



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN-MANAGUA

TESIS DE GRADO

Diseño y Simulación de una Planta Termoeléctrica a Base de Biomasa de Cascarilla de Café para la Generación de Energía Eléctrica en Beneficios Cafetaleros

Bellorín, A; Mendoza, Z; Marín, C.

Tutor

Dr. Edwin Antonio Reyes Aguilera

CENTRO UNIVERSITARIO REGIONAL DE ESTELÍ

¡Universidad del Pueblo y para el Pueblo!



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN-MANAGUA

Centro Universitario Regional de Estelí CUR-ESTELÍ

Recinto Universitario “Leonel Rugama Rugama”
Departamento Ciencias Tecnológicas y salud

Diseño y Simulación de una Planta Termoeléctrica a Base de Biomasa de
Cascarilla de Café para la Generación de Energía Eléctrica en Beneficios
Cafetaleros

Trabajo de investigación para optar al grado de
Ingenieros en energías renovable

Autores

Francisco Adrián Bellorín Gutiérrez
Zulmy Gisselle Mendoza Fajardo
Carlos Fernando Marín Acuña

Tutor

Dr. Edwin Antonio Reyes Aguilera

Estelí, 05 de diciembre del 2025



Dedicatoria

“El conocimiento no te lleva al final de un camino te lleva hasta una parte del pues el camino es nuestra vida y el conocimiento nuestro guía.”

Francisco Adrián Bellorín

A Dios, porque hasta aquí nos ha traído su voluntad, por la sabiduría, y en su nombre ponerme nuestros planes y propósitos para que seamos instrumentos de bien y sirvamos con amor al que más lo necesite en lo que sea que nos tenga preparado para el futuro.

A nuestros padres, porque nos inculcaron el camino del saber, a ser mejor cada día, a no rendirnos durante la carrera, por ser motivación para cada uno de nosotros y gracias a sus grandes esfuerzos hoy estamos entregándoles un poquito de gratitud.

A grandes docentes que fueron parte en nuestro crecimiento personal y profesional, en la carrera universitaria a todos sin excepción alguna, estamos seguro de que marcaron nuestro futuro y sembraron su semilla del saber en esta tierra que apenas comienza a germinar y así seguir adelante cumpliendo metas.

“A la memoria de Dr. Lizandro D' León Mairena QEPD”

Agradecimiento

A Dios, por darnos la salud, porque cada día su misericordia esta aun con nosotros y que no, nos ha soltado de sus manos, no nos deja solos y nos bendice cada día con el simple hecho de seguir teniendo a nuestras familias unidas y con salud por encima de cualquier adversidad que nos ha tocado enfrentar.

Les damos las gracias a nuestros padres, porque los hemos visto luchar, pero nunca rendirse ante todo obstáculo, y ese es el legado que hoy estamos reafirmando, gracias por seguir aquí en pie de lucha, esperamos que nuestro señor nos siga prestando vida para recompensar todo lo que hicieron y aun hacen por nosotros.

A nuestro tutor Dr. Edwin Antonio Reyes Aguilera por habernos guiado con esfuerzo y dedicación en el proceso de aprendizaje en nuestra carrera universitaria y entrega incondicional en nuestra tesis, como nos acompañó a lo largo de estos cinco años, más que un docente encontramos a un buen amigo.

A nuestro amigo Martin Natanael Zamora Martínez por su gran apoyo durante estos años, por su dedicación brindando su ayuda, estando en las buenas y malas volviéndose más que un compañero como un hermano para nosotros, esperamos de corazón que cumpla todas sus metas y sueños futuros, que Dios le siga dando salud, prestando vida y sabiduría. Se volvió una persona importante en estos últimos cinco años.

A nuestra alma mater UNAN Managua, CUR-Estelí por habernos permitido formarnos como profesionales, porque más que una universidad, que nos acogió como un segundo hogar, nos regaló hermanos de vida y padres de conocimientos que nos prepararon para la vida



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN-MANAGUA

CENTRO UNIVERSITARIO REGIONAL, ESTELÍ
“2025: Eficiencia y Calidad para seguir en victorias”
Departamento de Ciencias de la Educación y Humanidades

CARTA AVAL DEL TUTOR

Estelí, 01 de diciembre de 2025

Por medio de la presente, en calidad de tutor del trabajo de modalidad de graduación titulado: **“Diseño y Simulación de una Planta Termoeléctrica a Base de Biomasa de Cascarilla de Café para la Generación de Energía Eléctrica en Beneficios Cafetaleros de Estelí, Nicaragua”**, elaborado por los estudiantes:

Nombres y Apellidos	Número de Carné
Zulmy Gisselle Mendoza Fajardo	21513117
Francisco Adrián Bellorín Gutiérrez	20515340
Carlos Fernando Marín Acuña	21512842

Estudiantes de la carrera de **Ingeniería en energías renovables**, hago constar que he brindado acompañamiento académico y metodológico durante el desarrollo de dicho trabajo, cumpliendo con lo establecido en el cronograma y en la normativa institucional vigente. Asimismo, avalo que el trabajo cumple con los requisitos formales, científicos y éticos exigidos por la Universidad, en cumplimiento de la modalidad de graduación correspondiente.

Atentamente,

Dr. Edwin Antonio Reyes Aguilera

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0996-1567>

UNAN-Managua/CUR-Estelí

CC/

¡Universidad del Pueblo y para el Pueblo!

Barrio 14 de abril, contiguo a la subestación de ENATREL, Tel 27137734, Ext 7424
dceh.curesteli@unan.edu.ni

Resumen

El presente estudio analiza la viabilidad técnica y ambiental de una planta termoeléctrica basada en el ciclo Rankine que emplea cascarilla de café como biomasa residual en los beneficios cafetaleros de Estelí y Jinotega. La investigación se desarrolló con el propósito de determinar si este subproducto agrícola puede ser transformado en energía eléctrica de manera eficiente y sostenible, contribuyendo a la reducción de impactos ambientales y al fortalecimiento del sector cafetalero. La metodología incluyó la caracterización fisicoquímica de la cascarilla de café, la simulación del ciclo Rankine mediante el software especializado CyclePad y el análisis de balances de energía para validar la capacidad de generación eléctrica. Los resultados evidenciaron que la cascarilla posee un poder calorífico suficiente para combustión controlada y que el ciclo Rankine simulado alcanzó eficiencias térmicas cercanas al 30%, con una potencia útil estimada en el rango de 1.5 a 1.7 MW. Los balances de energía confirmaron la consistencia del modelo y la factibilidad de operación en condiciones locales. Se concluye que la propuesta es técnicamente viable y ambientalmente favorable, pues permite valorizar un residuo agrícola, disminuir emisiones contaminantes y fortalecer la sostenibilidad energética de los beneficios cafetaleros en Nicaragua.

Palabras clave: biomasa; cascarilla de café; ciclo Rankine; simulación; energía renovable.

Abstract

This study analyzes the technical and environmental feasibility of a thermoelectric plant based on the Rankine cycle that uses coffee husk as residual biomass in coffee processing facilities in Estelí and Jinotega. The research was carried out with the purpose of determining whether this agricultural by-product can be transformed into electrical energy in an efficient and sustainable way, contributing to the reduction of environmental impacts and to the strengthening of the coffee sector. The methodology included the physicochemical characterization of the coffee husk, the simulation of the Rankine cycle using the specialized software CyclePad, and the analysis of energy balances to validate the generation capacity. The results showed that the coffee husk has sufficient calorific value for controlled combustion and that the simulated Rankine cycle reached thermal efficiencies close to 30%, with a useful power estimated in the range of 1.5 to 1.7 MW. The energy balances confirmed the consistency of the model and the feasibility of operation under local conditions. It is concluded that the proposal is technically viable and environmentally favorable, as it allows the valorization of an agricultural residue, reduces pollutant emissions, and strengthens the energy sustainability of coffee processing facilities in Nicaragua.

Keywords: biomass; coffee husk; Rankine cycle; simulation; renewable energy.

Índice

Contenido

1.	Introducción.....	1
2.	Antecedentes.....	3
3.	Planteamiento del problema	6
3.1.	Caracterización del problema.....	6
3.2.	Delimitación del problema	7
3.3.	Formulación del problema.....	7
3.4.	Sistematización del problema	7
4.	Justificación	8
5.	Objetivos de investigación	11
5.1.	Objetivo General	11
5.2.	Objetivos específicos.....	11
6.	Limitaciones del estudio.....	12
7.	Hipótesis.....	13
8.	Operacionalización de Variables	15
9.	Marco Teórico	19
9.1.	Primer principio de la termodinámica.....	19
9.2.	Tipos de ciclo en termodinámica	20
9.2.1.	Ciclo Otto	20
9.2.2.	Ciclo Diesel	21
9.2.3.	Ciclo Brayton	23
9.2.4.	Ciclo Carnot.....	24
9.2.5.	Ciclo Rankine.....	24
9.3.	Fundamentación de cyclepad	25
9.3.1.	Componentes dentro del programa.....	26
9.3.2.	Contextualización de stuff	29
9.3.3.	Modelado de Suposiciones	30
9.3.4.	Biomasa como fuente renovable.....	31

9.3.5.	Conversión de la biomasa en energía.....	33
9.3.6.	Tipos de Biomasa y sus Usos	34
9.3.7.	Procesos de transformación de la biomasa	35
9.3.8.	Eficiencia de conversión de energía de la biomasa a electricidad	36
9.4.	Cinética de los procesos bio- químicos en reactores en cuanto al cambio de las concentraciones en el sistema y su afectación directa en el tiempo de tratamiento y el tamaño de los reactores que requieren.....	38
9.4.1.	Aspectos fundamentales del software de simulación.....	42
10.	Diseño metodológico.....	45
10.1.	Tipo de investigación	45
10.2.	Población y selección de la muestra.....	45
10.3.	Técnicas, instrumentos y procedimientos para la recolección de datos	45
10.4.	Confiabilidad y Validez de los Instrumentos	46
10.4.1.	Confiabilidad:	47
10.4.2.	Validez:.....	47
10.4.3.	Planificación y Selección del Área de Estudio	47
10.5.	Procedimientos para el procesamiento y análisis de datos.	48
11.	Análisis y discusión de resultados.....	49
11.1.	Caracterización las propiedades fisicoquímicas y el poder energético de la cascarilla de café como biomasa residual disponible en Jinotega y Estelí.	49
11.1.1.	Propiedades químicas de la cascarilla de café, composición elemental, contenidos de humedad, y contenidos de la biomasa para producir energía	49
11.1.2.	Volumen proyectado de cascarilla de café en meses hábiles	51
11.1.3.	Balance de Materia Jinotega-Estelí	53
11.2.	Simulación el ciclo Rankine mediante software especializado para estimar la eficiencia térmica del sistema.	55
11.2.1.	Variables y parámetros clave de los componentes del modelo de simulación y condiciones iniciales del modelo de simulación	56
11.2.2.	Reconocimiento del procedimiento para realizar la primera aproximación de la simulación con el software Cyclepad.	60

11.2.3.	Procedimientos para la realización de simulación por las etapas de compresor, cámara de combustión, turbina de expansión, recuperador de calor, turbina de expansión, bomba de agua	61
11.2.4.	Resultados obtenidos de la simulación.....	64
11.3.	Análisis los balances de energía del ciclo (entalpía, entropía y trabajo neto) para validar la capacidad de generación eléctrica.....	65
11.4.	Evaluación alternativas tecnológicas para la planta considerando criterios de viabilidad técnica, ambiental y normativa en energías renovables.	71
12.	Conclusiones.....	80
13.	Recomendaciones	82
14.	Referencias Bibliográficas.....	83
15.	Anexos	84

Índice de tablas

Tabla 1 Limitaciones del estudio	12
Tabla 2 Operacionalización de Variables	15
Tabla 3 Propiedades químicas de la cascarilla de café	50
Tabla 4 Datos principales de biomasa de la ciudad de Estelí en los 6 meses hábiles.....	51
Tabla 5 Producción anual de biomasa en el departamento de Jinotega.....	51
Tabla 6 Producción anual de biomasa en el departamento de Jinotega y Estelí.....	52
Tabla 7 variables del modelo de simulación.....	56
Tabla 8 Parámetros del modelo de simulación	57
Tabla 9 Condiciones iniciales del modelo de simulación.....	57
Tabla 10 características de la caldera	71
Tabla 11 Turbina de vapor utilitaria SST-9000.....	72
Tabla 12 Generador de turbina de vapor de condensación multietapa serie Yz60.....	73

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. conservación de la energía.....	19
Ecuación 2. conservación de la energía aplicada en la termodinámica.....	19
Ecuación 3 Cinética de Michaelis-Menten.....	39
Ecuación 4 Cinética de Monod.....	40
Ecuación 5 Cinética de Briggs-Haldane.....	40
Ecuación 6 Balance de materia.....	53
Ecuación 7 Balance de CO ₂	53
Ecuación 8 Balance general.....	54
Ecuación 9 Poder calorífico.....	54
Ecuación 10 Eficiencia de la bomba.....	58
Ecuación 11 Expansión isentrópica	59
Ecuación 12 Trabajo de la bomba	67
Ecuación 13 Balance de energía en la bomba	67
Ecuación 14 Calidad en el estado 4.....	68
Ecuación 15 Entalpia 4.....	68
Ecuación 16 Eficiencia térmica del ciclo	68
Ecuación 17 Balance de energía en el condensador	68
Ecuación 18 Despeje para encontrar el calor de entrada	69
Ecuación 19 Trabajo neto del sistema	69
Ecuación 20 Flujo masico del sistema.....	69

Índice de figuras

Figura 1. Turbina de vapor	26
Figura 2. Compresor para apresurar gases.....	26
Figura 3. Bomba de flujo de líquidos	26
Figura 4. Calentador de fluidos	27
Figura 5. Enfriador de fluidos	27
Figura 6. Tipos de intercambiadores de calor.....	27
Figura 7. Acelerador	28
Figura 8. Divisor de flujo de fluido	28
Figura 9. Mezclador de corrientes	29
Figura 10. Fuente de alimentación	29
Figura 11 Diagrama sucesivo del ciclo de Rankine.....	58
Figura 12 Interconexión de los elementos en el ciclo termodinámico Rankine.....	61
Figura 13 asignación de valores y parámetros a los elementos del ciclo	62
Figura 14 Parámetros a la entrada de la bomba.....	62
Figura 15 Parámetros de entrada a la caldera	63
Figura 16 Parámetros a la entrada de la turbina	63
Figura 17 Parámetros de entrada al condensador	64
Figura 18 Resultados del modelo de simulación	64
Figura 19 Ciclo Rankine con datos recolectados.....	66
Figura 20 Caldera de vapor	71
Figura 21 turbina de vapor SST-9000.....	73
Figura 22 Turbina CHENYANG	74
Figura 23 transformadores elevadores.....	74
Figura 24 Bomba de agua hasta.....	76
Figura 25 Condensador.....	77
Figura 26 Ciclo de Rankine	78
Figura 27 Plano de interconexión.....	79
Figura 28 Cascarilla de café	84
Figura 29 Cascarilla de café	84

1. Introducción

La generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables constituye uno de los principales desafíos y oportunidades en el contexto actual de transición energética. En países productores de café como Nicaragua, los beneficios cafetaleros generan grandes volúmenes de residuos orgánicos, entre ellos la cascarilla de café, que en la mayoría de los casos no es aprovechada de manera eficiente y termina siendo desechada en vertederos o quemada de forma incontrolada, contribuyendo a la contaminación ambiental. Esta situación plantea la necesidad de explorar alternativas tecnológicas que permitan transformar dichos residuos en energía útil, reduciendo impactos negativos y fortaleciendo la sostenibilidad del sector cafetalero.

La cascarilla de café, por sus propiedades fisicoquímicas y su poder calorífico, representa un recurso con potencial para ser utilizado como biomasa en procesos de combustión controlada. Su disponibilidad estacional en regiones como Jinotega y Estelí, junto con la creciente demanda energética de los beneficios durante la cosecha, hacen de este subproducto una opción viable para la generación eléctrica. Sin embargo, su aprovechamiento requiere un análisis riguroso de las características del material, de la eficiencia de los ciclos termodinámicos aplicables y de las condiciones técnicas necesarias para su implementación.

En este marco, la presente tesis aborda el “diseño y simulación de una planta termoeléctrica basada en el ciclo Rankine que utiliza cascarilla de café como biomasa residual para la generación de energía eléctrica en beneficios cafetaleros de Estelí y Jinotega”. El objetivo principal es evaluar la viabilidad técnica y ambiental de esta propuesta, respondiendo a interrogantes sobre las propiedades energéticas del sustrato, la eficiencia térmica alcanzable mediante simulación y los balances de energía que validan la capacidad de generación. El alcance del trabajo se centra en la caracterización del recurso, la modelación del ciclo Rankine con software especializado y la discusión de resultados en función de la realidad cafetalera local.

Finalmente, el documento se estructura en capítulos que incluyen la introducción y antecedentes del problema, la justificación y objetivos de la investigación, el marco teórico sobre termodinámica y biomasa, el diseño metodológico, el análisis y discusión de resultados obtenidos en la simulación, así como las conclusiones y recomendaciones derivadas del

estudio. De esta manera, se ofrece una propuesta académica y técnica que busca aportar soluciones concretas al aprovechamiento energético de la cascarilla de café en Nicaragua

2. Antecedentes

En la información presentada por Aráuz Sequeira & López Chavarría (2008), detalla aspectos relevantes de la cascarilla de café. En Nicaragua el periodo de recolección del grano del café comienza en el mes de septiembre que es la primera fase del proceso, luego se recibe y dentro de la empresa recicladora pasa a los beneficios húmedos, lo que puede tardar dependiendo de la distancia del beneficio entre 1 y 3 horas de transporte. Seguidamente comienza el proceso de despulpado con agua donde da como resultado los desperdicios que se utilizaran como materia prima que es la pulpa para la generación de energía eléctrica. La Comisión Nacional de Energía (CNE) con la asistencia de la Agencia Brasileña de Cooperación Internacional realizó durante el año 2002, una identificación preliminar del potencial de biomasa para generación de energía eléctrica. Hay también muchos estudios sobre el uso de rastrojos y la leña. La generación de electricidad en los ingenios de azúcar es una medida muy ingeniosa que ya se está implementado en Nicaragua. También la generación de electricidad de la basura de la ciudad Managua o de las empresas de café o cacao son inversiones productivas. Nicaragua, en este momento, tiene potencial para que los ingenios azucareros amplíen la producción de electricidad y sea vendida a la red nacional.

Saúl Abiel García Rivas (2016), presenta datos relevantes sobre el cultivo de café. Para ello hay que tener en cuenta las condiciones climatológicas de la región, ya que estas determinan la dinámica de desarrollo y crecimiento de la planta de café, dentro de ellas la distribución de la lluvia define en gran medida el ciclo vegetativo y reproductivo de la planta de cafeto. Además, condiciona la secuencia de las labores agrícolas. El concepto de nutrición para el cultivo del café está enmarcado dentro de lo que se conoce como agricultura sostenible, que es la que optimiza la efectividad de los insumos sin deterioro del medio ambiente, procurando la conservación del suelo y fundamentalmente de su capa orgánica. Comprende las etapas de instalación, establecimiento, crecimiento y producción. Esta práctica se complementa con adiciones sucesivas de materia orgánica, principalmente por el manejo de subproductos del cultivo. La fertilización foliar no es utilizada en el cultivo del café. Un elevado porcentaje de humedad reduce la eficiencia de la combustión debido a que una gran parte del calor liberado se usa para evaporar el agua y no se aprovecha en la reducción química del material.

El trabajo investigativo realizado por Castro (2012), en el beneficio Sajonia S.A. ubicado en el Km 117 carretera Managua/Matagalpa, detalla información fundamental en manipulación del sustrato de cascarilla de café. Situado en la comunidad de Quebrada Onda, la cual se encuentra en el municipio de Matagalpa, tuvo el objetivo de la presente investigación fue evaluar el proceso de secado de café pergamino actual en el Beneficio Sajonia S.A. para alcanzar dicho objetivo estudiaron las diferentes etapas en el proceso de secado, desde la recepción de café hasta su almacenaje cuando posee el porcentaje de humedad adecuado, además se estudiaron los diferentes métodos de secado actual como son, pilas de concreto, telones de plástico negro y cajillas de madera, se estudiaron las variables que intervienen en el proceso de secado de café pergamino, entre las cuales se encuentra la temperatura media, humedad relativa, radiación solar y flujo másico del aire. También se propone un diseño de secadero solar con una capacidad de 453.6 kg equivalentes a 1000 libras con un sistema activo del modelo integral. La presente investigación es de gran importancia para el beneficio Sajonia como para el país en general ya que el café es una de las bases de la economía de nuestro país, mediante la evaluación del proceso de secado se aportará significativamente al mejoramiento de dicho proceso.

Antecedentes internacionales

El estudio presentado por Frias (2019), detalla aspectos cruciales sobre el manejo de la cascarilla de café. titulado, ‘propuesta de generación de electricidad a partir de pulpa de café para el proceso de despulpado en la asociación sierra norte minas’ La pulpa de café es un material fibroso mucilaginoso y se genera durante el procesamiento del café por vía húmeda (beneficio húmedo) y en este caso se conoce como pulpa de café y constituye cerca del 40 % del peso fresco de la cereza de café. Por cada tonelada de café cerezo procesada por esta vía se genera cerca de media tonelada de pulpa. Cuando el procesamiento del café se realiza por vía seca (beneficio seco), se denomina cáscara de café y solo se generan 90 kilogramos. El cultivo del café es originario del norte de África y es cultivado con el fin de producir granos, estos granos de café tienen rico contenido de sustancias aromáticas y estimulantes que permite preparar una infusión altamente preciada como bebida y como sobremesa. La calidad del café como producto final definitivamente depende del proceso en el que se haya llevado a cabo, desde su cultivo hasta producto terminado. En el Perú, el café llegó hace 270 años de

la mano de unos cuantos colonos europeos. Para el 2016 se cultivó 425 000 ha a lo largo y ancho de la cordillera de Los Andes, a temperaturas templadas y alturas entre los 900 y 1800 msnm. Además, cabe resaltar que directa o indirectamente.

El estudio realizado por Serna (2018) determina que, en la producción de café, se realiza el aprovechamiento del 60% del grano. El excedente es pulpa que constituye un subproducto con pocos usos industriales. Teniendo en cuenta el impacto ambiental de estos residuos orgánicos, se establecieron las condiciones para su aprovechamiento, para lo cual se evaluó la extracción de compuestos bioactivos, empleando agua como solvente en tiempos entre 4 y 8 minutos y temperaturas entre 60 a 90 °C. A cada una de las infusiones obtenidas se les midió el contenido de polifenoles totales y capacidad antioxidante, empleando los métodos Folin-Ciocalteu, ABTS y DPPH, respectivamente. Se encontró que las infusiones (extracciones en agua) tienen un alto contenido de polifenoles y una elevada capacidad antioxidante; adicionalmente el tiempo y la temperatura tuvieron un efecto significativo en la extracción de estos compuestos. Los resultados encontrados indican que hay potencial para aprovechar la pulpa de café, a través de la extracción de compuestos bioactivos con características funcionales, lo que permite, de esta manera hacer un aprovechamiento más integral de esta materia prima.

En el siguiente artículo Rivera (2019), aborda la investigación y el desarrollo actuales sobre el uso de la biomasa del café para la generación de energía eléctrica. Esta exhaustiva revisión bibliográfica busca sintetizar, organizar y estructurar temas relacionados con el uso de residuos sólidos, como la pulpa y la cascarilla de café, para calderas de centrales eléctricas. La literatura disponible muestra la implementación de nuevas tecnologías para transformar y mejorar los procesos de obtención y generación de este tipo de energía renovable. Mediante una revisión sistemática, estos residuos sólidos del café se presentan como una alternativa bioenergética para la sostenibilidad de las plantas de procesamiento de café. Los resultados muestran las fortalezas y debilidades de su uso energético, lo cual podría tener un impacto significativo en los países productores de café, ya que es una de las industrias más pujantes de los países del trópico ecuatorial. A pesar de la amplia gama de aplicaciones de estos residuos de café, se han identificado pocos estudios sobre la aplicación del pirólisis a partir de dicha biomasa para la generación de energía. Esta primera revisión de la literatura sobre

el tema tiene implicaciones prácticas sobre la tendencia actual del uso de la biomasa del café como medio para generar energía, y puede ser una base para el alcance de futuras investigaciones sobre su implementación y sostenibilidad en las regiones productoras de café.

3. Planteamiento del problema

3.1. Caracterización del problema

Dicovski y otros (2014), detallan información relevante sobre producción de café. En Nicaragua, los departamentos de Jinotega y Estelí constituyen zonas estratégicas en la producción cafetalera, generando cada año miles de toneladas de residuos orgánicos, principalmente cascarilla de café. Este subproducto representa entre el 40% y 50% del peso del grano procesado y, al no ser aprovechado adecuadamente, contribuye a la contaminación del suelo y cuerpos de agua, además de emitir gases de efecto invernadero por su disposición en vertederos.

A la par, los beneficios cafetaleros de estas regiones enfrentan una alta demanda energética durante la temporada de cosecha, con consumos entre 1 y 2 MW por planta, abastecidos en gran parte por combustibles fósiles importados. Esta dependencia energética implica costos elevados y emisiones significativas de CO₂, lo que limita la sostenibilidad del sector (MEM (Ministerio de Energía y Minas), 2020).

La información presentada por Zeledón Rodríguez y otros (2017), detalla aspectos clave basados en la problemática de estudio. La falta de sistemas integrados para la valorización energética de la cascarilla de café, como plantas termoeléctricas basadas en ciclos termodinámicos eficientes (e.g., ciclo Rankine), perpetúa un modelo de producción vulnerable y poco sostenible. En este contexto, se plantea la necesidad de evaluar la viabilidad técnica y ambiental de transformar la cascarilla de café en una fuente de energía limpia, que permita cubrir parte de la demanda energética local y fomentar la economía circular.

3.2. Delimitación del problema

En los beneficios cafetaleros de Jinotega y Estelí, la cascarilla de café generada durante el proceso de beneficio húmedo y secado no es aprovechada como recurso energético. La implementación de una planta de generación eléctrica basada en el ciclo Rankine permitiría utilizar esta biomasa residual para cubrir hasta el 50% de la demanda energética local, reducir las emisiones de CO₂ y mejorar la eficiencia operativa del sector cafetalero.

3.3. Formulación del problema

¿Cómo evaluar la viabilidad técnica y ambiental de una planta de generación eléctrica basada en el ciclo Rankine que utilice cascarilla de café como biomasa residual, orientada a cubrir la demanda energética de los beneficios cafetaleros en la región de Estelí y Jinotega?

3.4. Sistematización del problema

- ¿Cuáles son las propiedades fisicoquímicas y el poder energético de la cascarilla de café disponible en Jinotega y Estelí?
- ¿Qué eficiencia térmica puede alcanzar el ciclo Rankine al simularse con software especializado utilizando cascarilla de café?
- ¿Qué resultados se obtienen del análisis de los balances de energía del ciclo (entalpía, entropía y trabajo neto)?
- ¿Qué alternativas tecnológicas existen para implementar una planta de generación eléctrica con criterios de viabilidad técnica, ambiental y normativa?

4. Justificación

La realización de esta investigación resulta altamente conveniente en el contexto actual de Nicaragua, particularmente durante el ciclo productivo cafetalero 2024-2025, que se extiende hasta mediados de año y genera un volumen significativo de residuos como la cascarilla de café. Con una producción reportada de 5.8 millones de quintales de café oreado a nivel nacional, concentrada en regiones como Jinotega y Estelí, existe una disponibilidad inmediata y estacional de biomasa residual que facilita el muestreo y análisis in situ sin requerir importaciones o logística compleja. Además, el uso de herramientas de simulación como CyclePad permite una fase teórica y de modelado rápida (4-6 semanas), alineada con el calendario académico y la temporada de cosecha, minimizando costos y maximizando la aplicabilidad práctica antes de la próxima zafra en 2026.

Esta investigación es relevante al abordar directamente los desafíos energéticos y ambientales del sector cafetalero nicaragüense, donde los beneficios en Estelí dependen en un 70-80% de combustibles fósiles para procesos como el secado y beneficio, exacerbando la volatilidad de costos y la contaminación local. La cascarilla de café, subproducto subutilizado que representa el 40-50% del peso del grano procesado, ofrece un potencial renovable inmediato para autogeneración, alineándose con la transición energética regional impulsada por el aumento en la producción cafetalera (580 mil toneladas oreadas acopiadas hasta junio 2025). En un escenario de cambio climático, donde Nicaragua enfrenta sequías y lluvias erráticas que afectan la agricultura, esta propuesta promueve la economía circular, convirtiendo residuos en energía y reduciendo la presión sobre recursos limitados.

La importancia de esta investigación radica en su capacidad para mitigar impactos ambientales y económicos críticos: la quema incontrolada de cascarilla genera emisiones de CO₂ equivalentes a 1.5-2 toneladas por tonelada de café, contribuyendo al 10-15% de las emisiones agroindustriales del país, mientras que la dependencia fósil eleva costos operativos en hasta 30%. Al simular una planta termoeléctrica de 1.7 MW basada en el ciclo de Rankine, se demuestra la viabilidad de reducir estas emisiones en un 50% en beneficios locales, fomentando la soberanía energética y la innovación en energías renovables. Esto no solo fortalece la resiliencia del sector cafetalero, clave para el 5-7% del PIB nacional, sino que

posiciona a Nicaragua como referente en bioenergía tropical, impulsando publicaciones académicas y patentes locales.

La viabilidad técnica y operativa es elevada, ya que se basa en tecnologías maduras y accesibles: el ciclo de Rankine opera con eficiencia del 34% en calderas de biomasa como la DZL de Zosen, y componentes como turbinas SST-9000 de Siemens están disponibles en mercados regionales con costos estimados en 1-2 millones de USD para una planta piloto. El flujo másico de 1.53 kg/s requerido equivale a 132,192 kg/día de cascarilla, cubierto por el acopio local (86,695 quintales en pergamino hasta noviembre 2024), y la simulación en CyclePad valida parámetros sin necesidad de prototipos físicos iniciales. Financieramente, se alinea con fondos como el Fondo Nacional de Energía Renovable, con un ROI proyectado en 5-7 años por ahorros en diésel (0.20 USD/kWh vs. 0.15 USD/kWh renovable). Académicamente, el CUR-Esteli cuenta con laboratorios para pruebas físico-químicas, asegurando ejecución en 6-9 meses.

Los principales beneficiarios son los productores y beneficios cafetaleros de Estelí y Jinotega (aprox. 10,000 familias), quienes obtendrán energía eléctrica asequible y estable para reducir costos en 20-30%, incrementando márgenes de ganancia y competitividad exportadora. Las comunidades rurales se beneficiarán de empleo verde (20-50 puestos por planta en operación y mantenimiento), mejorando ingresos en zonas con pobreza multidimensional del 40%. El medio ambiente gana con la valorización de 50,000-100,000 toneladas anuales de cascarilla, evitando contaminación hídrica y emisiones. Instituciones como el MAG y MEM obtendrán datos para políticas, mientras que estudiantes y docentes del CUR-Esteli adquieren experiencia práctica, fomentando formación en ingeniería renovable.

Esta investigación se vincula directamente con varios ODS de la Agenda 2030: el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante) al promover la generación renovable de biomasa para cubrir el 50% de la demanda local, reduciendo la dependencia fósil; el ODS 13 (Acción por el clima) mediante la mitigación de emisiones de CO₂ (200-400 t/año por planta); el ODS 8 (Trabajo decente y crecimiento económico) al generar empleo sostenible en el agro; y el ODS 12 (Producción y consumo responsables) al fomentar la economía circular con residuos agrícolas. Estas contribuciones apoyan el compromiso de Nicaragua en la implementación nacional de los ODS, integrando bioenergía en estrategias de adaptación climática.

La propuesta se alinea con el Plan Nacional de Lucha Contra la Pobreza y para el Desarrollo Humano 2022-2026, que destina el 65% del Presupuesto General de la República 2025 (aprox. 127 mil millones de córdobas) a la erradicación de la pobreza mediante 12 lineamientos estratégicos, incluyendo la soberanía energética, la inclusión productiva rural y la reducción de desigualdades. Específicamente, fortalece el lineamiento de "Fomento a la Economía Familiar y Comunitaria" al valorizar residuos cafetaleros en comunidades pobres de Estelí y Jinotega, promoviendo ingresos alternos y autosuficiencia; el de "Desarrollo Sostenible y Protección Ambiental" al minimizar emisiones y erosión; y el de "Innovación y Transferencia de Tecnologías" mediante simulación y escalabilidad. Así, contribuye a la meta del Plan de reducir la pobreza en un 10% para 2026, integrando energías renovables en el modelo de desarrollo humano integral.

5. Objetivos de investigación

5.1. Objetivo General

Evaluar la viabilidad técnica y ambiental de una planta de generación eléctrica basada en el ciclo Rankine que utilice biomasa residual del grano de café, orientada a cubrir la demanda energética de los beneficios cafetaleros en la región de Estelí y Jinotega.

5.2. Objetivos específicos

1. Caracterizar las propiedades fisicoquímicas y el poder energético de la cascarilla de café como biomasa residual disponible en Jinotega y Estelí.
2. Simular el ciclo Rankine mediante software especializado para estimar la eficiencia térmica del sistema.
3. Analizar los balances de energía del ciclo (entalpía, entropía y trabajo neto) para validar la capacidad de generación eléctrica.
4. Evaluar alternativas tecnológicas para la planta considerando criterios de viabilidad técnica, ambiental y normativa en energías renovables.

6. Limitaciones del estudio

Tabla 1 Limitaciones del estudio

Limitaciones	Descripción	Impacto
Temporal	El estudio se lleva a cabo en el año 2025 y tiene análisis previos desde el año 2024	Las variaciones estacionales y tiempos de cosecha no son considerados, limitando los posibles cambios en las características físicas del sustrato
Espacial	La investigación obtiene las propiedades del sustrato únicamente del Beneficio Centroamérica	Los resultados pueden presentar variaciones dependiendo de la región y los tratamientos que usen en los procesos de producción los diferentes Beneficios
Técnica	Se pretende evaluar la capacidad del sustrato en su estado natural	El estudio no contempla añadir elementos al sustrato o cambios físicos que se realicen al mismo
Experimental	Se integran los datos físicos realizados en el año 2024	El estudio tiene pruebas limitadas al sustrato y dichas pruebas son solamente físicas, el resto de las características utilizadas son teóricas y obtenidas de diferentes tesis e investigaciones en países extranjeros.

7. Hipótesis

La cascarilla de café podrá ser usada para generar energía eléctrica pues esta materia orgánica tiene un porcentaje de celulosa mínimo del 40%, esto le permite una combustión rápida.

8. Operacionalización de Variables

Objetivo General: Evaluar la viabilidad técnica y ambiental de una planta de generación eléctrica basada en el ciclo Rankine que utilice biomasa residual del grano de café, orientada a cubrir la demanda energética de los beneficios cafetaleros en la región de Estelí y Jinotega.

Tabla 2 Operacionalización de Variables

Objetivo específico	Variable conceptual	Dimensiones / Subvariables	Indicador	Instrumento	Tipo de variable	Encuesta	Observación	Cálculos
Caracterizar las propiedades fisicoquímicas y el poder energético de la cascarilla de café como biomasa residual disponible en Jinotega y Estelí	Propiedades fisicoquímicas y poder energético de la cascarilla de café	Humedad, cenizas, contenido de carbono, poder calorífico	% de humedad, % de cenizas, poder calorífico (MJ/kg)	✓	Cuantitativa continua	✓	✓	✓

		Disponibilidad geográfica	Volumen disponible por zona (kg/mes)	✓	Cuantitativa continua	✓	✓	✓
Simular el ciclo Rankine mediante software especializado para estimar la eficiencia térmica del sistema	Eficiencia térmica del ciclo Rankine	Parámetros termodinámicos	Eficiencia térmica (%)	✓	Cuantitativa continua			✓
		Condiciones de operación	Presión, temperatura, entalpía, entropía	✓	Cuantitativa continua			✓

<p>Analizar los balances de energía del ciclo (entalpía, entropía y trabajo neto) para validar la capacidad de generación eléctrica</p>	<p>Balance energético del ciclo Rankine</p>	<p>Trabajo neto, entalpía, entropía</p>	<p>Trabajo neto (kJ), entalpía (kJ/kg), entropía (kJ/kg·K)</p>	<p>✓</p>	<p>Cuantitativa continua</p>			<p>✓</p>
		<p>Capacidad de generación eléctrica</p>	<p>Potencia eléctrica estimada (kW)</p>	<p>✓</p>	<p>Cuantitativa continua</p>			<p>✓</p>

Evaluar alternativas tecnológicas para la planta considerando criterios de viabilidad técnica, ambiental y normativa en energías renovables	Viabilidad tecnológica y ambiental	Alternativas de tecnología	Tipo de tecnología seleccionada	✓	Cuantitativa discreta	✓	✓	
		Criterios técnicos y normativos	Cumplimiento de normativas, eficiencia esperada	✓	Cuantitativa continua	✓	✓	
		Impacto ambiental	Reducción estimada de emisiones (kg CO ₂ /año)	✓	Cuantitativa continua			✓

9. Marco Teórico

9.1. Primer principio de la termodinámica

Con la información presentada por Cutnell y Johnson (2004), muestra el concepto fundamental de la primera ley de la termodinámica. El primer principio de la termodinámica o primera ley de la termodinámica es un principio que refleja la conservación de la energía en el contexto de la termodinámica y establece que, si se realiza trabajo sobre un sistema o bien este intercambia calor con otro, la energía interna del sistema cambiará. Visto de otra forma, esta ley permite definir el calor como la energía necesaria que debe intercambiar el sistema para compensar las diferencias entre trabajo y energía interna. En palabras simples: la energía total del universo se mantiene constante. No se crea ni se destruye, sólo se transforma.

La ecuación general de la conservación de la energía es la siguiente:

Ecuación 1. conservación de la energía

$$E_{entra} - E_{sale} = \Delta E_{sistema}$$

Que aplicada a la termodinámica teniendo en cuenta el criterio de signos termodinámico, queda de la forma:

Ecuación 2. conservación de la energía aplicada en la termodinámica

$$\Delta U = Q - W$$

Donde U es la energía interna del sistema (aislado), Q es la cantidad de calor aportado al sistema y W es el trabajo realizado por el sistema. Esta última expresión es igual de frecuente encontrarla en la forma. Ambas expresiones, aparentemente contradictorias, son correctas y su diferencia está en que se aplique el convenio de signos IUPAC o el Tradicional (véase criterio de signos termodinámico).

Ciclo termodinámico

La información presentada por WordPress (2023), detalla el concepto base de ciclos termodinámicos. Se denomina ciclo termodinámico a cualquier serie de procesos termodinámicos en los que un sistema parte de una situación inicial y tras aplicar dichos procesos regrese al estado inicial. Como procesos termodinámicos se conoce a la variación

de las propiedades termodinámicas del sistema (presión, entropía, volumen, entalpía y temperatura) desde un estado inicial a un estado final.

Al realizar un ciclo completo, la variación de la energía interna debe ser nula por lo tanto el calor transferido por el sistema debe de ser igual al trabajo realizado por el sistema (como dicta la primera ley de la termodinámica). Lo importante es que gracias a esta propiedad se puede obtener trabajo de un sistema mediante un aporte calorífico. Si el rendimiento fuese perfecto todo el calor que se suministra se podría transformar en calor, pero esto no es así ya que hay pérdidas de calor.

9.2. Tipos de ciclo en termodinámica

Los ciclos termodinámicos más comunes son:

9.2.1. Ciclo Otto

El libro de física para la ciencia y la ingeniería- Giancoli (2009), presenta información sobre el concepto base del ciclo de Otto y su funcionamiento. El ciclo Otto es un ciclo termodinámico bajo el que funcionan la mayoría de los motores de gasolina de combustión interna. Es un ciclo de cuatro tiempos (admisión, compresión, explosión y escape) y así es cómo funciona.

Las fases definidas para el ciclo de Otto son 4 en las cuales se realizan 6 procesos para el funcionamiento de un motor de combustión interna con encendido por chispa son las siguientes:

- 1) Admisión a presión constante: Con el pistón en el punto más alto (PMS o punto muerto superior) y a punto de iniciar su recorrido de descenso se abre la válvula de admisión, que permite entrar en la cámara de combustión el aire o la mezcla de aire y combustible a una presión constante a medida que baja.
- 2) Compresión isoentrópica: al finalizar el recorrido descendente del pistón (PMI o punto muerto inferior), se cierra la válvula de admisión y la de escape permanece cerrada. El pistón comienza a ascender y el aire o la mezcla de aire y combustible encerrados en el cilindro se van comprimiendo al reducirse el volumen del cilindro a medida que asciende

el pistón. Es un proceso isoentrópico en el que no existe intercambio de calor con el entorno.

- 3) Combustión y trabajo: a punto de llegar a su PMS y con el aire y el combustible comprimidos se realiza la inyección de la mezcla explosiva resultante empleando para ello una chispa eléctrica. Esta fuente de ignición provoca una explosión de la mezcla sometida a presión y se libera una energía que empuja el pistón hacia abajo. Es la fase en la que se produce el trabajo, de ahí que la fase de explosión se llame también fase de esfuerzo o de trabajo. Aquí se realizan casi simultáneamente dos de los procesos del ciclo Otto: la combustión (aporte de calor a volumen constante) y el trabajo, expansión isoentrópica o parte del ciclo que entrega trabajo.
- 4) Escape: el pistón llega al punto inferior tras la combustión de la mezcla de aire y combustible y comienza su recorrido ascendente. La válvula de admisión permanece cerrada y se abre la válvula de escape para dejar salir los gases resultantes de la combustión empujados por el pistón en su recorrido ascendente. Aquí de nuevo se realizan casi simultáneamente dos procesos del ciclo Otto: la cesión de calor al entorno a presión constante (al estar la válvula de escape abierta no hay variaciones de presión) y el vaciado de la cámara de combustión para un nuevo ciclo.

9.2.2. Ciclo Diesel

La información presentada por Sevilla (2013), muestra conceptos base sobre el ciclo de Diesel. Un ciclo Diésel ideal es un modelo simplificado de lo que ocurre en un motor diésel. En un motor de esta clase, a diferencia de lo que ocurre en un motor de gasolina la combustión no se produce por la ignición de una chispa en el interior de la cámara. En su lugar, aprovechando las propiedades químicas del gasóleo, el aire es comprimido hasta una temperatura superior a la de autoignición del gasóleo y el combustible es inyectado a presión en este aire caliente, produciéndose la combustión de la mezcla.

Puesto que sólo se comprime aire, la relación de compresión (cociente entre el volumen en el punto más bajo y el más alto del pistón) puede ser mucho más alta que la de un motor de gasolina (que tiene un límite, por ser indeseable la autoignición de la mezcla). La relación de

compresión de un motor diésel puede oscilar entre 12 y 24, mientras que el de gasolina puede rondar un valor de 8.

Para modelar el comportamiento del motor diésel se considera un ciclo Diesel de seis pasos, dos de los cuales se anulan mutuamente:

Admisión $E \rightarrow A$

El pistón baja con la válvula de admisión abierta, aumentando la cantidad de aire en la cámara. Esto se modela como una expansión a presión constante (ya que al estar la válvula abierta la presión es igual a la exterior). En el diagrama PV aparece como una recta horizontal.

Compresión $A \rightarrow B$

El pistón sube comprimiendo el aire. Dada la velocidad del proceso se supone que el aire no tiene posibilidad de intercambiar calor con el ambiente, por lo que el proceso es adiabático. Se modela como la curva adiabática reversible $A \rightarrow B$, aunque en realidad no lo es por la presencia de factores irreversibles como la fricción.

Combustión $B \rightarrow C$

Un poco antes de que el pistón llegue a su punto más alto y continuando hasta un poco después de que empiece a bajar, el inyector introduce el combustible en la cámara. Al ser de mayor duración que la combustión en el ciclo Otto, este paso se modela como una adición de calor a presión constante. Éste es el único paso en el que el ciclo Diesel se diferencia del Otto.

Expansión $C \rightarrow D$

La alta temperatura del gas empuja al pistón hacia abajo, realizando trabajo sobre él. De nuevo, por ser un proceso muy rápido se aproxima por una curva adiabática reversible.

Escape $D \rightarrow A$ y $A \rightarrow E$

Se abre la válvula de escape y el gas sale, empujado por el pistón a una temperatura mayor que la inicial, siendo sustituido por la misma cantidad de mezcla fría en la siguiente admisión. El sistema es realmente abierto, pues intercambia masa con el exterior. No obstante, dado que la cantidad de aire que sale y la que entra es la misma podemos, para el balance energético, suponer que es el mismo aire, que se ha enfriado. Este enfriamiento ocurre en dos fases.

Cuando el pistón está en su punto más bajo, el volumen permanece aproximadamente constante y tenemos la isócora $D \rightarrow A$. Cuando el pistón empuja el aire hacia el exterior, con la válvula abierta, empleamos la isobara $A \rightarrow E$, cerrando el ciclo.

9.2.3. *Ciclo Brayton*

Predictiva21 (2013), muestra información en cuanto al ciclo termodinámico de Brayton. El ciclo Brayton, también conocido como ciclo Joule o ciclo Froude, representa un proceso termodinámico que incluye una compresión adiabática, un calentamiento isobárico y una expansión adiabática de un fluido termodinámico compresible. Este ciclo, actualmente empleado principalmente en turbinas de gas, fue inicialmente utilizado en máquinas reciprocantes. En el contexto de los motores de turbina de gas, este ciclo puede generar desde trabajo mecánico para la producción de electricidad mediante quemadores de gas natural, hasta la generación de empuje en aerorreactores. Esta versatilidad permite su aplicación en diversas industrias, incluyendo la generación eléctrica y motores terrestres o marinos.

Admisión: El aire frío a presión atmosférica entra por la boca de la turbina.

Compresor: El aire es comprimido y dirigido hacia la cámara de combustión mediante un compresor. Puesto que esta fase es muy rápida, se modela mediante una compresión adiabática $A \rightarrow B$.

Cámara de combustión: El aire es calentado por la combustión del queroseno. La cámara está abierta, el aire puede expandirse, por lo que el calentamiento se modela como un proceso isóbaro $B \rightarrow C$.

Cámara de combustión: El aire es calentado por la combustión del queroseno. La cámara está abierta, el aire puede expandirse, por lo que el calentamiento se modela como un proceso isóbaro $B \rightarrow C$.

Turbina: El aire caliente pasa por la turbina, a la cual mueve. El aire se expande y se enfría rápidamente, lo que se describe mediante una expansión adiabática $C \rightarrow D$

Escape: Por último, el aire enfriado sale. Técnicamente, este es un ciclo abierto, ya que el aire que escapa no es el mismo que entra por la boca de la turbina, pero dado que sí entra en la misma cantidad y a la misma presión, se hace la aproximación de suponer una recirculación.

En este modelo el aire de salida simplemente cede calor al ambiente y vuelve a entrar por la boca ya fría. En el diagrama PV esto corresponde a un enfriamiento a presión constante D→A.

9.2.4. Ciclo Carnot

INESEM (2023), presenta información relevante en cuanto al ciclo de Carnot. El ciclo de Carnot se compone de cuatro etapas reversibles: dos procesos isotermos (a temperatura constante) y dos procesos adiabáticos (sin transferencia de calor). Estas etapas se llevan a cabo en un sistema compuesto por un gas ideal contenido en un dispositivo llamado «máquina de Carnot». Vamos a despreocupar la fricción en el sistema y asumir que todos los procesos son cuasiestáticos.

El ciclo de Carnot opera entre dos fuentes de calor, un foco caliente a una temperatura alta (T_c) y un foco frío a una temperatura baja (T_f). El ciclo tiene como objetivo convertir el calor absorbido de la fuente caliente en trabajo útil y rechazar el calor residual a la fuente fría.

9.2.5. Ciclo Rankine

Con la información presentada por R, Fusté (2015), muestra el funcionamiento del ciclo de Rankine. El ciclo Rankine es un tipo de ciclo termodinámico que se usa en las centrales termoeléctricas. Para que este ciclo se produzca hay que operar con un vapor que se obtiene al calentar agua en una caldera hasta que termina evaporándose. Posteriormente, ese vapor se lleva a una turbina donde se crea la energía cinética, aunque para ello ese vapor termina perdiendo presión.

Posteriormente, ese vapor llega a un condensador que lo hace pasar a estado líquido. Seguidamente, ese líquido llega a una bomba en la que se le sube la presión que se pueda introducir de nuevo en la caldera.

El procedimiento de generación del ciclo Rankine se puede resumir de una forma técnica en cuatro pasos. El primero de ellos es el de compresión isoentrópica en una bomba, para hacer

este tipo de compresión hay que establecer una relación entre las energías reales y las energías adecuadas o ideales que se tendrían que dar en esa bomba.

El siguiente paso es añadir calor a una caldera a presión y de una forma constante. A continuación, ese calor se expande en una turbina de una forma isoentrópica y finalmente, tiene lugar un rechazo de ese calor que se ha aplicado de forma constante y a presión dentro del condensador.

9.3. Fundamentación de cyclepad

Cyclepad es el primer laboratorio virtual de articular que el grupo de razonamiento cualitativo ha puesto en marcha. Cyclepad permite a los estudiantes construir y analizar una amplia variedad de ciclos termodinámicos. Una instalación de la explicación de hipertexto proporciona al estudiante el acceso a la cadena de razonamiento que subyace a la derivación de cada valor.

Cyclepad nos ayuda a:

Especificar la estructura de nuestro diseño, es decir las partes de que está compuesto y su interconexión.

Analiza el diseño, indicando las consecuencias de las suposiciones que se han realizado. Tales suposiciones incluyen valores numéricos, es decir presiones, temperaturas de operación asumidas, o suposiciones relacionadas con el modelado del sistema, por ejemplo, considerar un compresor isoentrópico.

Ejecución de análisis de sensibilidad para comprender como las diferentes elecciones realizadas en el diseño contribuyen a los resultados. Cyclepad puede decir como la eficiencia de un sistema cambia según varía una función que depende de otros parámetros, por ejemplo, la temperatura de entrada a la turbina.

9.3.1. Componentes dentro del programa

Turbina

Figura 1. Turbina de vapor



Las turbinas constan de un conjunto de palas de rotor entrelazadas con un conjunto de palas estacionarias o estatores. El fluido de trabajo ingresa a alta velocidad y se expande a medida que fluye a través de la turbina. Esta expansión, resistida por las palas del rotor, hace que el eje del rotor gire, creando trabajo en el eje. La temperatura del fluido de trabajo también cae durante este proceso. El fluido que ingresa a la turbina debe ser vapor seco saturado o gas; Los vapores o líquidos húmedos saturados erosionarán seriamente las palas de la turbina debido a la alta velocidad de la corriente de fluido.

Los posibles supuestos de modelización para turbinas incluyen isentrópicos y adiabáticos.

Compresor

Figura 2. Compresor para apresurar gases

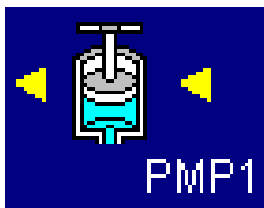


Los compresores presurizan los gases. En general, esto requiere mucho más trabajo que bombear líquidos y el fluido de trabajo experimenta un aumento significativo de temperatura, de acuerdo con la ley de los gases ideales. Los compresores no pueden manejar vapores o líquidos saturados húmedos, ya que dichos fluidos provocan un desgaste excesivo.

Los posibles supuestos de modelado para compresores incluyen adiabáticos, isentrópicos, isotérmicos, politrópicos y no politrópicos.

Bomba

Figura 3. Bomba de flujo de líquidos



Las bombas provocan flujos de fluido en los líquidos. Bombear un líquido es más eficiente que comprimir un gas, porque se puede bombear mucho más líquido por unidad de volumen y los líquidos, al ser básicamente incompresibles, no ganan una cantidad apreciable de calor durante el proceso de bombeo. Las bombas no pueden manejar gases o vapores

saturados, porque dichos fluidos tienden a cavitarse o hervir. La cavitación provoca golpes excesivos dentro de la bomba y puede provocar rápidamente su falla. Las posibles suposiciones de modelado para bombas incluyen: isotérmica.

Calentador

Figura 4. Calentador de fluidos



Los calentadores añaden energía térmica al fluido de trabajo que fluye a través de ellos. Esto puede hacer que el líquido cambie de fase. Se puede utilizar un calentador para representar una caldera, un sobre calentador, un recalentador, una cámara de combustión o un reactor nuclear.

Los posibles supuestos de modelado para calentadores incluyen: isobárico.

Enfriador

Figura 5. Enfriador de fluidos

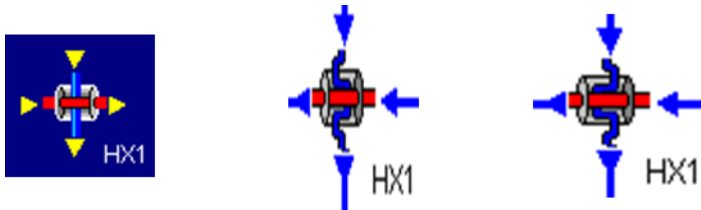


Los enfriadores enfrían el fluido de trabajo que fluye a través de ellos permitiendo que el calor fluya al medio ambiente. Este proceso puede hacer que el fluido cambie de fase.

Posibles supuestos del modelado: isobárico.

Intercambiador de calor

Figura 6. Tipos de intercambiadores de calor



Modelo sencillo Contracorriente Co-corriente

Los intercambiadores de calor permiten una transferencia de energía térmica de un fluido de trabajo de alta energía a un fluido de baja energía. En el intercambiador de calor a contracorriente, los fluidos fríos y calientes fluyen en direcciones opuestas, lo que minimiza la diferencia de temperatura entre los fluidos en un punto dado y, por tanto, la irreversibilidad

resultante. En el intercambiador de calor a paralelos, los fluidos fluyen en la misma dirección. Puede utilizar el intercambiador de calor a contracorriente para investigar la ganancia en eficiencia lograda mediante el diseño a contracorriente, pero no es necesario elegir uno u otro; el modelo simple de intercambiador de calor calculará el intercambio de energía mediante las restricciones de la Primera Ley.

Posibles supuestos: Co-corriente, contracorriente, lado caliente isobárico, lado frío isobárico.

Acelerador

Figura 7. Acelerador



Los estranguladores permiten una expansión sin resistencia del fluido de trabajo que fluye a través de ellos. Como no hay resistencia, no se realiza ningún trabajo y, por tanto, no hay cambio de entalpía. El comportamiento de un fluido que fluye a través de un estrangulador depende de su coeficiente de Joule-Thompson y de si está por encima o por debajo de su punto de inversión. Un fluido por encima del punto de inversión experimentará un aumento de temperatura, mientras que uno por debajo del punto de inversión bajará de temperatura. Un gas que pasa a través de un acelerador puede precipitarse y convertirse en líquido, mientras que un líquido puede vaporizarse repentinamente, creando un efecto de refrigeración a medida que absorbe calor de su entorno para sostener el proceso de evaporación.

Posibles supuestos de modelado para aceleradores: ninguno

Divisores

Figura 8. Divisor de flujo de fluido



Los divisores dividen el flujo de fluido de trabajo en dos corrientes. Se puede usar un divisor para combinar turbinas en una turbina de múltiples etapas con purgas de vapor utilizadas para la regeneración.

Posibles supuestos de modelado para divisores: saturados, no saturados

Mezclador

Figura 9. Mezclador de corrientes



Los mezcladores unen dos corrientes. Si las dos corrientes difieren marcadamente en temperatura, el mezclador puede funcionar como un intercambiador de calor abierto. Las centrales eléctricas suelen emplear intercambiadores de calor abiertos como medio para desairar el fluido de trabajo. Si las dos corrientes difieren significativamente en presión, el mezclador puede funcionar como un eyector de chorro, una bomba en la que la corriente de alta presión arrastra y comprime la corriente de baja presión. Estas bombas pueden utilizarse en aplicaciones de aire acondicionado, en las que son "impulsadas" por una fuente de combustible barata, como el gas natural.

Posibles supuestos de modelado para mezcladores: ninguno

Fuente

Figura 10. Fuente de alimentación



Las fuentes inician transmisiones. Hay dos tipos de flujos: los que forman parte de bucles y los que comienzan en fuentes y terminan en sumideros. Utilizando divisores y mezcladores, es posible combinar los dos tipos de flujos, pero para cada fuente debe haber un sumidero y viceversa.

Posibles supuestos de modelización para las fuentes: ninguno

9.3.2. Contextualización de stuff

Un stuff representa las propiedades de estado del fluido de trabajo en un punto en particular. Por ejemplo: la presión del stuff que está conectando la salida de una caldera con la entrada de una turbina representa la presión en ese punto.

La línea azul representa el tubo que está conectando a dos componentes, y el pando en la línea representa el fluido de trabajo en ese tubo.

Cada stuff tiene una etiqueta (S1 en la figura de arriba). Si el diseño tiene más de un subciclo, entonces cada stuff será etiquetado con una letra indicando a que subciclo pertenece.

9.3.3. *Modelado de Suposiciones*

El ciclo de diseños construidos en CyclePad son solo modelos de artefactos reales, y los resultados que produce CyclePad son, por lo tanto, sólo aproximaciones de los resultados reales que se observarían con un ciclo físico funcionando, bajo condiciones del mundo real.

A continuación, se muestran los modelados de suposiciones que se pueden hacer en CyclePad. Sólo un subconjunto de estos supuestos se aplicará a cualquier componente determinado.

La presión isobárica: permanece constante. Esta es una suposición sólida para componentes como calentadores y refrigeradores, porque en realidad la presión no cambiará drásticamente a través de ellos.

El volumen isocórico: permanece constante. Esta suposición es más comúnmente hecha para procesos de calefacción y refrigeración en sistemas de ciclo cerrado. A medida que un gas se calienta o enfría, se expandirá o contraerá. En un proceso de calentamiento isocórico, el gas intentará expandirse, pero el volumen constante del proceso dará como resultado un aumento en la presión del gas. Por lo tanto, isobárico e isocórico son en general supuestos mutuamente excluyentes.

La temperatura isotérmica: permanece constante.

La entropía isentrópica: permanece constante.

Politrópico para gases ideales: el término $p v^k$ permanece constante. Los procesos politrópicos se aproximan a las curvas reales de expansión y compresión para presiones en el rango de cientos de psi. Se supone que los calores específicos del fluido de trabajo permanecen constantes.

No politrópico: el término $p v^k$ puede variar libremente.

Proceso adiabático: no permite que se produzca transferencia de calor entre el fluido de trabajo y el medio ambiente. Según esta suposición, por ejemplo, la carcasa de una turbina no irradia calor del vapor que la atraviesa, lo cual es una suposición muy razonable para muchas turbinas, donde el calor perdido al medio ambiente es bastante pequeño en comparación con el calor convertido en trabajo.

Proceso no isoparamétrico: cuando se aplica a divisores y fluidos de trabajo saturados, los parámetros de los dos productos de salida no están obligados a ser los mismos. Es decir, para un fluido de trabajo saturado que ingresa al divisor, un tramo de salida podría contener fluido de una calidad diferente que el otro y, por lo tanto, volúmenes específicos diferentes etc.

Proceso Isoparamétrico: cuando se aplica a divisores, se supone que los dos productos de salida son paraméricamente idénticos y tendrán la misma calidad y otros valores intensivos.

9.3.4. Biomasa como fuente renovable

Natuyser (2019), plasma la importancia de la biomasa como fuente de energía renovable. El uso energético de la biomasa es reconocido como respetuoso con el medio ambiente, pero el conocimiento acerca de la materia prima, como bioenergía, sigue siendo escaso. En la actualidad, las investigaciones sobre fuentes de energía renovables han alcanzado mucha importancia debido a que las fósiles (carbón, petróleo, gas natural, entre otras) no cumplen con los principios de sostenibilidad y respeto al medio ambiente para el bienestar de la humanidad. La biomasa es un recurso que puede cumplir con estos principios, y que, además, posee un enorme potencial de generación de empleo directo e indirecto derivado de su aprovechamiento.

La transformación de la biomasa procedente de residuos de poda es susceptible de ser aprovechada como fuente de energía, pues permite obtener diversos productos comercializables en el mercado energético, denominados biocombustibles. Este es el camino más diligente para conseguir una mayor participación en las energías renovables. Además, no afecta el balance global de CO₂ en la atmósfera, pues dicho gas de efecto invernadero ha sido previamente sustraído del medio en la fase de crecimiento de las plantas, retenido mediante la fotosíntesis. Por ello, el uso de biomasa o de sus derivados puede considerarse neutro en términos de emisiones netas.

La biomasa vegetal está compuesta aproximadamente por tres cuartas partes de agua y una cuarta de materia seca, que a su vez se compone de compuestos minerales inorgánicos y compuestos orgánicos.

- Hidratos de carbono: generalmente se encuentran como polisacáridos, unidos mediante enlaces O-glicosídicos.

- Celulosa: es un homopolisacárido que puede tener desde cientos a miles de monómeros de β -glucosa. Tiene una estructura fibrosa, formada por cadenas de glucosas que se entrelazan mediante puentes de hidrógeno de los grupos hidroxilo, dando lugar a fibras impermeables que constituyen la pared celular de las células vegetales.
- Hemicelulosa: es un heteropolisacárido formado por distintos tipos de monómeros. La hemicelulosa forma parte de las paredes de las células vegetales, recubriendo la superficie de las fibras de celulosa y permitiendo el enlace de pectina.
- Lignina: es el polímero natural más complejo en relación con su estructura y heterogeneidad. La molécula de lignina presenta un elevado peso molecular, que resulta de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos (cumarílico, coniferílico y sinapílico). El acoplamiento aleatorio de estos radicales da origen a una estructura tridimensional, polímero amorfo, característico de la lignina. Proporciona rigidez a la pared celular y resistencia de los tejidos lignificados al ataque de los microorganismos, impidiendo la penetración de las enzimas destructivas en la pared celular.
- Taninos: químicamente son metabolitos secundarios de las plantas, fenólicos, no nitrogenados. Son compuestos de peso molecular elevado, que se localizan sobre todo en las hojas y la corteza, retardando la descomposición de la materia orgánica.
- Proteínas: son polipéptidos, cadenas de aminoácidos de alto peso molecular.
- Lípidos: son ácidos grasos, ceras y resinas entre otros compuestos que actúan como fuentes de energía y de protección de las plantas.

La energía de la biomasa proviene de una variedad de fuentes que incluyen:

- Madera de bosques naturales
- Plantaciones forestales
- Residuos forestales
- Residuos agrícolas como paja, restos de madera, desechos de caña y desechos agrícolas verdes
- Residuos agroindustriales, como el bagazo de caña de azúcar y la cáscara de arroz
- Desechos animales (estiércol de vaca, camada de aves, etc.)

- Residuos industriales, como el licor negro de la fabricación de papel
- Aguas residuales
- Residuos sólidos municipales (RSU)
- Residuos de procesamiento de alimentos

9.3.5. Conversión de la biomasa en energía

Pérez (2022), presenta el manejo de la conversión de biomasa en energía renovable. El aprovechamiento de estos residuos de origen animal o vegetal se lleva a cabo en plantas de biomasa mediante la transformación de dichos recursos ecológicos, generando en su proceso energía renovable que contribuye de forma notable a la mejora y conservación del medio ambiente, ya que su impacto medioambiental es muy reducido.

La biomasa sólida, como la madera y la basura, puede quemarse directamente para producir calor. También se puede convertir en un gas llamado biogás o en biocombustibles líquidos como el etanol y el biodiesel. Estos combustibles, a su vez, pueden ser quemados para obtener la denominada energía biomasa.

Biogás

Se forma cuando el papel, los restos de comida y los desechos del jardín se descomponen en vertederos, y se pueden generar al procesar aguas residuales y estiércol en recipientes especiales llamados digestores.

Etanol

Se fabrica a partir de cultivos como el maíz y la caña de azúcar que se fermentan para producir etanol combustible para su uso en vehículos.

Biodiesel

Se produce a partir de aceites vegetales y grasas animales y puede usarse en vehículos y como combustible para calefacción.

Calderas de Biomasa

Las calderas de biomasa son una alternativa eficiente y ecológica para calentar una vivienda y producir agua caliente sanitaria para la misma. Este tipo de calderas son muy similares a

las calderas de gas convencional, pero en lugar de usar gas (del tipo que sea) para producir calor, queman pellets de madera procedentes de fuentes sostenibles.

Sin embargo, las calderas de biomasa normalmente son bastante más grandes, ya que, al estar quemando pellets de madera, se necesita más espacio para alojarlos.

Este tipo de calderas son una alternativa cada vez más utilizada.

9.3.6. Tipos de Biomasa y sus Usos

Herguedas y Tarán (2012), muestran información sobre los tipos de biomasa y sus usos. Madera como combustible: Se trata de biomasa de origen forestal, obtenida a base de actividades de explotación de bosques y de trabajos de mantenimiento y limpieza de estos, como podas y aclarados. La combustión de la biomasa permite generar electricidad, calentar edificios, producir calor para procesos industriales y proporcionar agua caliente.

La madera puede emplearse en las calderas de biomasa en diferentes tipos de combustión:

- **Astillas**

La astilla es madera triturada sin ningún tipo de aditivo. Ésta suele provenir generalmente de los restos de bosques o árboles que no sirven para la industria del mueble.

- **Pellets**

Residuos provenientes de limpiezas forestales y de la industria de la madera. Este material se tritura y se seca para disminuir su nivel de humedad y luego se prensa y se comprime en pequeños cilindros.

En cuanto a su seguridad cabe destacar que, en caso de fuga, no existe ningún riesgo para la salud, ya que se trata de un combustible no tóxico.

- **Briquetas**

Las briquetas son una biomasa muy similar al de la leña tradicional, pudiéndose utilizar en cualquier chimenea, estufa o actividad industrial.

Usando este tipo de materiales, se contribuye a reducir considerablemente la emisión de gases de efecto invernadero y se fomenta la limpieza de bosques, ya que los residuos de podas limpias se utilizan para fabricar este tipo de combustible.

- **Residuos agroindustriales:**

Son cultivos agrícolas y materiales de desecho que bien se queman como combustible, o bien, se convierten en biocombustibles líquidos. Este tipo de residuos proviene fundamentalmente de las industrias de la producción de aceite de oliva y aceituna, de las alcoholeras y la uva, y de los frutos secos.

Los residuos agroindustriales más comunes son la cáscara de almendra y el hueso de aceituna. Normalmente, son combustibles económicos y de buena calidad, aunque en algunos casos se debe prestar una especial atención a las distintas calidades de una misma biomasa.

Residuos de origen animal: Se trata de compuestos como el estiércol y residuos y desechos orgánicos obtenidos de la actividad ganadera. El estiércol animal, así como también las aguas residuales humanas, se convierten en biogás, que puede quemarse como combustible.

9.3.7. Procesos de transformación de la biomasa

Proceso Termoquímico

Con la información presentada por Ministerio de energía y minería en Castilla y León (2019) en cuanto a los procesos de transformación de la energía de la biomasa. Los procesos termoquímicos son aquellos que transforman la biomasa, en determinadas condiciones de presión y temperatura, para obtener productos sólidos, líquidos o gaseosos, generalmente mediante reacciones exotérmicas. Estos productos serán diferentes según el tipo de técnica aplicada.

Atendiendo a la cantidad de oxígeno que interviene en la transformación, se clasifican en:

- **Combustión:** es un tratamiento a una temperatura entre 150 °C y 1200 °C, en el que la cantidad de oxígeno es superior a la estequiométrica, es decir, está por encima de las necesidades determinadas en una reacción química teórica. La biomasa se oxida completamente y se obtienen gases calientes, que es la parte que se aprovecha como energía térmica. Coloquialmente, diremos que quemamos la biomasa.

- **Gasificación:** tratamiento donde si interviene oxígeno en la reacción química, pero en una cantidad inferior a la estequiométrica, con lo cual se reduce significativamente la obtención de sólidos respecto al proceso anterior. Como resultado, se obtiene un gas denominado gas pobre que se utiliza como combustible.
- **Pirólisis:** tratamiento a una temperatura entre 500 °C y 600 °C, y con ausencia de oxígeno. Se basa en la descomposición de la materia orgánica por calor. Como resultado, se obtiene una mezcla que es, en parte sólida (principalmente carbón), en parte líquida, y en parte gaseosa. Los líquidos y los gases son hidrocarburos y compuestos alifáticos. Estos productos pueden ser utilizados como combustibles y materias primas.

Proceso bioquímico

- Se llevan a cabo utilizando diferentes microorganismos que degradan las moléculas. Se utilizan para biomasa de alto contenido en humedad. Los más corrientes son:
- **Fermentación alcohólica.** Es una técnica que consiste en la fermentación de hidratos de carbono que se encuentran en las plantas y en la que se consigue un alcohol (etanol) que se puede utilizar para la industria.
- **Fermentación metánica.** Es la digestión anaerobia (sin oxígeno) de la biomasa, donde la materia orgánica se descompone (fermenta) y se crea el biogás.

9.3.8. *Eficiencia de conversión de energía de la biomasa a electricidad*

Con la información presentadas Gómez (2016), se muestra Eficiencia de conversión de energía de la biomasa a electricidad. La eficiencia de conversión de energía de la biomasa a electricidad es un tema de gran importancia en el panorama energético actual, especialmente dado el impulso hacia fuentes de energía renovable y sostenible. Esta eficiencia puede variar significativamente según una serie de factores, que incluyen los procesos de conversión utilizados, las tecnologías empleadas y las características específicas de la biomasa utilizada.

Un enfoque común para la conversión de biomasa en electricidad es a través de la combustión directa en plantas de energía. Sin embargo, esta tecnología tiende a tener eficiencias relativamente bajas, generalmente entre el 20% y el 40%. Esto se debe en parte a las pérdidas

de calor inherentes al proceso de combustión y a las limitaciones en la captura y utilización eficiente de los subproductos de la combustión, como el calor residual.

Por otro lado, la gasificación de biomasa ha surgido como una alternativa prometedora, con eficiencias que a menudo superan el 40%. En la gasificación, la biomasa se convierte en un gas combustible, que luego se puede utilizar para generar electricidad en un proceso más eficiente que la combustión directa. Además, la gasificación ofrece la ventaja de producir también subproductos valiosos, como biocombustibles sintéticos o productos químicos.

La digestión anaeróbica es otra tecnología utilizada para convertir la biomasa en electricidad, particularmente en el caso de residuos orgánicos y desechos agrícolas. Si bien la eficiencia de conversión puede variar según la calidad y la composición de la biomasa, así como el diseño del sistema, la digestión anaeróbica puede ofrecer eficiencias decentes, especialmente cuando se aprovecha tanto el biogás producido como el calor residual.

Es importante tener en cuenta que la eficiencia de conversión de energía de la biomasa a electricidad no es el único factor para considerar al evaluar la viabilidad de estas tecnologías. También es crucial analizar la disponibilidad y sostenibilidad de la biomasa utilizada, así como los impactos ambientales y socioeconómicos asociados con su producción y conversión.

Si bien existen tecnologías prometedoras para la conversión de biomasa en electricidad con eficiencias razonables, sigue siendo necesario un enfoque integrado que considere aspectos técnicos, ambientales y sociales para garantizar un uso sostenible y efectivo de la biomasa como fuente de energía renovable.

9.4. Cinética de los procesos bio- químicos en reactores en cuanto al cambio de las concentraciones en el sistema y su afectación directa en el tiempo de tratamiento y el tamaño de los reactores que requieren.

Con la información presentada por McGRAW-HILL BOOK COMPANY (1991) muestra todos los aspectos de la cinética de los procesos bioquímicos en los reactores. La cinética de los procesos bioquímicos en reactores está relacionada con la velocidad a la que ocurren las reacciones químicas y biológicas, y cómo estas afectan las concentraciones de los diferentes componentes en el sistema. La comprensión de la cinética es fundamental para determinar el tiempo de tratamiento y el tamaño del reactor necesario para lograr una conversión eficiente de los reactivos en productos.

Orden de la reacción: Este concepto describe la dependencia de la velocidad de reacción con respecto a las concentraciones de los reactivos. La suma de las potencias de las concentraciones de reactivos en la ecuación de velocidad de reacción determina el orden global de la reacción. Por ejemplo, una reacción de primer orden depende linealmente de la concentración de un solo reactivo, mientras que una reacción de segundo orden depende de las concentraciones de dos reactivos o de la concentración cuadrática de un reactivo.

Constante de velocidad: La constante de velocidad (k) es una medida de la velocidad a la que se produce la reacción, específica para una reacción química en una temperatura determinada. Una constante de velocidad alta indica una reacción rápida, mientras que una baja indica una reacción lenta. La constante de velocidad depende de la temperatura según la ecuación de Arrhenius, que relaciona el factor de frecuencia (A) y la energía de activación (E_a) con la constante de Boltzmann (k_B) y la temperatura absoluta (T).

Activación de la energía: La energía de activación (E_a) es la energía mínima requerida para que ocurra una reacción, y representa la barrera energética que deben superar las moléculas para formar un estado de transición antes de formar productos. Una alta energía de activación significa que la reacción es menos probable y que puede requerir catalizadores o un aumento de la temperatura para acelerarla.

En un reactor bioquímico, los factores como la temperatura, el pH, la presión, la presencia de inhibidores o activadores, y la concentración de los reactivos iniciales pueden afectar la

cinética de la reacción. Por lo tanto, es importante controlar y optimizar estos parámetros para lograr una operación eficiente del reactor y maximizar la producción de productos deseados.

El estudio de la cinética de los procesos bioquímicos permite modelar matemáticamente la dinámica del sistema y predecir el comportamiento del reactor en diferentes condiciones. Estos modelos pueden utilizarse para simular y optimizar los procesos, así como para el diseño y control de reactores a escala industrial.

Aspectos importantes relacionados con la cinética de los procesos bioquímicos en reactores:

Modelos cinéticos: Existen diferentes modelos cinéticos que se utilizan para describir la velocidad de reacción y la dependencia de la concentración de los reactivos. Algunos ejemplos incluyen la cinética de Michaelis-Menten, la cinética de Monod y la cinética de Briggs-Haldane. Estos modelos se aplican a diferentes tipos de reacciones, como las enzimáticas, las de fermentación y las de crecimiento microbiano.

Cinética de Michaelis-Menten: la cual es una ecuación bien conocida que describe la velocidad de reacción de muchas reacciones enzimáticas. La ecuación toma su nombre de Leonor Michaelis y Maud Menten, quienes desarrollaron el modelo en 1913. La ecuación se representa como:

Ecuación 3 Cinética de Michaelis-Menten

$$V = \frac{(V_{\max} * [S])}{(K_m + S)}$$

donde:

- v es la velocidad de reacción
- V_{\max} es la velocidad máxima de reacción
- $[S]$ es la concentración de sustrato
- K_m es la constante de Michaelis-Menten, que representa la concentración de sustrato en la que la velocidad de reacción alcanza la mitad de V_{\max} .

Esta ecuación describe la relación entre la velocidad de reacción y la concentración del sustrato para una enzima específica. La enzima se une al sustrato para formar un complejo

enzima-sustrato, que luego se convierte en productos y libera la enzima para que participe en nuevas reacciones. La cinética de Michaelis-Menten se utiliza ampliamente en bioquímica y biología molecular para caracterizar la actividad enzimática y ayuda a explicar el comportamiento de muchas reacciones biológicas.

Cinética de Monod: La ecuación de Monod se utiliza para modelar el crecimiento microbiano en función de la concentración de sustrato limitante:

Ecuación 4 Cinética de Monod

$$\mu = \mu_{\max} * \frac{[S]}{(K_s + [S])}$$

donde:

- μ es la tasa de crecimiento específica
- μ_{\max} es la tasa de crecimiento máxima
- S es la concentración de sustrato limitante
- K_s es la constante de saturación de Monod, que representa la concentración de sustrato en la que la tasa de crecimiento alcanza la mitad de μ_{\max} .

Cinética de Briggs-Haldane: La ecuación de Briggs-Haldane es una versión simplificada de la cinética de Michaelis-Menten para enzimas con un solo sustrato:

Ecuación 5 Cinética de Briggs-Haldane

$$V = \frac{(V_{\max} * [S])}{(K_m + [S])}$$

La diferencia entre esta ecuación y la ecuación de Michaelis-Menten es que la constante de Michaelis-Menten (K_m) se define ligeramente diferente. En la cinética de Briggs-Haldane, K_m es la concentración de sustrato en la que la velocidad de reacción alcanza el 50% de V_{\max} en condiciones de inhibición competitiva.

Estas ecuaciones son fundamentales en el campo de la biología y la ingeniería bioquímica, ya que permiten modelar y predecir la dinámica de sistemas bioquímicos y enzimáticos en diferentes condiciones.

Efecto de la temperatura: La temperatura tiene un impacto significativo en la cinética de las reacciones bioquímicas, ya que afecta la constante de velocidad y la energía de activación de la reacción. A medida que aumenta la temperatura, la velocidad de reacción tiende a aumentar, pero la temperatura óptima puede variar dependiendo del tipo de reacción y los organismos involucrados.

Efecto del pH: El pH también puede afectar la cinética de las reacciones bioquímicas, especialmente en el caso de las reacciones enzimáticas. Cada enzima tiene un rango de pH óptimo en el que su actividad catalítica es máxima. Fuera de este rango, la actividad enzimática disminuye, lo que afecta la velocidad de reacción.

Inhibición y activación enzimáticas: La presencia de inhibidores o activadores en el medio puede afectar la cinética de las reacciones enzimáticas al influir en la actividad de las enzimas. Los inhibidores pueden disminuir la velocidad de reacción, mientras que los activadores pueden aumentarla.

Cinética de crecimiento microbiano: En los procesos bioquímicos que involucran microorganismos, la cinética del crecimiento microbiano es esencial para entender y modelar la dinámica del sistema. La cinética de crecimiento describe la relación entre la velocidad de crecimiento de los microorganismos y las concentraciones de nutrientes y productos en el reactor.

La comprensión detallada de la cinética de los procesos bioquímicos en reactores es fundamental para el diseño y optimización de procesos industriales, así como para la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías en el área de la biotecnología y la ingeniería bioquímica.

9.4.1. Aspectos fundamentales del software de simulación

Con la información presentada por Qualitative Reasoning Group (2012) se presentan aspectos fundamentales de cyclepad. Cyclepad es el primer laboratorio virtual de articular que el Grupo de razonamiento cualitativo ha puesto en marcha. Cyclepad permite a los estudiantes construir y analizar una amplia variedad de ciclos termodinámicos. Una instalación de la explicación de hipertexto proporciona al estudiante el acceso a la cadena de razonamiento que subyace a la derivación de cada valor.

construcción del modelo, donde se emplea el editor gráfico para situar los componentes conectándolos entre ellos, y análisis del modelo, donde se especifican el fluido de trabajo, suposiciones de trabajo y valores numéricos para las propiedades del fluido en los diferentes puntos.

La función de Cyclepad es descubrir cuando los valores que has propuesto son físicamente imposibles. Una vez que aparece el modo contradicción, Cyclepad no permite proseguir con el análisis, hasta que se corrijan las suposiciones que crearon el error.

Con la información presentada por Zueco (2001) muestra datos relevantes sobre el software de simulación de ciclos termodinámicos. Un ciclo termodinámico es una colección de componentes los cuales intercambian energía, unos toman calor y generan energía, son las máquinas térmicas, o reciben energía y producen calor, son las máquinas frigoríficas o bombas de calor. Así pues, ejemplos de ciclos termodinámicos son las plantas de potencia, refrigeradores, plantas de propulsión y motores.

Cyclepad nos ayuda a:

- Especificar la estructura de nuestro diseño, es decir las partes de que está compuesto y su interconexión.
- Analiza el diseño, indicando las consecuencias de las suposiciones que se han realizado. Tales suposiciones incluyen valores numéricos, es decir presiones, temperaturas de operación asumidas, o suposiciones relacionadas con el modelado del sistema, por ejemplo, considerar un compresor isoentrópico.

- Ejecución de análisis de sensibilidad para comprender como las diferentes elecciones realizadas en el diseño contribuyen a los resultados. Cyclepad puede decir como la eficiencia de un sistema cambia según varía una función que depende de otros parámetros, por ejemplo, la temperatura de entrada a la turbina.

También se pueden realizar análisis en régimen permanente de sistemas abiertos y cerrados. En un sistema abierto hay un caudal másico que recorre la instalación, mientras que en un sistema cerrado no. Una turbina de gas o de vapor es un sistema abierto, mientras que un motor de combustión forma un sistema cerrado.

Los análisis en régimen estacionario proporcionan una buena orientación inicial en el diseño conceptual, ya que en el diseño conceptual de ciclos termodinámicos las cuestiones importantes son las condiciones de operación y la estimación de la eficiencia y la producción de potencia, frío o calor. Las etapas posteriores del diseño son obtener las consecuencias tales como la respuesta del sistema a transitorios, desarrollo de procedimientos para la puesta en marcha y la parada, y que aseguren que el sistema es fácil de monitorizar y mantener.

Cyclepad trabaja en dos fases, (a) construcción del modelo, donde se emplea el editor gráfico para situar los componentes conectándolos entre ellos, y (b) análisis del modelo, donde se especifican el fluido de trabajo, suposiciones de trabajo y valores numéricos para las propiedades del fluido en los diferentes puntos (stuffs) del ciclo.

Cyclepad incorpora unas facilidades para el diseñador a la hora de comenzar a analizar el ciclo. Para que surja esta ayuda, Cyclepad primero hace deducciones sobre el papel que cada elemento está jugando. El papel se define como la función que un elemento en particular está intentando realizar. Por ejemplo, algunas plantas de gas licuado usan turbinas en vez de válvulas de estrangulación (throttles) para expandir el fluido de trabajo, porque una expansión resistida produce una mayor caída de temperatura que una expansión sin resistencia. En este caso, aun cuando el ciclo puede hacer uso de la potencia derivada de la expansión, la intención de la turbina es enfriar el fluido de trabajo, no producir potencia.

Para contemplar el papel que Cyclepad ha deducido para cada parte del ciclo escoge, Tools/Annotations/Device Role Annotations. Pulsando con el ratón en las funciones

mostradas, aparecerá el sistema de preguntas que te provee de una explicación del porque cyclepad ha deducido dicha función.

Cyclepad utiliza estas deducciones para generar consejos para que mejoren el análisis del ciclo. Para ver estos consejos elige Help/Análisis Coach y los consejos que el programa ha obtenido se muestran en una ventana de explicación.

Cyclepad automatiza el análisis numérico del ciclo para que puedas emplear más tiempo pensando sobre las implicaciones del diseño. Para asistirte en tus investigaciones Cyclepad esta provisto de un sistema de preguntas. Usando este sistema puedes obtener explicaciones sobre algún determinado valor paramétrico, fase de alguna sustancia o del modelo de suposiciones que Cyclepad ha deducido para algún elemento. (Estos valores aparecen en texto azul en la pantalla).

La forma de trabajar del análisis de sensibilidad normalmente está implementada en cyclepad bajo dos parámetros, un parámetro dependiente y un parámetro independiente. El parámetro dependiente es el que deseamos mejorar, puede ser la eficiencia térmica, el trabajo producido, o reducir la cantidad de calor perdido. El parámetro independiente es una de las suposiciones que esta casualmente relacionada con el parámetro dependiente, tal como la temperatura de salida de la caldera o la relación de compresión que deseas cambiar para alterar el parámetro dependiente.

10. Diseño metodológico

10.1. Tipo de investigación

El diseño metodológico de esta investigación se ubica en el paradigma positivista, que enfatiza la objetividad, la cuantificación y la verificación empírica de hipótesis a través de métodos científicos rigurosos, permitiendo la replicabilidad y la generalización de resultados en contextos similares. Este enfoque se alinea con la naturaleza técnica y simulativa del estudio, donde se prioriza la medición precisa de variables termodinámicas y fisicoquímicas para validar modelos predictivos.

El enfoque de investigación es predominantemente cuantitativo. El tipo de investigación es aplicada y de desarrollo tecnológico, con un carácter descriptivo-experimental: descriptiva al caracterizar propiedades de la cascarilla de café y el potencial energético regional; experimental al simular el ciclo de Rankine en software para probar escenarios operativos. La investigación es no experimental en su fase de campo (observación y muestreo), pero experimental en la simulación computacional.

10.2. Población y selección de la muestra

La población objetivo comprende los beneficios cafetaleros (secos y húmedos) en los departamentos de Estelí y Jinotega, que representan aproximadamente el 80% de la producción nacional de café, con un total estimado de 59 beneficios secos monitoreados en el ciclo 2024-2025.

La muestra se seleccionó mediante muestreo no probabilístico por conveniencia y bola de nieve, priorizando beneficios accesibles desde el CUR-Estelí (distancia <50 km) y con producción media-alta (>5,000 quintales/ciclo). Se selecciona 1 beneficios.

10.3. Técnicas, instrumentos y procedimientos para la recolección de datos

Los métodos combinan enfoques de campo y computacionales para una triangulación de datos.

Implementación de métodos cuantitativos Se utilizó un formato de registro elaborado previamente en el programa informático Excel, que sirvieron para el registro de las variables cuantitativas discretas y continuas que surgieron en la experimentación.

Instrumentos de recogida:

- **Equipo de laboratorio:** balanza analítica KERN con una precisión de 0,001 g, horno de secado (105°C) Hot Air Sterilizer.
- **Software de simulación:** CyclePad para modelado termodinámico; GPS portátil (Garmin) para georreferenciación.
- **Guía de observación:** Check-list para flujos de biomasa.

El procedimiento que se siguió para la recolección de los datos e información se presentan de acuerdo con cada uno de los objetivos planteados en esta investigación.

Primeramente, se realizó la selección del sustrato de cascarilla en etapas post-procesado en los beneficios seleccionados.

Para la caracterización de las propiedades físico-químicas se hizo mediante análisis en laboratorio según normas ASTM/UNE para caracterización.

El método de determinación de los sólidos totales o masa seca, consistió en la evaporación total del agua contenida en la muestra en un crisol pesado y secado, hasta peso constante, en una estufa de la marca Hot Air Sterilizer a 105°C durante 24 horas.

Para llevar a cabo la determinación de los Sólidos Volátiles (SV), se calcinó el residuo seco procedente de la determinación de ST hasta peso constante en un horno de mufla de la marca HUMBOLDT a una temperatura de 550°C durante 4 horas. Concluido este proceso se procedió a la extracción de las muestras, pesándolas para conocer el porcentaje de cenizas y el contenido de sólidos volátiles presente en las muestras.

Simulación computacional: Modelado del ciclo de Rankine en software especializado.

10.4. Confiabilidad y Validez de los Instrumentos

La validación asegura la confiabilidad (consistencia) y validez (precisión) de los instrumentos, siguiendo criterios triangulados.

10.4.1. Confiabilidad:

- **Prueba piloto:** Aplicación en 2 beneficios no muestrales (alfa de Cronbach >0.80 para encuestas; coeficiente de variación <10% para pruebas lab).
- **Estabilidad temporal:** Repetición de mediciones en submuestras (intervalo de 7 días) para propiedades físico-químicas (correlación >0.90).
- **Consistencia interna:** Análisis factorial exploratorio en SPSS para encuestas (KMO >0.70).

10.4.2. Validez:

- **Validez de contenido:** Revisión por expertos (3 ingenieros en energías renovables del CUR-Esteli) mediante matriz de juicio.

Formulación y validación: Los instrumentos se formularon iterativamente: borrador inicial basado en objetivos, refinado por retroalimentación de los expertos a quienes se les envió para validación.

Los instrumentos son herramientas prácticas y de bajo costo, adaptadas a un entorno de campo y laboratorio. En esta investigación se incluyen formatos para registro sistemático, como las hojas de campo que son una plantilla estandarizada para anotar observaciones y mediciones en tiempo real.

10.4.3. Planificación y Selección del Área de Estudio

- **Descripción:** Identificar fuentes de datos primarias (beneficios de café en Estelí y Jinotega) y secundarias (literatura y herramientas geográficas).
- **Acciones específicas:**
 - Geolocalización de empresas productoras de cascarilla de café usando Google Earth (2023) para obtener coordenadas exactas: Longitud -86°20'54"W, Latitud 13°05'20"N, Altitud 841 msnm.
 - Recopilación inicial de datos estadísticos de producción anual/mensual (en quintales) directamente de las empresas, enfocados en meses hábiles (e.g., diciembre como pico).

Procesamiento y Validación de Datos

- **Descripción:** Transferencia y análisis posterior para integración en modelos.
- **Acciones específicas:**
 - Calcular balances de materia/energía usando fórmulas termodinámicas (e.g., $C_6H_{10}O_5 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 5H_2O$) para estimar potencia (e.g., 7.75 MW en Estelí).
 - Validar con simulaciones en software CyclePad y cálculos manuales (eficiencia térmica ~34%).
 - Incluir datos secundarios de producción anual (e.g., Tabla 7: total Estelí + Jinotega).

10.5. Procedimientos para el procesamiento y análisis de datos.

- **Descriptivo:** Medidas de tendencia central (media, mediana) y dispersión (desviación estándar) para propiedades físico-químicas; gráficos.
- **Termodinámico:** Cálculos manuales (balances de energía, ecuaciones de Rankine) validados contra simulación (error absoluto <3%). Análisis de sensibilidad en CyclePad (variando T=450-550°C).
- **Comparativo:** Correlaciones (Pearson) entre variables (e.g., producción vs. potencial energético); modelado de impacto ambiental con ecuaciones IPCC (reducción CO₂ = biomasa × factor emisión).

11. *Análisis y discusión de resultados*

11.1. *Caracterización las propiedades fisicoquímicas y el poder energético de la cascarilla de café como biomasa residual disponible en Jinotega y Estelí.*

La caracterización de la cascarilla de café como biomasa residual disponible en Jinotega y Estelí se fundamenta en la obtención de parámetros fisicoquímicos y energéticos que permiten evaluar su viabilidad como fuente alternativa de energía térmica. Para ello, se aplicaron procedimientos sistematizados que incluyen subrutinas de procesamiento de datos, cálculos de propiedades termodinámicas y funciones matemáticas específicas, como las utilizadas en el análisis de humedad, contenido de cenizas, materia volátil, carbono fijo y poder calorífico superior. Estas propiedades fueron determinadas mediante métodos estandarizados que permiten establecer comparaciones con otras biomásas lignocelulósicas. La estructura de datos empleada, junto con algoritmos de búsqueda y ordenamiento, facilitó la organización y validación de los resultados obtenidos. Además, se consideró la relevancia regional del recurso, dado que la cascarilla de café representa un subproducto abundante en zonas cafetaleras como Jinotega y Estelí, donde su aprovechamiento energético podría integrarse en sistemas termoeléctricos de pequeña escala, como los ciclos Rankine adaptados a contextos rurales. Esta caracterización técnica constituye un insumo clave para valorar el potencial de la cascarilla en estrategias de diversificación energética y sostenibilidad productiva.

11.1.1. *Propiedades químicas de la cascarilla de café, composición elemental, contenidos de humedad, y contenidos de la biomasa para producir energía*

Con la información presentada por Castillo **Fuente especificada no válida.**, muestra información sobre las propiedades del café. Las propiedades químicas de la biomasa seleccionada en este caso cascarilla de café se destacan por cualidades adecuadas para su manejo como reactivo para la generación de energía los parámetros

La cascarilla de café tiene la siguiente composición química: contenido de humedad de 7.6%, materia seca 92.8%, extracto etéreo 0.6%, nitrógeno 0.39%, cenizas 0.5%, extracto libre de nitrógeno 18.9%, calcio y Magnesio 150 mg y fósforo 28 mg.

De acuerdo con estudios realizados, el cisco o cascarilla del café presenta las siguientes propiedades:

- El poder calorífico es de aproximadamente 7458 Kcal/Kg.
- El porcentaje de cenizas es de aproximadamente 0.6%.
- Su humedad promedio es de 5.4 %.
- El Material volátil es de 87.7 %.
- Densidad aparente promedio 0.33 g / cm³
- Composición bioquímica para la cascarilla de café

Tabla 3 Propiedades químicas de la cascarilla de café

Componente	Porcentaje (%)	
	A	B
Celulosa	43,0 ± 8,0	24,5
Hemicelulosa	7,0 ± 3,0	29,7
Lignina	9,0 ± 1,6	23,7

Celulosa

Este compuesto es un homopolímero lineal de elevado peso molecular y grado de polimerización; la conforman entre 200 y hasta 10 000 unidades de β-D-glucopiranosas unidas por un enlace glicosídico o de tipo éter. La celobiosa conforma la unidad repetitiva de las cadenas de celulosa, Debido a su estructura la celulosa posee alta resistencia, por lo cual este compuesto, además de que al entrar en el proceso de combustión entra en el proceso de generación de energía demostrando sus características como reactivo para la transformación de energía.

11.1.2. Volumen proyectado de cascarilla de café en meses hábiles

Los registros muestran la disponibilidad de cascarilla de café en los departamentos de Estelí y Jinotega, expresada en volúmenes mensuales de producción. Estos datos evidencian la magnitud del residuo generado durante la cosecha y permiten dimensionar su potencial como biomasa aprovechable en procesos energéticos. La información cuantitativa refleja la importancia de ambas regiones en la generación de subproductos cafetaleros, constituyendo una base sólida para evaluar su viabilidad en aplicaciones termoeléctricas.

Tabla 4 Datos principales de biomasa de la ciudad de Estelí en los 6 meses hábiles

Esteli	
noviembre	240000
diciembre	
enero	
febrero	
Marzo	
Abril	
Quintal a Kg	24000000
Kg/ Dia de café	142857.1429
Brosa al dia Kg	71428.57143
celulosa Kg/día	28571.42857
CO2 Kg generado	46520.64
CO2 M3 generado	46.52064354
CO2 M3 generado	1442.13995

Tabla 5 Producción anual de biomasa en el departamento de Jinotega

Jinotega	
noviembre	945000
diciembre	
enero	
febrero	

Marzo	
Abril	
Quintal a Kg	94500000
Kg/ Dia de café	562500
Brosa al dia Kg	281250
celulosa Kg/dia	112500
CO2 Kg generado	183175.03
CO2 M3 generado	183.175034
CO2 M3 generado	5678.42605
Producción de Jinotega	
945000	
240000	

Tabla 6 Producción anual de biomasa en el departamento de Jinotega y Estelí

Ambos Estelí Jinotega	
noviembre	1185000
diciembre	
enero	
febrero	
Marzo	
Abril	
Quintal a Kg	
Kg/ Dia de café	705357.143
Brosa al dia Kg	352678.571
celulosa Kg/dia	141071.429
CO2 Kg generado	229695.68
CO2 M3 generado dia	229.695677
CO2 M3 generado	7120.566

11.1.3. Balance de Materia Jinotega-Esteli

Se plasma el balance de materia y energía del mes de diciembre para cuantificar la generación de energía eléctrica en el mes establecido

se consideraron las reacciones químicas involucradas en su combustión y transformación térmica. Para ello, se aplicaron principios de estequiometría y balance de ecuaciones químicas, con el fin de modelar las reacciones entre los principales componentes orgánicos de la biomasa (hidrocarburos, celulosa, lignina) y el oxígeno atmosférico. Las ecuaciones balanceadas permiten estimar la cantidad de productos generados, como dióxido de carbono y vapor de agua, así como la liberación de energía asociada a cada reacción. Este enfoque facilita la cuantificación del poder calorífico superior y la evaluación del comportamiento térmico de la cascarilla en condiciones controladas, aportando datos clave para su integración en sistemas termoeléctricos como el ciclo Rankine. La aplicación de estos modelos químicos refuerza la caracterización fisicoquímica del residuo y permite proyectar su rendimiento energético en escenarios reales de aprovechamiento rural en Jinotega y Esteli.

Compuesto de referencia para la combustión

$$\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5 \times 1 = \frac{\text{mol C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5}{\text{Kgr C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5} \quad (6)$$

Ecuación 6 Balance de materia

Cálculo de moles a partir de la masa

$$28571.42857 \text{ C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5 \times \frac{1}{0.16214} = \frac{\text{mol C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5}{\text{Kgr C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5} = 176214.56 \text{ mol}$$

$$\text{moles de CO}_2 = 176214.56 \times 6 = 1057287.35$$

$$\text{moles de H}_2\text{O} = 176214.56 \times 5 = 881072.79$$

$$\text{moles de CO}_2 = 176214.56 \times 6 = 1057287.35$$

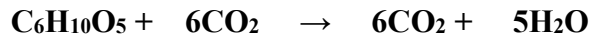
$$\text{CO}_2 \times 1 = \frac{0.044 \text{ Kgr CO}_2}{\text{mol de CO}_2}$$

Ecuación 7 Balance de CO2

$$1057287.35 \text{ mol CO}_2 \times \frac{0.044}{1} = \frac{\text{Kgr CO}_2}{\text{mol de CO}_2} = 46520.64 \text{ Kgr CO}_2$$

$$881072.79 \text{ mol H}_2\text{O} \times \frac{0.018}{1} = \frac{\text{KgrCO}_2}{\text{mol de CO}_2} = 15859.31 \text{ Kgr CO}_2$$

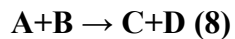
Reacción química balanceada de combustión



$$28571.42857$$

$$? \quad 46520.64 \quad 15859.31$$

Ecuación 8 Balance general

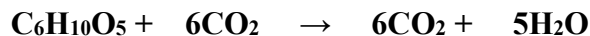


$$\mathbf{B= C+D-A}$$

$$B= 46520.64 + 15859.31 - 28571.4286$$

$$B= 33808.53$$

formula balanceada



$$28571.42857 \quad 33808.53 \quad \rightarrow \quad 46520.64 \quad 15859.31$$

$$62379.95 \rightarrow 62379.95$$

$$Q= -669967752.74 \text{ KJ}$$

$$t= 86400$$

$$P= 7754.256397 \text{ KW}$$

$$Q= 1057287.35. \text{ mol} \quad -339.5 \text{ KJ/mol} \quad + \quad 881072.79. \text{ mol} \quad + \quad -285.8 \text{ KJ/mol}$$

$$\mathbf{Q = \Sigma ni\Delta Fi \text{ (9)}}$$

Ecuación 9 Poder calorífico

$$Q = \frac{-669967752.7\text{KJ}}{86400}$$

$$P= 7754.26 \text{ KW}$$

Balance de Matéria Jinotega

Se plasma el balance de materia y energía del mes de diciembre para cuantificar la generación de energía eléctrica en los meses establecidos

$$\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5 \times \mathbf{1} = \frac{\text{mol C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5}{\text{KgrC}_6\text{H}_{10}\text{O}_5}$$

$$112500 \text{ Kgr C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5 \times \frac{1}{0.16214} = \frac{\text{mol C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5}{\text{Kgr C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5} = 693844.83 \text{ mol}$$

$$\text{moles de CO}_2 = 693844.83 \quad 6 \quad 4163068.95$$

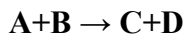
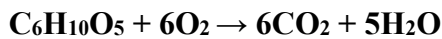
$$\text{moles de H}_2\text{O} = 693844.83 \quad 5 \quad 3469224.13$$

$$\text{moles de CO}_2 = 693844.83 \quad 6 \quad 4163068.95$$

$$\text{CO}_2 \times 1 = \frac{0.044 \text{ KgrCO}_2}{\text{mol de CO}_2}$$

$$4163068.95 \text{ mol CO}_2 \times \frac{0.044}{1} = \frac{\text{KgrCO}_2}{\text{mol de CO}_2} = 183175.03 \text{ Kgr CO}_2$$

$$110134.10 \text{ mol H}_2\text{O} \times \frac{0.018}{1} = \frac{\text{KgrCO}_2}{\text{mol de CO}_2} = 1982.41 \text{ Kgr CO}_2$$

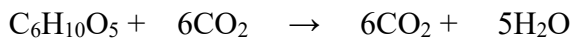


$$\text{B} = \text{C+D-A}$$

$$\text{B} = 183175.03 + 62446.03 - 112500$$

$$\text{B} = 133121.07$$

formula balanceada



$$112500 \quad ? \quad 183175.03 \quad 62446.03$$

$$Q = -2637998026.40 \text{ KJ}$$

$$t = 86400 \text{ S}$$

$$Q = 4163068.95. \text{ mol} \quad -339.5 \text{ KJ/mol} \quad + 3469224.13. \text{ mol} \quad -285.8 \text{ KJ/mol}$$

$$Q = \Sigma ni\Delta Fi$$

$$Q = \frac{-2637998026 \text{ KJ}}{86400}$$

$$P = 30532.38 \text{ KW} = 30.53 \text{ MW}$$

11.2. Simulación el ciclo Rankine mediante software especializado para estimar la eficiencia térmica del sistema.

La estimación de la eficiencia térmica en sistemas de generación eléctrica a partir de biomasa requiere la aplicación de modelos termodinámicos que representen con precisión el

comportamiento del ciclo de conversión. En este contexto, se ha implementado la simulación del ciclo Rankine mediante software especializado, con el propósito de analizar el rendimiento del sistema bajo condiciones operativas adaptadas al aprovechamiento de la cascarilla de café como fuente de calor. La simulación permite integrar variables como presión, temperatura, entalpía y flujo de masa en cada etapa del ciclo —caldera, turbina, condensador y bomba—, lo que facilita la evaluación del desempeño energético del conjunto. Este enfoque computacional no solo proporciona una aproximación cuantitativa de la eficiencia térmica, sino que también permite explorar escenarios de operación ajustados a la escala productiva de los caficultores en Jinotega y Estelí. La modelación virtual del ciclo Rankine constituye, por tanto, una herramienta clave para validar la viabilidad técnica del sistema propuesto y orientar decisiones sobre su implementación en contextos rurales con disponibilidad de biomasa residual.

11.2.1. Variables y parámetros clave de los componentes del modelo de simulación y condiciones iniciales del modelo de simulación

Se presentan las variables y parámetros que son parte del modelo de simulación además de las condiciones iniciales del ciclo de simulación del modelo de simulación plasmadas de manera legible. para mayor comprensión todo se muestra en la tabla 1, 2 y 3.

Tabla 7 variables del modelo de simulación

Variables:	
Presión del vapor (P_vapor):	
Presión en la caldera	MPa (Megapascuales)
Presión en la entrada de la turbina	MPa (Megapascuales)
Presión en el condensador	kPa (kilopascuales)
Temperatura del vapor	(T_vapor)
Temperatura en la caldera	°C (Celsius)
Temperatura en la entrada de la turbina	°C (Celsius)
Temperatura en el condensador	°C (Celsius)
Flujo de vapor	(\dot{m} _vapor)

Flujo de vapor requerido potencia con una eficiencia del 90%	kg/s (kilogramos sobre segundo)
Potencia generada ($P_{generada}$)	MW (Mega watts)
Eficiencia de la turbina ($\eta_{turbina}$)	% (porcentaje)
Temperatura del agua de refrigeración (T_{agua})	°C (porcentaje)

Tabla 8 Parámetros del modelo de simulación

Parámetros	
Temperatura de entrada de agua ($T_{agua_entrada}$)	°C (Celsius)
Presión de entrada de agua ($P_{agua_entrada}$)	MPa (Megapascuales)
Eficiencia del intercambiador de calor (intercambiador)	% (porcentaje)
Eficiencia del generador ($\eta_{generador}$)	% (porcentaje)
Eficiencia del condensador ($\eta_{condensador}$)	% (porcentaje)

Tabla 9 Condiciones iniciales del modelo de simulación

Condiciones iniciales	
Temperatura inicial del agua en la caldera	°C
Presión inicial del agua en la caldera	MPa
Sin vapor presente en el sistema al inicio de la simulación	Sin vapor presente en el sistema al inicio de la simulación
Condiciones ambientales	
Temperatura ambiente	T°C
Presión atmosférica	<i>ka</i>

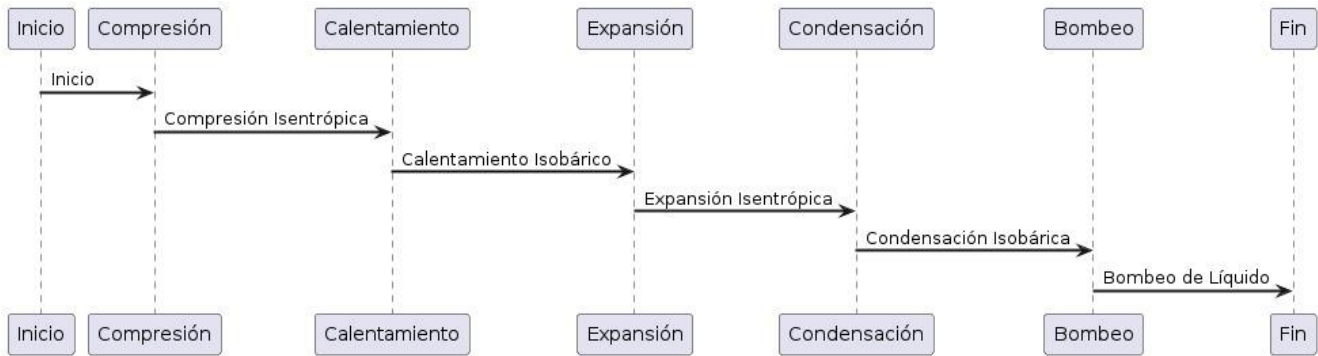


Figura 11 Diagrama sucesivo del ciclo de Rankine

Compresión isentrópica

tiene la finalidad de elevar la presión de un fluido compresible (un gas, un vapor o una mezcla de gases y vapores) sobre el que opera. La presión del fluido se eleva reduciendo el volumen específico del mismo durante su paso a través del compresor. Se distinguen del turbo soplantes y ventiladores centrífugos o de circulación axial, en cuanto a la presión de salida, los compresores se clasifican generalmente como máquinas de alta presión, mientras que los ventiladores y soplantes se consideran de baja presión pues estos últimos manejan grandes cantidades de gas sin modificar sensiblemente su presión.

Ecuación 10 Eficiencia de la bomba

$$\eta_c = \frac{w_{isen}}{w_{real}} = \frac{h_{2isen} - h_1}{h_{2real} - h_1}$$

Donde h_2 isen y h_{2real} son los valores de la entalpía en el estado de salida para los procesos de compresión isentrópico y real.

Calentamiento isobárico

Es decir, durante la expansión/calentamiento isobárico, se agrega calor positivo al gas o, de manera equivalente, el ambiente recibe calor negativo. Reiterado, el gas recibe calor positivo del ambiente. Si el sistema rechaza el calor, entonces $Q < 0$.

Expansión isentrópica

Un proceso isentrópico es un proceso termodinámico, en el cual la entropía del fluido o gas permanece constante. Significa que el proceso isentrópico es un caso especial de un proceso adiabático en el que no hay transferencia de calor o materia. Es un proceso adiabático reversible.

dónde:

- p es la presión absoluta del gas
- R es la constante de gas ideal, o universal, igual al producto de la constante de Boltzmann y la constante de Avogadro.
- n es la cantidad de sustancia
- T es la temperatura absoluta
- V es el volumen

Ecuación 11 Expansión isentrópica

$$\frac{p_1}{p_2} = \left[\frac{v_2}{v_1} \right]^k = \left[\frac{T_1}{T_2} \right]^{\frac{k}{k-1}}$$

Condensación isobárica

Los procesos termodinámicos que pueden dar lugar al desencadenamiento de la condensación en las partículas atmosféricas inicialmente no saturadas, es un problema importante desde el punto de vista meteorológico, puesto que se refiere al estudio de la formación de nubes y nieblas. En el caso de los sistemas de generación eléctrica este proceso lo realiza el reductor de temperatura del sistema condensando el vapor de agua cambiando su estado a líquido.

Bombeo de líquido

Al líquido ser condensado en el sistema de intercambiador de calor, la bomba traslada el líquido utilizando un motor eléctrico, la cantidad de volumen de agua que se mueve depende del modelo de la bomba, el proceso de bombeo es clave para cerrar el proceso de Rankine.

11.2.2. Reconocimiento del procedimiento para realizar la primera aproximación de la simulación con el software Cyclepad.

Para plasmar los datos de la primera aproximación de simulación en el software cyclepad se determinaron las variables de operación para poder identificar aspectos fundamentales como lo es el calor generado en el sistema, el flujo masico, las variables de temperatura, presión, perdidas en forma de calor entre otras variables.

El procedimiento de simulación da inicio mediante la introducción de datos a los sistemas como lo son la caldera la turbina el condensador y la bomba además de introducir datos en las entradas y salidas de las mismas bajo la finalidad de analizar los fenómenos termodinámicos y cuantificar la cantidad de energía generada en proporción a la cantidad de biomasa que se introduce en sistema termodinámico, teniendo como punto fundamental además de la obtención de energía la identificación de la eficiencia térmica del ciclo.

Se introducen los valores primeramente en la caldera, siendo este un proceso isobárico, teniendo en cuenta que es un intercambiador de calor y operará a presión constante. De igual manera como es un intercambiador a presión constante el condensador realiza un proceso isobárico

En el caso de la bomba y la turbina se ingresará como adiabáticas, pero no isentrópicas porque tienen una eficiencia del 90% denotando la carencia de perdidas en forma de calor.

En las corrientes de procesos

Se plasma, primeramente, que a la entrada de la bomba tenemos un líquido saturado, el fluido a trabajar es agua, pero con la característica de agua saturada

Para que el agua pueda pasar de estado líquido a gaseoso y viceversa requiere de cierta cantidad de tiempo de transición, este fenómeno se conoce como saturación y ocurre en condiciones de presión y temperatura únicas tales como lo son los ciclos termodinámicos en especial el de Rankine.

Por otra parte, se introduce el valor de la presión acorde a los resultados obtenidos con la utilización de las fórmulas de trabajo

En cuanto al flujo masico también es el resultado de la formulación de cálculos manuales de la cantidad de biomasa que se introduce al ciclo para la generación de calor útil.

En cuanto a las condiciones de entrada a la turbina

La presión será dada mediante cálculos manuales con datos obtenidos mediante su recopilación y será introducido el valor en kilopascales a la entrada de la turbina.

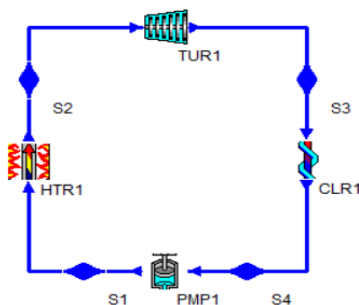
El valor de la temperatura a la entrada de la turbina será de 500°celcius que es a lo que operan la mayoría de las calderas en plantas de generación de energía por biomasa.

Agregados estos valores, el programa mostrará resultados al activar el modo simulación para así obtener la eficiencia térmica del ciclo.

11.2.3. Procedimientos para la realización de simulación por las etapas de compresor, cámara de combustión, turbina de expansión, recuperador de calor, turbina de expansión, bomba de agua

Con la implementación del software de simulación de ciclos termodinámicos cyclepad se logró dimensionar la central de generación eléctrica a base de biomasa como fuente de energía, donde los resultados fueron idóneos en base a la proporcionalidad de sustrato de cascarilla de café con el que se cuenta en base a la producción del mismo en los departamentos de Jinotega y Estelí.

Figura 12 Interconexión de los elementos en el ciclo termodinámico Rankine

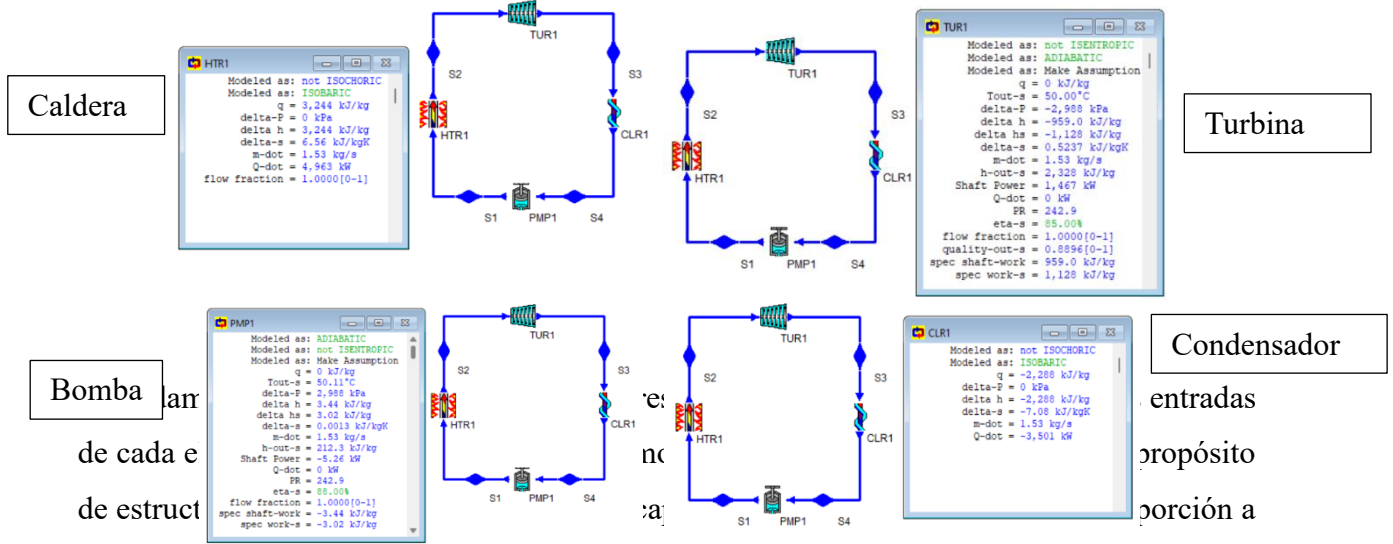


La simulación se representa de la siguiente manera, un ciclo termodinámico basado en el ciclo de Rankine primigenio o sencillo.

se plasma la interconexión de los elementos del ciclo tales como la caldera, turbina, el condensador y la bomba con la finalidad de dar funcionamiento al sistema de generación de energía eléctrica, el ciclo está representado en la figura 12.

Sucesivamente se le asignan valores y parámetros a los elementos del ciclo acorde a proceso que vayan a realizar tal como lo muestra la figura 13.

Figura 13 asignación de valores y parámetros a los elementos del ciclo



la cantidad de sustrato existente. Dando inicio en el proceso en la entrada de la bomba como se representa en la figura 14.

Figura 14 Parámetros a la entrada de la bomba

Se plasman los valores a la entrada del ciclo donde tenemos un líquido saturado con una calidad de 0, se denota en esta etapa 1 un flujo masico de 1.53 kg/s en dependencia de a la cantidad de biomasa disponible además de una presión de 12.35 kPS con una temperatura 50°C y se presenta una entalpia de 209.3 kJ/kg y una entropía de 0.7037 kJ/kg.

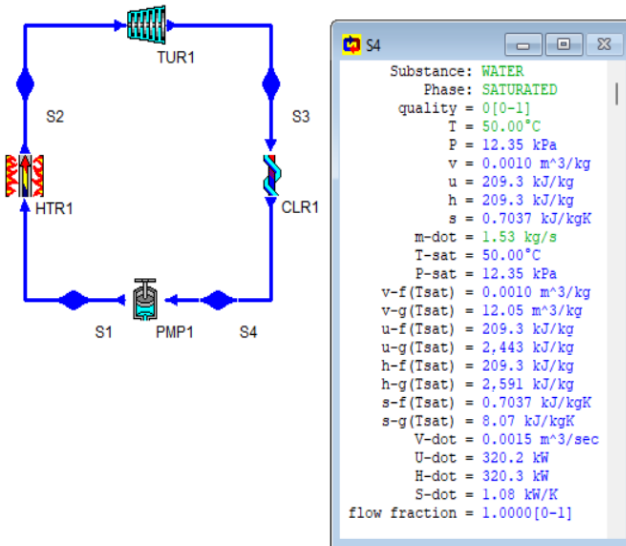
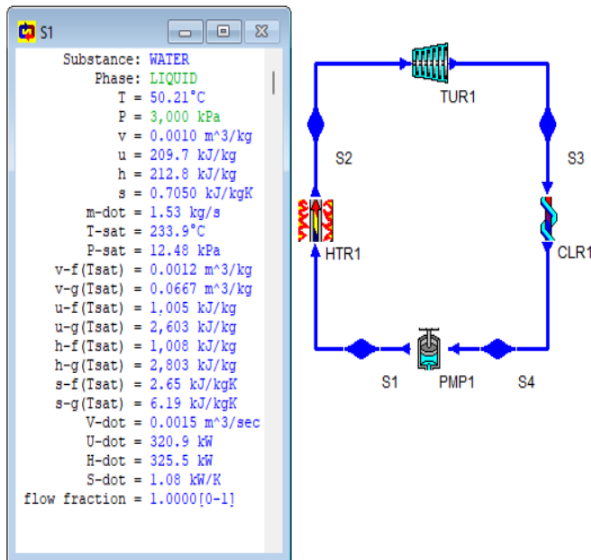


Figura 15 Parámetros de entrada a la caldera



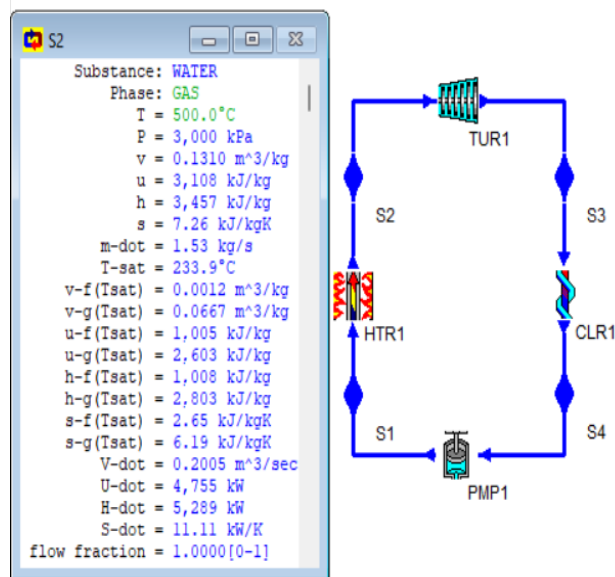
La siguiente entrada es de la caldera donde se mostrarán los índices de presión más elevados del sistema, como lo presenta la figura 15.

Se evidencian los valores de entrada en la caldera, donde se puede discernir que es un líquido en precalentado y no un líquido saturado luego de sus procesos en la bomba y el condensador, en esta etapa 2 se plasma una presión de 3MPa con una temperatura de 50.21°C con un flujo masico constante además de una entalpia de 212.8 kJ/kg y una entropía de 0.7050 kJ/kg.

Sucesivamente tenemos la entrada a la turbina donde se muestran los valores de temperatura más elevados del sistema además de la presión constante acorde al proceso anterior, todo representado en la figura 16.

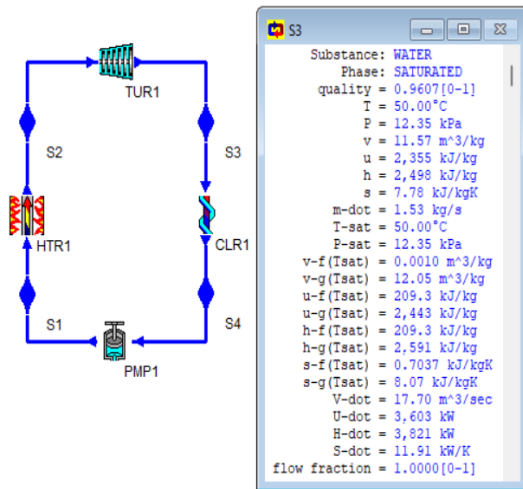
Figura 16 Parámetros a la entrada de la turbina

Se representan los valores de entrada a la turbina, donde se puede identificar el vapor de agua sobrecalentado, en esta etapa 3 se denotan los valores de temperatura de aproximadamente 500°C además de una presión de 3MPa con un flujo masico constante además de una entalpia de 3457 kJ/kg y una entropía de 7.26 kJ/kg.



Para finalizar se presenta la entrada al condensador donde se plasman los valores de presión y temperatura acorde a la entrada a la bomba, todo representado en la figura 17.

Figura 17 Parámetros de entrada al condensador

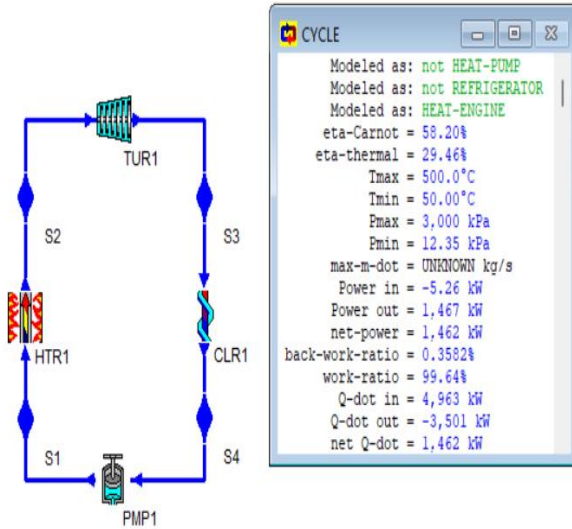


Se evidencian los valores de entrada al condensador, donde se identifica un fluido saturado, en esta etapa 4 se denotan valores de presión a 12.35 kPa y una temperatura de 50°C, de igual manera con un flujo masico constante al de las anteriores etapas además en esta etapa se presenta una entalpia de 2498 kJ/kg y una entropía de 7.78 kJ/kg.

11.2.4. Resultados obtenidos de la simulación.

con la construcción del ciclo termodinámico y la introducción de todos los parámetros y variables en el mismo, se plasman los resultados acordes al flujo masico del sustrato en proporción, obteniendo una gran similitud asertiva entre los cálculos matemáticos y la simulación en el software de ciclos termodinámicos donde los valores se presentan en la figura 18.

Figura 18 Resultados del modelo de simulación



La simulación realizada permite determinar valores aproximados de capacidad de generación en base a los datos previamente calculados de forma manual, el programa nos muestra que todo es ciclo no actúa como una bomba de calor o como un sistema de refrigeración, si no que actúa como un motor térmico que permite una eficiencia del 58.20 % de todo el ciclo y una eficiencia térmica del 29.46%, las temperaturas

máximas que se dan dentro del sistema provenientes de los sistemas de calentamiento otorgan valores de 500°C permitiéndonos obtener un vapor sobre saturado, con temperaturas mínimas de 50°C, los valores de presión máxima son de 3000 kPa y unos valores mínimos de 12.35 kPa, como se observa en la figura 25, muestra que tenemos un consumo de energía 5.26 kW mientras que obtiene una generación dentro del sistema de 1,462 kW que pueden ser enviados a sistemas de red.

11.3. Análisis los balances de energía del ciclo (entalpía, entropía y trabajo neto) para validar la capacidad de generación eléctrica.

La validación de la capacidad de generación eléctrica en sistemas basados en biomasa requiere el análisis detallado de los intercambios energéticos que ocurren en cada etapa del ciclo Rankine. Para ello, se consideran los valores de entalpía, entropía y trabajo neto en los puntos clave del sistema: caldera, turbina, condensador y bomba. Estos parámetros permiten cuantificar el rendimiento térmico real, identificar pérdidas por irreversibilidades y estimar la eficiencia global del proceso. La información obtenida es esencial para proyectar el comportamiento del sistema bajo condiciones operativas específicas, especialmente en contextos rurales como Jinotega y Estelí, donde la cascarilla de café se plantea como fuente primaria de calor. Este enfoque termodinámico aporta evidencia técnica sobre el potencial del ciclo para generar electricidad de forma sostenible a partir de residuos agroindustriales

Para determinar el umbral de generación a través de la fuente renovable denominada biomasa, se formularon datos matemáticos basados en la información recolectada de los centros de acopios de los departamentos del país tales como Jinotega y Estelí para tener el valor de generación de la planta en cuantos a los meses de mayor productividad.

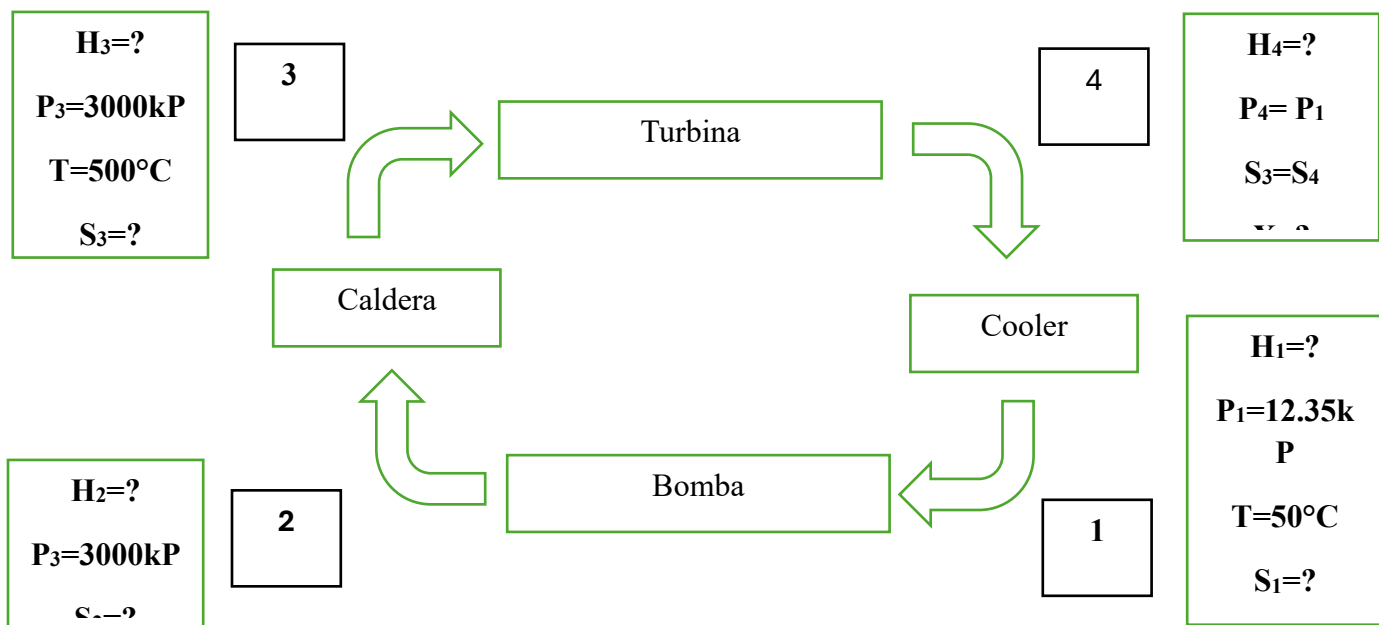
Donde tomamos las presiones estándar en ciclos termodinámicos para su implementación en la generación de energía

Datos

$T = 500^{\circ}\text{C}$ $P = 3000 \text{ kP}$ $P = 1462 \text{ kW}$

$T = 50^{\circ}\text{C}$ $P = 12.35 \text{ Kp}$ $X \text{ (calidad)?}$

Figura 19 Ciclo Rankine con datos recolectados



Estado 1

Con la información presentada en el de termodinámica de Cengel (2006) muestra datos para los cálculos de las entalpías y las entropías. La validación de la capacidad de generación eléctrica en el ciclo Rankine requiere el análisis de los intercambios energéticos que ocurren en cada componente del sistema. Para ello, se consideran las variaciones de entalpía, entropía y trabajo neto en los puntos clave del ciclo, lo que permite identificar el comportamiento

térmico del fluido de trabajo y estimar el rendimiento global del proceso. Este enfoque termodinámico facilita la evaluación de la eficiencia del sistema bajo condiciones operativas representativas, y aporta criterios técnicos para proyectar su aplicación en contextos rurales con disponibilidad de biomasa residual como fuente de calor.

En la tabla A - 5 de vapor de agua con la presión dada

12.35 kPA

Líquido saturado

Volumen específico es encontrado en la tabla ya antes mencionada

$$V = 0.001014 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$H_1 = 225.95 \text{ kJ/kg}$$

Estado 2

Ecuación 12 Trabajo de la bomba

$$W_B = V_{\text{especifico}} (P_2 - P_1)$$

$$W_B = (0.001014 \text{ m}^3/\text{kg}) (3000\text{kP} - 12.35 \text{ kPA}) = 3.02947 \text{ kJ/kg}$$

Balance de energía

Se determina por la diferencia de entalpia

Ecuación 13 Balance de energía en la bomba

$$W_B = H_2 - H_1 \quad \text{despeje de la fórmula} \quad H_2 = W_B + H_1$$

$$H_2 = 3.02947 \text{ kJ/kg} + 225.95 \text{ kJ/kg} = 228.98 \text{ kJ/kg}$$

Estado 3

Con los datos proporcionados en la tabla A-6 se determinan los siguientes valores. **Vapor sobrecalentado**

$$P = 3000\text{kP}$$

$$T = 500^\circ\text{C}$$

$$H_3 = 3457.2 \text{ kJ/kg}$$

$$S_3 = 7.2359 \text{ kJ/kg}$$

$$S_3 = S_4$$

Expansión isoentrópica

Estado 4

Mezcla saturada tabla A – 5

$$S_p = S_{\text{promedio}} (7.2359 \text{ kJ/kg})$$

Buscar entalpia en 4

$$S_f = S_{\text{entropia de líquido saturado}} (0.7549 \text{ kJ/kg})$$

$$P_4 = P_1 = P_4 (12.35 \text{ kPA})$$

$$S_4 = S_3 = S_4 (7.2359 \text{ kJ/kg})$$

X = ?

$$S_{fg} = S_{\text{diferencia de entropía}} (7.22522 \text{ kJ/kg})$$

Ecuación 14 Calidad en el estado 4

$$X = x = \frac{s_p - s_f}{s_{fg}} = X = \frac{(7.2359 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}) - (0.7549 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})}{(7.22522 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})} = 0.8936 = 89\%$$

Valores de tabla

$$H_f = 225.94 \text{ H}_{\text{evaporacion}} \quad X_{\text{calidad}} = 0.8936 = 89\% \quad H_{fg} = 2372.1 \text{ H}_{\text{fg diferencia de entropía}}$$

Ecuación 15 Entalpia 4

$$H_4 = H_f + X * H_{fg}$$

$$H_4 = (225.94) + (0.8936) * (2372.1) = 2345.64 \text{ kJ/kg}$$

Se determinó que la calidad a la salida de la bomba es de 0.89

Se determinará la eficiencia térmica del ciclo

Donde Q_L = calor de salida Q_H = calor de entrada η = eficiencia

Ecuación 16 Eficiencia térmica del ciclo

$$\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad \text{o} \quad \eta = \frac{W_{\text{neto}}}{Q_H}$$

Q_L Balance de energía en el condensador

Ecuación 17 Balance de energía en el condensador

$$H_4 = Q_L + H_1 = Q_L = H_4 - H_1 =$$

$$Q_L = (2345.64 \text{ kJ/kg} - 225.95 \text{ kJ/kg}) = 2119.7 \text{ kJ/kg}$$

Balance de energía en el condensador

Ecuación 18 Despeje para encontrar el calor de entrada

$$H_2 + Q_H = H_3 \quad Q_H = H_3 - H_2$$

$$Q_H = (3457.2 \text{ kJ/kg} - 228.96 \text{ kJ/kg}) = 3228.24 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_H = 3228.24 \text{ kJ/kg}$$

Aplicamos la ecuación 12 para encontrar la eficiencia térmica del ciclo

$$\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad \eta = 1 - \frac{2119.7}{3228.24} = 0.34 = 34\%$$

Para encontrar el flujo masico debemos encontrar primeramente el trabajo neto y lo logramos con la siguiente formula

$$W_{\text{neto de salida}} \quad \dot{m} = \text{flujo masico}$$

Ecuación 19 Trabajo neto del sistema

$$W_{\text{neto}} = Q_H - Q_L$$

$$W_{\text{neto}} = 3228.24 \text{ kJ/kg} - 2119.7 \text{ kJ/kg} = 1108.54 \text{ kJ/kg}$$

En el caso del flujo masico seria de la siguiente manera

$$\dot{w}_{\text{neto}} = \text{umbral de generación} = 1.7 \text{ MW} = 1700 \text{ kJ/s}$$

$$W_{\text{neto}} = 1108.54 \text{ kJ/kg}$$

Ecuación 20 Flujo masico del sistema

$$\dot{m} = \frac{\dot{w}_{\text{neto}}}{w_{\text{neto}}} =$$

$$\dot{m} = \frac{1700 \text{ kJ/s}}{1108.54 \text{ kJ/kg}} = 1.53 \text{ kg/s}$$

Conversiones para el cálculo de promedio de ingreso de biomasa a la hora y al día

$$1.53 \text{ kg/s} * 3600 \text{ s} = 5508 \text{ kg/h}$$

$$5508 \text{ kg/h} * 24 \text{ h} = 132192 \text{ kg/Día}$$

Se concluye que se cumplen las necesidades primarias del proyecto, dado que la aplicación rigurosa de las relaciones termodinámicas, incluyendo los balances de energía y las ecuaciones fundamentales del ciclo Rankine, permite validar la capacidad del sistema para transformar biomasa residual en energía eléctrica de manera eficiente. Este respaldo técnico constituye la base para proyectar la viabilidad operativa del sistema en contextos rurales con disponibilidad de cascarilla de café como recurso energético

La validación de la capacidad de generación eléctrica del ciclo Rankine se fundamenta en el análisis de los balances de energía que rigen su funcionamiento. Para ello, se aplican expresiones termodinámicas que permiten calcular el trabajo neto del sistema, considerando las variaciones de entalpía y entropía en cada componente. Fórmulas como la del trabajo de la bomba, el balance energético del condensador y la relación entre presión de vapor y temperatura —derivada de la ecuación de Clausius-Clapeyron— son esenciales para modelar con precisión el comportamiento del fluido de trabajo. Estas herramientas permiten identificar las transformaciones energéticas clave, cuantificar las pérdidas internas y proyectar la eficiencia térmica del sistema bajo condiciones operativas representativas. El uso riguroso de estas relaciones fortalece la base técnica del proyecto y aporta criterios sólidos para evaluar su viabilidad en contextos rurales con disponibilidad de biomasa residual.

11.4. Evaluación alternativas tecnológicas para la planta considerando criterios de viabilidad técnica, ambiental y normativa en energías renovables.

propuesta técnica de selección de tecnologías para la generación de energía eléctrica a base de biomasa

se muestran las tecnologías para el montaje del sistema de generación de energía eléctrica a base de biomasa como lo muestran las figuras siguientes

Caldera de vapor alimentada por biomasa serie DZL -Vapor

Con la información presentada por ZOZEN BOILER (2023) se plasma el catálogo de calderas para su respectiva selección de esta.

Figura 20 Caldera de vapor

Tabla 10 características de la caldera

Capacidad térmica
2-10 t/h
Presión laboral
1-2,5MPa
Temperatura de salida
170-225°C
Combustible disponible
Gránulos de moldeo de biomasa, astillas de madera, mazorcas de maíz, aserrín, cáscaras de palma, cáscara de arroz, etc.



Combustible disponible

Gránulos de moldeo de biomasa, astillas de madera, mazorcas de maíz, aserrín, cáscaras de palma, cáscara de arroz, etc.

La caldera de instalación rápida serie DZL es una caldera horizontal de rejilla de cadena de tubos de agua de tres pasos diseñada para la combustión de biomasa. La caldera presenta un diseño de tambor único con tubos de humo roscados para una superficie de calentamiento por convección y paredes enfriadas por agua en ambos lados del tambor para una superficie de calentamiento radiante. El equipo de combustión adopta una rejilla de cadena liviana y la caldera se entrega completa y de instalación rápida. El sistema de control eléctrico permite un control infinitamente variable de la parrilla, con alarma y protección de enclavamiento para parámetros críticos.

Paquete de turbina de vapor utilitaria SST-9000

Con la información presentada por SIEMENS (2024) se plasman los tipos de turbinas a seleccionar. Tecnología líder para una generación de energía eficiente, flexible y confiable

Las turbinas de vapor de la serie Siemens Energy SST-9000 son altamente confiables para su aplicación en islas convencionales de reactores avanzados de agua a presión en plantas de energía nuclear, con una potencia de hasta 1.900 MW.

La serie SST-9000 de media velocidad (25 vueltas por segundo) consta de una turbina de vapor saturado de alta presión (HD) de doble flujo y hasta tres turbinas de baja presión (ND) de doble flujo con rotores de disco de rueda encogidos. Las turbinas de baja presión de Siemens con discos de rueda encogidos representan una tecnología probada durante décadas. El resultado: no hay corrosión por fisuras bajo tensión y, por lo tanto, no es necesario sustituir el rotor de baja presión ni los discos de rueda durante toda su vida útil, excepto la vida útil.

Tabla 11 Turbina de vapor utilitaria SST-9000

Frecuencia (Hz)	50 o 60
Potencia (MW)	1.9
Temperatura de entrada (°C)	310 °C/590 °F

Presión de entrada (bar)	80
Longitud de la hoja de la última etapa (cm)	50 Hz: 117 cm - 183 cm 60 Hz: 107cm - 142 cm



Generador de turbina de vapor de condensación multietapa serie Yz60/ planta de energía

Con la información presentada por SIEMENS (2024) Se plasman los tipos de generadores eléctricos

Tabla 12 Generador de turbina de vapor de condensación multietapa serie Yz60

Información Básica - Estándar
Generador: Sincrónico
tipo de motor: Asíncrono
Frecuencia: 50hz
Frecuencia: 60hz
Voltaje: 380/430
Tipo de turbina: Condensación
Presión de admission:1-4mpa
Paquete de Transporte: Sea Worht
Especificación:1000-3000KW
Marca Comercial: CHENYANG

Origen: China

Código del HS: 8406811000

Capacidad de Producción: 50 Sets/Year

Figura 22 Turbina CHENYANG



Transformadores tipo núcleo

Con la información presentada por HITACHI ENERGY (2023) muestra los tipos de transformadores elevadores. Estos transformadores vienen en una variedad de tamaños y configuraciones, que consisten en dos componentes principales: el núcleo, que está hecho de alta permeabilidad, orientado a granos, acero eléctrico de silicio, en capas en piezas, y devanados, que están hechos de conductores de cobre



enrollados alrededor del núcleo, proporcionando entrada y salida eléctrica. Existen dos configuraciones básicas de núcleo y devanados: el núcleo y las formas de la carcasa.

En una potencia de tipo núcleo, los devanados cilíndricos de la pata cubren la pata del núcleo.

Alcance del producto:

- Calificaciones unitarias: hasta 1.500 MVA
- Tensión primaria: hasta 1.000 kV
- Tensión secundaria definida por el voltaje del generador
- Cambiadores de tomas de carga disponible
- Unifásico o trifásico

GRUNDFOS CM-A Bomba de agua hasta 6 m³/h

Con la información presentada por (Hidraulicart, 2024) se plasman los tipos de bombas para la planta de generación eléctrica. Las bombas GRUNDFOS de la serie CM-A A son bombas centrífugas multicelulares horizontales no autocebantes con entrada axial. Son compactos y silenciosos. El diseño del cierre mecánico les confiere una particular resistencia a los riesgos de funcionamiento en seco y el motor clase EFF 1 garantiza una alta eficiencia energética.

Bomba centrífuga multietapa horizontal confiable, compacta y de succión axial con puerto de succión axial y boquilla de salida radial. El eje, impulsores y cámaras están fabricados en acero inoxidable. Las piezas de entrada y descarga están fabricadas en hierro fundido. El sello mecánico es un sello de junta tórica desequilibrado de diseño especial. La conexión de las tuberías se realiza mediante roscas internas para tubos Whitworth, Rp (ISO 7/1).

Características:

Cabezal de bomba de hierro fundido

Piezas en contacto con líquido: acero AISI 304

Temperatura del líquido: -20°C a 90°C

Presión máxima de funcionamiento: 10 bar de -20°C a 40°C / 6 bar de 41°C a 90°C

Sello mecánico: AVBE (otro bajo pedido)

Clase de aislamiento: F

Clase de protección: IP55

Motor: Clase de eficiencia IE3 $\geq 0,75$ kW

Beneficios:

Bomba compacta, robusta y resistente a la corrosión.

Compacto y silencioso.

Bombas de excelente rendimiento, protegidas contra sobrecargas eléctricas involuntarias.

Condensador de vapor de planta

Figura 24 Bomba de agua hasta



Tipo Condensador

Figura 25 Condensador

Uso de vapor de la turbina del condensador

Otros atributos

Lugar del origen Shandong, China

Marca QLD

Número de Modelo QLDC

Name steam turbine condenser

spec steam turbine condenser

manufacturer steam turbine condenser

Embalaje y entrega

Paquete steam turbine condenser

Puerto Qingdao

Capacidad de suministro

Capacidad de suministro 5 Unidad/es per Month Turbina de vapor de condensador

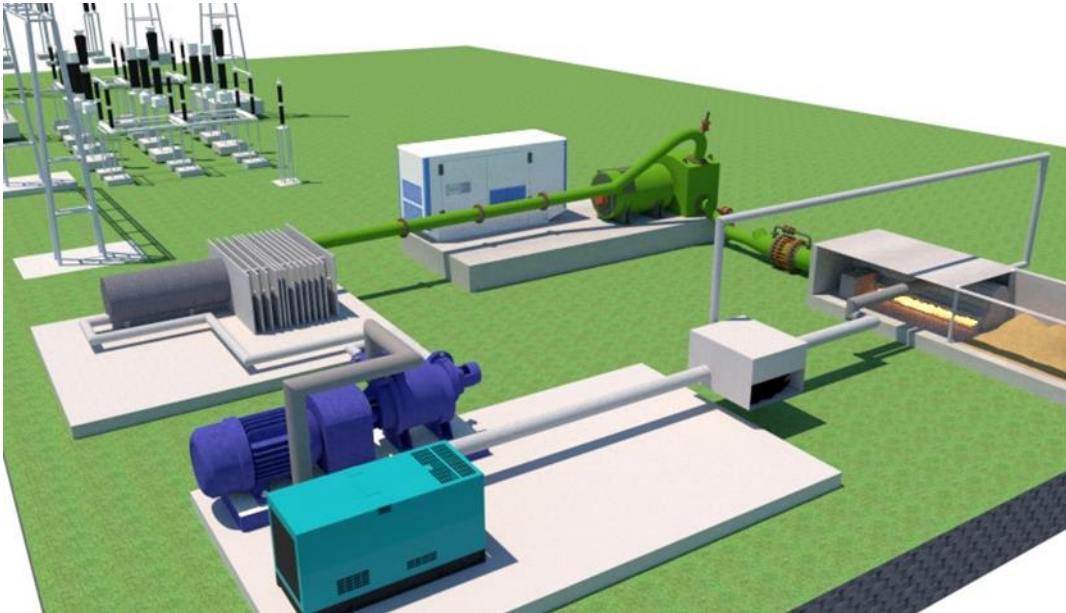


11.5 Modelado de la planta de generación eléctrica de biomasa a partir del sustrato de cascarilla de café

La planta y sus sistemas están estructurados con el objetivo de aprovechar al máximo la biomasa tratando de que entre un sustrato y de ese se obtenga energía eléctrica, desde los sistemas de calderas que es donde el ciclo inicia hasta los sistemas de distribución que es donde obtenemos el beneficio que nos otorga la materia prima.

La estructura resulta simple, diseñada a partir de las necesidades de cumplir con el ciclo de Rankine su estructura se centra en 4 sistemas principales, caldera tubular (1-2), turbina (2-3), Cooler o sistema de enfriamiento (3-4), y bomba de agua (4-1), luego de estos están los sistemas de precalentamiento para aprovechar y reducir el CO₂ que produce la quema de biomasa y por ultimo los sistemas de distribución a la red.

Figura 26 Ciclo de Rankine

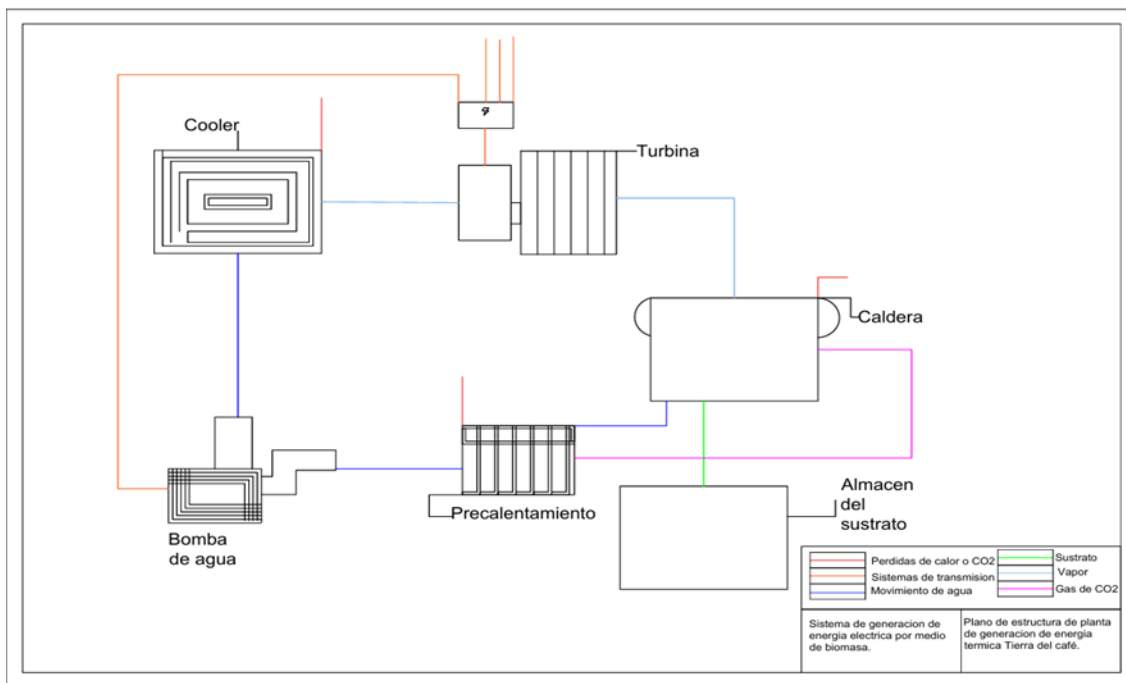


11.5.1 Plano de distribución de la planta

El plano que se muestra en la figura (27) muestra como estarán conectados los diversos componentes y los flujos de materia que suceden dentro del sistema, tanta entrada de materia, entradas de vapor, hasta las salidas de energía, y sistemas de pérdida de calor o CO₂ para facilitar la comprensión y distribución de los sistemas.

Las conexiones más notables suceden en la caldera donde entra el sustrato y de ella sale vapor hacia la turbina quien se encarga de aprovecharlo convirtiéndolo en energía mecánica y posteriormente a energía eléctrica, desde la caldera también se envían gases de CO2 hasta un sistema de precalentamiento en las tuberías que vienen desde la bomba hasta la caldera con el fin de facilitar el proceso.

Figura 27 Plano de interconexión



12. Conclusiones

A lo largo de esta investigación se buscó evaluar la viabilidad de un sistema de generación eléctrica mediante ciclo Rankine utilizando cascarilla de café en comunidades rurales de Jinotega y Estelí. El estudio permitió analizar aspectos técnicos, logísticos, económicos y ambientales, respondiendo de manera directa a los objetivos planteados y ofreciendo una visión integral sobre la pertinencia de esta alternativa energética.

En el plano técnico se demostró que el ciclo Rankine puede operar de manera estable con cascarilla de café, alcanzando eficiencias acordes a sistemas de pequeña escala siempre que se controle la humedad del combustible y se optimice la recuperación de calor. Esto confirma que la biomasa disponible puede sostener un balance energético adecuado y que el objetivo de validar la viabilidad técnica fue cumplido.

En relación con la disponibilidad de biomasa, se verificó que los volúmenes generados en cooperativas y beneficios de café son suficientes para abastecer una planta comunitaria. Sin embargo, la estacionalidad y la variabilidad interanual hacen necesario establecer protocolos de almacenamiento y contratos de suministro que garanticen continuidad. De esta manera, el objetivo de estimar la logística de acopio se cumplió parcialmente, pues, aunque la cantidad es suficiente, la gestión requiere medidas adicionales.

En el ámbito ambiental se comprobó que el sistema reduce emisiones en comparación con el diésel y permite valorizar un residuo agrícola, aportando beneficios claros a la sostenibilidad. No obstante, se requiere implementar controles de partículas y un manejo seguro de cenizas para cumplir con la normativa vigente. Así, el objetivo de analizar los impactos ambientales se cumplió, con la condición de aplicar medidas de mitigación adecuadas.

Finalmente, se propusieron lineamientos de implementación basados en modelos cooperativos, mantenimiento preventivo y formación técnica para operadores locales. Estos lineamientos ofrecen una ruta práctica para asegurar la sostenibilidad del proyecto y cumplen con el objetivo de diseñar estrategias de gestión aplicables a productores de café en Jinotega y Estelí.

El estudio deja en evidencia que la generación eléctrica con cascarilla de café mediante ciclo Rankine es una alternativa viable y con beneficios económicos, ambientales y sociales

relevantes. Sin embargo, también muestra limitaciones relacionadas con la estacionalidad del combustible, la necesidad de validación en planta piloto y la importancia de asegurar financiamiento adecuado. Futuras investigaciones deberían enfocarse en optimizar el pretratamiento del combustible, validar emisiones en campo y explorar modelos financieros innovadores que fortalezcan la competitividad del sistema.

Este proceso permitió comprender que el rigor técnico adquiere verdadero sentido cuando se traduce en soluciones útiles para las comunidades. La investigación no solo aporta cálculos y modelos, sino que abre un camino concreto hacia la sostenibilidad energética, reforzando la capacidad de los productores de café para generar valor agregado y resiliencia. Con ello, se concluye que cada objetivo planteado fue abordado y cumplido en la medida esperada, consolidando la relevancia académica, económica y práctica de este trabajo.

13. Recomendaciones

Productores de café, se recomienda aprovechar la cascarilla como recurso energético, organizando sistemas de acopio y almacenamiento que reduzcan la estacionalidad y garanticen continuidad en el suministro. Es importante que se fortalezcan las capacidades técnicas de los miembros de las cooperativas, de modo que puedan participar activamente en la operación y mantenimiento de las plantas de generación.

Cooperativas y asociaciones locales, se les sugiere establecer modelos de gestión compartida que aseguren la sostenibilidad del proyecto. Esto implica definir responsabilidades claras en la logística de biomasa, crear acuerdos de suministro entre beneficiarios y productores, y promover la capacitación comunitaria en temas de energía renovable y gestión ambiental.

Instituciones gubernamentales y entes reguladores, se recomienda apoyar iniciativas de generación con biomasa mediante políticas de incentivo, asistencia técnica y financiamiento. Así mismo, es fundamental garantizar el cumplimiento de normativas ambientales, promoviendo tecnologías de control de emisiones y disposición adecuada de cenizas.

Comunidad universitaria, se les sugiere continuar con estudios piloto que validen en campo los parámetros técnicos y ambientales, así como explorar mejoras en el pretratamiento de la cascarilla (secado, peletizado) y en el diseño de sistemas de combustión adaptados a pequeña escala. Estos aportes fortalecerán la base científica y tecnológica para futuras implementaciones.

Comunidades rurales usuarias de la energía, se recomienda involucrarse en los procesos de capacitación y gestión, reconociendo que la sostenibilidad del sistema depende de la participación de los beneficiarios. La apropiación social del proyecto permitirá que la energía generada no solo sea un recurso técnico, sino también un motor de desarrollo comunitario.

14. Referencias Bibliográficas

- Aráuz Sequeira, Y. E., & López Chavarría., M. A. (2008). Aprovechamiento de la Pulpa de Café Como Fuente de Energía Eléctrica en la Comunidad de San Ramón, Municipio de Matagalpa. <https://ribuni.uni.edu.ni/1431/1/60204.pdf>
- Castro, B. J. (2012). <https://repositorio.unan.edu.ni/id/eprint/7156/1/6587.pdf>
- Cengel , Y. (2006). Termodinámica. (q. edicion, Ed.) Nevada, EEUU.
- Dicovskiy , L. M., Pichardo, C. B., Rodríguez Zeledón, A. N., Martínez Centeno, B. J., & Rodríguez Espinoza, K. d. (2014). alidación de briquetas elaboradas con cascarilla de café para el reemplazo de leña en la producción de rosquillas. Revista Higo, 4(1), 10–19. Universidad Nacional de Ingeniería. <https://ribuni.uni.edu.ni/761/1/160-266-1-PB.pdf>
- Frias, R. M. (2019). PROPUESTA DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A PARTIR DE. Chiclayo, Perú.
- García Rivas , S. A. (2016). Generación de energía eléctrica a partir de la cascarilla de arroz y la pulpa de café. <https://ribuni.uni.edu.ni/106/>
- McGRAW-HILL BOOK COMPANY. (1991). La Ingenieria de la cinetica quimica. ciudad de mexico, CEDEMEX, Mexico: COMPARIA EDITORIAL CONTINENTAL, S. A. DE C. V.CALLDETLALPANNÚM. 5022, MÉx1co22, D. F.
- MEM (Ministerio de Energia y Minas). (2020). nforme de la matriz energética nacional. Gobierno de Nicaragua. <https://mem.gob.gt/>
- Qualitative Reasoning Group. (11 de 5 de 2012). termodinamicaparaiq.blogspot.com. <https://termodinamicaparaiq.blogspot.com/p/cyclepad.html>
- Rivera, J. A. (2019). https://www.mateconferences.org/articles/mateconf/pdf/2019/42/mateconf_acmme2019_05002.pdf
- Serna, J. A. (Junio de 2018). http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-100X2018000100037
- Zeledón Rodríguez, J. D., Gahona Zeledón, J. J., & Herrera Pérez, M. J. (2017). Desarrollo de macetas biodegradables a partir de cascarilla de café para la producción de plántulas de hortalizas en la ciudad de Estelí, Nicaragua [Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería. <https://ribuni.uni.edu.ni/2374/>
- Zueco, J. (2001). estudio de instalaciones termicas empleando soporte informatico cyclepad. Carolina del norte . <https://www.qrg.northwestern.edu/thermo/design-library/rankine/rankine.html>

15. Anexos

Figura 28 Cascarilla de café



Figura 29 Cascarilla de café





¡Universidad del Pueblo y para el Pueblo!



