

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO DE MEZCLAS DE GLICEROL
RESIDUAL GENERADO EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL CON BIOMASA
DE PROCESOS AGRÍCOLAS PARA MEZCLAS COMBUSTIBLES COMO USO
ALTERNATIVO DE SUBPRODUCTOS RELACIONADOS CON PROCESOS
AGROINDUSTRIALES.

Informe de Proyecto de Graduación sometido a la consideración de la Escuela de
Ingeniería Química como requisito para optar por el grado de Licenciatura en
Ingeniería Química

María José Ureña Salas

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio Brenes
San José, Costa Rica
2019

A mi familia, mi novio y mis amigos,
que han hecho de esta etapa de mi vida
una experiencia llena de alegría.

RESUMEN

Este proyecto se enfocó en determinar los poderes caloríficos de mezclas de biomasa con glicerol crudo con el fin de dar una aplicabilidad a ambos compuestos correspondientes a residuos o productos secundarios. La selección de la biomasa se llevó a cabo a partir de una matriz de selección que contempla la capacidad calorífica, la humedad y la disponibilidad del material, donde el resultante de mayor puntuación corresponde a la cascarilla de coquito de la palma aceitera.

Para la determinación del poder calorífico se llevó a cabo en el Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica, a partir de la mezcla inicial de glicerol puro, agua y cascarilla de coquito, para definir los valores en el caso más crítico, donde el glicerol no presente restos de metanol que puedan favorecer la combustión.

En el primer ensayo experimental se encontró un error sistemático en los valores experimentales relacionado con el equipo, lo que resultó en una no normalidad de los datos. Para corregir el error sistemático se incrementó la estandarización del equipo utilizando ácido benzoico y generando una segunda corrida experimental.

Se utilizó la metodología de regresión lineal múltiple para el análisis de los datos y se encontró un ajuste de 59.58%, luego se modeló un ajuste a partir de Red Neuronal con fines ilustrativos donde el modelo encontrado presentó un ajuste de 65.65%.

Se determinó el poder calorífico de la muestra de glicerol crudo de la empresa Energías Biodegradables y se determinó un poder calorífico de 20.153 MJ/kg con una desviación estándar de 0.323 MJ/kg.

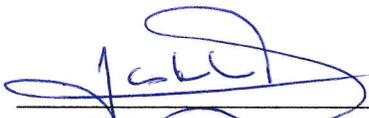
Determinación del poder calorífico de mezclas de glicerol residual generado en la producción de biodiesel con biomasa de procesos agrícolas para mezclas combustibles como uso alternativo de subproductos relacionados con procesos agroindustriales.

Proyecto de graduación presentado ante la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica como requisito final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Química.

Sustentante

María José Ureña Salas

Aprobado por:



PhD. Esteban Durán Herrera

Presidente del tribunal

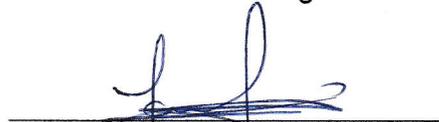
Director Escuela de Ingeniería Química



M.Sc. Adolfo Ulate Brenes

Director del Proyecto

Profesor Escuela de Ingeniería Química



M.Sc. Lautaro Ramírez Varas

Lector del Proyecto

Profesor Escuela de Ingeniería Química



Lic. Esteban Gamboa Gamboa

Lector del Proyecto

Profesor Escuela de Ingeniería Química



Lic. Juliana Da Luz Castro

Lectora de Objetivos

Lic. Juliana Da Luz Castro
Profesora Escuela de Ingeniería Química

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Proceso de generación de biodiesel y glicerol	2
1.2 Glicerol como subproducto	4
1.3 Tipos de biomasa.....	7
CAPÍTULO 2. SELECCIÓN DE BIOMASA.....	9
2.1 Características energéticas de la biomasa, humedad y poder calorífico.	9
2.2 Características químicas de la biomasa	12
2.3 Disponibilidad y sostenibilidad de la biomasa	16
2.4 Características físicas de la biomasa.....	19
2.5 Herramienta de selección de la biomasa	22
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	25
3.1 Objetivo General	25
3.2 Objetivos Específicos.....	25
3.3 Materiales y Equipo	25
3.4 Diagrama del Equipo	27
3.5 Determinación de cantidad de agua y metanol presente en el glicerol crudo	27
3.6 Determinación del porcentaje de agua y poder calorífico de la cascarilla de coquito de palma aceitera.....	28
3.7 Preparación y determinación del poder calorífico de mezclas de cascarilla de coquito, glicerol puro y agua.....	29
3.8 Preparación y determinación de poder calorífico de mezclas de cascarilla de coquito con glicerol crudo.	32
3.9 Análisis de los datos de Poder Calorífico.....	34

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	35
4.1 Propiedades del glicerol crudo.	35
4.2 Porcentaje de humedad y poder calorífico de la cascarilla de coquito.	36
4.3 Poder Calorífico de mezclas glicerol puro, agua y cascarilla de coquito.	37
4.3.1 Regresión Lineal Múltiple.....	43
4.3.2 Regresión lineal múltiple considerando la interacción X_{agua} y X_{glicerol}	62
4.3.3 Modelo predictivo a partir de Red Neuronal.	66
4.4 Mezcla de glicerol crudo con cascarilla de coquito.....	76
CAPÍTULO 5. ESCALAMIENTO PARA PREPARACIÓN DE LA MEZCLA A NIVEL PLANTA PILOTO	79
5.1 Normativa en el país sobre el uso de biomasa como combustible.....	79
5.2 Base de cálculo para la determinación de cantidad de mezcla a procesar. .	80
5.3 Operaciones unitarias para la preparación de la mezcla.....	83
5.3.1 Molienda del coquito de palma.....	83
5.2.2 Mezclado de la cascarilla de coquito con glicerol crudo.....	97
5.2.3 Peletización de las mezclas	103
5.4 Diagrama de flujo del proceso.....	108
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	109
REFERENCIAS	111
NOMENCLATURA	119
APENDICES.....	122

ÍNICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Reacción de transesterificación mediante metanol en un medio básico, también conocida como metanólisis (Torossi Baudiono, 2006)	2
Figura 2.1 Cascarilla de café (Centro de Investigación y desarrollo de proyectos energéticos, 2017).	19
Figura 2.2 Cascarilla de arroz (López, 2015).	20
Figura 2.3 Cascarilla de coquito de palma africana (Human & Eco, 2017).	20
Figura 2.4 Fibra de mesocarpio (FGV, 2017).	21
Figura 2.5 Bagazo (Organización Radiofónica de Oxaca, 2016).....	21
Figura 2.6 Pinzote (Chiaki, 2017).	22
Figura 3.1 Equipo de bomba calorimétrica con termómetro digital de precisión y unidad de ignición Parr (Parr Instrument Company, 2013).	27
Figura 3.2 Procedimiento para mezcla de cascarilla de coquito con glicerol puro y agua.	31
Figura 3.3 Preparación de muestras de glicerol crudo.	32
Figura 3.4. Muestreo del glicerol crudo para la preparación de mezcla con cascarilla de coquito.....	33
Figura 4.1. Prueba de Normalidad para los valores de poder calorífico en MJ/kg (Elaboración propia en software Minitab 17).	44
Figura 4.2. Gráfico de valores justados contra los residuos (Elaboración propia en software Minitab 17).	49
Figura 4.3 Poder calorífico de mezclas cascarilla de coquito, glicerol puro y agua	49
Figura 4.4 Poder calorífico de las estandarizaciones según la composición de agua en la muestra.	50
Figura 4.5 Poder calorífico de las estandarizaciones según su orden de determinación cronológica, cuya desviación estándar corresponde a 0.717 MJ/kg.	51
Figura 4.6. Prueba de normalidad (Elaboración propia en software Minitab 17)..	54

Figura 4.7. Gráfico de valores ajustados contra los residuos (Elaboración propia en software Minitab 17).	58
Figura 4.8 Poder calorífico de mezclas luego de ajustar secuencia de estandarizaciones (Elaboración propia).	59
Figura 4.9 Estandarizaciones según el porcentaje de agua presente en la mezcla (Elaboración propia).	60
Figura 4.10 Poder calorífico de las estandarizaciones según su orden cronológico, cuya desviación estándar corresponde a 0.025 MJ/kg (Elaboración propia).....	61
Figura 4.11 Gráfico de valores ajustados contra los residuos (Elaboración propia en software Minitab 17).	66
Figura 4.12 Modelos de red neuronal (Elaboración propia).	67
Figura 4.13 Planteamiento del modelo de red neuronal (Elaboración propia en el software JMP).....	69
Figura 4.14 Perfiles predictivos para los modelos encontrados (Elaboración propia con el software JMP)	73
Figura 4.15 Continuación de los perfiles predictivos para los modelos encontrados (Elaboración propia con el software JMP).	74
Figura 5.1 Molino de martillos (Uribe Pérez & Lozano Ramírez, 2014).	86
Figura 5.2 Radio de giro del martillo (Uribe Pérez & Lozano Ramírez, 2014)	88
Figura 5.3 Sistema mezclador de lecho fluidizado (Teunou & Poncelet, 2002)	97
Figura 5.4 Diagrama de clasificación de polvos fluidizados por aire (Geldart, 1973).	98
Figura 5.5 Peletizadora de molde de anillo. 1. Base del sistema, 2. Salida de material, 3. Alimentador, 4. Molde de anillo, 5. Eje de rotación, 6. Motor (Wei, Tabil, Rongfei, & Dejun, 2016).	105
Figura 5.6 Proceso de peletización en el molde de anillo. 1. Rodillo, 2. Molde de anillo, 3. Zona de extrusión, 4. Zona de compresión, 5. Zona de alimentación (Wei, Tabil, Rongfei, & Dejun, 2016).....	105

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.1 Productores de biodiesel en Costa Rica (García A. , 2013).	4
Cuadro 2.1 Contenido de humedad y poder calorífico inferior para los residuos agrícolas orgánicos de los tres sectores agrícolas a contemplar.	11
Cuadro 2.2 Análisis último, porcentajes en base seca.	12
Cuadro 2.3 Composición química de la biomasa.	13
Cuadro 2.4 Análisis próximo de la biomasa. Carbono fijo, material volátil y cenizas presentes.	14
Cuadro 2.5 Composición de ceniza.....	15
Cuadro 2.6 Tiempos de cosecha según el sector agrícola para diferentes zonas de cultivo (ICAFE y UEEM, 2015), (CONARROZ COSTA RICA, 2015), (CANAPALMA, 2016).	16
Cuadro 2.7 Producción según sector, porcentaje de residuo según materia prima o factor de generación de residuos, precio de residuo.....	17
Cuadro 2.8 Aplicaciones actuales para la biomasa.....	18
Cuadro 2.9 Importancia de cada parámetro de selección de biomasa.....	23
Cuadro 2.10 Matriz de selección de biomasa	24
Cuadro 3.1 Materiales y reactivos utilizados para la determinación del poder calorífico de mezclas de cascarilla de coquito con glicerol crudo.	26
Cuadro 3.2 Equipo utilizado para la determinación del poder calorífico de mezclas de cascarilla de coquito con glicerol crudo.....	26
Cuadro 3.3. Porcentaje másico del menor componente en la mezcla.....	30
Cuadro 4.1 Resultados de corridas preliminares para la determinación del porcentaje másico agua y metanol en el glicerol crudo.....	35
Cuadro 4.2 Resultados del porcentaje másico agua y metanol en el glicerol crudo.	36
Cuadro 4.3 Resultado para el porcentaje de humedad de la cascarilla de coquito en base seca.....	36
Cuadro 4.4 Resultado para el poder calorífico de la cascarilla de coquito.	37

Cuadro 4.5 Fracciones másicas para las mezclas glicerol puro, agua y cascarilla de coquito.....	38
Cuadro 4.6. Resultados del Poder Calorífico Inferior para las mezclas de biomasa, agua y glicerol puro (Elaboración propia).....	42
Cuadro 4.7. Resultados del análisis estadístico de medida de ajuste del modelo (Elaboración propia).....	46
Cuadro 4.8. Resultados del análisis de coeficientes de la regresión lineal (Elaboración propia).....	47
Cuadro 4.9. Análisis de Varianza de la regresión lineal (Elaboración propia).....	48
Cuadro 4.10. Fracciones másicas para las mezclas glicerol puro, agua y cascarilla de coquito con la estandarización para cada dato.....	52
Cuadro 4.11. Resultado de las corridas bajo la nueva metodología planteada. ...	53
Cuadro 4.12. Análisis estadístico de los valores de la medida del ajuste de los datos al modelo encontrado (Elaboración propia).....	55
Cuadro 4.13. Resultados para el análisis de coeficientes generado en el software Minitab 17 (Elaboración propia).....	56
Cuadro 4.14. Análisis de Varianza generado en el software Minitab 17 (Elaboración propia).....	57
Cuadro 4.15 Análisis estadístico de los valores de la medida del ajuste de los datos al modelo encontrado (Elaboración propia).....	63
Cuadro 4.16. Resultados para el análisis de coeficientes generado en el software Minitab 17 (Elaboración propia).....	64
Cuadro 4.17. Análisis de Varianza generado en el software Minitab 17 (Elaboración propia).....	65
Cuadro 4.18 Determinación del modelo de Red Neuronal, valores de coeficientes de determinación y análisis de sobre ajuste (Elaboración propia con el software JMP 13).....	71
Cuadro 4.19 Determinación del modelo de Red Neuronal, valores de errores cuadráticos medios (Elaboración propia con el software JMP 13).....	72
Cuadro 4.20. Resultados para el modelo seleccionado.....	75

Cuadro 4.21. Poder calorífico de la mezcla agua, glicerol crudo y cascarilla de coquito.	77
Cuadro 4.22 Poder calorífico de las estandarizaciones.	77
Cuadro 5.1 Horas de operación de la caldera de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica en el periodo de un año (Chacón Villalobos, 2017).	81
Cuadro 5.2 Resultados de parámetros de calor considerados en el balance de energía utilizando la base de cálculo de 150 horas para la caldera del Laboratorio de la Escuela de Ingeniería Química (Chacón Villalobos, 2017).....	82
Cuadro 5.3 Parámetros de diseño para el molino de viento.....	96
Cuadro 5.4. Parámetros de diseño del lecho fluidizado para la mezcla de la cascarilla de coquito con glicerol crudo.....	103
Cuadro 5.5. Parámetros de diseño de la peletizadora de molde de anillo para la mezcla de la cascarilla de coquito con glicerol crudo.....	108

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Costa Rica desde hace varios años se ha centrado en alcanzar un modelo de generación de energía basado en fuentes renovables, logrando satisfacer la demanda energética del país casi en su totalidad. Gracias a esto se encuentra dentro de los países que tienen como objetivo llegar a un modelo de desarrollo sostenible, donde se genera energía sin comprometer la capacidad de generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades energéticas. Al lograr este objetivo el país se puede beneficiar en tres aspectos principales: crecimiento económico, progreso social y el uso racional de recursos. Debido a esto la investigación y desarrollo de nuevas fuentes renovables es un área importante que logra mantener al país en esta dirección (Chávez , 2006).

Dentro del desarrollo de tecnologías basadas en energías renovables se presenta la necesidad de encontrar materia prima que implique un fácil tratamiento, alta capacidad de generación energética y que mantengan un consumo equilibrado. Para que se logre un desarrollo sostenible, se ha presentado la iniciativa basada en el aprovechamiento de residuos de otros procesos en los que normalmente su desecho puede implicar contaminación al ambiente. En el caso del biodiesel es una fuente renovable con gran potencial que ha llegado a tasas de producción altas en los últimos años, sin embargo, esto ha aumentado también la producción de glicerol, residuo del proceso, el cual no posee el nivel de pureza exigido por su aplicación a nivel industrial.

Basado en esta afirmación, el presente proyecto plantea dar una finalidad energética a este glicerol residual, buscando ser utilizado como aditivo a combustibles que presenten un mayor poder calorífico. Se define entonces como objetivo determinar el poder calorífico de mezclas de este glicerol crudo como aditivo a otro combustible, seleccionando lo que es la biomasa residual de la industria agrícola, para incorporar la aplicabilidad de residuos industriales.

1.1 Proceso de generación de biodiesel y glicerol

El biodiesel se define como un número de variedades de combustibles oxigenados basados en ésteres, procesado a partir de fuentes biológicas como aceites orgánicos y grasas, que reaccionan con la ayuda de catalizadores. Comúnmente se utiliza metanol o etanol como reactivos, siendo el primero de mayor uso debido a un menor costo. A esta reacción se le llama transesterificación, y es uno de los cuatro métodos utilizados para disminuir la viscosidad del aceite vegetal para poder ser utilizado como combustible. Otros métodos son la dilución, micro-emulsificación y pirolisis.

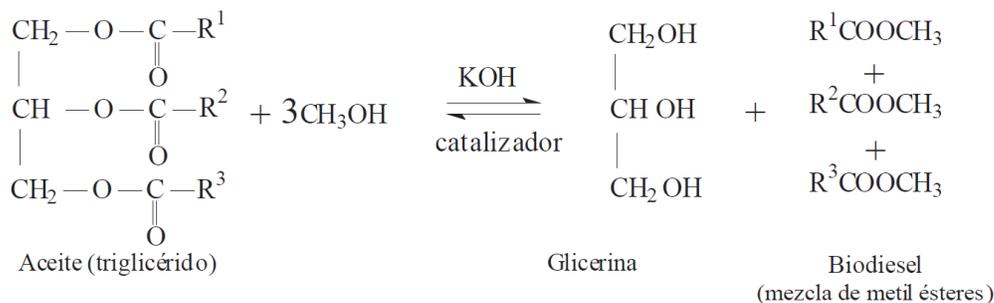


Figura 1.1 Reacción de transesterificación mediante metanol en un medio básico, también conocida como metanólisis (Torossi Baudiono, 2006)

En Costa Rica las principales materias primas con mayor potencial para la producción de biodiesel son la palma africana, aceites usados y otras fuentes en estudio como el aceite de higuera, *Jatropha* y microalgas (García A. , 2013).

La Crisis Internacional de los Energéticos ocurrida en el año 1979 hizo que el país impulsara un programa en el que se incluyó el uso de gasohol como combustible, programa que operó durante diecinueve meses en el año 1981. Al inicio en los primeros dos meses se vendió más de 200 m³ de gasolina con mezcla de 20% etanol y para los últimos meses se logró superar esa misma cantidad para llegar a un valor de ventas de 13 000 m³. Sin embargo, el programa cerró y cesó la venta

de la mezcla, debido principalmente a la falta de infraestructuras adecuadas, inseguridad sobre el efecto que presentara la mezcla en los vehículos, y además de una campaña que se desarrolló en contra del proyecto por parte de los grupos de interés (Chávez , 2006).

Para el año 2002 el Gobierno de la República realiza el movimiento para incorporar el etanol a las gasolinas, generado por un incremento marcado en el precio de combustibles, además de una concientización respecto al cuidado del medio ambiente. A partir de estos movimientos, para el año 2005 todas las gasolinas mezcladas con etanol anhidro fueron propuestas para su comercialización, sin embargo, la única acción correcta resultó en la venta al público de etanol anhidro a partir del 10 de febrero del siguiente año (Chávez , 2006).

En el 2006 se presenta en el Plan Nacional de Desarrollo una serie de acciones para lograr impulsar el desarrollo de biocombustibles para el cual en febrero del 2008 se emitió el Programa Nacional de Biocombustibles (PNB) el cual presentaba como objetivos sustituir en forma progresiva los combustibles fósiles por otras fuentes de energía renovable, además de propiciar el desarrollo social en zonas vulnerables, reactivando el sector agrícola a partir de cultivos de productos agro energéticos y desarrollar una industria de biocombustibles competitiva (MAG-MINAE, 2008).

Posteriormente en el Plan Nacional de Desarrollo 2011-2014 se estableció la meta de implementar el PNB donde se pretendió disminuir un 5% el combustible fósil en la flotilla vehicular y transporte público. El fin de la implementación se basó en la obtención de una economía baja en emisiones de gases con efecto invernadero (García A. , 2013).

En la actualidad la producción nacional de biodiesel está desarrollada por tres compañías: Energías Biodegradables S.A, Biodiesel H&M y CoopeVictoria. Otras

empresas se encuentran en la iniciativa de producción, pero sin lograr un lugar estable en el mercado. En el caso de la empresa Dieselloverde S.A. cuenta con una planta que produce 3.4 m³ de diésel por día y la empresa Compañía Coto 54 S.A y Quivel tienen instalaciones que pueden llegar a capacidades de 95.4 m³ de diésel por día (García A. , 2013).

Cuadro 1.1 Productores de biodiesel en Costa Rica (García A. , 2013).

Productor	Ubicación	Materia Prima	Producción (bbl/año)	Capacidad Instalada (bbl/año)
Energías Biodegradables S.A	El Alto, Ochomogo	Aceites usados	22 958 - 34 436	34 438
CoopeVictoria R.L	San Isidro, Grecia	Aceites usados	490	1 132

1.2 Glicerol como subproducto

Como se indicó anteriormente, el glicerol es un subproducto importante de la producción de biodiesel, donde aproximadamente 4.53 kg de glicerol crudo es producido por cada 45 kg de biodiesel. El porcentaje de pureza que posee este glicerol ronda entre el 80% y 88%, dependiendo del tipo de aceite o grasa a utilizar, donde normalmente se presentan residuos de jabones, aceite, metanol o etanol (dependiendo del proceso), además de residuos propios del aceite. En el caso del glicerol crudo a utilizar en el presente proyecto, el aceite proviene de restaurantes entre otros lugares, por lo que además presentan un contenido de agua.

El porcentaje de pureza del glicerol crudo no es apropiado en aplicaciones dentro de la industria farmacéutica, que se requiere de un 99% de pureza. Este porcentaje

también es requerido en áreas como la alimentaria y la cosmética. Los grados de pureza del glicerol se pueden dividir en tres tipos; grado I, II, III, donde el grado I indica un porcentaje del 99.5%, el II de 96% a 99.5% y el III 99.5% a 99.7% (Ayoub & Abdullah, 2012).

A nivel general, las aplicaciones para glicerol altamente refinado son mayores a las que se encuentran para su estado crudo, principalmente por su versatilidad a nivel químico, además de su no toxicidad y compuestos biodegradables. Esta preferencia se da incluso por el costo que implica la purificación de glicerol crudo. En la industria farmacéutica su principal aplicación es como disolvente, donde se humedece e incrementa la viscosidad a diferentes drogas. También se utiliza en jarabes para la tos, medicinas para infección de oídos y en cápsulas de antibióticos, entre otros. A nivel cosmético se utiliza como lubricante, mejorando la suavidad y humectación en productos para la piel y cabello. En las pastas de dientes el glicerol es el mayor ingrediente que previene que éstas se endurezcan o se sequen. A nivel alimenticio se basa en un compuesto que permite la preservación de bebidas, además de actuar como un solvente endulzante (Tan, Aziz, & Aroua, 2013).

El uso del glicerol crudo ha sido de estudio desde hace varios años, donde se busca su aplicabilidad en procesos tanto energéticos como de generación de productos químicos. Un ejemplo es la producción de productos que normalmente son generados a partir de propileno, el cual es derivado del petróleo crudo, al utilizar, en vez de este, el glicerol crudo de la producción de biodiesel, manufacturando químicos como el ácido acrílico, acroleína, entre otros a partir de un proceso de deshidratación (Jernigan, Hansrote, Ramey, Richardson, & Seavy, 2010).

Estudios previos demuestran que a pesar de que el glicerol cuenta con un poder calorífico bajo y una alta temperatura de ignición, se puede realizar su combustión. Sin embargo, una incorrecta combustión directa del glicerol puede llevar a generar

gases tóxicos, como la acroleína, por lo que investigaciones se han centrado en desarrollar equipos que generen una combustión eficiente, a partir de reducción de la energía de precalentamiento por métodos de como la atomización (Jiang & Agrawal, 2014).

Otra aplicación del glicerol crudo que se encuentra bajo estudio corresponde a su papel en el proceso de fermentación, el cual puede ser utilizado para producir alcohol o hidrógeno, a partir de procesos bioquímicos utilizando bacterias u hongos (Liu, Ruhdal, & Workman, 2012).

El uso del glicerol crudo en conjunto con otros residuos se ha investigado en el proceso de co-digestión, donde la descomposición de glicerol crudo junto con biomasa como lodos y estiércol de aguas residuales, por una comunidad microbiana (Baba, y otros, 2013). Otro proceso corresponde a la co-gasificación a partir de mezcla de glicerol con biomasa lignocelulósica, donde a partir de la descomposición termoquímica se generan mezclas de hidrógeno, dióxido de carbono, metano y gases de hidrocarburo ligeros (Đurišić-Mladenović, Škrbić, & Zabaniotou, 2016).

Actualmente, la Universidad de Costa Rica, el grupo del profesor Adolfo Ulate, está investigando diferentes usos del glicerol para aplicaciones en procesos químicos, como lo que es el efecto de la glicerina en la producción de etanol a partir de la fermentación con miel de purga (Valenciano, 2018), el uso de glicerol en la producción de hidrógeno junto con un catalizador $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Waterhouse, 2019) además de aplicaciones de otros subproductos considerados residuos, como la evaluación de un catalizador a partir de níquel y alúmina para la producción de hidrógeno (Cartín Muñoz, 2018), y la producción de azúcares como sustrato en la reacción de reformado en fase acuosa (APR) a partir de rastrojo de piña (Jaikel, 2019).

1.3 Tipos de biomasa

Según Coto (2013) existen cuatro tipos de biomasa; la natural, residual seca, residual húmeda y la de cultivos energéticos:

- *Biomasa natural*: es la que es producida por la naturaleza sin intervención humana.

Como ejemplo se presenta lo que sería la leña, la cual procede de árboles que crecen de manera espontánea en tierras no cultivadas. Su uso con fines energéticos no es el deseado, ya que implica la destrucción de ecosistemas (Coto, 2013).

- *Biomasa residual seca*: residuos orgánicos que se pueden obtener de diferentes actividades agrícolas o de transformación de madera, con poco contenido húmedo. Pueden ser utilizadas para la generación de energía por medio de su combustión sin generar un impacto grande en el medio ambiente (Coto, 2013).

- *Biomasa residual húmeda*: residuos orgánicos con mayor contenido de humedad que pueden provenir de residuos ganaderos, urbanos, e industriales biodegradables, además pueden ser utilizadas para la generación de energía a partir de la producción de biogases (Coto, 2013).

- *Cultivos energéticos*: cultivos con la finalidad de ser utilizados exclusivamente para la generación de energía al ser transformados en biocombustibles. Ejemplos incluyen microalgas oleoginosas, coco, soja, palma africana, caña de azúcar, higuera, remolacha y jatropha, entre otras (Coto, 2013).

El tipo de masa de interés en este caso corresponde al uso de biomasa residual húmeda, proveniente de procesos agrícolas. En el país se presentan la palma africana, la caña de azúcar, café, banano, la piña y el arroz como los sectores agrícolas que generan una diversidad de residuos que pueden ser utilizados para fines energéticos. Su capacidad para generar energía de forma eficiente depende directamente de sus propiedades térmicas que van de la mano con sus porcentajes de humedad y cantidad de lignina, entre otros aspectos técnicos a considerar.

CAPÍTULO 2. SELECCIÓN DE BIOMASA

Para llevar a cabo la selección de biomasa para utilizar como fuente de energía para el proceso de combustión es necesario tomar en cuenta varios aspectos importantes que determinan la capacidad de la biomasa para generar energía de forma eficiente y sostenible. El primer aspecto importante corresponde al porcentaje de humedad y poder calorífico que posee la biomasa, los cuales están directamente relacionados con el proceso de combustión. El segundo aspecto importante corresponde a las propiedades químicas o composición presente en la biomasa, donde se realiza comúnmente un análisis próximo y un análisis último (ver sección 3.2) que permite determinar el comportamiento de la biomasa durante el proceso de combustión. El tercer aspecto corresponde a las propiedades físicas de la biomasa, que determinarán la forma de almacenamiento, su transporte y diseño del equipo a utilizar (Desideri & Fantozzi, 2013).

Otros aspectos importantes por considerar son la disponibilidad de la biomasa, donde se debe tomar en cuenta desde la cantidad de producción, usos actuales y precios de venta.

2.1 Características energéticas de la biomasa, humedad y poder calorífico.

El contenido de humedad es un factor importante ya que tiene un efecto directo sobre el proceso de combustión debido a que la energía que se invierte en el proceso de evaporación disminuye la cantidad de energía disponible para el proceso de calentamiento.

Es por eso por lo que el uso dado a la biomasa está ligado con el porcentaje de humedad que presente. Con contenidos de humedad altos se recomienda aprovechar la biomasa en procesos de biodigestión, ya que favorece la descomposición del material. Para contenidos de humedad inferiores al 60% es posible considerar la combustión directa de la biomasa mientras que para procesos

termoquímicos como el de gasificación se requiere que la humedad sea inferior al 20% (Ramírez, Carazo, Roldán, & Villegas, 2008).

Debido a esta relación con el porcentaje de humedad se recomienda que el poder calorífico se cuantifique basado en la cantidad de energía efectiva en el proceso, conocida como poder calorífico inferior, la cual no cuantifica la energía que se invirtió en la evaporación.

El Cuadro 2.1 muestra los valores de porcentaje de humedad y poder calorífico para diferentes residuos generados por los sectores agrícolas industriales presentes actualmente en el país, se observa que ocho de los residuos agrícolas o RAO (pulpa y mucílago de café, cachaza y residuos de campo de la caña de azúcar, rastrojo y coronas de la piña y los residuos del procesamiento de banano) contienen porcentajes de humedad superiores al 60% por lo que no son buenos para el proceso de combustión. Por esta razón se descartan como posible biomasa a utilizar, y no se investigarán para los demás aspectos mencionados anteriormente.

En el caso de la cascarilla de arroz y café, el bagazo de la caña de azúcar, y los residuos de la palma africana contienen un porcentaje de humedad que permite sean considerados para su uso como posibles fuentes para la combustión.

El Cuadro 2.1 además muestra que de los residuos agrícolas a considerar el que presenta mayor poder calorífico inferior corresponde a la cascarilla de coquito de la palma africana con un valor de 22.56 MJ/kg, seguido de la cascarilla de café con 19.27 MJ/kg y la fibra de mesocarpio de la palma africana con 18.595 MJ/kg.

Los residuos que presentan menor capacidad calorífica corresponden a la cascarilla de arroz con 15,80 MJ/kg y el bagazo de caña de azúcar con 16,37 MJ/kg.

Cuadro 2.1 Contenido de humedad y poder calorífico inferior para los residuos agrícolas orgánicos de los tres sectores agrícolas a contemplar.

Sector agrícola	Residuos agrícolas orgánicos	Contenido de humedad (%)	Poder calorífico inferior (MJ/kg)	Fuente
	Pulpa	81.0	14.051	(Coto, 2013)
Café	Cascarilla	8.5	19.27	(Villalobos & Alvarado, 2013)
	Mucilago	81.0	14.051	(Coto, 2013)
Arroz	Cascarilla	11.5	15.800	(Mora Salas, 2017)
Caña de azúcar	Bagazo	50.0	16.371	(Coto, 2013)
	Cachaza	73.6	14.338	(Coto, 2013)
	Residuos de campo	70.0	15.850	(Coto, 2013)
Palma Africana	Fibra de mesocarpio	37.0	18.595	(Coto, 2013)
	Cascarilla de coquito	17.0	22.556	(Coto, 2013)
	Fibra de pinzote	55.0	17.378	(Coto, 2013)
Piña	Rastrojo	90.0	9.569	(Coto, 2013)
	Corona	78.5	9.828	(Coto, 2013)
Banano	Pinzote	85.0	9.682	(Coto, 2013)
	Banano rechazo	85.0	9.682	(Coto, 2013)

2.2 Características químicas de la biomasa

Los compuestos químicos presentes en la biomasa determinan propiedades que afectan directamente en el proceso de combustión. Las reacciones exotérmicas del carbono e hidrógeno permiten liberar grandes cantidades de energía por unidad de masa (Jara Millar, 2009). Como se muestra en el Cuadro 2.2 la biomasa, independientemente de su origen, tiene una composición de carbono e hidrógeno muy similar por lo que este no representa un factor determinante en la selección.

Cuadro 2.2 Análisis último, porcentajes en base seca.

Biomasa	C	H	N	S	O	Fuente
Cascarilla de café	46.51	6.77	0.43	0.09	46.2	(Rodriguez & Gordillo, 2011)
Cascarilla de arroz	38.83	4.75	0.52	20.26	35.47	(Jeng & Zaunuddin, 2012)
Bagazo	45.5	4.6	0.4	0.1	49.5	(Valix, Katyal & Cheung, 2017)
Fibra de mesocarpio	46.4	9.28	0.39	-	50.21	(Sukiran, Abnisa, Wan Daud, Bakar & Loh, 2017)
Cascarilla de coquito	50.32	6.195	0.795	0.33	42.37	(Gaona Reinoso, 2014)
Fibra de pinzote	45.29	5.73	1.57	0.508	46.9	

Al contrario, la cantidad de lignina, celulosa y hemicelulosa varía según la especie. El mayor contenido de carbono e hidrógeno de la lignina afecta de forma determinante el contenido final de energía. Además, al ser un agente aglomerante, permite una mejor peletización del material y mejora las propiedades mecánicas de los pélets debido a su capacidad de penetrar en los espacios de la pared celular entre la celuosa, la hemicelulosa y la pectina presente en la biomasa. El calentamiento, extrusión y enfriamiento de la biomasa en la peletización fluidiza y endurece la lignina, mejorando la aglomeración entre las partículas (Zapata, Tallero, Rincón, & González, 2017).

Como se muestra en el Cuadro 2.3 la biomasa que contiene mayor cantidad de lignina corresponde a la cascarilla de coquito con un 49,58%, seguido de la cascarilla de arroz con un 24,20% y la fibra de mesocarpio con un 21,79%.

Cuadro 2.3 Composición química de la biomasa.

Biomasa	Hemicelulosa	Celulosa	Lignina	Material Extraíble	Fuente
Cascarilla de café	7.00	43.00	9.00	-	(Murthy & Naidu, 2012)
Cascarilla de arroz	28.60	28.60	24.20	18.40	(Jeng & Zaunuddin, 2012)
Bagazo	46.41	48.75	2.78	-	(Motaung & Anandjiwala, 2015)
Fibra de mesocarpio	16.58	33.21	21.79	19.34	(García, Cárdenas, & Yáñez, 2010)
Cascarilla de coquito	12.72	30.28	49.58	7.13	
Fibra de pinzote	19.92	44.97	10.23	19.32	

Otro aspecto importante para el proceso de combustión de la biomasa es el material volátil presente, ya que éste implica que el material inflame con facilidad. En el Cuadro 2.4 se puede observar que los residuos de palma africana y el bagazo

corresponden a la biomasa que contiene mayores porcentajes de material volátil, donde la fibra de pinzote es el de mayor contenido con un porcentaje de 87,0%.

La cantidad de ceniza presente en la biomasa implica costos de mantenimiento, manejo y diseño del proceso. Es preferible un bajo porcentaje de este no solo por eficiencia energética, sino también para no generar una gran cantidad de residuos. En el Cuadro 2.4 se observa que la biomasa con menor porcentaje de ceniza es la cascarilla de coquito con un 3,00%, seguida del bagazo y la fibra de pinzote con un 4,2 % y 4,60% respectivamente.

En el caso de la cascarilla de arroz se presenta un porcentaje elevado en comparación con el resto de biomasa, de un 18,91%, lo que implica que el manejo de esta ceniza debe ser contemplado en el diseño del proceso.

Cuadro 2.4 Análisis próximo de la biomasa. Carbono fijo, material volátil y cenizas presentes.

Biomasa	Carbono Fijo (% base seca)	Material Volátil (% base seca)	Cenizas (% base seca)	Fuente
Cascarilla de café	20,71	73,3	6,99	(Kore, Assefa, Spliethoff , & Mayerhofer, 2013)
Cascarilla de arroz	13,85	64,27	18,91	(Gai, Dong, & Zhang, 2013)
Bagazo	12,7	83,1	4,2	(Valix, Katyal, & Cheung, 2017)
Fibra de mesocarpio	9,0	84,9	6,10	
Cascarilla de coquito	13,6	83,4	3,00	(Soh, 2016)
Fibra de pinzote	9,4	87,0	4,60	

Además de la cantidad de ceniza que se genera es importante su composición, ya que la presencia de minerales de bajo punto de fusión implica incrustaciones que reducen la eficiencia en el sistema, aumentando a su vez costos relacionados con el mantenimiento. El caso del óxido de potasio (K_2O) posee un punto de fusión bajo por lo que es recomendable una biomasa con un menor porcentaje de K_2O en sus cenizas. Como se observa en el Cuadro 2.5 la cascarilla de café contiene solo un 2%, mientras que la fibra de pinzote tiene un porcentaje de 44,0%.

Por el contrario, el dióxido de silicio (SiO_2) posee puntos de fusión elevados, por lo que un mayor porcentaje de éste evita que se generen incrustaciones, como es el caso de la cascarilla de café con un 94,1%.

Cuadro 2.5 Composición de ceniza.

Biomasa	Composición de ceniza (%)							Fuente
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Na_2O	MgO	K_2O	CaO	
Cascarilla de café	94,1	0,12	-	0,11	0,95	2,10	0,55	(Prada & Cortés, 2010)
Cascarilla de arroz	93,30	-	-	0,33	-	7,60	-	(Mora Salas, 2017)
Bagazo	76,4	5,8	4,5	1,2	2,3	4,2	3,3	(Vidal, Torres, & González, 2014)
Fibra de mesocarpio	63,90	3,89	3,30	-	3,37	10,20	6,93	(Karim, Hashim, Razak, & Yusoff, 2017)
Cascarilla de coquito	64,80	6,30	2,00	-	3,55	3,50	10,10	(Rufino, Machado, & Dias, 2013)
Fibra de pinzote	27,0	-	3,0	-	4,8	44,0	8,0	(Lahijani, Zainal, Mohamed, & Mohammadi, 2013)

2.3 Disponibilidad y sostenibilidad de la biomasa

Otro factor importante para tener en cuenta es la disponibilidad de la biomasa. Los tiempos de cosecha deben ser contemplados para determinar si se dispone de la materia durante todo el año o solo de forma estacionaria. Como se observa en el Cuadro 2.6 la época de cosecha depende de la zona en que se cultiva. En el caso de la palma aceitera se presenta el mismo tiempo de cosecha para todas las zonas.

Cuadro 2.6 Tiempos de cosecha según el sector agrícola para diferentes zonas de cultivo (ICAFE y UEEM, 2015), (CONARROZ COSTA RICA, 2015), (CANAPALMA, 2016).

Sector Agrícola	Zona de cultivo	Tiempo de cosecha
Arroz	Pacífico norte	Octubre a noviembre
	Pacífico sur y central	Agosto a setiembre
	Zona atlántica	Agosto a setiembre
Caña de azúcar	Pacífico central	Marzo a mayo
	Pacífico norte	Noviembre a abril
Café	Guanacaste	Julio a Diciembre
	Valle Occidental	Noviembre a Febrero
	Valle Central	Noviembre a Marzo
	Turrialba	Junio a Febrero
Palma Aceitera	Zona Sur	Setiembre a Febrero
	Zona Pacífico Sur	Mayo a Noviembre
	Zona Pacífico Central	Mayo a Noviembre
	Zona Atlántica	Mayo a Noviembre

El factor de generación de residuo (FGR) corresponde a la generación de residuo por unidad de producción generada en el sector. En el Cuadro 2.7 se presenta este factor además de la producción del sector con datos estadísticos del año 2017 según SEPSA. Es importante aclarar que en los casos en que no se presentan datos se debe a que la empresa encuestada no vende el subproducto, sino que lo utiliza dentro de su proceso para generación de energía, como el caso del Ingenio El Viejo y Coopedota, o no lo manejan como un producto para consumo y es una posible fuente de ingreso para estas empresas. En el caso de Cogranza corresponde a una

empresa nacional dedicada a la venta de este producto, donde se tiene un mercado en lo que corresponde a sustratos para siembra, entre otras aplicaciones (ver Cuadro 2.8).

Cuadro 2.7 Producción según sector, porcentaje de residuo según materia prima o factor de generación de residuos, precio de residuo.

Biomasa	Producción de sector (t)*	FGR (%)**	Producción del residuo (t)	Precio del residuo (CRC/g)	Fuente de precios
Cascarilla de café	460 475	4,3	19 800	-	Coopedota, 2017
Cascarilla de arroz	203 931	20,0	40 786	2,5	Cogranza, 2017
Bagazo	4 158 371	25,0	1 039 593	-	Ingenio El Viejo, 2017
Fibra de mesocarpio		13,0	141 628	-	
Cascarilla de coquito	1 089 448	5,0	54 472	-	Coopeagropal, 2017
Fibra de pinzote		22,0	239 678	-	

*Fuente para producción de sector (SEPSA, 2017).

**Fuente para el factor de generación de residuo (Coto, 2013).

Para la disponibilidad del residuo además se debe considerar las aplicaciones actuales que representan una competencia de adquisición de materia prima para el proceso, donde es importante darles prioridad a las aplicaciones para alimentos por altos contenidos nutricionales sobre lo que corresponde a energía. En el Cuadro 2.8 se presentan aplicaciones que ya se dan en el país para el residuo como algunas que se encuentran en investigación, como es el caso del uso de cascarilla de arroz y coquito de palma aceitera para fines de construcción.

Cuadro 2.8 Aplicaciones actuales para la biomasa.

Sector	Biomasa	Aplicaciones	Fuente
Café	Cascarilla de café	<ul style="list-style-type: none"> - Combustible para hornos de secado del café. - Producción de electricidad. 	(ICAFFE, 2016)
Arroz	Cascarilla de arroz	<ul style="list-style-type: none"> - Producción de electricidad. - Combustible en hornos. -Sustituto de paja por su capacidad de absorción. - Sustituto de madera para fabricación de muebles (características de permeabilidad y resistencia). - Tejas para techo. -Sustrato para cultivos hidropónicos. - Bloques de concreto. 	(Molina Salas, 2010) (Mora Salas, 2017)
Caña de azúcar	Bagazo	<ul style="list-style-type: none"> - Generación de energía eléctrica. - Combustible para calderas. - Producción de papel -Productos basados en fermentaciones como el alcohol. 	(TABOGA, 2016) (Valdez Melara, 2011)
Palma Aceitera	Fibra de mesocarpio y de pinzote	<ul style="list-style-type: none"> - Combustible para calderas. - Producción de papel 	(Venegas López, Salazar Vega, & Montero Camacho, 2013)
	Cascarilla de coquito	<ul style="list-style-type: none"> - Como sustrato para uso en suelos del campo. - Como biomasa para uso en procesos de combustión. - Como material para adoquines y bloques de construcción 	

2.4 Características físicas de la biomasa

Aspectos como el transporte y manejo de la biomasa son fundamentales para el diseño del proceso. Factores físicos como el tamaño de partícula, humedad, densidad aparente y real afectan directamente en estos aspectos mencionados. Como se observa en las Figuras 2.1, 2.2 y 2.3, estas corresponden a los residuos sin procesar de las cascarillas de arroz, café y coquito, los cuales representan un mejor manejo y transporte por el tamaño de residuo que se genera, al igual que la fibra de mesocarpio representada en la Figura 2.4.



Figura 2.1 Cascarilla de café (Centro de Investigación y desarrollo de proyectos energéticos, 2017).



Figura 2.2 Cascarilla de arroz (López, 2015).



Figura 2.3 Cascarilla de coquito de palma africana (Human & Eco, 2017).



Figura 2.4 Fibra de mesocarpio (FGV, 2017).



Figura 2.5 Bagazo (Organización Radiofónica de Oaxaca, 2016).



Figura 2.6 Pinzote (Chiaki, 2017).

2.5 Herramienta de selección de la biomasa

Para la selección de biomasa es importante calificar cada opción según las características mencionadas anteriormente utilizando una herramienta de selección, lo que permite determinar si se apega a los aspectos técnicos necesarios para su uso como combustible.

La herramienta corresponde a un cuadro comparativo en donde se asigna una calificación del 1 al 6, donde 1 es la más baja y 6 la más alta. De esta manera a cada opción de biomasa presente se le califica dependiendo de las características que se están tomando en consideración. Como se mencionó anteriormente se tienen en total 6 opciones de biomasa que presentan porcentajes de humedad que permiten su uso como combustible sin utilizar mucha energía en su pretratamiento, que corresponden a la cascarilla de café y de arroz, bagazo, además de coquito, fibra de pinzote y mesocarpio de palma. Al evaluar en un rango de 1 a 6 se permite ordenar las opciones de mayor a menor, facilitando la calificación.

Además de asignarse una calificación a cada opción de biomasa según los parámetros, se debe evaluar el peso que estos tienen en la evaluación. Como ejemplo, el poder calorífico de la biomasa es la principal característica y tiene sentido que tenga mayor peso que el caso de la cantidad de lignina presente para favorecer la peletización. En el Cuadro 2.9 se presentan los porcentajes asignados para cada parámetro según su importancia en la calificación de los tipos de biomasa, los cuales fueron asignados por el comité lector y la estudiante.

Cuadro 2.9 Importancia de cada parámetro de selección de biomasa.

Parámetro de evaluación	Porcentaje (%)
1. Poder Calorífico	40
2. Humedad	30
3. Lignina	0
4. Cantidad de ceniza	0
5. Cantidad de minerales en la ceniza con bajo punto de fusión	0
6. Generación de residuo	30
7. Precio del residuo	0
8. Facilidad de transporte	0
Total	100%

La cantidad de lignina, ceniza y minerales presente en la ceniza con bajo punto de fusión son factores que en cierta medida se relacionan con el poder calorífico de la biomasa, por lo que se puede obviar su calificación asignándose en el primer factor, poder calorífico.

Como se comentó anteriormente en el Cuadro 2.7, la mayoría de los residuos bajo investigación no presentan un precio en el mercado, ya que las empresas utilizan estos residuos en sus procesos. Debido al hecho de que no se tiene la información del precio de estos residuos precisamente por no ser un producto del proceso y

además de que según la aplicación que se les encuentre a los residuos el precio puede variar, este rubro no se contempla para la presente evaluación. Otro punto como lo es la facilidad de transporte no se contempla para la clasificación al plantearse una aplicación in situ, por lo que se optó por omitir en el análisis.

En el Cuadro 2.10 se indica la matriz con los porcentajes de importancia para cada factor junto con la calificación de cada tipo de biomasa. Los criterios para la calificación según cada factor seleccionado para el análisis son los siguientes:

- A mayor poder calorífico, mayor puntuación (Ver Cuadro 2.1)
- A mayor humedad, menor puntuación ya que afecta el rendimiento en la combustión (Ramírez, Carazo, Roldán, & Villegas, 2008) (Ver Cuadro 2.1).
- A mayor generación de residuo mayor puntaje, donde se tiene mayor cantidad de materia prima disponible (Ver Cuadro 2.7).

Según el Cuadro 2.10, la biomasa seleccionada es la cascarilla de coquito.

Cuadro 2.10 Matriz de selección de biomasa

Tipo de Biomasa	Poder Calorífico			Humedad			Generación de Residuo			Total
	Pto	%	Total	Pto	%	Total	Pto	%	Total	
Cascarilla de Café	5.0	40.0	2.0	6.0	20.0	1.2	1.0	20.0	0.2	3.4
Cascarilla de Arroz	1.0	40.0	0.4	5.0	20.0	1.0	2.0	20.0	0.4	1.8
Bagazo	2.0	40.0	0.8	1.0	20.0	0.2	6.0	20.0	1.2	2.2
Fibra de Mesocarpio	4.0	40.0	1.6	3.0	20.0	0.6	4.0	20.0	0.8	3.0
Cascarilla de coquito	6.0	40.0	2.4	4.0	20.0	0.8	3.0	20.0	0.6	3.8
Fibra de Pinzote	3.0	40.0	1.2	2.0	20.0	0.4	5.0	20.0	1.0	2.6

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1 Objetivo General

Determinar el poder calorífico de mezclas de glicerol residual generado en la producción de biodiesel con biomasa de procesos agrícolas para preparar mezclas combustibles como uso alternativo de subproductos relacionados con procesos agroindustriales.

3.2 Objetivos Específicos

- Determinar la cantidad de agua y alcohol presente en la muestra de glicerol crudo.
- Determinar el poder calorífico de la biomasa seleccionada (cascarilla de coquito).
- Preparar mezclas de biomasa con glicerol puro en diferentes proporciones para determinar la variación del poder calorífico.
- Definir la proporción de mezcla que permita tener el máximo uso de glicerol sin perder las propiedades combustibles de la biomasa.
- Determinar el poder calorífico de la mezcla encontrada en el objetivo anterior utilizando el glicerol crudo de la empresa Energías Biodegradables.

3.3 Materiales y Equipo

Para poder realizar el objetivo general propuesto se utilizó como materiales y reactivos los componentes mencionados en el Cuadro 3.1, facilitados por el Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica. En el caso del glicerol crudo no se presentó la pureza ni punto de ebullición ya que, al ser un residuo, no se cuenta con datos por parte de la empresa. Sin embargo, las propiedades importantes para su uso se determinan a nivel de laboratorio. En el caso de los demás reactivos su pureza es fundamental para el proceso de determinación del poder calorífico, por lo que se utilizan químicos que sí presentan sus datos provistos por los proveedores.

Cuadro 3.1 Materiales y reactivos utilizados para la determinación del poder calorífico de mezclas de cascarilla de coquito con glicerol crudo.

Nombre	Fabricante o proveedor	Peso Molecular (g/mol)	Punto de ebullición (°C)	Pureza (%)
Glicerol	Riedel-De Haen AG	92,10	290	98.0
Ácido Benzoico	J.T Baker	122.12	249	99.5
Metanol	Quimar S.A	32.04	64.7	99,9
Oxígeno	Praxair	16.00	-183	-

Principalmente se utilizó como equipo la bomba calorimétrica Parr presente en el Laboratorio de Ingeniería Química junto con equipos de apoyo mencionados en el Cuadro 3.2. Para el manejo de los datos brindados por la unidad de ignición con termómetro digital 6775A marca Parr, se realizó la toma de datos con intervalos de dos segundos, permitiendo tener datos precisos sobre el proceso de combustión.

Cuadro 3.2 Equipo utilizado para la determinación del poder calorífico de mezclas de cascarilla de coquito con glicerol crudo.

Equipo	Ámbito	Fabricante	Placa UCR
Pellet Presser	-	Parr	120762
Bomba Calorimétrica	-	Parr	350879
Estufa	25 °C – 295 °C	Blue M	120757
Rotavapor	21°C – 100 °C	BÜCHI	162423
Balanza semi analítica	0 g – 360 g	AE ADAM	228343
Balanza granataria	0 g – 6000 g	Scout-Pro	325968
Plantilla Agitación	0 °C – 495 °C	IKA	320389

3.4 Diagrama del Equipo



Figura 3.1 Equipo de bomba calorimétrica con termómetro digital de precisión y unidad de ignición Parr (Parr Instrument Company, 2013).

3.5 Determinación de cantidad de agua y metanol presente en el glicerol crudo

Para utilizar el glicerol crudo provisto por la empresa Energías Biodegradables, localizada en el alto de Ochomogo, Cartago, es importante determinar su composición, debido a que el contenido de la muestra se basa principalmente en proporciones variadas de glicerol, aceites, jabones y metanol, según el proceso de preparación de biodiesel realizado en la empresa. Esta variación se debe al uso de residuos de aceite de cocina proveniente de restaurantes, sodas e industrias como materia prima. Como parte del objetivo general del proyecto, donde el uso alternativo del glicerol crudo se basa en tener características combustibles, se determinó solo la cantidad de agua y metanol presente en el glicerol, esto debido a

que el agua disminuye la capacidad calorífica, mientras que el metanol favorece la combustión.

Inicialmente se muestreó el galón provisto por la empresa en tres beakers diferentes, con agitación constante debido a la heterogeneidad de la mezcla. Luego el contenido se vertió a un balón de 100 mL, donde se pesó la masa inicial. Para determinar el porcentaje másico de estos componentes se extrajo el metanol con un rotavapor a 80 °C por una hora. Se midió la masa de los tres balones y se determinó por diferencia el porcentaje de metanol presente en la mezcla. Luego se deshidrató las tres muestras en una estufa a 100 °C por dos horas asegurándose que se extrajo el agua por completo (Robles Chavez & Quesada Espinoza, 2013).

3.6 Determinación del porcentaje de agua y poder calorífico de la cascarilla de coquito de palma aceitera.

El uso de la biomasa como parte de la mezcla planteada se basa en favorecer la combustión, por lo que esta debe presentar un poder calorífico mayor que el del glicerol crudo para lograr un aporte energético. Basándose en la Herramienta de Selección del Capítulo 2, la biomasa disponible en el país que cumple con los requisitos planteados es la cascarilla de coquito de palma aceitera. Para lograr visualizar el aporte energético por parte de la biomasa es importante determinar su poder calorífico.

Para determinar el porcentaje de agua se pesó 5 g de muestra y se determinó por diferencia másica el porcentaje de agua presente, utilizando la balanza semi analítica AE ADAM.

Como pretratamiento para la determinación del poder calorífico se secó 50 g de la biomasa molida utilizando la estufa Blue M del Laboratorio de Ingeniería Química, a una temperatura de 100 °C a 105 °C por 21 horas, donde, para mantener la biomasa libre de humedad, se utilizó un desecador. Luego se determinó el poder calorífico de la cascarilla de coquito de palma aceitera utilizando la bomba

calorimétrica con termómetro digital de precisión y unidad de ignición Parr basado en el ASTM D240-64 “Método de Prueba Estándar para el Calor de Combustión de hidrocarburos combustibles líquidos mediante bomba calorimétrica”. Como blanco se utilizó ácido benzoico en pastilla utilizando una peletizadora Parr para su compresión. Para el proceso de ignición se utilizó el fuse Parr con una corrección de 1 400 cal/g pesando respectivamente la cantidad de fusible sobrante. Luego se pesó la muestra donde, según el método, no debe exceder de 1.1 g (Parr Instrument Company, 2013). Es recomendado por el método aumentar la densidad de la muestra al compactarla con el Pellet Presser, sin embargo, debido a la baja humedad de la cascarilla de coquito la pastilla perdía su estructura, por lo que se procedió a pesar la muestra directamente en el crisol sin aumentar su densidad. Es importante en este caso entregar de forma pausada el oxígeno al sistema, ya que puede generar perdidas de muestra en el crisol que no se incinere y no considerar la totalidad de la muestra en el proceso. El registro de la temperatura se llevó a cabo a partir de la unidad de ignición con termómetro digital 6775A marca Parr.

3.7 Preparación y determinación del poder calorífico de mezclas de cascarilla de coquito, glicerol puro y agua.

Debido a la variación en la composición del glicerol crudo se determinó inicialmente el poder calorífico de glicerol puro fabricado por Riedel-De Haen AG a un 98% de pureza con agua y cascarilla de coquito. Esto permitió dar un perfil de la variación del poder calorífico según la cantidad de agua y glicerol puro, siendo estas las composiciones que afectan de forma negativa la variable respuesta.

Para obtener la mezcla final de biomasa, glicerol y agua se realizó dos procesos de mezclado:

Para el primer proceso, en beakers de 50 mL, se preparó mezclas que contienen glicerol puro con diferentes relaciones másicas de agua (Cuadro 3.3). Para este paso se utilizó la balanza semi analítica, donde se agregó cada compuesto (glicerol puro y agua) según su porcentaje hasta llegar a la cantidad de mezcla total de 50 g.

Luego, para el segundo proceso, se taró un vidrio reloj donde se dosificó con una espátula la cascarilla de coquito previamente secada, obteniendo la relación glicerol húmedo/ biomasa mostrada en el Cuadro 3.3. Al tener la cantidad de cascarilla de coquito en el vidrio reloj requerida, se dosificó la mezcla glicerol con agua, utilizando un gotero, hasta llevar la muestra a su total de 4 g.

Cuadro 3.3. Porcentaje másico del menor componente en la mezcla

Mezcla	Primer proceso de mezclado	Segundo proceso de mezclado
	Relación agua/glicerol (%)	Relación glicerol húmedo/ biomasa (%)
1	5.0	5.0
2	10.0	5.0
3	15.0	5.0
4	20.0	5.0
5	30.0	5.0
6	40.0	5.0
7	5.0	10.0
8	10.0	10.0
9	15.0	10.0
10	20.0	10.0
11	30.0	10.0
12	40.0	10.0
13	5.0	15.0
14	10.0	15.0
15	15.0	15.0
16	20.0	15.0
17	30.0	15.0
18	40.0	15.0

El proceso de mezclado requiere especial atención debido a la viscosidad que presenta el glicerol, además de representar la menor fracción en la mezcla. Debido a lo anterior se debe entonces mezclar de tal forma que la mayor parte del glicerol se impregne a la biomasa y no quede en otras superficies, como en este caso del vidrio reloj que lo contiene o la espátula. Como se muestra en la Figura 3.2 se utilizó dos espátulas para dar uniformidad a la mezcla y permitir mejor adherencia del glicerol húmedo a la biomasa, lo que además facilitó disminuir la pérdida de muestra en el proceso.



Figura 3.2 Procedimiento para mezcla de cascarilla de coquito con glicerol puro y agua.

Luego se determinó el poder calorífico de las muestras según el Cuadro 3.3, donde se fraccionó los 4 g en tres réplicas, donde cada una de las muestra se pesó a aproximadamente 1.000 g, y se utilizó la bomba calorimétrica con termómetro digital de precisión y unidad de ignición Parr a partir del ASTM D240-64 “Método de Prueba Estándar para el Calor de Combustión de hidrocarburos combustibles líquidos mediante bomba calorimétrica”. Como blanco se utilizó ácido benzoico y el fuse Parr con una corrección de 1 400 cal/g. Como se explica en el Capítulo 4, sección 4.3,

se detectó un error por variación del equipo, por lo que el experimento se volvió a realizar con un menor muestreo.

3.8 Preparación y determinación de poder calorífico de mezclas de cascarilla de coquito con glicerol crudo.

Para la preparación de la mezcla utilizando el glicerol crudo provisto por la empresa Energías Biodegradables se utilizó dos de las muestras ya pretratadas donde se les extrajo el agua y el metanol en balones aforados. A partir de los datos generados en la sección 3.8 se llevó las muestras al contenido de metanol inicial y el contenido de agua óptimo al agregar cada componente según su porcentaje, como se muestra en la Figura 3.3. Para el mezclado se utilizó una plantilla de agitación IKA a una temperatura de 30 °C, disminuyendo la viscosidad y favoreciendo el mezclado.

Debido a la viscosidad de la muestra de glicerol crudo, el método de muestreo podría generar un error aún mayor que el caso del glicerol puro. Por esta razón, para el muestreo de las mezclas de glicerol crudo inicialmente se tomó muestra directamente del primer balón, donde se extrajo la cantidad según la fracción encontrada en la sección 3.8, y se generó la mezcla de un total de cuatro gramos, de la cual se tomó 1 g cada una de las tres replicas.



Figura 3.3 Preparación de muestras de glicerol crudo.

Luego, para el segundo balón se siguió el proceso de muestreo mostrado en la Figura 3.4. Del balón previamente tratado se trasvasó el glicerol crudo por completo a tres beakers en partes iguales. Luego, se pesó la cascarilla de coquito previamente tratada donde se redujo su porcentaje de agua y de cada beaker se tomó mezcla utilizando un gotero, dosificando el glicerol crudo para generar la mezcla de 4 g en total. Se tomó tres muestras de 1 g y se midió el poder calorífico de cada una. Para las dos mezclas restantes en los beakers, solo se muestreó 1 g de cada.

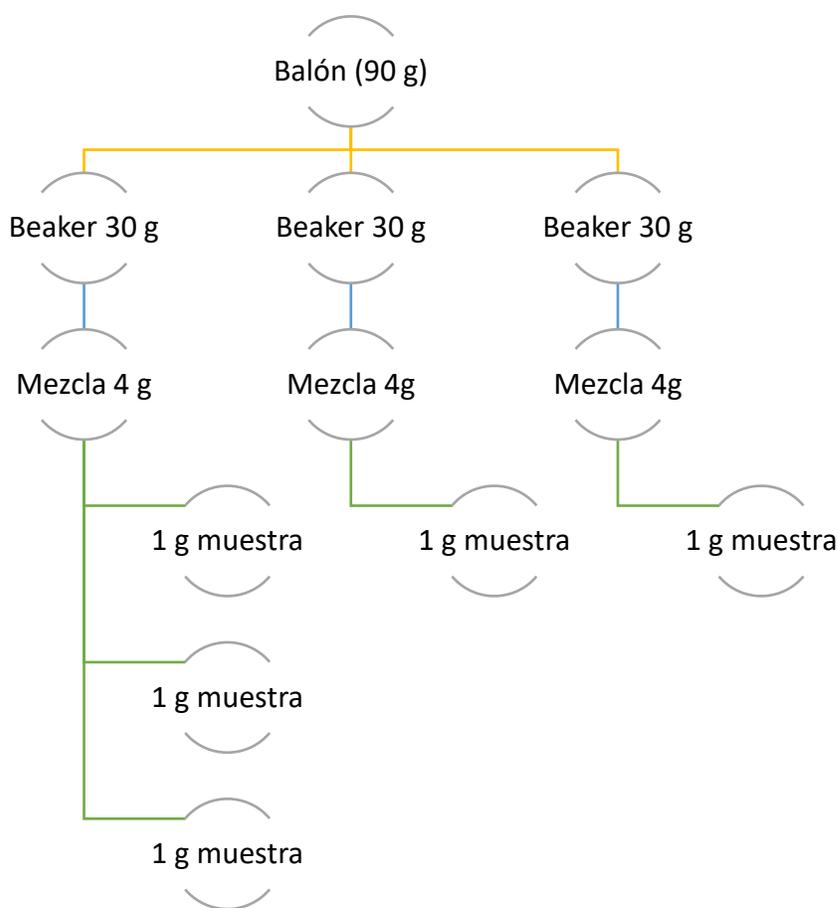


Figura 3.4. Muestreo del glicerol crudo para la preparación de mezcla con cascarilla de coquito.

El poder calorífico de las muestras se midió utilizando la bomba calorimétrica con termómetro digital de precisión y unidad de ignición Parr. Como blanco se utilizó ácido benzoico en pastilla prensada en una peletizadora Parr, con corrección del

fuse Parr de 1, 400 cal/g. Un punto importante a resaltar es que debido a que el porcentaje de agua en la mezcla es un parámetro de estudio, la biomasa de cascarilla de coquito se utilizó seca luego de un proceso de secado en el horno a 100 °C por 12 horas seguidas.

3.9 Análisis de los datos de Poder Calorífico

Para analizar el poder calorífico determinado en las secciones anteriores de las mezclas planteadas se utilizó inicialmente la regresión lineal múltiple, utilizando la herramienta estadística Minitab 17.

La herramienta permite realizar ajustes de datos, donde inicialmente se parte de la verificación de la normalidad de estos para poder determinar si la inferencia estadística del ajuste del modelo es aceptable. Se realiza la prueba de normalidad utilizando el grafico lineal de ajuste, donde el valor P indica si se debe rechazar la hipótesis nula de normalidad.

La regresión lineal múltiple en el software Minitab 17 se basa en el ajuste del modelo de la ecuación del cálculo de poder calorífico (Capítulo 4, Ecuación 4.1) a partir de una única respuesta continua (y) y un máximo de cinco predictores (x). En este caso la variable respuesta continua corresponde al poder calorífico, mientras que los predictores corresponden a las fracciones másicas de agua, glicerol y biomasa.

El modelo planteado de mezclas posee únicamente 3 valores discretos para la fracción de biomasa, por lo que su aporte a nivel estadístico con respecto a las demás variables no es suficiente y se excluyó del modelo tomándolo como una constante (sección 4.3.1)

Para aumentar el ajuste se analizó la interacción de las fracciones de agua y glicerol debido al método de muestreo, lo que mejoró su ajuste (sección 4.3.2) y, por último, se utilizó una Red Neuronal para incluir la fracción de biomasa, solo como fin ilustrativo y fuera del objetivo del presente proyecto (sección 4.3.3).

CAPÍTULO 4.RESULTADOS Y ANÁLISIS

Como objetivo del proyecto, se determinó la proporción de los componentes de una mezcla que contenga el glicerol crudo al cual se le desea dar una aplicación como combustible, junto con la biomasa seleccionada, que corresponde, según el Capítulo 2, a la cascarilla de coquito.

La determinación correcta del poder calorífico de esta mezcla implica, inicialmente, la determinación de las propiedades de cada compuesto de forma individual, para lograr un análisis adecuado de lo que corresponde a las propiedades como un conjunto.

4.1 Propiedades del glicerol crudo.

Para la determinación del contenido de agua y metanol presente en la mezcla de glicerol crudo, se obtuvo datos de corridas preliminares con alta variabilidad. Al ser una mezcla de diversos compuestos con densidades heterogéneas y alta viscosidad el muestreo puede implicar variaciones en los resultados, por lo que, para las corridas experimentales, el glicerol crudo se mantuvo en constante agitación desde la toma de muestra del galón facilitado por la empresa.

Cuadro 4.1 Resultados de corridas preliminares para la determinación del porcentaje másico agua y metanol en el glicerol crudo.

Compuesto	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
	%	%	%	%
Metanol	10.0	2.3	5.0	5.7
Agua	15.1	6.0	10.0	10.4

Esta variación se debe principalmente al proceso de producción de biodiesel de la empresa Energías Biodegradables, donde se utiliza como materia prima residuos de aceite de cocina proveniente de restaurantes, sodas e industrias. La variación en los compuestos de materia prima implica una variación en los compuestos de salida del proceso, por lo que los datos obtenidos a nivel experimental no son

representativos de los residuos de la empresa a nivel global. Como se observa en el Cuadro 4.2, el resultado obtenido para la determinación de agua corresponde a un promedio de 10.4 % másico en base al total de muestra, mientras que la cantidad de metanol presente en el glicerol crudo corresponde a un 4,5 % másico en base al total de muestra.

Cuadro 4.2 Resultados del porcentaje másico agua y metanol en el glicerol crudo.

Compuesto	Muestra 1 %	Muestra 2 %	Muestra 3 %	Promedio %
Metanol	4.2	5.0	4.3	4.5
Agua	16.5	16.6	15.3	16.1

Las diferencias entre ambos cuadros se dan debido a que la composición en la muestra no era representativa de un muestreo directo del proceso, ya que fue manipulada anteriormente por otro estudiante en el laboratorio para un proyecto diferente. Por esta razón se procedió tomar una muestra directa con el fin de eliminar esa variabilidad en los datos.

4.2 Porcentaje de humedad y poder calorífico de la cascarilla de coquito.

Siendo el porcentaje de agua en la mezcla una de las variables experimentales planteadas es importante determinar la humedad presente en la biomasa seleccionada, es decir, la humedad en base seca de la cascarilla de coquito. En el Cuadro 4.3 se puede observar que el valor de esta humedad corresponde a un 9.24% en base seca.

Cuadro 4.3 Resultado para el porcentaje de humedad de la cascarilla de coquito en base seca.

Muestra	Masa (g)	Porcentaje de humedad (m/m)
Inicial	5.060	9.24%
Final	4.632	

El poder calorífico se determinó utilizando la cascarilla de coquito después del proceso de secado. Debido a la baja humedad y cohesión entre las partículas de la molienda de la muestra, la medición se realizó sin formar la pastilla, como es la práctica en el caso de la medición con la bomba calorimétrica. La masa se midió por diferencia directamente en el crisol, asegurándose de que el fusible esté en contacto con la muestra. Esta metodología, donde a la muestra no se le realiza el proceso de formar a pastilla, puede generar un error en la medición, ya que la pastilla permite una distribución de la energía de ignición de forma uniforme a toda la muestra. Por esta razón, y para mitigar el error por esta metodología, para cada ensayo se aseguró de que luego del proceso, no se presentara ninguna partícula fuera del crisol. En caso contrario, donde si se encuentre particulado, no se tomó el dato y se procedió a realizar de nuevo la medición, ya que esto implica que no se obtuvo una combustión completa. Se midió el poder calorífico por triplicado con la bomba calorimétrica, y se obtuvo un valor promedio de 19.8945 MJ/kg.

Cuadro 4.4 Resultado para el poder calorífico de la cascarilla de coquito.

Réplica	Masa de muestra (g)	Poder Calorífico (MJ/kg)	Promedio (MJ/kg)	Varianza de la muestra (MJ/kg)
1	1.008	19.9512		
2	1.013	19.6390	19.8945	0.0540
3	1.032	20.0932		

4.3 Poder Calorífico de mezclas glicerol puro, agua y cascarilla de coquito.

Debido a la variación en la composición del glicerol crudo residual del proceso de producción de biodiesel, se determinó inicialmente el poder calorífico de mezclas compuestas por la cascarilla de coquito con glicerol puro y agua.

El análisis de estas mezclas genera un perfil de la variación del poder calorífico solo con las composiciones que afectan de forma negativa la variable experimental

(glicerol y agua). Con estos datos se determinó proporciones adecuadas de mezcla que se mantengan dentro de un rango funcional, es decir, que no disminuya su poder calorífico de forma significativa.

Basado en el aporte individual del poder calorífico de cada compuesto, entre mayor sea la fracción de agua y glicerol, disminuye el poder calorífico de la mezcla. Es por este principio teórico que se mantiene la mayor proporción de biomasa, la cual aporta un poder calorífico mayor en comparación con los demás compuestos. En el Cuadro 4.5 se presentan las fracciones másicas que componen cada mezcla, que a diferencia del Cuadro 3.3, se presentan las fracciones másicas de forma individual en base al total de mezcla.

Cuadro 4.5 Fracciones másicas para las mezclas glicerol puro, agua y cascarilla de coquito.

Mezcla	Agua (m/m)	Glicerol (m/m)	Biomasa (m/m)
1	0.0025	0.0475	0.9500
2	0.0050	0.0450	0.9500
3	0.0075	0.0425	0.9500
4	0.0100	0.0400	0.9500
5	0.0150	0.0350	0.9500
6	0.0200	0.0300	0.9500
7	0.0050	0.0950	0.9000
8	0.0100	0.0900	0.9000
9	0.0150	0.0850	0.9000
10	0.0200	0.0800	0.9000
11	0.0300	0.0700	0.9000
12	0.0400	0.0600	0.9000
13	0.0075	0.1425	0.8500
14	0.0150	0.1350	0.8500
15	0.0225	0.1275	0.8500
16	0.0300	0.1200	0.8500
17	0.0450	0.1050	0.8500
18	0.0600	0.0900	0.8500

Como se observa en Cuadro 4.5 las fracciones másicas del glicerol puro y el agua corresponden a valores que experimentalmente representan un reto. Según la metodología para la determinación del poder calorífico utilizando la bomba calorimétrica Parr del Anexo I, la cantidad máxima de muestra que se puede medir corresponde a 1.1 g. Lo anterior implica cantidades másicas complejas de medir. Por ejemplo, la primera muestra del Cuadro 4.5 corresponde a un 0.0025 g de agua para una muestra de masa total de 1 g, la cual resulta físicamente imposible de entregar utilizando cualquier instrumento de dosificación en el laboratorio.

Por esta razón la metodología para el mezclado de los componentes se basó en mezclar inicialmente los compuestos líquidos, es decir, glicerol puro con agua, donde la muestra total represente una cantidad másica fácil de dosificar, en este caso un total de mezcla de 50 g, como se mencionó en la sección 3.8. Una vez que se obtuvo la mezcla de las fases líquidas se procedió a mezclar con la fase sólida, donde el total de muestra corresponde a 4 g. Esta metodología de mezclado puede generar un error de muestreo, por lo que se procedió a agitar vigorosamente cada muestra de glicerol con agua antes de ser dosificada con gotero a la fase sólida de la mezcla.

Basándose en el principio de la Ecuación 4.1 para la determinación del calor de combustión, y siendo el calor específico del agua (4.184 kJ/kgK) mayor al del glicerol puro (2.400 kJ/kgK) (Van Wylen, Sonntag, & Borgnakkke, 2009), al aumentar la cantidad de agua y glicerol presente en la mezcla disminuye el poder calorífico, debido al aporte energético que estos presentan en comparación con el aporte energético de la biomasa.

$$Q = m_{\text{agua}} h_{\text{agua}} + m_{\text{glicerol}} h_{\text{glicerol}} + m_{\text{biomasa}} h_{\text{biomasa}} \quad (4.1)$$

$$\dot{Q} = x_{\text{biomasa}} h_{\text{biomasa}} + x_{\text{agua}} h_{\text{agua}} + x_{\text{glicerol}} h_{\text{glicerol}} \quad (4.1)$$

Donde:

Q	Poder calorífico de combustión, kJ
m	Masa, kg
H	Entalpía de combustión, kJ/kg

Otro principio que rige en la determinación del poder calorífico de la mezcla es la relación entre las cantidades de los componentes. Como se observa en el Cuadro 4.5, si se fija la cantidad de biomasa, al aumentar la cantidad de agua debe disminuir la cantidad de glicerol puro, para mantener el principio representado por la Ecuación 4.2.

$$1 = X_{\text{agua}} + X_{\text{glicerol}} + X_{\text{biomasa}} \quad (4.2)$$

Donde:

x	Fracción másica, adimensional
---	-------------------------------

Como se puede observar, el principio de determinación del poder calorífico entonces corresponde a una ecuación de modelo lineal, la cual se rige como propiedad extensiva, donde se espera un comportamiento de decremento al disminuir la proporción de agua y glicerol.

A partir de la metodología experimental, al utilizar la bomba calorimétrica Parr, esta determina el Poder Calorífico Superior de la muestra, debido a que mide el proceso de combustión a partir de la variación de temperatura desde el estado inicial de estabilización del sistema, seguido del proceso de ignición hasta llegar al equilibrio del final del proceso. Al contemplar la etapa final del proceso, se incluye en la medición la energía necesaria para la condensación del agua presente en la mezcla.

Para lograr un correcto análisis del poder calorífico, es importante que se contemple el Poder Calorífico Inferior, el cual no considera el aporte del calor al condensar el agua, ya que, en sistemas de combustión industriales, los gases generados en la ignición se pierden al ambiente. Sin embargo, determinar la condensación exacta de los gases de la muestra no es posible a nivel experimental, pero se puede hacer una aproximación al asumir que se condensa la cantidad de agua presente y se desprecia el aporte de condensación de los demás gases.

Basándose en lo anterior, para determinar el Poder Calorífico Inferior de la mezcla se utilizó la Ecuación 4.3, donde se conoce la cantidad de agua presente en la muestra al ser una variable controlada en el proceso.

$$\text{PCI} = \text{PCS} - c_{\text{agua}}x_{\text{agua}} \quad (4.3)$$

Donde,

PCI	Poder Calorífico Inferior, MJ/kg.
PCS	Poder Calorífico Superior, MJ/kg.
c	Calor latente del agua, MJ/kg.
x	Fracción másica presente en la muestra, adim

A partir de la metodología descrita en la sección 3.8, se obtuvieron los valores de poder calorífico inferior para las mezclas planteadas por triplicado que se muestran en el Cuadro 4.6.

Cuadro 4.6. Resultados del Poder Calorífico Inferior para las mezclas de biomasa, agua y glicerol puro (Elaboración propia).

Mezcla	Agua	Glicerol	Biomasa	Replica	Poder Calorífico MJ/kg
1	0.0025	0.0475	0.9500	1	19.6665
1	0.0025	0.0475	0.9500	2	19.4214
1	0.0025	0.0475	0.9500	3	19.7143
2	0.0050	0.0450	0.9500	1	20.1266
2	0.0050	0.0450	0.9500	2	19.8153
2	0.0050	0.0450	0.9500	3	19.7168
3	0.0075	0.0425	0.9500	1	20.2865
3	0.0075	0.0425	0.9500	2	20.1195
3	0.0075	0.0425	0.9500	3	20.5920
4	0.0100	0.0400	0.9500	1	20.6423
4	0.0100	0.0400	0.9500	2	20.3994
4	0.0100	0.0400	0.9500	3	20.7409
5	0.0150	0.0350	0.9500	1	19.3000
5	0.0150	0.0350	0.9500	2	19.3610
5	0.0150	0.0350	0.9500	3	19.5754
6	0.0200	0.0300	0.9500	1	19.7098
6	0.0200	0.0300	0.9500	2	19.6924
6	0.0200	0.0300	0.9500	3	19.7156
7	0.0050	0.0950	0.9000	1	19.4767
7	0.0050	0.0950	0.9000	2	19.2006
7	0.0050	0.0950	0.9000	3	19.2833
8	0.0100	0.0900	0.9000	1	19.6401
8	0.0100	0.0900	0.9000	2	19.3273
8	0.0100	0.0900	0.9000	3	19.4601
9	0.0150	0.0850	0.9000	1	20.7495
9	0.0150	0.0850	0.9000	2	20.1321
9	0.0150	0.0850	0.9000	3	19.7143
10	0.0200	0.0800	0.9000	1	20.3768
10	0.0200	0.0800	0.9000	2	20.0801
10	0.0200	0.0800	0.9000	3	20.0279
11	0.0300	0.0700	0.9000	1	19.4802
11	0.0300	0.0700	0.9000	2	19.4676
11	0.0300	0.0700	0.9000	3	18.3842

Cuadro 4.6 (Continuación) Resultados del Poder Calorífico Inferior para las mezclas de biomasa, agua y glicerol puro (Elaboración propia).

Mezcla	Agua	Glicerol	Biomasa	Replica	Poder Calorífico MJ/kg
12	0.0400	0.0600	0.9000	1	19.7479
12	0.0400	0.0600	0.9000	2	20.0936
12	0.0400	0.0600	0.9000	3	19.8921
13	0.0075	0.1425	0.8500	1	19.1634
13	0.0075	0.1425	0.8500	2	18.8923
13	0.0075	0.1425	0.8500	3	19.3330
14	0.0150	0.1350	0.8500	1	19.9080
14	0.0150	0.1350	0.8500	2	20.0446
14	0.0150	0.1350	0.8500	3	19.7872
15	0.0225	0.1275	0.8500	1	19.8672
15	0.0225	0.1275	0.8500	2	19.8885
15	0.0225	0.1275	0.8500	3	19.5098
16	0.0300	0.1200	0.8500	1	19.3879
16	0.0300	0.1200	0.8500	2	19.2863
16	0.0300	0.1200	0.8500	3	19.4480
17	0.0450	0.1050	0.8500	1	18.0033
17	0.0450	0.1050	0.8500	2	17.9518
17	0.0450	0.1050	0.8500	3	17.9546
18	0.0600	0.0900	0.8500	1	19.0982
18	0.0600	0.0900	0.8500	2	19.1397
18	0.0600	0.0900	0.8500	3	19.5840

4.3.1 Regresión Lineal Múltiple

A partir del modelo de determinación del poder calorífico de mezcla y los resultados que se plantearon como variable respuesta y variables controladas, la metodología estadística para su análisis se debe basar en una regresión lineal multivariable, donde se toman en cuenta solo las proporciones de agua y glicerol.

Para la fracción másica de biomasa, basándose en el planteamiento del objetivo principal del análisis, al ser un compuesto que aporta de forma positiva la

combustión en la mezcla, su inclusión en el análisis puede ser representado como una constante. Como se indica en la sección 4.2, el poder calorífico promedio encontrado para la cascarilla de coquito seca corresponde a 19.89 MJ/kg, por lo que la expectativa de la tendencia de los datos es, como se mencionó anteriormente, un decremento según se vaya aumentando la fracción de agua y glicerol presente.

Para los valores del poder calorífico determinado en el Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica, se realizó la prueba de normalidad y regresión multivariable utilizando el software Minitab 17. En la Figura 4.1 se observa la prueba de normalidad. Como se visualiza en la prueba, para una muestra de 54 valores, se tiene un promedio de 19.62 MJ/kg con una desviación estándar de 0.6147 MJ/kg. El valor de P corresponde a un 0.009, el cual es menor a 0.05, indicando que se debe rechazar la hipótesis nula, concluyendo que los datos no son normales.

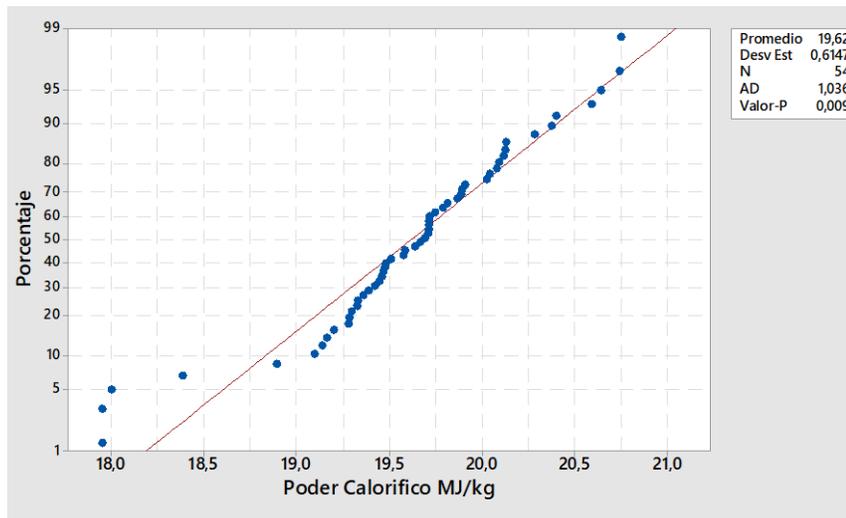


Figura 4.1. Prueba de Normalidad para los valores de poder calorífico en MJ/kg (Elaboración propia en software Minitab 17).

Al rechazar la hipótesis nula y concluir que los datos no son normales, la inferencia estadística respecto a la determinación del comportamiento de los datos no es robusta. Basado en el Teorema de Límite Central, el cual indica que, para un valor

elevado de observaciones, que corresponde a un valor de muestras n , efectuadas en idénticas condiciones, los distintos errores aleatorios o accidentales posibles se presentan con tanta mayor frecuencia cuanto menor sea su valor absoluto, además de que los errores del mismo valor absoluto, pero de distinto signo se presentan con igual frecuencia, por lo que la suma de todos estos errores es igual a cero (Walpole, Myers, Myers, & Ye , 2012).

En el caso de los datos determinados en la primera corrida experimental, la no normalidad indica que estos errores, a pesar de tener una muestra considerable en el ensayo, están presentes en distinta proporción, por lo que la no normalidad está relacionada a errores sistemáticos en el proceso.

Para comprender el aporte de estos errores sistemáticos se continuó con el análisis estadístico para comprender el ensayo. La Ecuación 4.4 corresponde al resultado de la ecuación de regresión que se obtuvo en con el software Minitab 17, el cual se asemeja a la Ecuación 4.3. Como se mencionó anteriormente, el aporte del poder calorífico de la cascarilla de coquito se manejó como una constante, cuyo valor experimental corresponde a 19.89 MJ/kg y donde en la Ecuación 4.4 se obtiene una constante de 20.304 MJ/kg. Los valores de coeficientes que corresponden a las variables X_{Agua} y X_{Glicerol} , las cuales representan sus respectivas fracciones másicas y basándose en la Ecuación 4.3, representan el poder calorífico de estos componentes.

$$\text{PCS} = 20.305 - 14.63 x_{\text{agua}} - 4.92 x_{\text{glicerol}} \quad (4.4)$$

Donde,

PCS: Poder Calorífico Inferior, MJ/kg

X: Fracción másica en la muestra, adim

En el Cuadro 4.7 se muestra además el resultado del análisis estadístico de los valores de la medida del ajuste de los datos al modelo encontrado. Como se puede observar, el valor de coeficiente de determinación ajustado corresponde a un 22.42%, el cual es un valor bajo, indicando que el modelo no se ajusta a los datos encontrados experimentalmente, por lo que no se recomienda para un análisis predictivo. En el caso de regresiones múltiples es importante analizar el valor del coeficiente de determinación ajustado, ya que este considera las variables independientes que sean estadísticamente significantes para el modelo.

Cuadro 4.7. Resultados del análisis estadístico de medida de ajuste del modelo (Elaboración propia).

Error estándar de la regresión	Coeficiente de determinación	Coeficiente de determinación ajustado	Coeficiente de determinación predictivo
(S)	(R2)	(R2-adj)	(R2-pred)
0.541409	25.35%	22.42%	16.27%

Para profundizar en la significancia estadística de las fracciones de agua y glicerol en el modelo, se analizó los resultados del análisis de coeficientes generado en el software Minitab 17, mostrados en el Cuadro 4.8, donde se aísla el papel de una variable de las demás variables del modelo. Como se comentó anteriormente, el aporte de la fracción másica de cascarilla de coquito se trabajó como una constante, ya que el objetivo planteado corresponde al análisis de los factores que afectan de forma negativa el poder calorífico de la mezcla.

Para este análisis se plantea como hipótesis nula que los valores de las variables fracción de agua y fracción glicerol no van a influir en la variable Poder Calorífico, mientras que la afirmación contraria corresponde a que al menos una de las variables si influye en la variable Poder Calorífico. Como se observa en el Cuadro 4.8, con un 95% de confianza, se encuentra que los valores P de las variables

fracción másica de agua y fracción másica de glicerol corresponden respectivamente a 0.005 y 0.026. Junto a estos resultados se rechaza entonces la hipótesis nula, ya que ambos valores se encuentran por debajo del valor de significancia de 0.05, indicando que las fracciones másicas de ambos compuestos influyen de forma negativa la variable Poder Calorífico.

Otro resultado importante que se muestra en el Cuadro 4.8 corresponde al valor del factor de inflación de la varianza (FIV), el cual determina el peso o grado de correlación entre las variables predictivas, es decir, las fracciones másicas de los componentes. La varianza inflada se considera alta cuando supera el valor 10, siendo el valor de referencia. Según la Ecuación 4.2, las fracciones másicas de los componentes en una mezcla presentan correlación entre sí, por lo que es esperable que se tenga en el modelo de regresión correlación entre las variables. Sin embargo, basados en los valores que se obtuvieron para cada variable, los cuales son cercanos a 1, esta correlación no representa una inflación significativa a la varianza, y ninguno de los términos debe ser eliminado del modelo.

Cuadro 4.8. Resultados del análisis de coeficientes de la regresión lineal (Elaboración propia).

Término	Coefficiente	Error Estándar del Coeficiente	Valor-T	Valor-P	Factor de Inflación de la varianza FIV
Constante	20.304	0.195	104.16	0.000	-
X _{Agua}	- 14.63	4.930	- 2.97	0.005	1.04
X _{Glicerol}	- 4.92	2.140	- 2.30	0.026	1.04

Se utilizó los resultados del Cuadro 4.9 de la prueba Análisis de Varianza generado en el software Minitab 17 para determinar según el valor p de la Falta de Ajuste, si el modelo especifica o no de forma correcta la relación entre las variables. Para esta prueba se parte de la hipótesis nula de que el modelo especifica de forma correcta

la relación que existe entre las variables independientes (predictores) y la variable respuesta. Como se observa en el cuadro 4.9, para un 95% de confianza el valor de p que se encuentra para la Falta de Ajuste corresponde a 0,000, el cual es menor al nivel de significancia determinado, rechazando así la hipótesis nula. Con lo anterior se puede concluir que la falta de ajuste es estadísticamente significativa y el modelo no es representativo.

Cuadro 4.9. Análisis de Varianza de la regresión lineal (Elaboración propia).

Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados Ajustados	Cuadrados medios Ajustados	Valor F	Valor P
Regresión	2	5.077	2.53833	8.66	0.001
Agua	1	2.583	2.58327	8.81	0.005
Glicerol	1	1.551	1.55135	5.29	0.026
Error	51	14.949	0.29312	-	-
Falta de Ajuste	15	12.652	0.84350	13.22	0.000
Error puro	36	2.297	0.06380	-	-
Total	53	20.026	-	-	-

Por último, como parte del estudio, se analizó la gráfica de Valores ajustados contra los residuos para comprobar que los residuos están distribuidos de forma aleatoria y poseen una variable constante. En la Figura 4.2 se muestra que la aleatoriedad no se da a ambos márgenes del rango del residuo. Como se observa en la primera agrupación de datos, para el valor 19,0 ajustado, los puntos representados en la gráfica se agrupan en el eje positivo de los residuos, y una tendencia similar se presenta en los demás valores ajustados. Basándose en este resultado, se puede concluir de que la varianza de los residuos no es constante, por lo que las variables independientes que se plantean en el modelo están faltantes de información, es decir, el modelo no explica todas las posibilidades que se pueden tener en el fenómeno descrito.

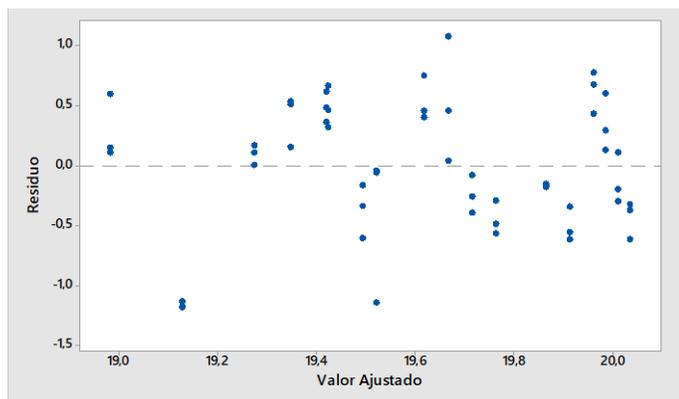


Figura 4.2. Gráfico de valores justados contra los residuos (Elaboración propia en software Minitab 17).

En conclusión, el análisis estadístico de regresión múltiple para el modelo generado a partir de los datos experimentales mostrados en el Cuadro 4.6 no representa normalidad, su modelo no es estadísticamente predictivo y la aleatoriedad de los residuos sugiere que los datos no describen el fenómeno en análisis.

Si para el Cuadro 4.6 se agruparon los valores de las fracciones másicas de cascarilla de coquito de forma constante, y si se representa los valores de las réplicas como promedios se obtiene la gráfica de la Figura 4.3 para la relación del poder calorífico inferior según el porcentaje de agua presente en la mezcla.

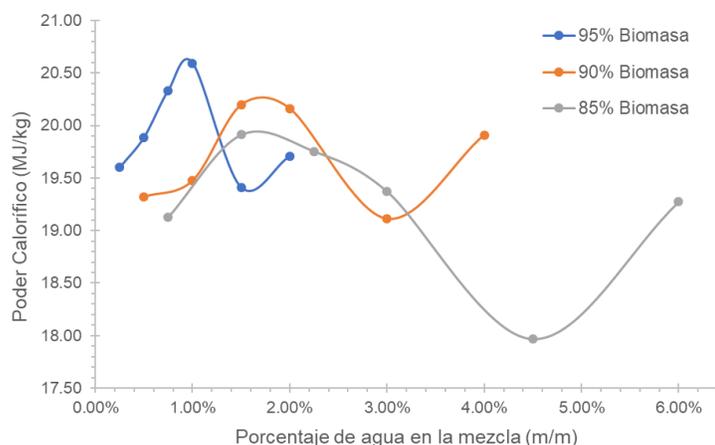


Figura 4.3 Poder calorífico de mezclas cascarilla de coquito, glicerol puro y agua

Además de la variación por la metodología de mezcla planteada al inicio de esta sección, el proceso de determinación del poder calorífico a partir de la Bomba Calorimétrica Parr en el Laboratorio de Ingeniería Química presenta otros factores que pueden llevar a una variación en el valor encontrado, como su manipulación por varios estudiantes debido a su uso a nivel didáctico y no exclusivo para su investigación, lo cual aplica también para los equipos alternativos, en este caso siendo el más crítico la balanza semi analítica, ya que el proceso es sensible a la masa. Debido estos factores, además de la demanda de tiempo que representa la metodología para la determinación del poder calorífico, se estableció días completos de su uso, evitando su manipulación durante la toma de datos por terceros, e inicialmente se estandarizó el equipo por día de uso.

El análisis de los datos recopilados para las estandarizaciones según la composición de agua en la mezcla, mostrada en la Figura 4.3 indica una tendencia similar a la mostrada en la Figura 4.4, donde se muestra la relación de la variable respuesta Poder Calorífico en relación con el porcentaje de agua en la mezcla. Debido a que los reactivos utilizados presentan alta pureza y la variabilidad externa al equipo, es decir, la manipulación asociada a error humano fue controlada en el proceso, se concluyó que la variabilidad se debe a un error en el equipo.

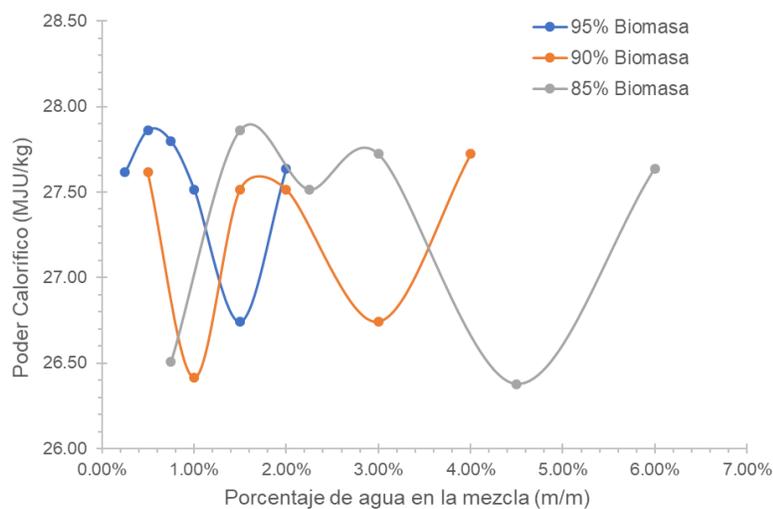


Figura 4.4 Poder calorífico de las estandarizaciones según la composición de agua en la muestra.

Analizando los valores de las estandarizaciones según su orden de determinación cronológica, mostrados en la Figura 4.5, se puede observar una alta variabilidad, teniendo en cuenta que estos valores corresponden a la referencia estándar en el proceso, lo que puede ocasionar ruido en el valor obtenido para la mezcla.

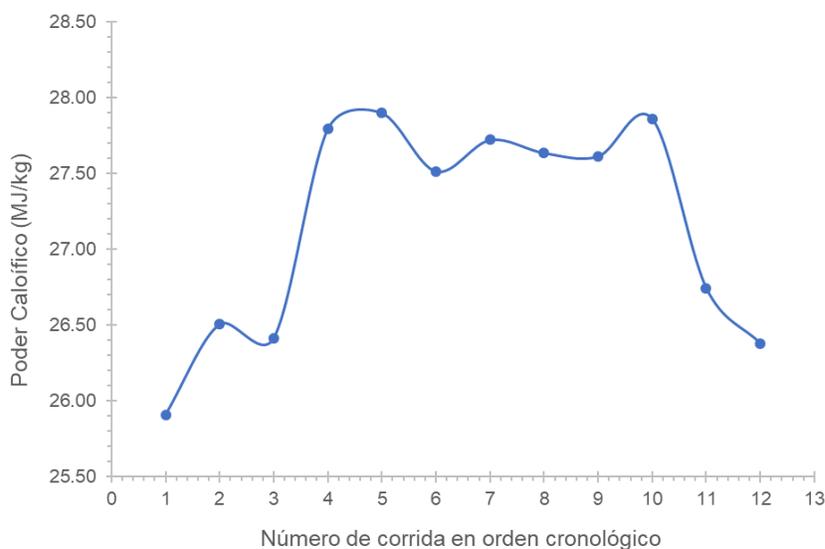


Figura 4.5 Poder calorífico de las estandarizaciones según su orden de determinación cronológica, cuya desviación estándar corresponde a 0.717 MJ/kg.

- Nueva corrida experimental con ajuste al error por equipo

Debido a la variabilidad encontrada se procedió a generar de nuevo los datos eliminando el ruido ocasionado por la variación en el equipo al realizar una estandarización antes de cada corrida. Lo anterior implica aumentar el tiempo que demanda la metodología por lo que se utilizó un modelo por duplicado, y se redujo la cantidad de mezclas, como se muestra en el Cuadro 4.10.

Cuadro 4.10. Fracciones másicas para las mezclas glicerol puro, agua y cascarilla de coquito con la estandarización para cada dato.

Mezcla	Agua (m/m)	Glicerol (m/m)	Biomasa (m/m)
1	0.0050	0.0450	0.9500
2	0.0075	0.0425	0.9500
3	0.0100	0.0400	0.9500
4	0.0150	0.0350	0.9500
5	0.0100	0.0900	0.9000
6	0.0150	0.0850	0.9000
7	0.0200	0.0800	0.9000
8	0.0250	0.0750	0.9000
9	0.0150	0.1350	0.8500
10	0.0225	0.1275	0.8500
11	0.0300	0.1200	0.8500
12	0.038	0.1125	0.8500

Al estandarizar el equipo para cada muestra se logra obtener datos que representan de forma consistente el estado del equipo, y donde se puede realizar la determinación de la variabilidad respecto al valor teórico del blanco que en este caso corresponde al ácido benzoico.

El resultado de las corridas bajo la metodología planteada respecto a la mayor frecuencia de estandarización del equipo se muestra en el Cuadro 4.11.

Cuadro 4.11. Resultado de las corridas bajo la nueva metodología planteada.

Mezcla	Agua	Glicerol	Biomasa	Replica	Poder Calorífico MJ/kg
1	0.005	0.0450	0.9500	1	19.2732
1	0.005	0.0450	0.9500	2	18.9685
2	0.008	0.0425	0.9500	1	18.3286
2	0.008	0.0425	0.9500	2	18.4835
3	0.010	0.0400	0.9500	1	18.4702
3	0.010	0.0400	0.9500	2	18.4760
4	0.015	0.0350	0.9500	1	18.4394
4	0.015	0.0350	0.9500	2	18.5930
5	0.010	0.0900	0.9000	1	18.0150
5	0.010	0.0900	0.9000	2	18.2540
6	0.015	0.0850	0.9000	1	18.1610
6	0.015	0.0850	0.9000	2	18.6824
7	0.020	0.0800	0.9000	1	18.2637
7	0.020	0.0800	0.9000	2	18.1449
8	0.025	0.0750	0.9000	1	18.1769
8	0.025	0.0750	0.9000	2	17.9536
9	0.015	0.1350	0.8500	1	17.7504
9	0.015	0.1350	0.8500	2	17.9393
10	0.023	0.1275	0.8500	1	18.0337
10	0.023	0.1275	0.8500	2	18.0290
11	0.030	0.1200	0.8500	1	17.4532
11	0.030	0.1200	0.8500	2	17.8137
12	0.038	0.1125	0.8500	1	18.2647
12	0.038	0.1125	0.8500	2	17.7195

Utilizando los datos generados para la prueba de normalidad se obtienen los resultados mostrados en la Figura 4.6. Como se muestra en el gráfico, el valor P corresponde a 0.711, el cual a un 95% de confianza se encuentra por encima del nivel de significancia, aceptando así la hipótesis nula de que los valores son normales, por lo que se puede tomar conclusiones estadísticas aceptables al realizar el análisis de regresión lineal múltiple.

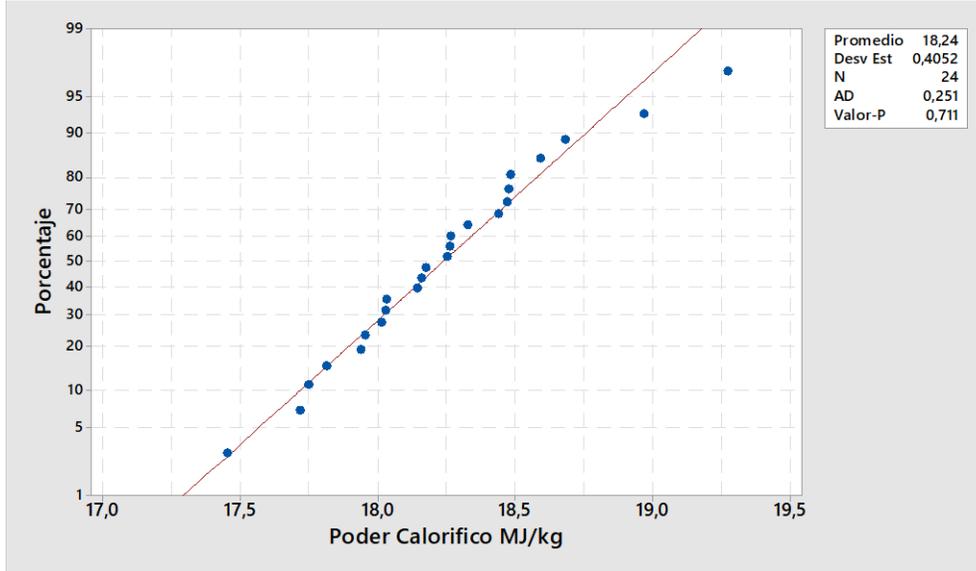


Figura 4.6. Prueba de normalidad (Elaboración propia en software Minitab 17).

La Ecuación 4.5 corresponde al resultado de la ecuación de regresión que se obtuvo con el software Minitab 17, utilizando los resultados mostrados en el Cuadro 4.11, la cual se asemeja a la Ecuación 4.3. Como se mencionó anteriormente, el aporte del poder calorífico de la cascarilla de coquito se manejó como una constante, cuyo valor experimental corresponde a 19.89 MJ/kg y donde en la Ecuación 4.4 se obtiene una constante de 18.997 MJ/kg. Los valores de coeficientes que corresponden a las variables x_{Agua} y x_{Glicerol} , las cuales representan sus respectivas fracciones másicas y basándose en la Ecuación 4.3, representan el poder calorífico de estos componentes.

$$\text{PCS} = 20.305 - 13.53 x_{\text{agua}} - 6.32 x_{\text{glicerol}} \quad (4.5)$$

Donde,

PCS Poder Calorífico Inferior, MJ/kg.

X Fracción másica presente en la muestra, adimensional.

En el Cuadro 4.12 se muestra además el resultado del análisis estadístico de los valores de la medida del ajuste de los datos al modelo encontrado. Como se puede observar, el valor de coeficiente de determinación ajustado corresponde a un 57.76%, el cual representa una mejora considerable al compararlo con el valor del coeficiente de determinación ajustado obtenido con los resultados mostrados en el Cuadro 4.7, con un valor de 22.42%. Otra mejora visible en el Cuadro 4.12 respecto al análisis de regresión obtenido con los datos del Cuadro 4.6 corresponde a la disminución del error estándar de la regresión a un 0.2633, comparado con el valor del Cuadro 4.7 de 0.5414.

Cuadro 4.12. Análisis estadístico de los valores de la medida del ajuste de los datos al modelo encontrado (Elaboración propia).

Error estándar de la regresión	Coeficiente de determinación	Coeficiente de determinación ajustado	Coeficiente de determinación predictivo
(S)	(R²)	(R²-adj)	(R²-pred)
0.263345	61.43%	57.76%	47.97%

A pesar de que se obtuvo un mejor coeficiente de determinación ajustado, se debe continuar el análisis de regresión para lograr concluir si el modelo generado con los datos analizados puede ser utilizado como un modelo predictivo. Como se muestra en el Cuadro 4.13, los resultados para el análisis de coeficientes generado en el software Minitab 17 muestran con un 95% de confianza que los valores P para los coeficientes Agua y Glicerol. Los valores.

Como se mencionó anteriormente, para el análisis de coeficientes a hipótesis nula corresponde a que existe asociación entre el término y la respuesta. Basándose en lo anterior, con un 95% de confianza, si se obtiene valores de p menores al valor de significancia 0.05, la asociación entre las variables es estadísticamente significativas. Como se observa en el Cuadro 4.13, el término de fracción de glicerol cumple con la premisa anterior, lo cual indica que influye en la variable respuesta,

sin embargo, no se presenta la misma situación para lo que es la fracción másica de agua.

Cuadro 4.13. Resultados para el análisis de coeficientes generado en el software Minitab 17 (Elaboración propia).

Término	Coeficiente	Error Estándar del Coeficiente	Valor-T	Valor-P	Factor de Inflación de la varianza FIV
Constante	18.997	0.142	133.40	0.000	
X _{Agua}	- 13.53	7.33	- 1.85	0.079	1.60
X _{Glicerol}	- 6.32	1.97	- 3.21	0.004	1.60

Basándose en la teoría, donde el valor de calor específico del agua (4.184 kJ/kgK) es mayor al del glicerol puro (2.400 kJ/kgK) (Van Wylen, Sonntag, & Borgnakkke, 2009), al aumentar la cantidad de agua y glicerol presente en la mezcla disminuye el poder calorífico, debido al consumo energético que generan. El estudio estadístico no está acorde al fenómeno físico teórico de la Ecuación 4.1.

Para analizar este caso se debe basar en los datos de fracciones másicas de agua mostradas en el Cuadro 4.7 en comparación con los valores del Cuadro 4.5. Debido a la demanda de tiempo y recursos que se requiere para la corrida de cada réplica, para lo que es la metodología planteada para la estandarización continua del equipo, al reducir la cantidad de mezclas a analizar, se disminuyó el rango de fracciones másicas de agua a evaluar. Como se observa en ambos cuadros se pasó a que el valor máximo de fracción másica en la mezcla fuera de un 0.06 a un 0.038. Al limitar los datos de esta forma, el error asociado al muestreo realizado según la sección 3.8 aumenta, ya que los valores donde se presenten menor proporción de agua en las mezclas glicerol-agua son más difíciles de muestrear en comparación con los que tengan mayor proporción. Este error, está asociado al resultado de la significancia estadística que se presenta en el Cuadro 4.13, y al valor de error estándar del coeficiente de fracción de agua, el cual con un valor de 7.33 es mayor al de la fracción de glicerol con un valor de 1.97. Se recomienda para futuros

investigadores realizar más pruebas en las condiciones metodológicas donde inicialmente las estandarizaciones en el equipo se den para cada corrida y con el mismo rango de fracciones másicas planteadas en el Cuadro 4.5.

A pesar de que se presenta esta situación, el Cuadro 4.13 también muestra valores de factores de inflación de la varianza de 1.60 para ambas variables, lo cual indica que la correlación que existe entre estas variables no presenta una inflación en la varianza y ninguno de los términos se debe eliminar.

Luego de analizar el aporte de cada variable se utilizaron los resultados del Cuadro 4.14 de la prueba Análisis de Varianza generado con el software Minitab 17 para determinar según el valor p de la Falta de Ajuste, si el modelo especifica o no de forma correcta la relación entre las variables. Como se menciona anteriormente, se parte de la hipótesis nula de que el modelo especifica de forma correcta la relación que existe ente los predictores y la variable respuesta. Como se observa en el Cuadro 4.14, para un 95% de confianza el valor de p que se encuentra para la Falta de Ajuste corresponde a 0,065, el cual es mayor al nivel de significancia determinado, aceptado así la hipótesis nula. Con lo anterior se puede concluir que la falta de ajuste no es estadísticamente significativa y el modelo es representativo de la relación entre las variables predictivas, y la variable respuesta.

Cuadro 4.14. Análisis de Varianza generado en el software Minitab 17 (Elaboración propia).

Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados Ajustados	Cuadrados Medios Ajustados	Valor F	Valor P
Regresión	2	2.3199	1,15994	16,73	0.000
Agua	1	0.2365	0.23655	3,41	0.079
Glicerol	1	0.7147	0.71473	10.31	0.004
Error	21	1.4564	0.06935		
Falta de Ajuste	9	0.9582	0.10647	2.56	0.065
Error puro	12	0.4982	0.04151		
Total	23	3.7762			

Por último, como parte del estudio, se analizó la gráfica de valores justados contra los residuos generada en el análisis para comprobar que los residuos están distribuidos de forma aleatoria y poseen una variabilidad constante. En la Figura 4.7 se muestra que la distribución de los residuos respecto al valor ajustado. El gráfico muestra varios valores atípicos que se alejan del valor cero, además de un agrupamiento de tres zonas, posiblemente relacionadas a la categorización de los datos respecto a los tres valores de fracción de biomasa de 0.85, 0.90 y 0.95. Basándose en este resultado, se puede concluir que la varianza de los residuos no es constante, y el modelo podría no ser aceptable, por lo que las variables independientes que se plantean en el modelo están faltantes de información, es decir, el modelo no explica todas las posibilidades que se pueden tener en el fenómeno descrito.

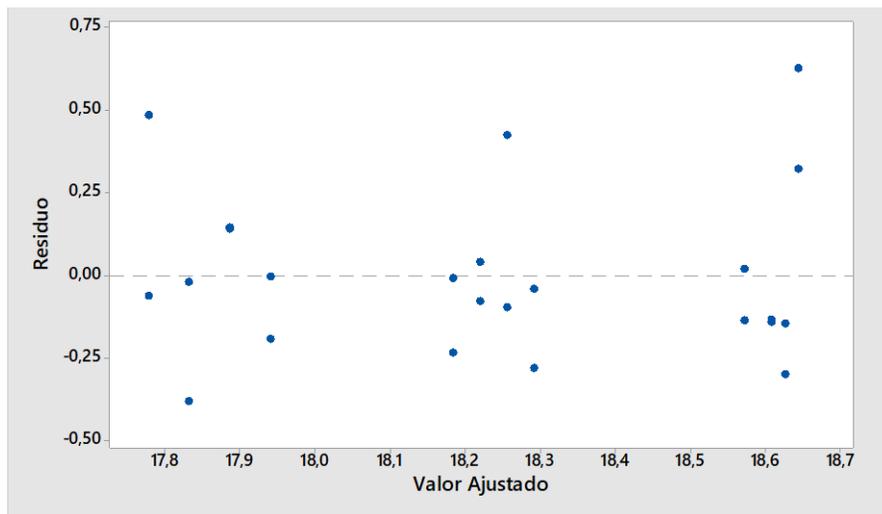


Figura 4.7. Gráfico de valores ajustados contra los residuos (Elaboración propia en software Minitab 17).

Como se mencionó anteriormente, al limitar el rango de fracción másica de agua, el error asociado al muestreo realizado según la sección 3.8 aumenta, ya que los valores donde se presenten menor proporción de agua en las mezclas glicerol-agua son más difíciles de muestrear en comparación con los que tengan mayor

proporción. Existe la posibilidad de que este error sea el que genere la alteración en los valores residuos, que indica que el modelo no describe todas las posibilidades que se pueden presentar, lo cual se respalda a su vez con el resultado de significancia estadística que se obtuvo para la fracción másica de agua en el Cuadro 4.13. Debido a esta premisa, se decidió realizar un modelo de regresión lineal que incluya la interacción entre las fracciones de glicerol y agua (referirse a la sección 4.3.2).

Para analizar a fondo si el error asociado al equipo fue estabilizado por el aumento de estandarizaciones en la metodología se agrupó de forma constante los valores de fracciones másicas de la cascarilla de coquito y se representó gráficamente el promedio de las réplicas, de la misma forma que se realizó en la Figura 4.3 a partir de los resultados obtenidos en el Cuadro 4.8, generando la gráfica de la Figura 4.8.

Los resultados obtenidos en la gráfica presentan su tendencia diferente a la encontrada inicialmente en la Figura 4.3. Como la metodología planteada de mezclado puede llevar a una variabilidad debido a la dificultad en el proceso de mezclado inicial, además de la variabilidad por error del equipo, los valores representados en el gráfico presentan una variabilidad que, al tener más información respecto al equipo, puede ser medible, al realizarse para cada corrida la estandarización del equipo.

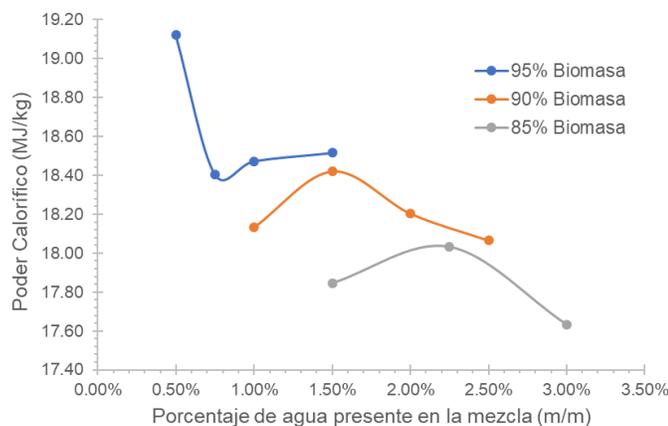


Figura 4.8 Poder calorífico de mezclas luego de ajustar secuencia de estandarizaciones (Elaboración propia).

En el caso de los valores de poder calorífico para las estandarizaciones según el porcentaje de agua presente en la mezcla representado en la Figura 4.9, no se encuentra la misma tendencia a los valores de poder calorífico de estandarizaciones determinados para las corridas iniciales en la Figura 4.3, la cual a su vez es diferente a la tendencia encontrada en la Figura 4.8 para los valores de poder calorífico de mezclas con la metodología basada en el aumento de estandarizaciones del equipo.

Es importante mencionar que la estandarización en cada corrida no corrige la variabilidad que poseen los datos, pero la información producto de las pruebas relaciona una variabilidad asociada a cada replica que mide el aporte del error debido al equipo, al ser analizado de forma continua y presenta mayor información del estado actual del equipo en cada corrida.

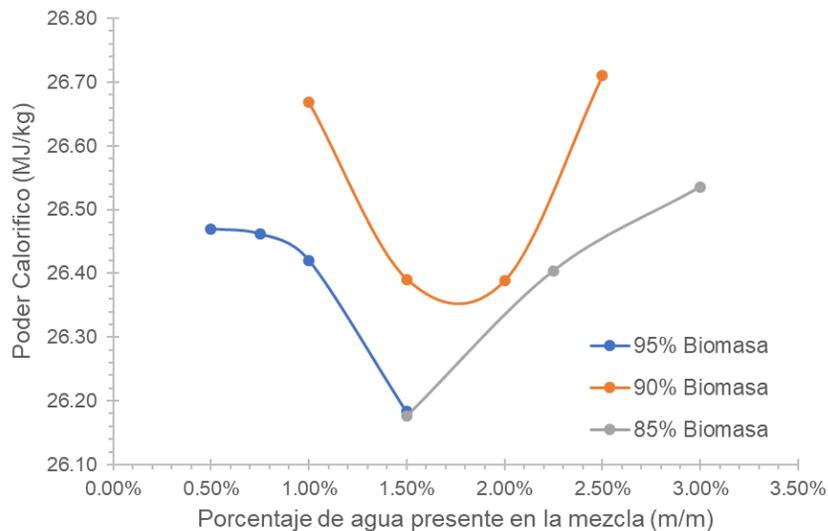


Figura 4.9 Estandarizaciones según el porcentaje de agua presente en la mezcla (Elaboración propia).

En cuanto a la tendencia presentada de las estandarizaciones según su orden cronológico, mostrado en la Figura 4.10, se observa que se presenta una mayor estabilidad del equipo entre las corridas 6 y 19, sin embargo, fuera de este rango se observa puntos específicos que se alejan de la tendencia, los cuales pueden atribuirse a las condiciones de trabajo en ese momento en específico del equipo. Basándose en este análisis se puede concluir que el error de equipo, a pesar de

estar presente, es medible por lo que el valor de los datos experimentales puede corregirse.

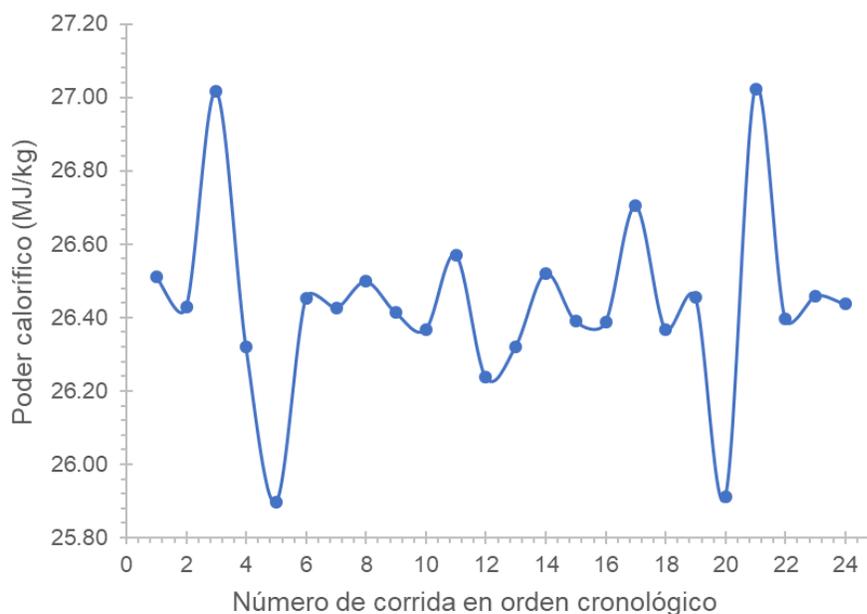


Figura 4.10 Poder calorífico de las estandarizaciones según su orden cronológico, cuya desviación estándar corresponde a 0.025 MJ/kg (Elaboración propia).

A partir de la Figura 4.8, se puede observar que la mezcla que implica un mayor poder calorífico corresponde a la que presenta mayor porcentaje de biomasa, lo que se apega al principio representado por la Ecuación 4.1. Sin embargo, la finalidad del proyecto es encontrar un uso alternativo al glicerol crudo a partir de mezclarlo con biomasa sin afectar su capacidad como combustible.

Comparando los datos obtenidos con los valores de poder calorífico de biomásas comúnmente utilizadas en el país, como es el caso del bagazo, el menor valor de poder calorífico de la mezcla cascarilla de coquito con el glicerol puro corresponde a 17.633 MJ/kg. Si se aplica a este valor el peor caso al restarle el error estándar de regresión encontrado en el Cuadro 4.9, el cual corresponde a un 0.2633 MJ/kg, se presenta el valor de 17.370 MJ/kg. donde mantiene incluso a un nivel superior

del poder calorífico teórico del bagazo, con un valor de 16.371 MJ/kg mostrado en el Cuadro 2.1.

El análisis del comportamiento de la mezcla agua, glicerol puro y cascarilla de coquito permitió determinar que la capacidad de la mezcla como uso combustible disminuye conforme se aumenta la cantidad de glicerol y agua. El modelo de regresión lineal encontrado basado en los datos experimentales no representa de forma completa y precisa la relación entre las fracciones agua y glicerol con el poder calorífico de la mezcla debido al error asociado al coeficiente de fracción másica, por lo que no se recomienda su uso como modelo predictivo.

Basándose en lo anterior se determinó que para la selección de la composición de mezcla deseado para el análisis utilizando los compuestos cascarilla de coquito, glicerol crudo y agua se debe basar en conclusiones técnicas, sin optimizar el modelo de regresión lineal encontrado.

Como se observa en la Figura 4.8 la composición de mezcla de 1.50% agua, 8.50% glicerol puro con 90% de cascarilla de coquito se encuentra en un punto medio en la gráfica, donde su poder calorífico corresponde a 18.422 MJ/kg. Utilizando este valor de mezcla se puede aprovechar el uso de glicerol crudo, y mantener la capacidad calorífica de la cascarilla de coquito.

4.3.2 Regresión lineal múltiple considerando la interacción X_{agua} y X_{glicerol} .

Para analizar el comportamiento de los datos debido al método de dosificación de la fase líquida de la mezcla (glicerol-agua) mencionado anteriormente se utilizó el modelo representado en la Ecuación 4.6, donde se incluye como un tercer predictor el factor $X_{\text{agua}} * X_{\text{glicerol}}$.

$$PC = A + B x_{\text{agua}} + C x_{\text{glicerol}} + D x_{\text{agua}} * x_{\text{glicerol}} \quad (4.6)$$

Donde:

PC, Poder Calorífico, MJ/kg.

A: Constante del modelo que corresponde al intercepto, MJ/kg.

B: Pendiente de la variable fracción másica de agua, MJ/kg.

C: Pendiente de la variable fracción másica de glicerol, MJ/kg.

D: Pendiente de la variable fracción másica de glicerol y agua, MJ/kg.

X, Fracción másica presente en la muestra, adimensional.

El ajuste lineal de regresión lineal múltiple a partir de la inclusión del factor $X_{\text{agua}} * X_{\text{glicerol}}$ genera el modelo representado en la Ecuación 4.7.

$$PCS = 19.422 - 46.4 x_{\text{agua}} - 11.29 x_{\text{glicerol}} + 344 x_{\text{agua}} * x_{\text{glicerol}} \quad (4.7)$$

Donde:

PCS, Poder Calorífico Inferior, MJ/kg.

X, Fracción másica presente en la muestra, adimensional.

En el Cuadro 4.15 se muestra el resultado del análisis estadístico de los valores de la medida del ajuste de los datos al modelo encontrado. Como se puede observar, el valor de coeficiente de determinación ajustado corresponde a un 59.58%, lo que representa una mejora del 1.82% respecto al ajuste encontrado en el Cuadro 4.12 del modelo. Otra mejora visible en el Cuadro 4.12 respecto al análisis de regresión obtenido con los datos del Cuadro 4.6 corresponde a la disminución del error estándar de la regresión de un valor de 0.2633 a 0.2576.

Cuadro 4.15 Análisis estadístico de los valores de la medida del ajuste de los datos al modelo encontrado (Elaboración propia).

Error estándar de la regresión	Coeficiente de determinación	Coeficiente de determinación ajustado	Coeficiente de determinación predictivo
(S)	(R2)	(R2-adj)	(R2-pred)
0.2576	64.85%	59.58%	47.23%

En el Cuadro 4.16 se muestra los resultados para el análisis de coeficientes donde, como se mencionó anteriormente, la hipótesis nula corresponde a que existe asociación entre el término y la respuesta en comparación con el resto de los coeficientes. Basándose en lo anterior, con un 95% de confianza, si se obtiene valores de p menores al valor de significancia 0.05, la asociación entre las variables es estadísticamente significativas. Sin embargo, es importante mencionar que la significancia estadística analizada de los coeficientes no implica necesariamente que deba o no ser incluido en el modelo final, sino que es insignificante ante la presencia de todas las otras variables en el problema. Con lo anterior el Cuadro 4.16 indica que el glicerol es estadísticamente significativo ante los factores de agua y la relación entre los factores agua y glicerol.

Cuadro 4.16. Resultados para el análisis de coeficientes generado en el software Minitab 17 (Elaboración propia).

Término	Coeficiente	Error Estándar del Coeficiente	Valor-T	Valor-P	Factor de Inflación de la varianza FIV
Constante	19.422	0.332	58.56	0.000	
X _{Agua}	- 46.4	24.4	- 1.90	0.072	18.81
X _{Glicerol}	- 11.29	3.99	- 2.83	0.010	6.87
X _{agua} *X _{glicerol}	344	243	1.42	0.172	35.13

Luego de analizar el aporte de cada variable se utilizaron los resultados del Cuadro 4.17 de la prueba Análisis de Varianza generado con el software Minitab 17 para determinar según el valor p de la Falta de Ajuste, si el modelo especifica o no de forma correcta la relación entre las variables. Como se menciona anteriormente, se parte de la hipótesis nula de que el modelo especifica de forma correcta la relación que existe ente los predictores y la variable respuesta. Como se observa en el Cuadro 4.17, para un 95% de confianza el valor de p que se encuentra para la Falta de Ajuste corresponde a 0,074, el cual es mayor al nivel de significancia

determinado, aceptado así la hipótesis nula. Con lo anterior se puede concluir que la falta de ajuste no es estadísticamente significativa y el modelo es representativo de la relación entre las variables predictivas, y la variable respuesta.

Cuadro 4.17. Análisis de Varianza generado en el software Minitab 17 (Elaboración propia).

Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados Ajustados	Cuadrados Medios Ajustados	Valor F	Valor P
Regresión	3	2.4489	0.81630	12.30	0.000
Agua	1	0.2396	0.23960	3.61	0.072
Glicerol	1	0.5303	0.53027	7.99	0.010
Agua*Glicerol	1	0.1331	0.13308	2.01	0.172
Error	20	1.3272	0.06636		
Falta de Ajuste	8	0.8291	0.10363	2.50	0.074
Error puro	12	0.4982	0.04151		
Total	23	3.7761			

Por último, se analizó la distribución de los residuos a partir de la Figura 4.11 contra el valor ajustado y se encontró aleatoriedad en el comportamiento, lo que indica que no solo se mejoró el ajuste del modelo, sino que también este tiene significancia estadística donde no hay evidencia de un modelo faltante de información. Lo anterior indica que este modelo representa el comportamiento de los datos determinados experimentalmente, sin embargo, basado en el resultado del Cuadro 4.15, este no representa un modelo predictivo.

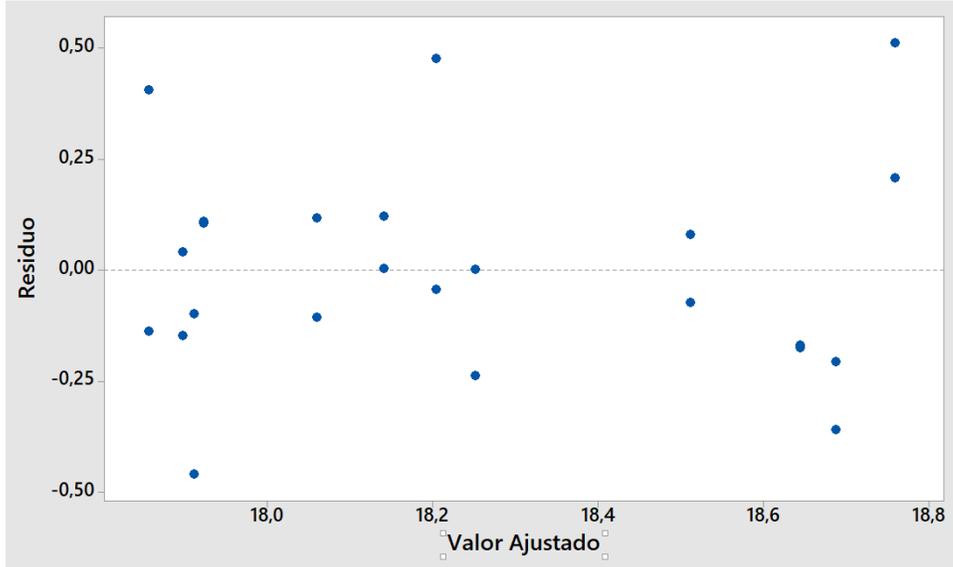


Figura 4.11 Gráfico de valores ajustados contra los residuos (Elaboración propia en software Minitab 17).

4.3.3 Modelo predictivo a partir de Red Neuronal.

Anteriormente se trabajó en la normalidad de los datos experimentales iniciales comprometidos por un error sistemático relacionado a equipo a partir de la generación de un segundo experimento donde se estandarizó con mayor frecuencia, luego el modelo se mejoró al incorporar la interacción entre las fases líquidas, glicerol y agua, debido al método de dosificación para la mezcla, sin embargo en estos casos siempre se dejó a un lado la variable de fracción másica de la cascarilla de coquito, debido a los tres únicos valores otorgados para las mezclas, ya que estadísticamente no presentan una cantidad apropiada de valores para su análisis. Debido a esto, y a modo ilustrativo fuera del objetivo del presente proyecto, se utilizó la herramienta de Red Neuronal que permite el uso de la fracción másica de la cascarilla de coquito, a pesar de presentar únicamente tres valores.

La Red Neuronal como modelo predictivo se define como un sistema de procesamiento de datos cuya estructura y funcionamiento está inspirado en las redes neuronales biológicas. La red se compone de unidades de procesamiento,

conocidas como nodos, los cuales están conectados entre sí, representando la relación entre estos componentes. El conjunto de nodos y conexiones generan lo que es conocido como la arquitectura de la red, representado en la Figura 4.11.

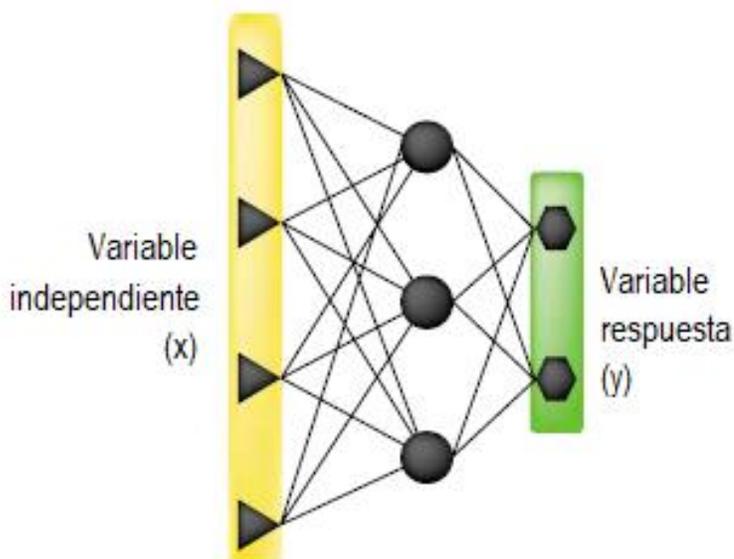


Figura 4.12 Modelos de red neuronal (Elaboración propia).

La característica principal de este modelo predictivo se basa en la capacidad de aprendizaje a través de un proceso de entrenamiento, el cual se puede llevar a cabo en diferentes métodos según el analista seleccione. El principio de entrenamiento corresponde al aprendizaje basado en la segregación aleatoria de los datos, donde se selecciona un porcentaje para lo que corresponde al entrenamiento del modelo y el otro porcentaje de datos se utiliza para validar el modelo encontrado (Dias & Pooliyadda, 2000).

Una vez se selecciona los dos grupos de datos la red busca las relaciones entre los datos basándose en tres modelos matemáticos, el modelo lineal, logarítmico y el tangente hiperbólico. La red genera entonces relaciones entre los datos de entrenamiento y logra un ajuste óptimo basado en estos modelos. Luego realiza el

mismo proceso con los datos segregados para la validación y obtiene a su vez un segundo modelo, el cual busca mejorar el ajuste a partir del entrenamiento previo.

La aplicación de este modelo ha crecido en ámbitos muy variados, incluyendo la ciencia, medicina, finanzas y contaduría debido a su capacidad de aproximación, predicción, clasificación y agrupación a partir del procesamiento de datos, donde la estadística tradicional se ve incluso superada debido a la flexibilidad de la red en encontrar relaciones entre variables sin basarse en suposiciones necesarias para el cumplimiento estadístico de los factores. Varios estudios se han realizado con el fin de comparar las técnicas estadísticas tradicionales con la aplicación de Redes Neuronales, y basado en la literatura se ha encontrado que incluso el 58% de casos de estudio indican que la Red Neuronal supera la estadística tradicional (Paliwal & Usha, 2009)

Para dar un mayor entendimiento a la relación entre las variables estudiadas en el presente proyecto, se analizó los resultados experimentales obtenidos para el segundo ensayo donde se corrige el error por equipo, con el fin de identificar un modelo que describa el comportamiento encontrado, mejorando el ajuste predictivo. La muestra para la segunda corrida experimental corresponde a un valor de 24 datos, los cuales en primera instancia podrían significar una muestra insuficiente, basándose en lo la aplicabilidad usual en la que se ha observado el uso de las Redes Neuronales, sin embargo, la idea de su uso es identificar el comportamiento de esta muestra en específico, logrando así incluir el factor que no se incluyó en el análisis de regresión lineal múltiple por las restricciones de los modelos estadísticos comunes.

Como se observa en la Figura 4.12, se realiza una esquematización del modelo de Red Neuronal tomando como nodos de entrada las tres variables experimentales (relación agua, glicerol y biomasa en la mezcla) y tomando la variable de estudio como el nodo de salida (poder calorífico).

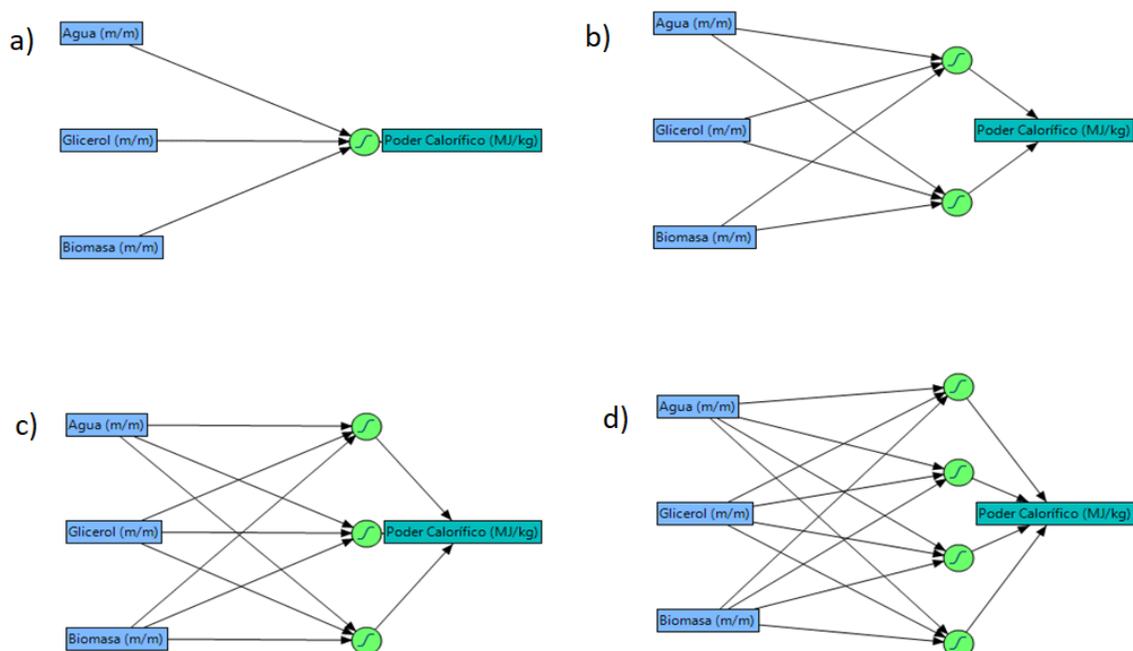


Figura 4.13 Planteamiento del modelo de red neuronal (Elaboración propia en el software JMP)

Como herramienta estadística se utilizó el software JMP, debido a que permite generar iteraciones con facilidad, controlando el diseño del modelo a partir de la cantidad de nodos y la definición del método de entrenamiento y validación, donde para este proyecto se seleccionó el modelo Holdback recomendado en la literatura (Klimberg & McCullough, 2017).

Este método consiste en dividir de forma aleatoria los datos en dos grupos, la muestra de entrenamiento y la muestra para validación. Ambos grupos presentan el mismo modelo, pero cada uno tiene su propio ruido relacionado. En la muestra de entrenamiento se asigna el peso a las variables de entrada, y luego en la muestra de validación se utilizan esos pesos para calcular el error. Para el muestreo de los grupos se utilizó la proporción recomendada de 70% datos para entrenamiento y 30% datos para la validación (Klimberg & McCullough, 2017).

Debido a que el proceso de entrenamiento se ve influenciado según el grupo de datos que se seleccionen de forma aleatoria para cada subgrupo, tanto para entrenamiento como validación, se recomienda un proceso iterativo donde se corra la red neuronal varios ensayos, donde en cada ensayo se varia la población de datos de cada subgrupo, a la vez que el peso de cada inicio del proceso de entrenamiento.

Para la iteración se decidió que cada arquitectura se debía correr al menos 10 veces, encontrando así luego un modelo que se aproxime de la mejor forma a la predicción deseada, como se muestra en el Cuadro 4.15.

La evaluación de las corridas del modelo se basa en analizar varios valores de salida del modelo predictivo. El principal valor de análisis corresponde al valor del coeficiente de determinación de entrenamiento (R_{entr}) y validación (R_{val}) para cada iteración. El proceso de entrenamiento se considera exitoso cuando se ve una mejora en el modelo de validación, lo que implica un mejor coeficiente de determinación.

En el caso en que no se tenga una mejora en la validación, es decir que el proceso de entrenamiento muestre un mejor ajuste que el de validación implica un sobreajuste en el entrenamiento, lo que puede indicar óptimos locales, según la población de entrenamiento seleccionada (Klimberg & McCullough, 2017)

Como se muestra en el Cuadro 4.18, al aumentar el número de nodos en el modelo aumenta la cantidad de iteraciones en las que se presenta un sobreajuste de los datos, lo que implica que el realizar un modelo más complejo aleja la predicción de los datos validada, por lo que la menor cantidad de nodos, la cual presenta un menor grado de complejidad del modelo presenta un mejor proceso de predicción.

Cuadro 4.18 Determinación del modelo de Red Neuronal, valores de coeficientes de determinación y análisis de sobre ajuste (Elaboración propia con el software JMP 13).

Nodos	Corrida	Coeficiente de determinación de entrenamiento	Coeficiente de determinación de validación	$R^2_{val} - R^2_{ent}$	Sobreajuste en el modelo
		R^2_{ent}	R^2_{ent}		
1	1	59.52	65.12	5.6	No
1	2	57.42	65.08	7.66	No
1	3	57.12	59.10	1.98	No
1	4	61.07	58.52	-2.55	Si
1	5	61.84	65.65	3.81	No
1	6	62.55	58.92	-3.63	Si
1	7	65.64	74.12	8.48	No
1	8	61.85	62.73	0.88	No
1	9	60.68	65.49	4.81	No
1	10	59.82	67.04	7.22	No
2	1	77.14	85.86	8.72	No
2	2	82.56	77.38	-5.18	Si
2	3	80.15	70.07	-10.08	Si
2	4	73.49	76.88	3.39	No
2	5	74.33	76.88	2.55	No
2	6	62.37	64.00	1.63	No
2	7	78.57	67.52	-11.05	Si
2	8	63.37	65.86	2.49	No
2	9	74.00	77.75	3.75	No
2	10	74.53	78.31	3.78	No
3	1	82.03	74.76	-7.27	Si
3	2	83.46	80.91	-2.55	Si
3	3	78.75	64.45	-14.3	Si
3	4	74.76	78.06	3.30	No
3	5	82.66	77.85	-4.81	Si
3	6	79.94	75.19	-4.75	Si
3	7	82.11	79.67	-2.44	Si
3	8	63.82	66.39	2.57	No
3	9	81.48	83.12	1.64	No
3	10	76.11	78.25	2.14	No
4	1	84.39	79.76	-4.63	Si
4	2	63.48	64.98	1.50	No
4	3	80.87	77.75	-3.12	Si
4	4	81.43	80.96	-0.47	Si
4	5	81.27	84.76	3.49	No

Cuadro 4.18 (Continuación) Determinación del modelo de Red Neuronal, valores de coeficientes de determinación y análisis de sobre ajuste (Elaboración propia con el software JMP 13).

Nodos	Corrida	Coefficiente de determinación de entrenamiento	Coefficiente de determinación de validación	$R^2_{val} - R^2_{ent}$	Sobreajuste en el modelo
		R^2_{ent}	R^2_{ent}		
4	6	83.29	81.34	-1.95	Si
4	7	84.5	80.75	-3.75	Si
4	8	84.11	80.28	-3.83	Si
4	9	83.73	80.20	-3.53	Si
4	10	82.11	80.02	-2.09	Si

Otro resultado del proceso de análisis predictivo de la red es el error cuadrático medio (EQM), el cual corresponde a la medición de la cantidad de error que existe entre los dos conjuntos de datos. En este caso se busca que el error encontrado en el proceso de validación sea menor al encontrado en el proceso de entrenamiento, lo cual también indica una mejora. En el Cuadro 4.19 se resumen las corridas que cumplen tanto el criterio de no tener sobreajuste, como el presentar una mejora en el error cuadrático medio en el análisis de validación, donde las diferencias menores a 0.002 kJ/kg.

Cuadro 4.19 Determinación del modelo de Red Neuronal, valores de errores cuadráticos medios (Elaboración propia con el software JMP 13).

Nodos	Corrida	Error Cuadrático Medio de entrenamiento	Error Cuadrático Medio de validación	Eent-Eval
		Eent	Eval	
1	5	0.2374	0.2367	0.0007
2	4	0.1979	0.1956	0.0023
2	5	0.1947	0.1942	0.0005
2	9	0.1959	0.1904	0.0055
3	4	0.1931	0.1892	0.0039
4	5	0.1663	0.1576	0.0087

Los modelos encontrados cumplen con los principios de ajuste por lo que se pueden considerar como modelos predictivos eficientes. Sin embargo, para abarcar el

objetivo del análisis, se realizó una evaluación de los perfiles predictivos generados por el software JMP 13 para cada una de las corridas con el fin de encontrar un comportamiento que presente un sentido físico del modelo. La Figura 4.12 muestra los perfiles de cada una de las corridas, donde se identifica que entre más complejo se vuelve el modelo al incrementar la cantidad de nodos, el perfil se aleja del principio teórico fundamentado en la Ecuación 4.1. por lo que se concluye el perfil a) de 1 nodo y corrida número 5 para profundizar en el análisis.

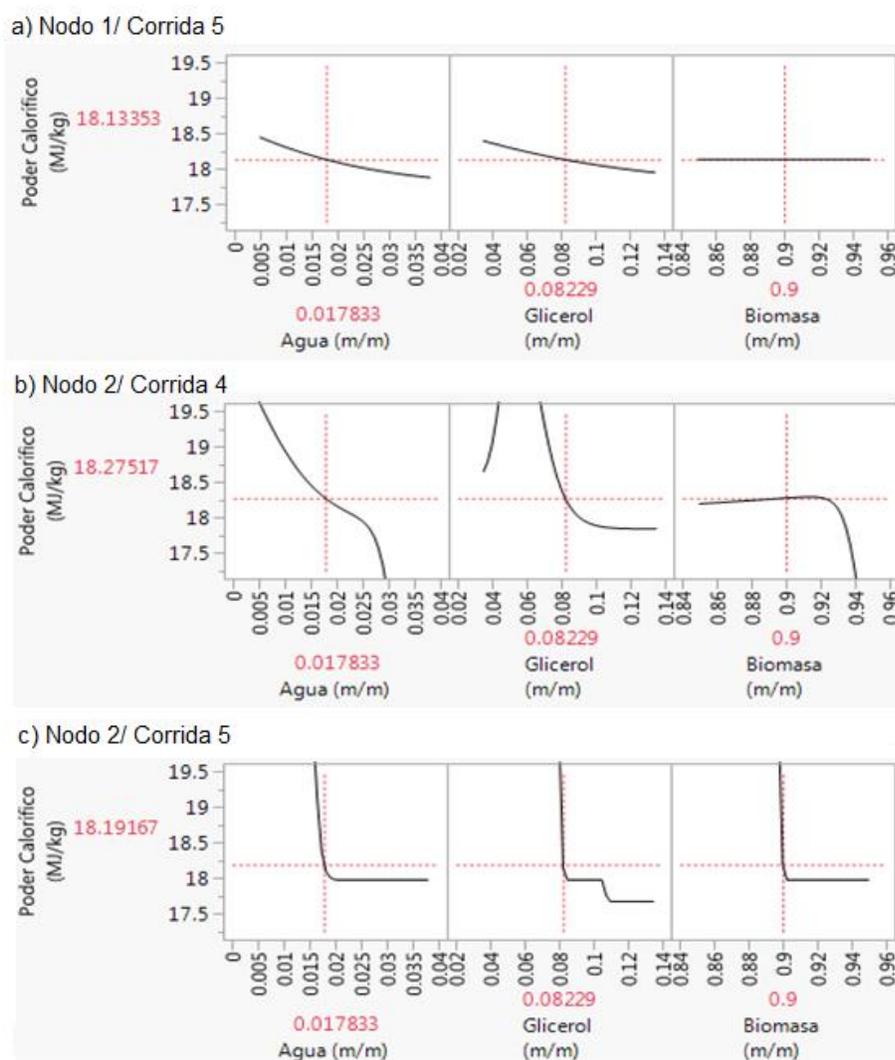


Figura 4.14 Perfiles predictivos para los modelos encontrados (Elaboración propia con el software JMP)

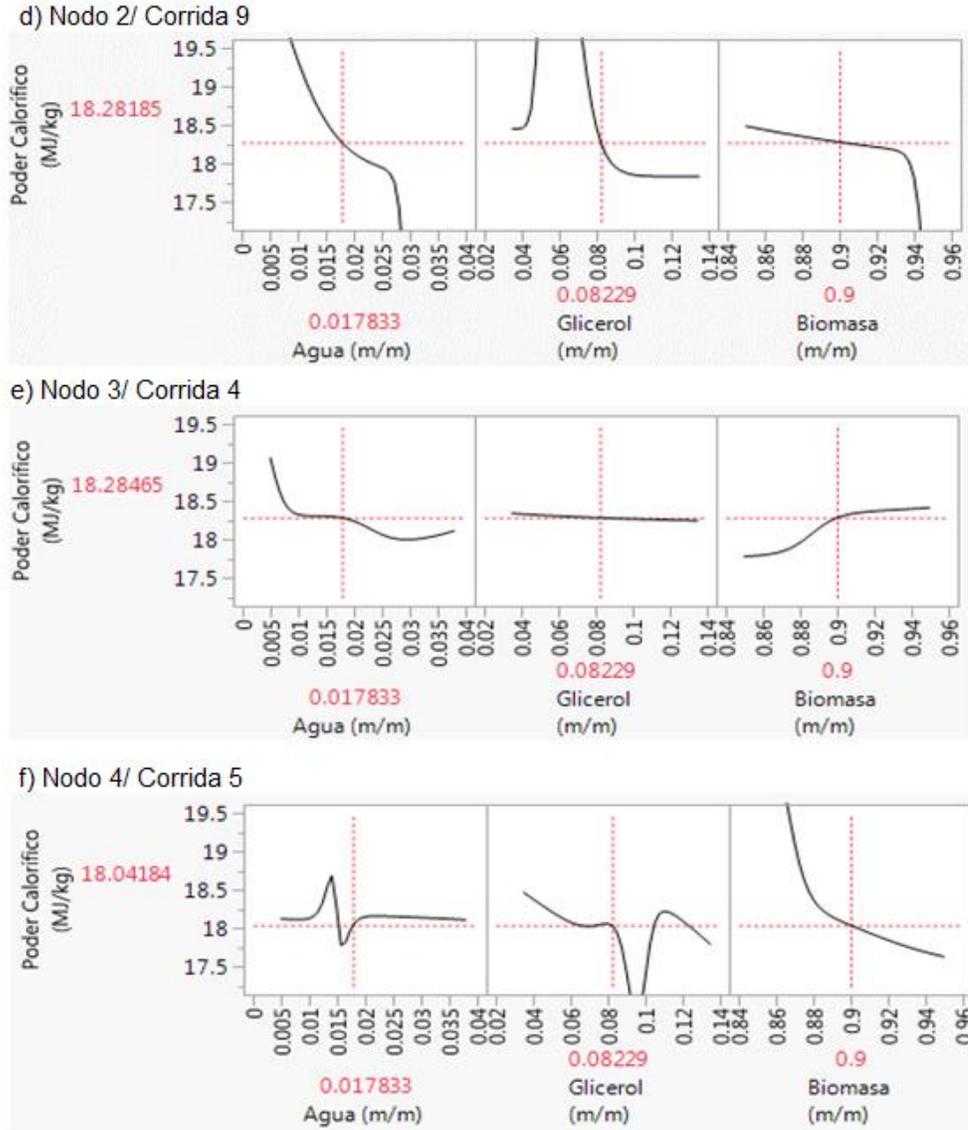


Figura 4.15 Continuación de los perfiles predictivos para los modelos encontrados (Elaboración propia con el software JMP).

A partir del modelo planteado a) de la Figura 4.12, se determinó la Ecuación 4.8 como el modelo predictivo encontrado a partir de la herramienta de Red Neuronal.

$$PC = 19.36 - 1.63H1 \quad (4.8)$$

Donde,

PC: Poder calorífico, kJ/kg.

Para el coeficiente H1 se define por la Ecuación 4.8.

Y la relación H1 se determina a partir de la Ecuación 4.9.

$$H1 = \tanh\left(0.5 (53.80 x_{\text{agua}} + 12.69x_{\text{glicerol}} - 0.13x_{\text{biomasa}})\right) \quad (4.9)$$

Donde,

H1: Factor de relación para el modelo de red neuronal, adim.

x: Fracción másica de la mezcla, adim.

Cuadro 4.20. Resultados para el modelo seleccionado

Coficiente de determinación de entrenamiento	Coficiente de determinación de validación	Error cuadrático medio de entrenamiento	Error cuadrático medio de validación
R²_{ent}	R²_{val}	E_{ent}	E_{val}
61.84	65.65	0.2374	0.2367

Comparando el ajuste predictivo de red neuronal descrito en el Cuadro 4.20 con el ajuste predictivo obtenido con la regresión lineal del Cuadro 4.15 se tiene un incremento de ajuste de 6.27%.

4.4 Mezcla de glicerol crudo con cascarilla de coquito.

Una vez concluido el análisis del caso del glicerol puro se procedió a determinar el poder calorífico de la muestra proveniente de la empresa Energías Biodegradables. Como se indicó en la sección 3.9, las muestras de glicerol crudo tratadas para la determinación de su contenido de agua y metanol fueron llevadas a su estado inicial, con la diferencia en que el contenido de agua corresponde al indicado según la fracción seleccionada. Para un 1.50% de agua en el total de mezcla se debe entonces mezclar inicialmente las fases líquidas, que corresponde a agregar al glicerol crudo pretratado un 10% de agua respecto a la muestra total, basándose en el Cuadro 3.3, que corresponde a la mezcla número 8.

Una vez que se tiene el glicerol crudo con la proporción seleccionada de agua, se procedió a la generación de las mezclas, según el muestreo indicado en la sección 3.9. La razón del muestreo se basa en que los resultados obtenidos presentan la varianza del trasvase de la proporción líquida, que, al ser tan viscosa, puede presentar diferentes proporciones de los componentes según la forma en que se tomen las muestras. El Cuadro 4.11 indica los valores de poder calorífico según el muestreo realizado, donde el balón 1 sigue el muestreo de la Figura 3.4, mientras que el segundo balón solo se tomó la muestra directamente de un solo trasvase de una parte del total de muestra presente.

El promedio del poder calorífico de la mezcla de 1.50% agua, 8.50% glicerol crudo con 90% de cascarilla de coquito corresponde a 20.153 MJ/kg, lo que es mayor al valor encontrado en el Cuadro 4.11. Lo anterior se debe al aporte energético del metanol presente en la muestra de glicerol crudo. La desviación estándar de las muestras está relacionada directamente tanto al error asociado a muestreo como el error asociado a equipo.

Cuadro 4.21. Poder calorífico de la mezcla agua, glicerol crudo y cascarilla de coquito.

Balón	Beaker	Masa de muestra (g)	Poder Calorífico (MJ/kg)	Poder Calorífico Promedio (MJ/kg)	Desviación estándar (MJ/kg)
1	1	1.069	19.904	20.153	0.323
		1.088	20.059		
	1.055	20.410			
	2	1.072	19.683		
	3	1.064	20.527		
2	1	1.014	19.834		
		1.068	20.342		
		1.074	20.461		

El valor de las estandarizaciones de cada replica se representa en el Cuadro 4.22, donde se tiene los valores tanto de la masa de la muestra de ácido benzoico en gramos, como su poder calorífico. Para estos resultados, la desviación estándar corresponde a 0.326 MJ/kg.

Cuadro 4.22 Poder calorífico de las estandarizaciones.

Balón	Beaker	Masa de muestra (g)	Poder Calorífico (MJ/kg)	Poder Calorífico Promedio (MJ/kg)	Desviación estándar (MJ/kg)
1	1	1.014	25.994	26.431	0.326
		1.040	26.567		
		1.054	26.692		
	2	1.029	26.783		
	3	1.020	26.716		
2	1	1.028	26.375		
		1.021	26.398		
		0.989	25.923		

CAPÍTULO 5. ESCALAMIENTO PARA PREPARACIÓN DE LA MEZCLA A NIVEL PLANTA PILOTO

Para la escalación a nivel de planta piloto del proceso se consideró el consumo de energía necesario para el uso de la caldera de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica a partir de la investigación “Viabilidad técnica y económica para el uso de pellets a partir de hojarasca y podas del campus Rodrigo Facio para la producción de vapor de la Escuela de Ingeniería Química” (Chacón Villalobos, 2017). Se plantea entonces el proceso según la demanda que presenta la Escuela de Ingeniería Química de vapor, como base de cálculo para el dimensionamiento de los equipos.

5.1 Normativa en el país sobre el uso de biomasa como combustible.

En la actualidad, el país no cuenta con un sistema regulatorio sobre la generación de energía a partir del uso de biomasa. En el pasado se han propuesto varios proyectos de ley que tenían como objetivo definir, delimitar y regular la actividad, sin embargo, ninguno ha sido aprobado.

El primer proyecto referente a la regulación de esta fuente de energía se presentó ante la asamblea el 13 de Setiembre del 2007, el cual corresponde al proyecto número 16788, bajo el asunto “LEY PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A TRAVÉS DE LA BIOMASA”, bajo un procedimiento proyecto de ley ordinario. Sin embargo, el 16 de noviembre del 2009 recibió un dictamen negativo por mayoría de diputados.

El segundo proyecto de ley presentado a la asamblea legislativa, número 18181, se inició en Julio del 2011, bajo el asunto “GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A TRAVÉS DE BIOMASA”, sin embargo, el proyecto venció su plazo cuatrienal sin ser debatido.

El tercer y último proyecto de ley presentado a la asamblea sobre el uso de biomasa como fuente de energía inició en el año 2015, bajo el número 19503, con el asunto “GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD POR MEDIO DE BIOMASA EN ÉPOCA DE VERANO (DICIEMBRE A MAYO)”, propuesto por Otto Guevara Guth y Natalia Díaz Quintana. La última actualización de las acciones según la página de la Asamblea Legislativa de Costa Rica indica un Dictamen Negativo Unánime, el día 23 de octubre del 2018 (Asamblea Legislativa Republica de Costa Rica, 2018).

En el marco legal del país la ley que involucra de forma general la generación de energía corresponde a la ley 7593, “LEY DE LA AUTORIDAD REGULADORA DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS”, la cual tiene como objetivo fundamental procurar el equilibrio entre las necesidades de los usuarios y los intereses de los prestatarios, velando por el cumplimiento de los requisitos de calidad, cantidad oportunidad, continuidad y confiabilidad de los servicios públicos, bajo las regulaciones dispuestas.

5.2 Base de cálculo para la determinación de cantidad de mezcla a procesar.

Para el diseño de la planta piloto se partió de las características encontradas a nivel experimental de la mezcla de la cascarilla de coquito junto con el glicerol crudo. Como se menciona en el capítulo anterior, la mezcla seleccionada corresponde en composición a 1.50% agua, 8.50% glicerol crudo con 90% de cascarilla de coquito. El valor encontrado para la mezcla con esta composición corresponde a 20.153 MJ/kg.

La cantidad de pellets a procesar por año se determinó utilizando como base de cálculo la caldera del Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica, basándose en el último estudio realizado sobre su producción de vapor. Anualmente se requiere de 16 690,4 kg de vapor, lo que implica un calor de combustión de 49 389 MJ por año, donde se utiliza como combustible el diesel, con un poder calorífico inferior de 42,7 MJ/kg (Chacón Villalobos, 2017).

Debido a que la caldera del Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica es de uso académico, la demanda de los pellets por hora que se presenta en el equipo se determinó a partir del Cuadro 5.1, que corresponde a la cantidad de horas que se utiliza según las actividades que se realizan. Además del uso de la caldera por parte de los estudiantes de Ingeniería Química, las escuelas de ingeniería que también utilizan la caldera en sus Trabajos de Graduación corresponden a la Escuela de Ingeniería Mecánica y la Escuela de Ingeniería Industrial

Cuadro 5.1 Horas de operación de la caldera de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica en el periodo de un año (Chacón Villalobos, 2017).

Área Utilizada	Practica de Laboratorio (h)	Trabajos de Graduación (h)
Escuela de Ingeniería Química	126	12
Escuela de Ingeniería Mecánica	NA	6
Escuela de Ingeniería Industrial	NA	6
Total de horas de uso	126	24
Total anual		150

Para determinar la cantidad de mezcla de cascarilla de coquito con glicerol a utilizar para suplir la demanda de vapor de la caldera de la Escuela de Ingeniería Química se utilizó la Ecuación 5.1, donde relaciona el calor de la caldera directamente con el calor entregado por los pellets,

$$Q_c = Q_p = PC_p * m_p \quad (5.1)$$

Donde,

Q_c : Calor de la caldera, MJ.

Q_p : Calor de pellets, MJ.

PC_p : Poder calorífico de los pellets, kJ/kg.

m_p : Masa de pellets, kg.

Resolviendo esta Ecuación con el dato del calor de caldera de 49 389 MJ del Cuadro 5.2, determinado en el último informe sobre el consumo de vapor entregado el poder calorífico determinado de forma experimental de 20.153 MJ/kg, se encuentra una masa de mezcla de cascarilla de coquito con glicerol crudo de 2450.702 kg anuales (Chacón Villalobos, 2017).

Cuadro 5.2 Resultados de parámetros de calor considerados en el balance de energía utilizando la base de cálculo de 150 horas para la caldera del Laboratorio de la Escuela de Ingeniería Química (Chacón Villalobos, 2017).

Parámetros de Calor	Calor (MJ/año)
Calor de la caldera	49 389
Perdidas para producir vapor	44 271.3
Pérdidas de calor por inquemados	1.56
Pérdidas de calor sensible	4 640.1
Pérdidas de calor de gases de combustión	4 641.6
Pérdidas de calor (radiación, convección)	476.1

Basado en el uso de 150 horas anuales del Cuadro 5.1, el consumo de pellets de la caldera corresponde a 16 kg/h.

5.3 Operaciones unitarias para la preparación de la mezcla

5.3.1 Molienda del coquito de palma.

Tipos de molino

En la actualidad existen varias clases de molinos, según el mecanismo que se utiliza en la reducción de tamaño de la materia. Entre las principales clases se encuentra el molino de martillos, molino de rodillos, molino de bolas, molino de discos, entre otros.

1) Molino de discos:

Su principio de molienda se basa en la fricción y aplastamiento que se ejerce entre el producto a moler con dos o tres placas o platos. Este tipo de molino es común para uso doméstico, como molinos para granos y carnes. Posee un sistema de alimentación sencillo, y comúnmente se utiliza para la molienda gruesa y media, sin embargo, no presenta un mecanismo donde el tamaño de partícula sea controlable y homogéneo, no se recomienda para una molienda fina, y la superficie de corte genera un mayor desgaste.

2) Molino de rodillos:

En el caso del molino de rodillos, su funcionamiento consiste en el aplastamiento ejercido por la presión entre los rodillos giratorios y el fruto, y el tamaño de la trituración está definido por el espacio que se encuentra entre los rodillos, lo que permite un control en el tamaño y homogeneidad de las partículas.

Dependiendo de la acción de agarre que se necesite en el proceso, la superficie de los rodillos puede estar lisa, dentada o estriada, lo que facilita el desmenuzamiento del fruto. Debido al tipo de alimentación, el molino puede atascarse fácilmente, y se requiere de un sistema de reducción de velocidad, lo que constituye un costo extra.

3) Molino de bolas:

Este tipo de molino se basa en la fuerza de impacto y fricción que se presentan al estar en contacto el material con un número determinado de esferas de acero o piedras con alta dureza.

El cuerpo del molino corresponde a un cilindro giratorio, que a una baja velocidad permite la elevación de las esferas por las paredes, para luego caer sobre el producto. A velocidades altas la fuerza centrífuga evita que las esferas caigan sobre el producto. El movimiento giratorio permite además la fricción entre las esferas y la molienda. Las fuerzas de frotamiento e impacto pueden generar un alto desgaste, además de generación de contaminación por desprendimiento de material de las esferas y cuerpo del molino.

4) Molino de martillos:

Su mecanismo se basa en la reducción de tamaño de la materia a partir del choque del material y martillos que giran sobre un eje. La energía cinética de los martillos en movimiento se transmite al material y rompe el producto en el punto de contacto.

Los martillos pueden tener diferentes formas y estar o no fijos a su eje de rotación, dependiendo de la fuerza requerida para ejercer en el material. Estos dispositivos giran a velocidades que oscilan entre 500 a 1800 rpm, y pueden operar de forma continua. Debido a la estructura, presentan una operación de mantenimiento sencilla, ya que permite cambiar sus tamices con facilidad y se puede prolongar el uso de martillos al contemplar el desgaste y variar su colocación en el eje principal.

El sistema a su vez consta de un tamiz, donde el material recibe continuamente la energía cinética hasta lograr el tamaño del tamiz y atravesarlo, lo que permite un control en el tamaño y homogeneidad de la partícula.

Selección del equipo de molino

Para determinar el equipo apropiado se basó en la literatura, donde se contempló criterios de facilidad de mantenimiento, bajo costo, control del tamaño, homogeneidad de la partícula y facilidad de operación, donde el equipo que cumple con estos factores corresponde al molino de martillos (Uribe Pérez & Lozano Ramírez, 2014).

Los principales componentes de un molino de martillos se detallan a continuación:

- Bastidor: es el cuerpo o soporte del equipo, el cual contribuye con sus paredes internas a la degradación del material. Se construye de acero y la sección superior es removible, con el fin de facilitar la limpieza y el montaje del eje. Sus paredes internas son revestidas con platinas de acero, con el fin de disminuir el desgaste, y según su tamaño puede incluir ventanas que faciliten el mantenimiento.

-Tamices: determinan el tamaño final del producto, clasificándolo a partir del impedimento físico creado ya sea por el uso de mallas de alambre de acero tejido o chapas de acero. Para el caso de las mallas, según la norma DIN/ISO 9044, el grosor de los alambres puede variar desde 0.04 mm hasta 10 mm, y 0.06 mm hasta 15 mm para la luz de apertura.

- Martillos: elementos que entran en contacto directo con el material y debido a su energía cinética generan el desgaste. Se acoplan a la periferia del eje rotatorio o volante, el cual proporciona la energía cinética al proceso. Su tamaño y dureza dependen del material a triturar.

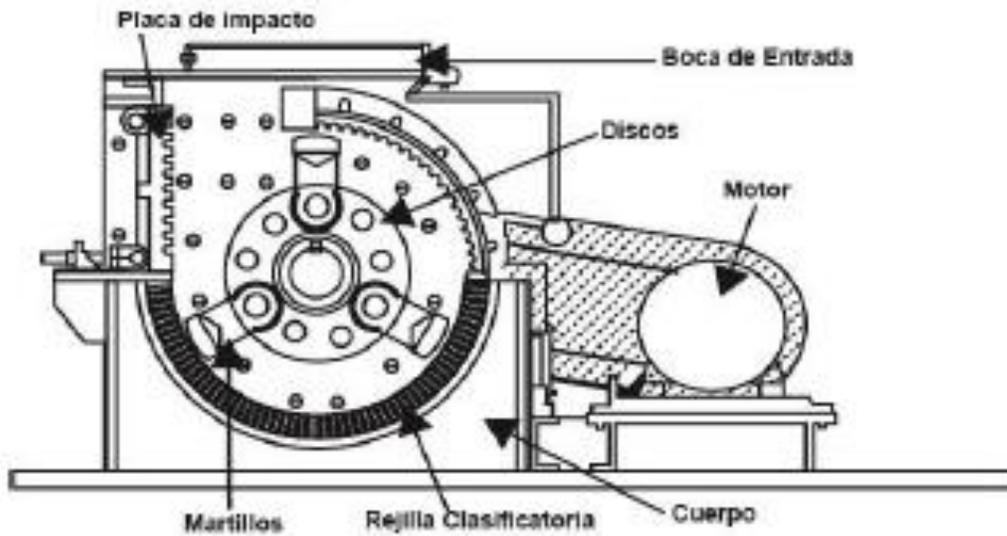


Figura 5.1 Molino de martillos (Uribe Pérez & Lozano Ramírez, 2014).

Cálculos y dimensionamiento del Molino de Martillos

A continuación, se presentan los cálculos y parámetros de diseño del molino de martillos necesarios para la producción de la mezcla combustible requerida para abastecer de energía la caldera de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica.

- Capacidad de molienda y tamaño de partícula:

Para determinar la capacidad de molienda (Cps), la cual corresponde a la cantidad de granos a procesar por hora, se utiliza la base de cálculo encontrada en la sección 5.2 con un valor de 16 kg/h de mezcla, donde tomando la proporción de 90% de biomasa seleccionada, corresponde a 14.4 kg/h. La masa de la cascarilla de coquito a moler corresponde aproximadamente a 0.5 g (Venegas López, Salazar Vega, & Montero Camacho, 2013), por lo que según la ecuación 5.3 la capacidad de molienda es de 480 granos/min.

$$\text{Cps} = 14.4 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times \frac{1000 \text{ g}}{\text{kg}} \times \frac{1 \text{ grano}}{0.5 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 480 \frac{\text{granos}}{\text{min}} \quad (5.3)$$

Donde,

Cps: Capacidad de molienda, grano/min.

Para poder dimensionar el equipo, además de la capacidad de molienda se necesita tener claro el tamaño de partícula deseado. El resultado de la operación unitaria se basa en el tamaño de partícula óptimo que se presente para la formación de pellets con alta calidad de combustión. A partir de diseños experimentales encontrados en la literatura, se determinó que el tamaño de grano debe ser de 0.25 mm a 0.5 mm, con una humedad entre 11.5% (Zapata Saad, 2016), por lo que la apertura del tamiz corresponde a esta medida y corresponde a una malla 32 (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

El diseño de los martillos es el principal contribuyente para una molienda eficiente, ya que estos son los componentes que generan la fractura del material, generando la acción de molienda.

El espesor y ancho del martillo es el primer parámetro para considerar, debido a que la acción de molienda se da debido a un impacto frontal entre la materia y el martillo. Basándose en recomendaciones de autores (Cuadrado Moncayo & Rueda Castillo, 2009) para la molienda de cascara de cacao y similares, donde se tomó un valor promedio del ancho de los martillos presentes en el mercado, se define con un valor de 4 cm, fabricado con acero inoxidable AISI 304, y con un espesor de 4 mm, según la granulometría deseada del producto (0.25mm a 0.5 mm).

La longitud del martillo se define a partir de la proporción del radio giratorio necesario en el proceso respecto al soporte de los martillos y su eje de rotación, como se muestra en la Figura 5.2. La geometría del soporte de martillos puede variar según el alcance del proceso, tomando en cuenta la facilidad de mantenimiento y costos. Para el presente proyecto, basado en recomendaciones de autores (Uribe Pérez & Lozano Ramírez, 2014) y tomando en cuenta que no se requiere una capacidad de molienda elevada, se decide utilizar una geometría triangular para el soporte de los martillos.

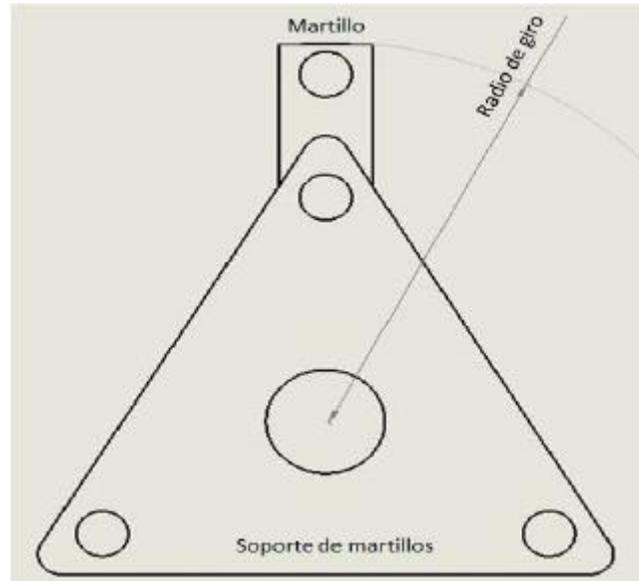


Figura 5.2 Radio de giro del martillo (Uribe Pérez & Lozano Ramírez, 2014)

Para determinar el radio de giro se utiliza la ecuación de velocidad angular del sistema (Ecuación 5.4) a partir de la velocidad del sistema con carga (V_c), la cual considera a los martillos, discos, ejes y material como un solo cuerpo llamado volante, además de la velocidad angular del sistema.

$$\omega = \frac{v}{r_g} \quad (5.4)$$

Donde,

ω : Velocidad angular, rad/s.

v : Velocidad de martillo con carga, m/s.

r_g : Radio de giro, m.

La velocidad angular del sistema, ω , se determina a partir del valor recomendado para un molino de martillos, para un valor de 1600 rpm en el caso de unidades pequeñas (Porrás, 2016), el cual corresponde a 167.6 rad/s.

Para la velocidad de martillo con carga se utiliza la Ecuación 5.5

$$v = -v_T \times \frac{C_S - 2}{C_S + 2} \quad (5.5)$$

Donde,

v : Velocidad de martillo con carga, m/s.

v_T : Velocidad tangencial del extremo del martillo, m/s.

C_S : Coeficiente de fluctuación, adim.

Para la velocidad tangencial del extremo del martillo se utiliza la Ecuación 5.6, donde se relaciona la energía de ruptura experimental de la literatura (Uribe Pérez & Lozano Ramírez, 2014), donde se ensaya a partir de la caída de 0.25 m de altura del material de acero inoxidable de 400 g sobre material en análisis de 0.5 g, y se identifica una altura de 0.25 m.

$$v_T = \sqrt{\frac{m_0 g h}{0.5 m_c}} = \sqrt{\frac{400 \text{ g} \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 0.25 \text{ m}}{0.5 \times 0.5 \text{ g}}} = 62.64 \text{ m/s} \quad (5.6)$$

Donde,

v_T : Velocidad tangencial del extremo del martillo, m/s.

m_0 : masa del martillo, g.

g : fuerza gravitacional, m/s².

h : altura de ensayos de energía de ruptura, m.

m_c : masa de grano de la cascarilla de coquito, g.

Despejando el valor de la velocidad tangencial de 62.64 m/s en la ecuación 5.5, donde se presenta un coeficiente de fluctuación de 0.020 (Uribe Pérez & Lozano Ramírez, 2014) para molinos de harina se obtiene una velocidad de martillo con carga.

$$v = - 62.64 \times \frac{0.020 - 2}{0.020 + 2} = 61.40 \text{ m/s} \quad (5.5)$$

Despejando los valores encontrados en las Ecuaciones 5.5 y 5.6 en la Ecuación 5.4 y despejando para el radio de giro se obtiene un valor de 0.37 m.

$$r_g = \frac{v}{\omega} = \frac{61.40 \text{ m/s}}{167.6 \text{ rad/s}} = 0.37 \text{ m} \quad (5.4)$$

A partir el radio de giro, se debe entonces dimensionar la longitud del martillo. Según las recomendaciones de los constructores de molinos de martillo, la longitud de este corresponde a una tercera parte del lado de la placa de sujeción, que a su vez los molinos deben estar lo más cercano al cuerpo del molino para asegurar el impacto entre el martillo y el material. Basado en la recomendación anterior, se obtiene un largo de 12 cm.

Para un martillo de 12 cm, con un espesor de 4 mm y un ancho de 4 cm, fabricado con acero inoxidable AISI 304 con una densidad de 7 800 kg/m³ se determina la masa del martillo a partir de la Ecuación 5.7, con un valor de 0.150 kg.

$$m = \rho V = \rho (L \times a \times e) = 7\,800 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \times 0.12 \text{ m} \times 0.04 \text{ m} \times 0.004 \text{ m} = 0.150 \text{ kg} \quad (5.7)$$

Donde,

m_0 : masa del martillo, kg.

V: Volumen del martillo, m^3 .

ρ : densidad del martillo, kg/m^3 .

L: longitud del martillo, m.

a: ancho del martillo, m.

e: espesor del martillo, m.

Para determinar la cantidad de martillos necesaria en el molino se utiliza la relación de la capacidad de molienda con la revolución por minuto del molino. Como se mencionó anteriormente, para molinos pequeños la revolución por minuto recomendada corresponde a 1600 rpm, por lo que, si se tiene 480 granos por revolución, se debe entonces triturar 0.3 granos por cada revolución. Este valor corresponde a su vez a la cantidad de martillos a diseñar. Debido a que la capacidad de molienda es muy baja, basado en la base de cálculo planteada, se decide incrementar la capacidad de molienda, según una cantidad dada de martillos.

Considerando una cantidad de 6 martillos, se determina que el valor de la capacidad de molienda, con 1600 rpm corresponde a 9 600 granos por revolución.

El caudal de entrada de material al molino se calcula a partir de la ecuación 5.8, donde el flujo de masa a procesar según la base de cálculo de la sección 5.2 es de 14.4 kg/h de cascarilla de coquito en la mezcla 90% cascarilla (0.004 kg/s), y con la densidad de 1 381 kg/m^3 (Sechage Cortes, Gómez Sandoval, Rodríguez Meléndez , & Mayorga Betancourt, 2017) se obtiene el valor de $2.90 \times 10^{-6} m^3/s$.

$$\dot{Q} = \frac{\dot{m}}{\rho_c} = \frac{0.004 \text{ kg/s}}{1381 \text{ kg/m}^3} = 2.90 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \quad (5.8)$$

Donde,

\dot{Q} : Caudal de entrada de materia, m^3/s .

\dot{m} : Flujo de masa, kg/s .

ρ_c : Densidad de la cascarilla de coquito, kg/m^3 .

A partir del caudal de entrada y el área de ingreso de material se puede determinar la velocidad de ingreso del material al molino. Considerando que el area de ingreso corresponde a la superficie entre el espesor de la camara que contiene 6 martillos de 4 mm de espesor, con el radio de giro de 0.37 m, se obtiene un valor de velocidad de ingreso de $4.03 \times 10^{-4} \text{ m/s}$.

$$v_i = \frac{\dot{Q}}{A_i} = \frac{2.90 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}}{6 \times 0.004 \text{ m} \times 0.371 \text{ m}} = 3.26 \times 10^{-4} \text{ m/s} \quad (5.9)$$

Donde,

v_i : Velocidad de ingreso del material, m/s .

\dot{Q} : Caudal de entrada de materia, m^3/s .

A_i : Área de ingreso, m^2 .

Para determinar el tiempo de choque se utiliza la Ecuación 5.9, donde como se comentó anteriormente, el tamaño de partícula corresponde a 0.5 mm, el radio de giro de 0.371 m y una velocidad angular de 167.6 rad/s.

$$t = \frac{d}{r_g \omega} = \frac{0.005 \text{ m}}{0.371 \text{ m} \times 167.6 \text{ rad/s}} = 8.04 \times 10^{-5} \text{ s} \quad (5.10)$$

Donde,

t: Tiempo de choque, s.

r_g : Radio de giro, m.

ω : Velocidad angular, rad/s.

d: diámetro de la partícula, m.

La masa de cada partícula se determina a partir de la Ecuación 11, con un diámetro de 0.005 m y una densidad real de 1381 kg/m³ (Sechage Cortes, Gómez Sandoval, Rodríguez Meléndez , & Mayorga Betancourt, 2017).

$$m_p = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d_p}{2}\right)^3 \rho_c = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{0.005 \text{ m}}{2}\right)^3 1381 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 9.03 \times 10^{-5} \text{ kg} \quad (5.11)$$

Donde,

m_p : Masa de la partícula, kg.

d_p : Diámetro de la partícula, m.

ρ_c : Densidad de la cascarilla de coquito, kg/m³.

A partir de los parámetros calculados anteriormente se puede determinar la fuerza de triturado que se ejercer a una partícula con la Ecuación 5.12, donde se determina un valor de 70.95 N.

$$F_p = \frac{m_p (v_T - v_i)}{t} = \frac{9.03 \times 10^{-5} \text{ kg} (62.64 \text{ m/s} - 3.26 \times 10^{-4} \text{ m/s})}{8.04 \times 10^{-5} \text{ s}} = 70.35 \text{ N} \quad (5.12)$$

Donde,

F_p : Fuerza de triturado de una partícula, N.

m_p : Masa de una partícula, kg.

v_T : Velocidad tangencial, m/s.

v_i : Velocidad de ingreso, m/s.

El total de fuerza de triturado se determina multiplicando la ecuación 5.12 por el número de partículas a triturar por revolución, calculado a partir de la Ecuación 5.13.

$$N_p = \frac{\dot{m}}{\omega \times m_p} = \frac{60 \times 0.004 \text{ kg/s}}{1600 \text{ rpm} \times 9.03 \times 10^{-5} \text{ kg}} = 1.66 \text{ partículas} \quad (5.13)$$

Donde:

N_p : Número de partículas por revolución, adim.

\dot{m} : Flujo de masa, kg/s.

ω : Velocidad angular, rad/s.

m_p : Masa de una partícula, kg.

Despejando los valores anteriores en la ecuación 5.14 se obtiene una fuerza de trituración total de 117.78

$$F_T = N_p \times F_p = 70.35 \text{ N} \times 1.66 = 116.78 \text{ N} \quad (5.14)$$

Donde,

F_T : Fuerza de trituración total, N.

N_p : Número de partículas por revolución, adim.

F_p : Fuerza de trituración de una partícula, N.

La potencia requerida para triturar la materia se calcula a partir de la Ecuación 5.15.

$$P_T = F_T \times r_g \times \omega = 116.78 \text{ N} \times 0.371 \text{ m} \times 167.6 \text{ rad/s} = 7\,261.68 \text{ W} \quad (5.15)$$

Donde,

P_T : Potencia requerida para triturar el material, W.

F_T : Fuerza de trituración total, N.

r_g : Radio de giro, m.

ω : Velocidad angular, rad/s.

Para determinar la potencia total que debe entregar el motor al molino se debe considerar la potencia requerida para generar la rotación del volante, es decir todo el conjunto de martillos, soportes y eje. Para este valor se utilizó el diseño empleado en la literatura, donde la masa total de cada soporte de martillo corresponde a 2.74 kg, y la masa de cada pasador corresponde a 0.661 kg, y la masa de cada martillo es de 400 g, donde se tiene un momento de inercia total del volante de 0.145 kg m² (Uribe Pérez & Lozano Ramírez, 2014).

A partir de la inercia total del rotor, se determina el consumo de energía rotacional necesaria para mover estos componentes con la Ecuación 5.16

$$E_o = \frac{1}{2} J_r \times \omega^2 = \frac{1}{2} \times 0.145 \text{ kg m}^2 \times 167.6 \text{ rad/s}^2 = 2036.51 \text{ J} \quad (5.16)$$

Donde,

E_o : Consumo de energía rotacional, J.

J_r : Inercia total del rotor, kg m².

ω : Velocidad angular, rad/s.

Y por último, la potencia requerida para girar el volante se calcula con la Ecuación 5.17, con un tiempo de arranque de 1 segundo.

$$P_r = \frac{E_o}{t_a} = \frac{2036.51 \text{ J}}{1 \text{ s}} = 2036.51 \text{ W} \quad (5.17)$$

Donde,

P_r : Potencia requerida para girar el volante, W.

E_o : Consumo de energía rotacional, J.

t_a : Tiempo de arranque, s.

Por lo tanto, la potencia total requerida por el motor corresponde a la Ecuación 5.18

$$P_{tot} = P_T + P_r = 7\,261.68 \text{ W} + 2036.51 \text{ W} = 9\,298.19 \text{ W} \quad (5.18)$$

Donde,

P_{tot} : Potencia del motor, W.

P_T : Potencia requerida para triturar el material, W.

P_r : Potencia requerida para girar el volante, W.

Basado en el mercado se requiere entonces un motor de una potencia de 10 kW.

A partir de los cálculos realizados se presenta los parámetros de diseño del molino en el Cuadro 5.3.

Cuadro 5.3 Parámetros de diseño para el molino de viento.

Parámetro de diseño	Valor	Unidades Si
Radio de giro	0.371	m
Masa de martillo	0.150	kg
Cantidad de martillos	6	Adim
Área de ingreso de material	8.904×10^{-3}	m^3
Potencia del motor	10	kW

5.2.2 Mezclado de la cascarilla de coquito con glicerol crudo

A nivel industrial existen varios tipos de equipos para mezclar sólidos, dependiendo del estado de los componentes a mezclar, el tamaño de partícula, y el comportamiento que estos presenten según su densidad. Para el presente proyecto el sistema de mezcla consiste en la mezcla de la cascarilla de coquito a un tamaño reducido de 0.005 m y el glicerol crudo, el cual se encuentra en estado líquido altamente viscoso.

Un equipo común en la mezcla sólido-líquido corresponde a la mezcladora de lecho fluidizado, la cual consiste en la fluidización de las partículas del sólido al introducir un fluido en el sistema, manteniendo las partículas en suspensión en un área determinada. La propuesta de equipo para la mezcla de cascarilla de coquito con glicerol crudo corresponde a la fluidización de la cascarilla introduciendo aire al equipo, donde luego se tiene un sistema de aspersion para entregar al proceso el glicerol crudo previamente calentado a 40 °C con el fin de reducir su viscosidad.

La fluidización del sólido permite una mezcla homogénea y controlada, ya que reduce la aglomeración al aumentar el área superficial de las partículas sólidas expuestas al contacto con el líquido a mezclar. El comportamiento de estas partículas como un fluido depende de las propiedades físicas de este, así como su interacción con el fluido introducido al sistema. Este tipo de sistemas no son particularmente predecibles, debido a la aleatoriedad en la trayectoria de las partículas, sin embargo, las propiedades de los sólidos permiten estudiar el comportamiento en el sistema. Un ejemplo del sistema se describe en la Figura 5.3.

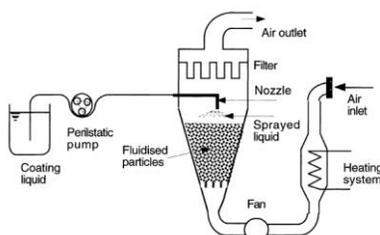


Figura 5.3 Sistema mezclador de lecho fluidizado (Teunou & Poncelet, 2002)

Según Geldart, existen cuatro grupos de partículas de sólidos, según sus propiedades y funcionalidad, tomando en cuenta la densidad del fluido, junto con la densidad y tamaño de las partículas. Por ejemplo, el grupo C corresponde a los polvos cohesivos y difíciles de comportarse como un fluido, mientras que el grupo A presenta las propiedades de aireación necesarias para un proceso de recubrimiento.

Para determinar la clasificación de la cascarilla de coquito reducida a 0.5 mm (500 μm) de tamaño de partícula, con una densidad de 1381 kg/m^3 (1.381 g/cm^3), y a partir de una densidad de aire de 0.001205 g/cm^3 (Sechage Cortes, Gómez Sandoval, Rodríguez Meléndez, & Mayorga Betancourt, 2017) se utilizó la gráfica de la Figura 5.4, donde se indica que la cascarilla de coquito a 0.005 m es del grupo B.

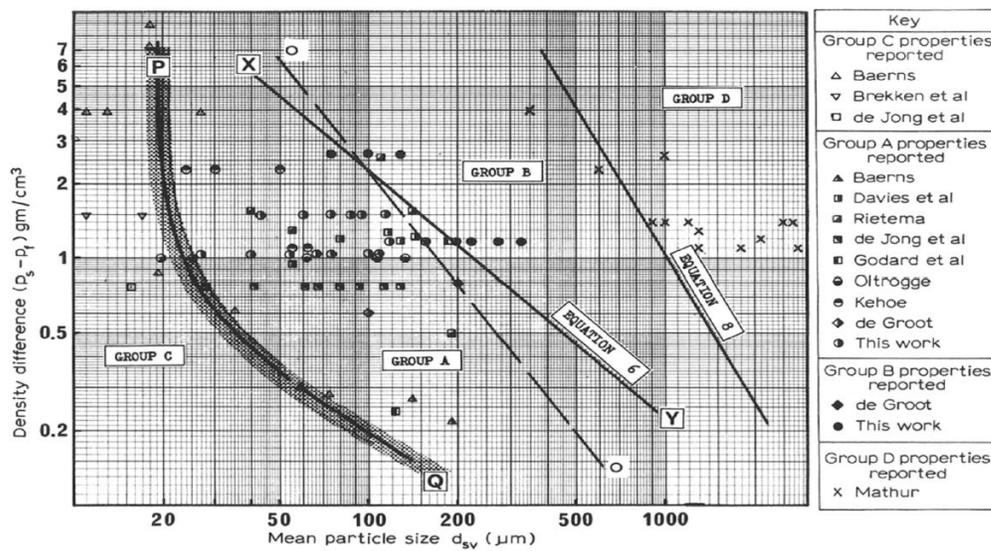


Figura 5.4 Diagrama de clasificación de polvos fluidizados por aire (Geldart, 1973).

Los polvos del grupo B corresponden a materiales con rangos de densidad de partícula de $1.4 \text{ g/cm}^3 < \rho_p < 4 \text{ g/cm}^3$, además de un rango de tamaño de partícula de $40 \text{ } \mu\text{m} < d < 500 \text{ } \mu\text{m}$. La fluidización de este tipo de polvos se caracteriza por

tener una pequeña expansión del lecho, donde las partículas colapsan rápidamente en la ausencia del suministro de gas.

Un parámetro importante para el proceso de lecho fluidizado corresponde a la velocidad de fluidización mínima, la cual corresponde a la velocidad del aire en la que el sólido comienza a comportarse como un fluido, la cual se calcula a partir de la Ecuación 5.19 (Kamranian, y otros, 2019).

$$U_{mf} = \frac{7.169 \times 10^{-4} (\rho_p - \rho_g)^{0.94} d_p^{1.82}}{\rho_g^{0.06} \times \mu_g^{0.88}} \quad (5.19)$$

Donde,

U_{mf} : Velocidad de fluidización mínima, m/s

ρ_p : Densidad de la partícula, kg/m³.

ρ_g : Densidad del gas, kg/m³.

d_p : Diámetro de la partícula, m.

Esta ecuación se basa en el principio de un número de Reynolds en condición mínima de fluidización menor a 30. Para determinar si las propiedades de la cascarilla de coquito coinciden con este principio se determina el número de Reynolds a partir de la Ecuación 5.20 (Kamranian, y otros, 2019)

$$Re_{mf} = \sqrt{(33.7^2 + 0.0408Ar)} - 33.7 \quad (5.20)$$

Donde:

Re_{mf} : Número de Reynolds en condición mínima de fluidización, adim.

Ar: Número de Arquímedes, adim.

El número de Arquímedes se determina a partir de la Ecuación 5.21, siendo la densidad de la cascarilla de coquito 1381 kg/m^3 , la densidad de aire de 1.205 kg/m^3 (Sechage Cortes, Gómez Sandoval, Rodríguez Meléndez , & Mayorga Betancourt, 2017), diámetro de la partícula de 0.5 mm , y la velocidad cinemática de aire de $1.81 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ (Fletcher , Deo, & Hanson, 1993).

$$Ar = \frac{g \times d_p^3 \times (\rho_p - \rho_g)}{\mu_g^2} \quad (5.21)$$

$$Ar = \frac{9.81 \text{ m/s}^2 \times 0.0005^3 \text{ m} \times (1381 \text{ kg/m}^3 - 1.205 \text{ kg/m}^3)}{(1.81 \times 10^{-5} \text{ kg/ms})^2} = 6300$$

Donde,

Ar: Número de Arquímedes, adim.

g: Gravedad, m/s^2 .

ρ_p : Densidad de la partícula, kg/m^3 .

ρ_g : Densidad del gas, kg/m^3 .

d_p : Diámetro de la partícula, m.

μ_g : Viscosidad cinemática del gas, kg/ms .

Por lo tanto, sustituyendo este valor en la Ecuación 5.20 se obtiene un valor de Reynolds de 3.64, el cual es menor a 30, concluyendo que la Ecuación 5.19 se puede utilizar para este sistema.

$$Re_{mf} = \sqrt{(33.7^2 + 0.0408 \times 6300)} - 33.7 = 3.64 \quad (5.20)$$

Despejando la Ecuación 5.19 se obtiene un valor de velocidad de fluidización mínima de 0.09 m/s

$$U_{mf} = \frac{7.169 \times 10^{-4} (1381 \text{ kg/m}^3 - 1.205 \text{ kg/m}^3)^{0.94} 0.0005^{1.82}}{1.205 \text{ kg/m}^{3 \times 0.006} \times 1.81 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}^{0.006}} = 0.09 \text{ m/s} \quad (5.19)$$

A partir de corridas experimentales encontradas en la literatura para la fluidización de polvos del grupo B, se determina que para un U_{mf} de 0.09 m/s se tiene una caída de presión de 4982 Pa (Fletcher, Deo, & Hanson, 1993). Para determinar la relación altura y diámetro del lecho se utiliza la Ecuación 5.22 (Teunou & Poncelet, 2002), donde el lecho consta de una geometría cilíndrica.

$$\Delta P = \frac{32 \times \mu_{app} \times U \times H}{g \times D^2} \quad (5.22)$$

Donde,

ΔP : Caída de presión, Pa.

μ_{app} : Viscosidad aparente del lecho, kg/ms.

U: Velocidad del gas, m/s.

H: Altura del lecho, m.

D: Diámetro del lecho, m.

Para determinar la viscosidad aparente del lecho se presenta la Ecuación 5.23, donde la fracción de vacío corresponde a 0.125 (Sechage Cortes, Gómez Sandoval, Rodríguez Meléndez , & Mayorga Betancourt, 2017).

$$\mu_{app} = \frac{1+0.5(1-\epsilon)}{\epsilon^4} = \frac{1+0.5(1-0.125)}{0.125^4} = 2304 \text{ kg/ms} \quad (5.23)$$

Despejando los valores encontrados en la ecuación 5.22 se encuentra la relación de altura y diámetro del lecho de la Ecuación 5.24.

$$4892 \text{ Pa} = \frac{32 \times 2304 \text{ kg/ms} \times 0.09 \text{ m/s} \times H}{9.81 \text{ m/s}^2 \times D^2} \quad (5.22)$$

$$H = 7.4D^2 \quad (5.24)$$

Donde,

H: Altura del lecho, m.

D: Diámetro del lecho, m.

Tomando la base de cálculo de 16 kg/h determinada a partir de las 150 horas anuales de uso de caldera del Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica, se decide realizar la operación dos veces por mes, lo que implica seis horas de uso. A partir de las seis horas de uso se requiere una masa de 96 kg de mezcla, lo que corresponde a un valor de 0.070 m³.

Tomando como base de cálculo el volumen de 0.070 m³ se determina a partir de la Ecuación 5.25 la longitud

$$V = \pi \left[\frac{D}{2} \right]^2 \times H = \pi \left[\frac{D}{2} \right]^2 \times (7.4D^2) = 0.070 \text{ m}^3 \quad (5.25)$$

Donde,

V: Volumen de mezcla, m³

H: Altura del lecho, m.

D: Diámetro del lecho, m.

Despejando el valor de volumen de mezcla en la Ecuación 5.25 se encuentra un valor de diámetro de lecho de 0.092 m, donde despejando el valor en la Ecuación 5.24 se tiene una altura de lecho de 0.063 m de lecho. A este valor se le debe además agregar el espacio requerido por el sistema de aspersion que corresponde a aproximadamente 50 cm, con una altura del sistema de 0.113

A continuación, se detallan los parámetros de diseño del lecho fluidizado para la mezcla de la cascarilla de coquito con glicerol crudo.

Cuadro 5.4. Parámetros de diseño del lecho fluidizado para la mezcla de la cascarilla de coquito con glicerol crudo.

Parámetro de diseño	Valor	Unidades Si
Velocidad mínima de fluidización	0.09	m/s
Altura del mezclador	0.113	m
Diámetro del mezclador	0.092	m
Caída de presión	4982	Pa

5.2.3 Peletización de las mezclas

El proceso de peletización se llevan a cabo bajo el principio básico de ejercer presión sobre el material para aumentar el tamaño de sus partículas, debido a la aglomeración de material que se genera. A nivel industrial existen dos métodos de

aglomeración, por granulación y por presión. Para el primer método, el aumento de tamaño se genera a partir del movimiento de las partículas de material libre que se dispersan en un área determinada, y que entra en contacto con agentes aglomerantes, mientras que el método por presión se basa en la aplicación de fuerzas elevadas al material particulado, en un volumen definido para incrementar su densidad. A nivel de equipos, los principales sistemas de densificación corresponden a las peletizadoras, prensa hidráulica, tornillo extrusor, tabletizador y aglomerador.

La comercialización de biomasa densificada se ha estandarizado bajo normas que indican las propiedades requeridas tanto del material previo a tratamiento, como el material ya siendo un producto final. Algunas normas e institutos que rigen esta comercialización se listan a continuación:

- Pellet Fuel Institute (PFI)
- European Common Standard for Solid Fuel,
- Pellsam
- DIN 51 731
- SN166000

Los parámetros comunes para caracterizar la calidad de los pellets corresponden a su durabilidad, densidad a granel, y comportamiento térmico. Para la peletización de la biomasa se analizó los diferentes equipos actualmente en la industria, y se seleccionó a partir de dos criterios importantes, la cantidad de energía que se debe administrar al sistema, y el costo.

La peletización utilizando moldes de anillo corresponde a una alternativa donde la energía requerida por el proceso se basa en la presión ejercida al material para aumentar su densidad. El sistema no requiere incluir procesos térmicos ya que el calor necesario se genera a partir de las fuerzas de fricción, logrando suavizar las partículas del material y generando un proceso de compactación a una densidad y forma específica.

En la Figura 5.5 se muestra las partes fundamentales que componen una peletizadora de molde de anillo, que corresponden a la unidad de poder, es decir el motor, el cuerpo o estructura de la máquina y el molde de anillo donde se genera la extrusión.

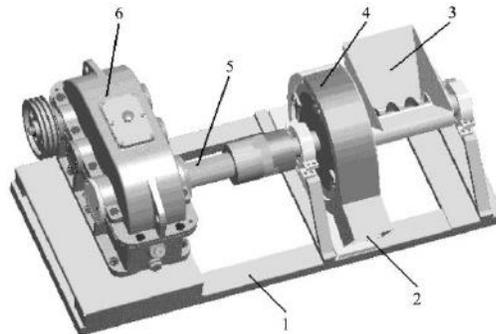


Figura 5.5 Peletizadora de molde de anillo. 1. Base del sistema, 2. Salida de material, 3. Alimentador, 4. Molde de anillo, 5. Eje de rotación, 6. Motor (Wei, Tabil, Rongfei, & Dejun, 2016).

El proceso inicia con el ingreso de material al cuerpo del peletizador, donde entra en contacto con el molde de anillo, como se muestra en la zona 5 de la Figura 5.6. En esta etapa, el material se ve afectado por la fuerza centrífuga presente en el sistema. Luego, las fuerzas de compresión entre el molde del anillo y los rodillos aumentan la densidad del material del proceso de compresión, mostrado en la zona 4, para luego ser extruido por los agujeros del molde de anillo, pasando por un proceso de extrusión mostrado en la zona 3.

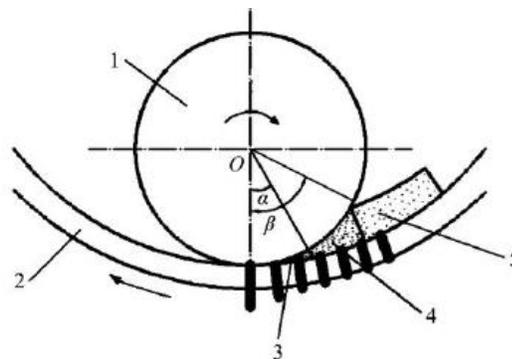


Figura 5.6 Proceso de peletización en el molde de anillo. 1. Rodillo, 2. Molde de anillo, 3. Zona de extrusión, 4. Zona de compresión, 5. Zona de alimentación (Wei, Tabil, Rongfei, & Dejun, 2016).

Para diseñar el equipo de peletización se partió de los valores óptimos de pellets de cascarilla de coquito encontrados en la literatura, donde se indica que el tamaño de grano debe estar entre 0.25 mm y 0.50 mm, además de que la humedad debe estar entre 11% a 17% y la presión máxima de peletización corresponde a 90 MPa. Las dimensiones del pellet se seleccionaron a partir de la norma de Estados Unidos, donde se indica un valor entre 6.35 mm y 7.25 mm (Zapata Saad, 2016).

La fuerza de compresión que se debe ejercer en el sistema se calcula a partir de la Ecuación 5.23, con un diámetro de dado que equivale al diámetro deseado del pellet de 6.7 mm y una longitud efectiva de 4 cm (Chaparro & Quintero, 2017).

$$F_c = \frac{P_c \times d_{\text{dado}} \times L_{\text{dado}}}{2} = \frac{90\,000 \text{ Pa} \times 0.0067 \text{ m} \times 0.04 \text{ m}}{2} = 12.1 \text{ kN} \quad (5.23)$$

Donde,

F_c : Fuerza de compresión, N

P_c : Presión, Pa

d_{dado} : Diámetro del dado, m

L_{dado} : Longitud efectiva del dado, m

El balance de los momentos de inercia del sistema corresponde a la suma de el momento de inercia de giro del molde de anillo con el momento de giro del rodillo, mostrado en la Ecuación 5.24

$$\sum M_{\text{molde}} + M_{\text{rodillo}} = 0 \quad (5.24)$$

Donde,

M_{molde} : Molde de inercia del molde de anillo, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$

M_{rodillo} : Molde de inercia del rodillo, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$

Basado en recomendaciones de diseño (Wei, Tabil, Rongfei, & Dejun, 2016), cuatro rodillos corresponden a la cantidad deseada ya que al incrementar la cantidad de rodillos reduce el tamaño requerido de estos, lo que a su vez implica un menor costo.

La ecuación 5.25 muestra los valores de la inercia de cada componente a partir de la energía que se debe entregar al sistema, el radio interno del molde de anillo y la velocidad de giro de este y la cantidad de rodillos seleccionada de 4.

$$\frac{E}{2\pi n} + 4F_c R = 0 \quad (5.25)$$

Donde,

E: Energía requerida para girar el molde de anillo, J

n: velocidad del molde de anillo, rev/min

F_c : Fuerza de compresión, N

R: Radio interno del molde de anillo, m

Despejando la Ecuación 5.25 para encontrar el radio se genera la Ecuación 5.26, donde se tiene la relación del radio del molde de anillo respecto a la energía entregada al sistema, que corresponde a la energía entregada por el motor. Partiendo de un valor de 40 kW de potencia, que para una base de cálculo de un minuto con una velocidad de 45.4 rev/min (Wei, Tabil, Rongfei, & Dejun, 2016) se encuentra un valor de radio interno de molde de anillo de 175 mm.

$$R = \frac{E}{8\pi \times n \times F_c} = \frac{40000 \text{ W} \times 60 \text{ s}}{8\pi \times 45.4 \text{ rev/min} \times 12100 \text{ N}} = 175 \text{ mm} \quad (5.26)$$

A partir del radio de giro, y basándose en la cantidad de rodillos seleccionada, el radio de los rodillos para generar la fricción del material corresponde a 87.5 mm

A continuación, se detallan los parámetros de diseño del lecho fluidizado para la mezcla de la cascarilla de coquito con glicerol crudo.

Cuadro 5.5. Parámetros de diseño de la peletizadora de molde de anillo para la mezcla de la cascarilla de coquito con glicerol crudo.

Parámetro de diseño	Valor	Unidades Si
Radio de giro	0.175	m
Radio de los rodillos	0.875	m
Potencia del motor	40	kW

5.4 Diagrama de flujo del proceso

A partir de las operaciones unitarias descritas en los puntos anteriores, se realizó el diagrama de flujo de proceso del sistema. El proceso inicia con la molienda de la cascarilla de coquito, la cual contiene un porcentaje de humedad de 9.24 % según los datos experimentales obtenidos en el laboratorio, y se encuentra por debajo del 11% de humedad recomendada (Zapata Saad, 2016), por lo que no se requiere un proceso de secado previo. Una vez que se cuenta con la cascarilla al tamaño de partícula deseado de 0.5 mm se procede a su mezcla con el glicerol crudo en el mezclador de lecho fluidizado, el cual trabaja como batch y se entrega el glicerol crudo a 40 °C según lo observado en laboratorio para disminuir su viscosidad. Por último, la mezcla se peletiza, formando pelets de 6.7 mm de diámetro.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La cantidad de agua y metanol presente en la mezcla corresponde a un 4.5% y 16.1% respectivamente.
- El resultado de la matriz de selección dio como resultado de biomasa seleccionada a la cascarilla de coquito de palma.
- El poder calorífico de la biomasa seleccionada corresponde a 19.89 MJ/kg.
- La proporción de mezcla seleccionada para el planteamiento a nivel planta piloto corresponde a 1.50% agua, 8.50% glicerol, 90% biomasa.
- El poder calorífico para la mezcla combustible cascarilla de coquito y glicerol crudo corresponde a un valor de 20.153 MJ/kg, el cual se encuentra por encima del poder calorífico teórico del bagazo, biomasa de mayor uso a nivel de Costa Rica.
- Para la metodología inicialmente planteada se determinó que los datos experimentales no presentan normalidad, debido al error por equipo presente en la bomba calorimétrica del Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica.
- El incrementar la estandarización para cada réplica del experimento genera una mejor comprensión del estado actual del equipo, permitiendo a su vez una mejora en la normalidad de los datos, y la capacidad de ajuste del modelo de regresión lineal basado en los datos experimentales.
- El rango de las fracciones máxicas de los compuestos determinado en la metodología puede influir en la significancia estadística en el modelo de regresión lineal debido al error por muestreo.
- A partir del análisis estadístico encontrado para la regresión lineal de las variables fracción máxica de agua y de glicerol, el modelo encontrado no puede ser utilizado como predictivo, ya que se presenta un error significativo de muestreo en la variable de fracción máxica.
- El modelo de red neuronal de un solo nodo mejoró el ajuste predictivo contra el modelo lineal a un 6%.

- Según el requerimiento energético de la caldera de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica la base de cálculo corresponde a 16 kg/h.
- Para el proceso de generación de pelets de la mezcla se requiere como operaciones unitarias la molienda de la cascarilla de coquito, la mezcla con el glicerol crudo y la peletización.
- Para la molienda de cascarilla de coquito se seleccionó un molino de martillos, en el mezclado se seleccionó un lecho fluidizado y para la peletización se seleccionó un peletizador de molde de anillo.
- Se recomienda el análisis del poder calorífico utilizando una bomba calorimétrica que presente una capacidad mayor de muestra, para disminuir el error de metodología que se presenta para mezclas sólido líquido.
- Se recomienda el uso de estandarizaciones en cada corrida para la bomba calorimétrica del Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica utilizado en este análisis.

REFERENCIAS

- Asamblea Legislativa Republica de Costa Rica. (Octubre de 2018). *Asamblea Legislativa Republica de Costa Rica*. Obtenido de http://www.asamblea.go.cr/Centro_de_informacion/Consultas_SIL/Pginas/Proyectos%20de%20ley.aspx
- Ayoub, M., & Abdullah, A. (2012). *Critical review on the current situation and significance of the crude glycerol resulting from biodiesel industry towards more sustainable renewable energy industry*. Malasia: Elsevier.
- Calvo, O., & Villalobos, T. (2010). *Producción de diferentes tipos de abonos, repelentes y fungicidas orgánicos. Experiencias de productores en la Zona Sur de Costa Rica*. Costa Rica: Plataforma de Tecnología de Información y Comunicación Agropecuaria y Rural.
- CANAPALMA. (Junio de 2016). *Cámara Nacional de Productores de Palma Costa Rica*. Obtenido de <http://www.canapalma.cr/index.php/novedades/8-noticias/20-estratificacion-de-los-productores-segun-extension-de-tierra-4>
- Castillo Benavides, J. A. (2014). Determinación de parámetros físicoquímicos y cinéticos de la degradación térmica de broza y cascarilla de café para ser utilizados en simulaciones computacionales del proceso de gasificación. Universidad de Costa Rica, San José.
- Centro de Investigación y desarrollo de proyectos energéticos. (Julio de 2017). *Grupo de Investigación Carbón Biomasa*. Obtenido de <http://carbonbiomasa.pucp.edu.pe/centro-de-investigacion/metodo-capfre/>
- Chacón Villalobos, P. (2017). *Viabilidad técnica y económica para el uso de pellets a partir de hojarasca y podas del Campus Rodrigo Facio para la producción de vapor de la Escuela de Ingeniería Química*. Universidad de Costa Rica: San José, Costa Rica.

- Chaparro, A., & Quintero, J. (2017). *Rediseño del sistema de rodillos de una pelletizadora vertical de alimento concentrado para pollos*. Bogotá: Universidad Libre.
- Chávez, M. (2006). *Antecedentes de la producción de alcohol en Costa Rica*. San José, Costa Rica: Dirección de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA).
- Chiaki, O. (Julio de 2017). *Satreps*. Obtenido de https://www.jst.go.jp/global/english/kadai/h2405_indonesia.html
- CONARROZ COSTA RICA. (2015). *Informe estadístico periodo 2014-2015*. San José: Unidad de inteligencia de mercados.
- Coto Chinchilla, O. (2013). *Valoración actualizada de residuos agrícolas orgánicos en Costa Rica como fuente de energía*. San José, Costa Rica: Presentado a: FITTACORI.
- Coto, C. O. (2013). *Uso de residuos agrícolas orgánicos como fuente de energía: aprovechamiento de recursos y reducción de gases de efecto invernadero en Costa Rica*. San José: Presentado a: FITTACORI.
- Cuadrado Moncayo, I., & Rueda Castillo, J. (2009). *Diseño y construcción de un molino de martillos*. Quito: Universidad San Francisco de Quito.
- Demirbas, A. (2009). *Green Energy an Technology*. Turkía: Springer.
- Desideri, U., & Fantozzi, F. (2013). Biomass combustion and chemical looping for carbon capture and storage. En E. Dahlquist, *Technologies for Converting Biomass to Useful Energy. Combustion, Gasification, Pyrolysis, Torrefaction and Fermentation* (págs. 129-173). CRC Press.
- Dias, W., & Pooliyadda, S. (2000). Neural networks for predicting properties of concretes with admixtures. *Construction and Building Materials*, 15, 371-379.

- FGV. (Julio de 2017). *Feda Palm Industries SDN BHD*. Obtenido de <http://feldapalmindustries.com/v2/index.php/mescarp-fiber/>
- Fletcher , J. V., Deo, M. D., & Hanson, F. V. (1993). Fluidization of a multi-sized Group B sand at reduced pressure. *Powder Technology* , 141-147.
- Gai, C., Dong, Y., & Zhang, T. (2013). The kinetic analysis of the pyrolysis of agricultural residue under non isothermal conditions. *Bioresource Technology*, 127, 298-305.
- Gaona Reinoso, D. A. (2014). *Mezcla de cascarilla de nuez de palmiste y raquis como combustible alternativo para generación eléctrica*. Universidad Central de Ecuador.
- García, A. (2013). *Estimación del potencial de alcohol en Costa Rica*. Cartago, Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica. .
- García, J., Cárdenas, M., & Yáñez, E. (2010). Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia. *PALMAS*, 31, 41-48.
- Geldart, D. (1973). Types of Gas Fluidization. *Powder Technology*, 7, 285-292.
- Glices , P., & Veloz, P. (2006). Estudio del uso de los nutrientes para la levadura en fermentación con el propósito de mejorar la producción del alcohol etílico. Universidad de Guayaquil, Ecuador.
- Gómez, C., Torres, C., Hernández, N., & Cerdas, M. (2016). *Informe Caracterización fisicoquímica de la broza de café de diferentes zonas de Costa Rica*. Escuela de Ingeniería Química UCR.
- Human & Eco. (Julio de 2017). *Human And Eco*. Obtenido de http://www.humanandeco.com/en/?page_id=457&lang=en
- ICAFFE. (11 de Julio de 2016). *ICAFFE, Instituto del Café de Costa Rica*. Obtenido de <http://www.icafe.cr/icafe-muestra-avances-del-proyecto-de-gasificacion/>

- ICAFE y UEEM. (2015). *Costos de producción agrícola de café fruta, cosecha 2014-2015*. Heredia.
- Jara Millar, H. (2009). Biomasa y sus propiedades como combustible. *Revista Celulosa y Papel*, 24-28.
- Jeng, L., & Zaunuddin, M. (2012). A review in utilization of biomass from rice industry as a source of renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 3084-3094.
- Kamranian, A., Buck, A., Antonyuk, S., Berend, v., Thevenin, D., & Tomas, J. (2019). The effect of the presence of very cohesive Geldart ultra fine particles on the fluidization of Geldart fine particle beds. *Process*, 1-28.
- Karim, M., Hashim, H., Razak, H., & Yusoff, S. (2017). Characterization of palm oil clinker powder for utilization in cement based applications. *Construction and Building Materials*, 135, 21-29.
- Klimberg, R., & McCullough, B. (2017). *Fundamentals of Predictive Analytics with JMP*. Washington, USA: SAS Institute.
- Kore, S., Assefa, A., Spliethoff, H., & Mayerhofer, M. (2013). Steam Gasification of Coffee Husk in Bubbling Fluidized Bed Gasifier. *Bionature*, 17/84.
- Lahijani, P., Zainal, Z., Mohamed, A., & Mohammadi, M. (2013). Ash of palm empty fruit bunch ash as a natural catalyst for promoting the CO₂ gasification reactivity of biomass char. *Bioresource Technology*, 132, 351-355.
- López, M. (Junio de 2015). *Ambientologa.Net*. Obtenido de <http://www.ambientologa.net/2015/06/goodyear-fabricara-neumaticos-partir-de.html>
- MAG-MINAE. (7 de Marzo de 2008). *V Plan Nacional de Energía 2008-2021*. Obtenido de

<http://www.dse.go.cr/es/03Publicaciones/01PoliticaEnerg/Programa%20Nacional%20de%20Biocombustibles.pdf>

- Martinez, P., Rodríguez, I., Esperanza, G., & Leiva, J. (2013). *Caracterización y evaluación del bagazo de caña de azúcar como biosorbente de hidrocarburos*. Universidad Central de Las Villas, Cuba.
- McCabe, W., Smith, J., & Harriot, P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. McGraw Hill.
- Molina Salas, E. (2010). Evaluación del uso de la cascarilla de arroz en la fabricación de bloques de concreto. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago.
- Mora Salas, J. F. (2017). Evaluación de pre factibilidad técnica y financiera para la implementación de una central termoeléctrica de cogeneración en una industria arrocera de Parrita, a partir de la combustión de biomasa lignocelulósica seca considerada residuo agroindustrial. Universidad de Costa Rica, San José.
- Motaung, T., & Anandjiwala, R. (2015). Effect of alkali and acid treatment on thermal degradation kinetics of sugar cane bagasse. *Industrial Crops and Products*, 74, 472-477.
- Murthy, P. S., & Naidu, M. (September de 2012). Sustainable management of coffee industry by products and value addition-A review. *Resources, Conservation & Recycling*, 66, 45-58.
- Murthy, P., & Naidu, M. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products and value additions - A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 66, 45-58.
- Organización Radiofónica de Oxaca. (Junio de 2016). *Oro Noticias*. Obtenido de <http://www.ororadio.com.mx/noticias/2016/06/estudiantes-crean-plastico-biodegradable-con-cana-de-azucar/>

- Paliwal, M., & Usha, K. (2009). Neural networks and statistical techniques: A review of applications. *Expert Systems with Applications*, 36, 2-17.
- Parr Instrument Company. (2013). *Analytical Methods for Oxygen Bombs*. Illinois: Parr Instrument Company.
- Porras, O. (2016). *Procesos y operaciones integradas* (Vol. 08). San Jose: Universidad de Costa Rica.
- Prada, A., & Cortés, C. (2010). La descomposición térmica de la cascarilla de arroz: Una alternativa de aprovechamiento integral. *ORINOQUIA*, 14.
- Quispe, C., Coronado, C., & Carvahalo, J. (2012). *Glycerol: Production, consumption, prices, characterization and new trends in combustion*. Brazil: Elsevier.
- Ramírez, F., Carazo, E., Roldán, C., & Villegas, G. (2008). *Encuesta de oferta y consumo energético nacional partir de la biomasa en Costa Rica año 2006*. MINAE, Dirección Sectorial de Energía, San José. Obtenido de <http://www.dse.go.cr/es/03Publicaciones/02Estadisticas/encuestaBiomasa2008.pdf>
- Robles Chavez, D., & Quesada Espinoza, J. (2013). Purificación y cuantificación de glicerina cruda y adaptación de método ASTM D6584 para la determinación de glicerina en biodiesel. *Ciencia y Tecnología*, 2(29), 17-29.
- Rodriguez, C., & Gordillo, G. (2011). Adiabatic Gasification and Pyrolysis of Coffee Husk Using Air-Stream for Partial Oxidation. *Journal of Combustion*. doi:10.1155/2011/303168
- Rufino, J., Machado, I., & Dias, Y. (2013). Determinación de mezclas de suelo estabilizado a partir de recursos de biomasa locales para mejorar la calidad de las viviendas construidas por la población de territorios de Uige, Angola. *Revista Ingeniería de Construcción*, 28, 63-80.

- Sechage Cortes, J., Gómez Sandoval, D., Rodríguez Meléndez, A., & Mayorga Betancourt, M. (2017). Modelamiento matemático para la pirólisis del cuesco de palma aceitera. *Ingenium*, 47.
- SEPSA. (2017). *Boletín Estadístico Agropecuario 2017 No 27*. Obtenido de <http://www.infoagro.go.cr/BEA/BEA27.pdf>
- Soh, L. (2016). Biocombustibles de segunda generación de la biomasa de palma de aceite. *Palmas*, 37, 137-148.
- Sukiran, M., Abnisa, F., Wan Daud, W., Bakar, N., & Loh, S. (2017). A Review of torrefaction of oil palm solid wastes for biofuel production. *Energy Conversion and Management*, 149, 101-120.
- TABOGA. (Noviembre de 2016). *TABOGA INGENIO*. Obtenido de <http://taboga.co.cr/?lang=es#260>
- Tan, H., Aziz, A., & Aroua, M. (2013). *GLycerol production and its applications as a raw material*. Malasia: Elsevier.
- Teunou, E., & Poncelet, D. (2002). Batch and continuous fluid bed coating - review and state of the art. *Journal of Food Engineering*, 53, 325-340.
- Torossi Baudiono, F. D. (2006). Reacciones en contexto: la transesterificación en la producción de biodiésel a partir de aceite de fritura usado. *Anales de Química*, 102(3), 43-49.
- Uribe Pérez, J., & Lozano Ramírez, E. (2014). *Desarrollo, construcción y pruebas de funcionamiento de un prototipo de molino de martillos para la trituración en estado seco de cáscara de cacao y similares*. Floridablanca: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Valdez Melara, M. (Setiembre de 2011). *Potencial Biotecnológico de los Residuos Agroindustriales de la Caña de Azúcar*. (CENIBiot, Intérprete) Costa Rica.

- Valix, M., Katyal, S., & Cheung, W. (2017). Combustion of thermochemically torrefied sugar cane bagasse. *BioResource Technology*, 223, 202-209.
- Van Wylen, G. J., Sonntag, R. E., & Borgnakkke, C. (2009). *Fundamentos de Termodinámica* (2da ed.). México: Limusa Wiley.
- Vargas, J., Alvarado, P., Vega-Baudrit, J., & Porras, M. (2013). *Caracterización del subproducto cascarillas de arroz en búsqueda de posibles aplicaciones*. Revista Científica.
- Venegas López, C., Salazar Vega, A., & Montero Camacho, C. (2013). *Balance energético de una extractora de aceite de palma aceitera, y análisis técnico y económico para el uso más eficiente de la biomasa generada en el proceso de extracción*. Universidad de Costa Rica.
- Vidal, D. V., Torres, J., & González, L. O. (2014). Ceniza de bagazo de caña de azúcar para elaboración de materiales de construcción: Estudio Preliminar. *Momento*(48E), 14-23. Obtenido de <http://www.bdigital.unal.edu.co/44960/1/45539-219556-3-PB.pdf>
- Villalobos, A., & Alvarado, G. (2013). *Caracterización de principales residuos de biomasa lignocelulósica en Costa Rica*. San José: Instituto Costarricense de Electricidad.
- Wei, G., Tabil, L., Rongfei, Z., & Dejun, L. (2016). Optimized design and experiment on ring mold pelletizer for producing biomass fuel pellets. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 57-66.
- Zapata Saad, A. (2016). *Investigación del efecto de los parámetros de elaboración de pellets de cuesco de palma en el proceso de pirólisis*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Zapata, A., Tallero, G., Rincón, S., & González, A. (2017). Peletización de tusa y fibra de palma africana torrefacta: evaluación del efecto de la temperatura de peletización y de torrefacción en la peletización y la calidad de los pélets. *Palma*, 38, 64-82.

NOMENCLATURA

C	Equivalente a coeficiente
d	Equivalente a diámetro
E	Equivalente a energía
F	Equivalente a fuerza
m	Equivalente a masa
\dot{m}	Equivalente a flujo masico
N	Equivalente a número
P	Equivalente a potencia
PC	Equivalente a poder calorífico
PCI	Equivalente a poder calorífico inferior
PCS	Equivalente a poder calorífico superior
Q	Equivalente a Calor
\dot{Q}	Equivalente a caudal
r	Equivalente a radio
t	Equivalente a tiempo
v	Equivalente a velocidades
Subíndices	
c	Equivalente a compresión
g	Equivalente a gas/giro
p	Equivalente a partícula
r	Equivalente a requerida
s	Equivalente a Fluctuación
T	Equivalente a tangencial

APENDICES

APENDICES

A. Datos experimentales

Cuadro A. 1 Resultados de corridas preliminares para la determinación del porcentaje másico de agua y metanol en el glicerol crudo.

Compuesto	Muestra 1 %	Muestra 2 %	Muestra 3 %	Promedio %
Metanol	10.0	2.3	5.0	5.7
Agua	15.1	6.0	10.0	10.4

Cuadro A. 2 Resultados del porcentaje másico de agua y metanol en el glicerol crudo.

Compuesto	Muestra 1 %	Muestra 2 %	Muestra 3 %	Promedio %
Metanol	4.2	5.0	4.3	4.5
Agua	16.5	16.6	15.3	16.1

Cuadro A. 3 Resultado para el porcentaje de humedad de la cascarilla de coquito en base seca.

Muestra	Masa (g)	Porcentaje de humedad (m/m)
Inicial	5.060	9.24%
Final	4.632	

Cuadro A. 4 Medición de la masa de muestras de mezcla de cáscara de coquito con glicerol y agua, primera corrida experimental.

Mezcla	Replica	Agua	Glicerol	Biomasa	Masa (g)
1	1	0.003	0.048	0.950	1.002
1	2	0.003	0.048	0.950	1.038
1	3	0.003	0.048	0.950	1.008
2	1	0.005	0.045	0.950	1.061
2	2	0.005	0.045	0.950	1.086
2	3	0.005	0.045	0.950	0.974
3	1	0.008	0.043	0.950	1.082
3	2	0.008	0.043	0.950	1.102
3	3	0.008	0.043	0.950	1.033
4	1	0.010	0.040	0.950	1.088
4	2	0.010	0.040	0.950	0.974
4	3	0.010	0.040	0.950	1.012
5	1	0.015	0.035	0.950	1.019
5	2	0.015	0.035	0.950	0.985
5	3	0.015	0.035	0.950	0.996
6	1	0.020	0.030	0.950	1.046
6	2	0.020	0.030	0.950	1.028
6	3	0.020	0.030	0.950	1.016
7	1	0.005	0.095	0.900	1.071
7	2	0.005	0.095	0.900	1.039
7	3	0.005	0.095	0.900	0.972
8	1	0.010	0.090	0.900	0.903
8	2	0.010	0.090	0.900	1.091
8	3	0.010	0.090	0.900	0.955
9	1	0.015	0.085	0.900	0.98
9	2	0.015	0.085	0.900	0.843
9	3	0.015	0.085	0.900	1.072
10	1	0.020	0.080	0.900	0.974
10	2	0.020	0.080	0.900	0.98
10	3	0.020	0.080	0.900	1.03
11	1	0.030	0.070	0.900	1.01
11	2	0.030	0.070	0.900	1003
11	3	0.030	0.070	0.900	1.01
12	1	0.040	0.060	0.900	1.039
12	2	0.040	0.060	0.900	1.053
12	3	0.040	0.060	0.900	1.036
13	1	0.008	0.143	0.850	0.987

Cuadro A. 5 (Continuación) Medición de la masa de muestras de mezcla de cáscara de coquito con glicerol y agua, primera corrida experimental.

Mezcla	Replica	Agua	Glicerol	Biomasa	Masa (g)
13	2	0.008	0.143	0.850	0.99
13	3	0.008	0.143	0.850	0.989
14	1	0.015	0.135	0.850	0.904
14	2	0.015	0.135	0.850	0.997
14	3	0.015	0.135	0.850	0.903
15	1	0.023	0.128	0.850	1.013
15	2	0.023	0.128	0.850	0.98
15	3	0.023	0.128	0.850	1.01
16	1	0.030	0.120	0.850	1.055
16	2	0.030	0.120	0.850	1.03
16	3	0.030	0.120	0.850	1.095
17	1	0.045	0.105	0.850	1.013
17	2	0.045	0.105	0.850	0.998
17	3	0.045	0.105	0.850	0.979
18	1	0.060	0.090	0.850	1.065
18	2	0.060	0.090	0.850	0.781
18	3	0.060	0.090	0.850	0.993

Cuadro A. 6 Medición de la masa de muestras de mezcla de cáscara de coquito con glicerol y agua, segunda corrida experimental.

Mezcla	Replica	Agua	Glicerol	Biomasa	Masa (g)
1	1	0.005	0.045	0.950	1.035
1	2	0.005	0.045	0.950	1.020
2	1	0.008	0.043	0.950	1.020
2	2	0.008	0.043	0.950	1.066
3	1	0.010	0.040	0.950	1.019
3	2	0.010	0.040	0.950	1.030
4	1	0.015	0.035	0.950	1.050
4	2	0.015	0.035	0.950	1.081
5	1	0.010	0.090	0.900	1.064
5	2	0.010	0.090	0.900	1.018
6	1	0.015	0.085	0.900	1.020
6	2	0.015	0.085	0.900	1.040
7	1	0.020	0.080	0.900	1.051
7	2	0.020	0.080	0.900	1.033

Cuadro A. 7 (Continuación) Medición de la masa de muestras de mezcla de cáscara de coquito con glicerol y agua, segunda corrida experimental.

Mezcla	Replica	Agua	Glicerol	Biomasa	Masa (g)
8	1	0.025	0.075	0.900	1.067
8	2	0.025	0.075	0.900	1.080
9	1	0.015	0.135	0.850	1.068
9	2	0.015	0.135	0.850	1.025
10	1	0.023	0.128	0.850	1.012
10	2	0.023	0.128	0.850	1.022
11	1	0.030	0.120	0.850	1.034
11	2	0.030	0.120	0.850	1.082
12	1	0.038	0.113	0.850	1.007
12	2	0.038	0.113	0.850	1.030

Cuadro A. 8 Datos de temperatura para determinación de poder calorífico en la segunda corrida para la mezcla 5, réplica 1 (Referirse al archivo de Excel para todos los valores de temperatura medidos por el equipo termómetro digital Parr).

Medición	Temperatura (°C)	Medición	Temperatura (°C)	Medición	Temperatura (°C)
1	32.1576	21	32.1561	41	32.0733
2	32.1529	22	32.1236	42	32.0710
3	32.1529	23	32.1236	43	32.0710
4	32.1529	24	32.1236	44	32.0710
5	32.1529	25	32.1236	45	32.0710
6	32.1529	26	32.1236	46	32.0710
7	32.1474	27	32.1000	47	32.0659
8	32.1474	28	32.1000	48	32.0659
9	32.1474	29	32.1000	49	32.0659
10	32.1474	30	32.1000	50	32.0659
11	32.1474	31	32.1000	51	32.0659
12	32.1431	32	32.0797	52	32.0640
13	32.1431	33	32.0797	53	32.0640
14	32.1431	34	32.0797	54	32.0640
15	32.1431	35	32.0797	55	32.0640
16	32.1431	36	32.0797	56	32.0640
17	32.1561	37	32.0733	57	32.0593
18	32.1561	38	32.0733	58	32.0593
19	32.1561	39	32.0733	59	32.0593
20	32.1561	40	32.0733	60	32.0593

Cuadro A. 9 (Continuación) Datos de temperatura para determinación de poder calorífico en la segunda corrida para la mezcla 5, réplica 1 (Referirse al archivo de Excel para todos los valores de temperatura medidos por el equipo termómetro digital Parr).

Medición	Temperatura (°C)	Medición	Temperatura (°C)	Medición	Temperatura (°C)
61	32.0593	95	32.0424	129	32.0270
62	32.0563	96	32.0424	130	32.0270
63	32.0563	97	32.0400	131	32.0270
64	32.0563	98	32.0400	132	32.0251
65	32.0563	99	32.0400	133	32.0251
66	32.0563	100	32.0400	134	32.0251
67	32.0532	101	32.0400	135	32.0251
68	32.0532	102	32.0378	136	32.0251
69	32.0532	103	32.0378	137	32.0229
70	32.0532	104	32.0378	138	32.0229
71	32.0532	105	32.0378	139	32.0229
72	32.0514	106	32.0378	140	32.0229
73	32.0514	107	32.0355	141	32.0229
74	32.0514	108	32.0355	142	32.0210
75	32.0514	109	32.0355	143	32.0210
76	32.0514	110	32.0355	144	32.0210
77	32.0495	111	32.0355	145	32.0210
78	32.0495	112	32.0333	146	32.0210
79	32.0495	113	32.0333	147	32.0185
80	32.0495	114	32.0333	148	32.0185
81	32.0495	115	32.0333	149	32.0185
82	32.0478	116	32.0333	150	32.0185
83	32.0478	117	32.0315	151	32.0185
84	32.0478	118	32.0315	152	32.0166
85	32.0478	119	32.0315	153	32.0166
86	32.0478	120	32.0315	154	32.0166
87	32.0456	121	32.0315	155	32.0166
88	32.0456	122	32.0294	156	32.0166
89	32.0456	123	32.0294	157	32.0152
90	32.0456	124	32.0294	158	32.0152
91	32.0456	125	32.0294	159	32.0152
92	32.0424	126	32.0294	160	32.0152
93	32.0424	127	32.0270	161	32.0152
94	32.0424	128	32.0270	162	32.0136

Cuadro A. 10 (Continuación) Datos de temperatura para determinación de poder calorífico en la segunda corrida para la mezcla 5, réplica 1 (Referirse al archivo de Excel para todos los valores de temperatura medidos por el equipo termómetro digital Parr).

Medición	Temperatura (°C)	Medición	Temperatura (°C)	Medición	Temperatura (°C)
163	32.0136	197	32.0315	231	33.4423
164	32.0136	198	32.0315	232	33.4423
165	32.0136	199	32.0315	233	33.4423
166	32.0136	200	32.0315	234	33.4423
167	32.0116	201	32.5134	235	33.4423
168	32.0116	202	32.5134	236	33.5156
169	32.0116	203	32.5134	237	33.5156
170	32.0116	204	32.5134	238	33.5156
171	32.0116	205	32.5134	239	33.5156
172	32.0102	206	32.6165	240	33.5156
173	32.0102	207	32.6165	241	33.6349
174	32.0102	208	32.6165	242	33.6349
175	32.0102	209	32.6165	243	33.6349
176	32.0102	210	32.6165	244	33.6349
177	32.0102	211	33.2250	245	33.6349
178	32.0081	212	33.2250	246	33.6017
179	32.0081	213	33.2250	247	33.6017
180	32.0081	214	33.2250	248	33.6017
181	32.0081	215	33.2250	249	33.6017
182	32.0081	216	33.1777	250	33.6017
183	32.0061	217	33.1777	251	33.6184
184	32.0061	218	33.1777	252	33.6184
185	32.0061	219	33.1777	253	33.6184
186	32.0061	220	33.1777	254	33.6184
187	32.0061	221	33.2160	255	33.6184
188	32.0045	222	33.2160	256	33.6665
189	32.0045	223	33.2160	257	33.6665
190	32.0045	224	33.2160	258	33.6665
191	32.0024	225	33.2160	259	33.6665
192	32.0024	226	33.2664	260	33.6665
193	32.0024	227	33.2664	261	33.6665
194	32.0024	228	33.2664	262	33.6533
195	32.0024	229	33.2664	263	33.6533
196	32.0315	230	33.2664	264	33.6533

Cuadro A. 11 (Continuación) Datos de temperatura para determinación de poder calorífico en la segunda corrida para la mezcla 5, réplica 1 (Referirse al archivo de Excel para todos los valores de temperatura medidos por el equipo termómetro digital Parr).

Medición	Temperatura (°C)	Medición	Temperatura (°C)	Medición	Temperatura (°C)
265	33.6533	299	33.7538	333	33.7775
266	33.6533	300	33.7538	334	33.7775
267	33.6917	301	33.7538	335	33.7775
268	33.6917	302	33.7603	336	33.7775
269	33.6917	303	33.7603	337	33.7783
270	33.6917	304	33.7603	338	33.7783
271	33.6917	305	33.7603	339	33.7783
272	33.7041	306	33.7603	340	33.7783
273	33.7041	307	33.7656	341	33.7783
274	33.7041	308	33.7656	342	33.7729
275	33.7041	309	33.7656	343	33.7729
276	33.7041	310	33.7656	344	33.7729
277	33.7140	311	33.7656	345	33.7729
278	33.7140	312	33.7795	346	33.7729
279	33.7140	313	33.7795	347	33.7729
280	33.7140	314	33.7795	348	33.7730
281	33.7140	315	33.7795	349	33.7730
282	33.7312	316	33.7795	350	33.7730
283	33.7312	317	33.7811	351	33.7730
284	33.7312	318	33.7811	352	33.7730
285	33.7312	319	33.7811	353	33.7747
286	33.7312	320	33.7811	354	33.7747
287	33.7445	321	33.7811	355	33.7747
288	33.7445	322	33.7769	356	33.7747
289	33.7445	323	33.7769	357	33.7747
290	33.7445	324	33.7769	358	33.7677
291	33.7445	325	33.7769	359	33.7677
292	33.7406	326	33.7769	360	33.7677
293	33.7406	327	33.7706	361	33.7677
294	33.7406	328	33.7706	362	33.7677
295	33.7406	329	33.7706	363	33.7677
296	33.7406	330	33.7706	364	33.7705
297	33.7538	331	33.7706	365	33.7705
298	33.7538	332	33.7775	366	33.7705

Cuadro A. 12 (Continuación) Datos de temperatura para determinación de poder calorífico en la segunda corrida para la mezcla 5, réplica 1 (Referirse al archivo de Excel para todos los valores de temperatura medidos por el equipo termómetro digital Parr).

Medición	Temperatura (°C)	Medición	Temperatura (°C)	Medición	Temperatura (°C)
367	33.7705	401	33.7555	435	33.7396
368	33.7705	402	33.7555	436	33.7396
369	33.7725	403	33.7555	437	33.7396
370	33.7725	404	33.7527	438	33.7396
371	33.7725	405	33.7527	439	33.7378
372	33.7725	406	33.7527	440	33.7378
373	33.7725	407	33.7527	441	33.7378
374	33.7644	408	33.7527	442	33.7378
375	33.7644	409	33.7514	443	33.7378
376	33.7644	410	33.7514	444	33.7374
377	33.7644	411	33.7514	445	33.7374
378	33.7644	412	33.7514	446	33.7374
379	33.7642	413	33.7514	447	33.7374
380	33.7642	414	33.7492	448	33.7374
381	33.7642	415	33.7492	449	33.7380
382	33.7642	416	33.7492	450	33.7380
383	33.7642	417	33.7492	451	33.7380
384	33.7620	418	33.7492	452	33.7380
385	33.7620	419	33.7479	453	33.7380
386	33.7620	420	33.7479	454	32.6343
387	33.7620	421	33.7479	455	32.6343
388	33.7620	422	33.7479	456	32.6343
389	33.7611	423	33.7479	457	32.6343
390	33.7611	424	33.7444	458	32.6343
391	33.7611	425	33.7444	459	29.6141
392	33.7611	426	33.7444	460	29.6141
393	33.7611	427	33.7444	461	29.6141
394	33.7575	428	33.7444	462	29.6141
395	33.7575	429	33.7412	463	29.6141
396	33.7575	430	33.7412	464	28.2644
397	33.7575	431	33.7412	465	28.2644
398	33.7575	432	33.7412	466	28.2644
399	33.7555	433	33.7412	467	28.2644
400	33.7555	434	33.7396	468	28.2644

Cuadro A. 13 (Continuación) Datos de temperatura para determinación de poder calorífico en la segunda corrida para la mezcla 5, réplica 1 (Referirse al archivo de Excel para todos los valores de temperatura medidos por el equipo termómetro digital Parr).

Medición	Temperatura (°C)	Medición	Temperatura (°C)	Medición	Temperatura (°C)
469	27.2896	503	25.0308	537	24.2310
470	27.2896	504	24.8853	538	24.2310
471	27.2896	505	24.8853	539	24.1584
472	27.2896	506	24.8853	540	24.1584
473	27.2896	507	24.8853	541	24.1584
474	26.6672	508	24.8853	542	24.1584
475	26.6672	509	24.7052	543	24.1584
476	26.6672	510	24.7052	544	24.1394
477	26.6672	511	24.7052	545	24.1394
478	26.6672	512	24.7052	546	24.1394
479	26.3023	513	24.7052	547	24.1394
480	26.3023	514	24.5051	548	24.1394
481	26.3023	515	24.5051	549	24.1133
482	26.3023	516	24.5051	550	24.1133
483	26.3023	517	24.5051	551	24.1133
484	25.8025	518	24.5051	552	24.1133
485	25.8025	519	24.3591	553	24.1133
486	25.8025	520	24.3591	554	24.0784
487	25.8025	521	24.3591	555	24.0784
488	25.8025	522	24.3591	556	24.0784
489	25.4420	523	24.3591	557	24.0784
490	25.4420	524	24.2944	558	24.0784
491	25.4420	525	24.2944	559	24.0413
492	25.4420	526	24.2944	560	24.0413
493	25.4420	527	24.2944	561	24.0413
494	25.1916	528	24.2944	562	24.0413
495	25.1916	529	24.2511	563	24.0413
496	25.1916	530	24.2511	564	23.9981
497	25.1916	531	24.2511	565	23.9981
498	25.1916	532	24.2511	566	23.9981
499	25.0308	533	24.2511	567	23.9981
500	25.0308	534	24.2310	568	23.9981
501	25.0308	535	24.2310	569	23.9683
502	25.0308	536	24.2310	570	23.9683

B. Resultados intermedios

Cuadro B. 1 Poder calorífico superior de las mezclas para la primera corrida experimental.

Mezcla	Agua	Glicerol	Biomasa	Replica	Poder Calorífico MJ/kg
1	0.0025	0.0475	0.9500	1	19.6722
1	0.0025	0.0475	0.9500	2	19.4271
1	0.0025	0.0475	0.9500	3	19.7200
2	0.0050	0.0450	0.9500	1	20.1380
2	0.0050	0.0450	0.9500	2	19.8267
2	0.0050	0.0450	0.9500	3	19.7282
3	0.0075	0.0425	0.9500	1	20.3035
3	0.0075	0.0425	0.9500	2	20.1365
3	0.0075	0.0425	0.9500	3	20.6090
4	0.0100	0.0400	0.9500	1	20.6650
4	0.0100	0.0400	0.9500	2	20.4221
4	0.0100	0.0400	0.9500	3	20.7636
5	0.0150	0.0350	0.9500	1	19.3341
5	0.0150	0.0350	0.9500	2	19.3951
5	0.0150	0.0350	0.9500	3	19.6095
6	0.0200	0.0300	0.9500	1	19.7552
6	0.0200	0.0300	0.9500	2	19.7378
6	0.0200	0.0300	0.9500	3	19.7610
7	0.0050	0.0950	0.9000	1	19.4881
7	0.0050	0.0950	0.9000	2	19.2120
7	0.0050	0.0950	0.9000	3	19.2947
8	0.0100	0.0900	0.9000	1	19.6628
8	0.0100	0.0900	0.9000	2	19.3500
8	0.0100	0.0900	0.9000	3	19.4828
9	0.0150	0.0850	0.9000	1	20.7836
9	0.0150	0.0850	0.9000	2	20.1662
9	0.0150	0.0850	0.9000	3	19.7484
10	0.0200	0.0800	0.9000	1	20.4222
10	0.0200	0.0800	0.9000	2	20.1255
10	0.0200	0.0800	0.9000	3	20.0733
11	0.0300	0.0700	0.9000	1	19.5483
11	0.0300	0.0700	0.9000	2	19.5357
11	0.0300	0.0700	0.9000	3	18.4523

Cuadro B. 1 (Continuación) Poder calorífico superior de las mezclas para la primera corrida experimental.

Mezcla	Agua	Glicerol	Biomasa	Replica	Poder Calorífico MJ/kg
12	0.0400	0.0600	0.9000	1	19.8387
12	0.0400	0.0600	0.9000	2	20.1844
12	0.0400	0.0600	0.9000	3	19.9829
13	0.0075	0.1425	0.8500	1	19.1804
13	0.0075	0.1425	0.8500	2	18.9093
13	0.0075	0.1425	0.8500	3	19.3500
14	0.0150	0.1350	0.8500	1	19.9421
14	0.0150	0.1350	0.8500	2	20.0787
14	0.0150	0.1350	0.8500	3	19.8213
15	0.0225	0.1275	0.8500	1	19.9183
15	0.0225	0.1275	0.8500	2	19.9396
15	0.0225	0.1275	0.8500	3	19.5609
16	0.0300	0.1200	0.8500	1	19.4560
16	0.0300	0.1200	0.8500	2	19.3544
16	0.0300	0.1200	0.8500	3	19.5161
17	0.0450	0.1050	0.8500	1	18.1055
17	0.0450	0.1050	0.8500	2	18.0540
17	0.0450	0.1050	0.8500	3	18.0568
18	0.0600	0.0900	0.8500	1	19.2344
18	0.0600	0.0900	0.8500	2	19.2759
18	0.0600	0.0900	0.8500	3	19.7202

Cuadro B. 2 Poder calorífico inferior de las mezclas para la primera corrida experimental.

Mezcla	Agua	Glicerol	Biomasa	Replica	Poder Calorífico MJ/kg
1	0.0025	0.0475	0.9500	1	19.6665
1	0.0025	0.0475	0.9500	2	19.4214
1	0.0025	0.0475	0.9500	3	19.7143
2	0.0050	0.0450	0.9500	1	20.1266
2	0.0050	0.0450	0.9500	2	19.8153
2	0.0050	0.0450	0.9500	3	19.7168
3	0.0075	0.0425	0.9500	1	20.2865
3	0.0075	0.0425	0.9500	2	20.1195
3	0.0075	0.0425	0.9500	3	20.5920
4	0.0100	0.0400	0.9500	1	20.6423
4	0.0100	0.0400	0.9500	2	20.3994
4	0.0100	0.0400	0.9500	3	20.7409
5	0.0150	0.0350	0.9500	1	19.3000
5	0.0150	0.0350	0.9500	2	19.3610
5	0.0150	0.0350	0.9500	3	19.5754
6	0.0200	0.0300	0.9500	1	19.7098
6	0.0200	0.0300	0.9500	2	19.6924
6	0.0200	0.0300	0.9500	3	19.7156
7	0.0050	0.0950	0.9000	1	19.4767
7	0.0050	0.0950	0.9000	2	19.2006
7	0.0050	0.0950	0.9000	3	19.2833
8	0.0100	0.0900	0.9000	1	19.6401
8	0.0100	0.0900	0.9000	2	19.3273
8	0.0100	0.0900	0.9000	3	19.4601
9	0.0150	0.0850	0.9000	1	20.7495
9	0.0150	0.0850	0.9000	2	20.1321
9	0.0150	0.0850	0.9000	3	19.7143
10	0.0200	0.0800	0.9000	1	20.3768
10	0.0200	0.0800	0.9000	2	20.0801
10	0.0200	0.0800	0.9000	3	20.0279
11	0.0300	0.0700	0.9000	1	19.4802
11	0.0300	0.0700	0.9000	2	19.4676
11	0.0300	0.0700	0.9000	3	18.3842

Cuadro B. 1 (Continuación) Poder calorífico inferior de las mezclas para la primera corrida experimental.

Mezcla	Agua	Glicerol	Biomasa	Replica	Poder Calorífico MJ/kg
12	0.0400	0.0600	0.9000	1	19.7479
12	0.0400	0.0600	0.9000	2	20.0936
12	0.0400	0.0600	0.9000	3	19.8921
13	0.0075	0.1425	0.8500	1	19.1634
13	0.0075	0.1425	0.8500	2	18.8923
13	0.0075	0.1425	0.8500	3	19.3330
14	0.0150	0.1350	0.8500	1	19.9080
14	0.0150	0.1350	0.8500	2	20.0446
14	0.0150	0.1350	0.8500	3	19.7872
15	0.0225	0.1275	0.8500	1	19.8672
15	0.0225	0.1275	0.8500	2	19.8885
15	0.0225	0.1275	0.8500	3	19.5098
16	0.0300	0.1200	0.8500	1	19.3879
16	0.0300	0.1200	0.8500	2	19.2863
16	0.0300	0.1200	0.8500	3	19.4480
17	0.0450	0.1050	0.8500	1	18.0033
17	0.0450	0.1050	0.8500	2	17.9518
17	0.0450	0.1050	0.8500	3	17.9546
18	0.0600	0.0900	0.8500	1	19.0982
18	0.0600	0.0900	0.8500	2	19.1397
18	0.0600	0.0900	0.8500	3	19.5840

PODER CALORÍFICO INFERIOR						
Humedad	Relación glicerol/biomasa					
glicerol	5%		10%		15%	
	Rep 1	Rep 2	Rep 1	Rep 2	Rep 1	Rep 2
10%	4603.0999	4530.3379	4302.6036	4359.6948	4239.3962	4284.5225
15%	4377.5083	4414.5080	4337.4644	4462.0104	4307.0594	4305.9512
20%	4411.3231	4412.7161	4361.9965	4333.6333	4168.4289	4254.5179
25%	4403.9622	4440.6400	4341.2607	4287.9465	4362.2342	4232.0202

Cuadro B. 2 Poder calorífico superior de las mezclas para la segunda corrida experimental.

Mezcla	Agua	Glicerol	Biomasa	Replica	Poder Calorífico MJ/kg
1	0.005	0.0450	0.9500	1	19.2846
1	0.005	0.0450	0.9500	2	18.9799
2	0.008	0.0425	0.9500	1	18.3468
2	0.008	0.0425	0.9500	2	18.5017
3	0.010	0.0400	0.9500	1	18.4929
3	0.010	0.0400	0.9500	2	18.4987
4	0.015	0.0350	0.9500	1	18.4735
4	0.015	0.0350	0.9500	2	18.6271
5	0.010	0.0900	0.9000	1	18.0377
5	0.010	0.0900	0.9000	2	18.2767
6	0.015	0.0850	0.9000	1	18.1951
6	0.015	0.0850	0.9000	2	18.7165
7	0.020	0.0800	0.9000	1	18.3091
7	0.020	0.0800	0.9000	2	18.1903
8	0.025	0.0750	0.9000	1	18.2337
8	0.025	0.0750	0.9000	2	18.0104
9	0.015	0.1350	0.8500	1	17.7845
9	0.015	0.1350	0.8500	2	17.9734
10	0.023	0.1275	0.8500	1	18.0859
10	0.023	0.1275	0.8500	2	18.0812
11	0.030	0.1200	0.8500	1	17.5213
11	0.030	0.1200	0.8500	2	17.8818
12	0.038	0.1125	0.8500	1	18.3510
12	0.038	0.1125	0.8500	2	17.8058

Cuadro B. 2 Poder calorífico inferior de las mezclas para la segunda corrida experimental.

Mezcla	Agua	Glicerol	Biomasa	Replica	Poder Calorífico MJ/kg
1	0.005	0.0450	0.9500	1	19.2732
1	0.005	0.0450	0.9500	2	18.9685
2	0.008	0.0425	0.9500	1	18.3286
2	0.008	0.0425	0.9500	2	18.4835
3	0.010	0.0400	0.9500	1	18.4702
3	0.010	0.0400	0.9500	2	18.4760
4	0.015	0.0350	0.9500	1	18.4394
4	0.015	0.0350	0.9500	2	18.5930
5	0.010	0.0900	0.9000	1	18.0150
5	0.010	0.0900	0.9000	2	18.2540
6	0.015	0.0850	0.9000	1	18.1610
6	0.015	0.0850	0.9000	2	18.6824
7	0.020	0.0800	0.9000	1	18.2637
7	0.020	0.0800	0.9000	2	18.1449
8	0.025	0.0750	0.9000	1	18.1769
8	0.025	0.0750	0.9000	2	17.9536
9	0.015	0.1350	0.8500	1	17.7504
9	0.015	0.1350	0.8500	2	17.9393
10	0.023	0.1275	0.8500	1	18.0337
10	0.023	0.1275	0.8500	2	18.0290
11	0.030	0.1200	0.8500	1	17.4532
11	0.030	0.1200	0.8500	2	17.8137
12	0.038	0.1125	0.8500	1	18.2647
12	0.038	0.1125	0.8500	2	17.7195

C. Muestra de Calculo

C.1 Cálculo del poder calorífico inferior

Se toma el valor del poder calorífico superior del Cuadro B.1 para la mezcla 1, replica 1 y el calor latente del agua que corresponde a 2.27 MJ/kg, con la fracción másica del agua correspondiente de 0.0025 y se calcula de la siguiente manera:

$$PCI = PCS - c_{\text{agua}}X_{\text{agua}}$$

$$PCI = 19.6722 \text{ MJ/kg} - 2.27\text{MJ/kg}(0.0025) = 19.6665 \text{ MJ/kg}$$

El resultado se encuentra tabulado en el Cuadro B.2, primera fila.

C.2 Cálculo la masa de la mezcla biomasa-glicerol crudo para la caldera de la Escuela de Ingeniería Química.

Se determina el cálculo de la masa requerida de la caldera de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica como base de cálculo para el planteamiento de la planta piloto del proceso de mezclado, donde se calcula a partir del poder calorífico de la mezcla determinado experimentalmente de 20.153 MJ/kg y el requerimiento energético de la caldera de 49 389 MJ anual.

$$m_p = \frac{Q_c}{PC_p}$$

$$m_p = \frac{49\,389 \text{ MJ}}{20.153 \text{ MJ/kg}} = 2\,450.702 \text{ kg}$$

Lo que resulta una base de cálculo del proceso de 2 450.702 kg de mezcla por año.

C.3 Velocidad tangencial del sistema de molino de martillo.

Se determina la velocidad tangencial del sistema a partir de la masa del martillo recomendada por la literatura de 400 g, la fuerza gravitacional de 9.81 m/s² la altura de ensayos de energía de ruptura de la literatura de 0.25 m, y la masa de la cascarilla de coquito de 0.5 g según lo experimental, encontrando un valor de 62.64 m/s.

$$v_T = \sqrt{\frac{m_0 g h}{0.5 m_c}}$$

$$v_T = \sqrt{\frac{400 \text{ g} \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 0.25 \text{ m}}{0.5 \times 0.5 \text{ g}}} = 62.64 \text{ m/s}$$

C.4 Cálculo de la velocidad del martillo con carga

La velocidad del martillo con carga se determina a partir del coeficiente de fluctuación encontrado en la literatura de 0.125, y la velocidad tangencial encontrada en el punto C.3, resultando un valor de

$$v = -v_T \times \frac{C_S - 2}{C_S + 2}$$

$$v = -62.64 \times \frac{0.020 - 2}{0.020 + 2} = 61.40 \text{ m/s}$$

C.5 Cálculo del radio de giro del Sistema de molienda de martillos

Para determinar el radio de giro se utilizó la velocidad del martillo con carga determinada en el punto C.4 de 61.40 m/s y se dividió entre la velocidad angular determinada para un motor según la literatura de 167.6 rad/s, encontrando un valor de 0.37 m.

$$r_g = \frac{v}{\omega}$$

$$r_g = \frac{61.40 \text{ m/s}}{167.6 \text{ rad/s}} = 0.37 \text{ m}$$

C.6 Cálculo del caudal de entrada del molino de martillos.

Se determina el caudal de entrada a partir del flujo de masa de 16 kg/h según las horas de trabajo de la caldera, que para un 90% de biomasa corresponde a 14.4 kg/h, que es 0.004 kg/s entre la densidad de la cascarilla de coquito encontrada en la literatura de 1 381 kg/m³.

$$\dot{Q} = \frac{\dot{m}}{\rho_c}$$

$$\dot{Q} = \frac{0.004 \text{ kg/s}}{1\,381 \text{ kg/m}^3} = 2.90 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

C.7 Cálculo de la velocidad de entrada del sistema de molino de martillos

La velocidad de entrada del molino se determina a partir del flujo de masa determinado por la base de cálculo determinada en el punto C.2 de 2 450.702 kg anuales que corresponde a además del área de entrada que corresponde a a la superficie entre el espesor de la cámara que contiene 6 martillos de 4 mm de espesor, con el radio de giro de 0.37 m, se obtiene un valor de velocidad de ingreso de 4.03 x 10⁻⁴ m/s.

$$v_i = \frac{\dot{Q}}{A_i}$$

$$v_i = \frac{2.90 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}}{6 \times 0.004 \text{ m} \times 0.371 \text{ m}} = 3.26 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

C.8 Cálculo del tiempo de choque

El tiempo de choque se determina a partir del diámetro de partícula de la cascarilla de coquito de 0.5 mm deseado entre el radio de giro determinado en el punto C.5 y la velocidad angular del sistema de 167.6 rad/s según lo recomendado en la literatura, resultando en un valor de 8.04×10^{-5} s.

$$t = \frac{d}{r_g \omega}$$

$$t = \frac{0.005 \text{ m}}{0.371 \text{ m} \times 167.6 \text{ rad/s}} = 8.04 \times 10^{-5} \text{ s}$$

C.9 Cálculo de la masa de la partícula.

Se determina la masa de la partícula a partir del diámetro deseado de 0.5 mm y la densidad de la cascarilla de coquito encontrada en la literatura de 1381 kg/m^3 .

$$m_p = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d_p}{2}\right)^3 \rho_c$$

$$m_p = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{0.005 \text{ m}}{2}\right)^3 1381 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 9.03 \times 10^{-5} \text{ kg}$$

C.10 Cálculo de la fuerza de trituración del sistema de molino de martillos para una partícula.

La fuerza de trituración se determina a partir de la masa de partícula del punto C.9 y la velocidad tangencial de 62.64 m/s y velocidad de ingreso de 3.26×10^{-4} m/s, respecto al tiempo de choque determinado en el punto C.8.

$$F_p = \frac{m_p (v_T - v_i)}{t}$$

$$F_p = \frac{9.03 \times 10^{-5} \text{ kg} (62.64 \text{ m/s} - 3.26 \times 10^{-4} \text{ m/s})}{8.04 \times 10^{-5} \text{ s}} = 70.35 \text{ N}$$

C.11 Cálculo del número de partículas por revolución del sistema.

Se determina a partir del flujo de masa de 0.004 kg/s entre la velocidad que corresponde a 1 600 revoluciones por minuto, y la masa de la partícula, resultando un valor de 1.66 partículas por revolución.

$$N_p = \frac{\dot{m}}{\omega \times m_p}$$

$$N_p = \frac{60 \times 0.004 \text{ kg/s}}{1600 \text{ rpm} \times 9.03 \times 10^{-5} \text{ kg}} = 1.66 \text{ partículas}$$

C.12 Cálculo de fuerza de trituración total del sistema.

Según la fuerza de trituración de una partícula y la cantidad de partículas por revolución calculada en los puntos C.11 y C.12 se determina la fuerza de trituración total del sistema por revolución.

$$F_T = N_p \times F_p$$

$$F_T = 70.35 \text{ N} \times 1.66 = 116.78 \text{ N}$$

C.13 Cálculo de la potencia requerida de trituración del material

Para la potencia de trituración se determinó a partir del radio de giro de 0.371 y la velocidad angular del sistema junto con la fuerza de trituración determinada en el punto anterior, encontrando un valor de 7 261.68 W.

$$P_T = F_T \times r_g \times \omega$$

$$P_T = 116.78 \text{ N} \times 0.371 \text{ m} \times 167.6 \text{ rad/s} = 7 261.68 \text{ W}$$

C.14 Cálculo del consumo de energía por la rotación del volante.

Se determina a partir de la inercia del sistema de 0.145 kgm² según la literatura y la velocidad angular de 167.6 rad/s, encontrando un valor de 2 036.51 J.

$$E_o = \frac{1}{2} J_r \times \omega^2$$

$$E_o = \frac{1}{2} \times 0.145 \text{ kg m}^2 \times 167.6 \text{ rad/s}^2 = 2\,036.51 \text{ J}$$

C.15 Cálculo de la potencia requerida para girar el volante del molino de martillos.

Para calcular la potencia se utiliza un tiempo de arranque de 1 s según lo recomendado en la literatura y la energía requerida por el sistema para su rotación según el punto C.14 de 2 036.51 J

$$P_r = \frac{E_o}{t_a}$$

$$P_r = \frac{2036.51 \text{ J}}{1 \text{ s}} = 2036.51 \text{ W}$$

C.16 Cálculo de la potencia total requerida por el sistema de molino de martillos.

Se determina la potencia total a partir de la suma de la potencia de trituración y la potencia de rotación de los puntos C.13 y C.15.

$$P_{\text{tot}} = P_T + P_r$$

$$P_{\text{tot}} = 7\,261.68 \text{ W} + 2036.51 \text{ W} = 9\,298.19 \text{ W}$$

C.17 Cálculo del Número de Arquímedes para la cascarilla de coquito molida.

Para determinar el número de Arquímedes de la cascarilla de coquito se partió de la densidad de la partícula de 0.5 mm, la densidad de la cascarilla de 1 381 kg/m³ según la literatura, la densidad del fluido que corresponde a aire de 1.205 kg/m³ y la viscosidad cinemática del aire de 1.81 x 10⁻⁵ kg/ms, resultando en un valor de 6 300.

$$Ar = \frac{g \times d_p^3 \times (\rho_p - \rho_g)}{\mu_g^2}$$

$$Ar = \frac{9.81 \text{ m/s}^2 \times 0.0005^3 \text{ m} \times (1381 \text{ kg/m}^3 - 1.205 \text{ kg/m}^3)}{(1.81 \times 10^{-5} \text{ kg/ms})^2} = 6\,300$$

C.18 Cálculo del número de Reynolds para la cascarilla de coquito.

Se determina el número de Reynolds a partir del número de Arquímedes encontrado en el punto C.17 de 6 300, para resultar en un valor de 3.64

$$Re_{mf} = \sqrt{(33.7^2 + 0.0408Ar)} - 33.7$$

$$Re_{mf} = \sqrt{(33.7^2 + 0.0408 \times 6300)} - 33.7 = 3.64$$

C.19 Cálculo de la velocidad de fluidización mínima de la cascarilla de coquito.

Se determina a partir de las densidades de aire y cascarilla de coquito según la literatura, además del diámetro de partícula y la viscosidad cinemática del aire, encontrando un valor de 0.09 m/s.

$$U_{mf} = \frac{7.169 \times 10^{-4} (\rho_p - \rho_g)^{0.94} d_p^{1.82}}{\rho_g^{0.06} \times \mu_g^{0.88}}$$

$$U_{mf} = \frac{7.169 \times 10^{-4} (1381 \text{ kg/m}^3 - 1.205 \text{ kg/m}^3)^{0.94} 0.0005^{1.82}}{1.205 \text{ kg/m}^{30.006} \times 1.81 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}^{0.006}} = 0.09 \text{ m/s}$$

C.20 Cálculo de la viscosidad aparente de la cascarilla de coquito

A partir de la fracción de vacío de la literatura de la cascarilla de coquito, la cual corresponde a un valor de 0.125, se determina la viscosidad aparente que resulta en 2 304 kg/ms.

$$\mu_{app} = \frac{1 + 0.5 (1 - \epsilon)}{\epsilon^4}$$

$$\mu_{app} = \frac{1 + 0.5 (1 - 0.125)}{0.125^4} = 2\,304 \text{ kg/ms}$$

C.21 Cálculo de la relación del diámetro y la altura con la caída de presión del lecho fluidizado.

A partir de los valores encontrados en los puntos C.19 y C.20 se determina la relación de altura y diámetro del lecho fluidizado a partir de la caída de presión según la literatura de 4 892 Pa.

$$\Delta P = \frac{32 \times \mu_{app} \times U \times H}{g \times D^2}$$

$$4892 \text{ Pa} = \frac{32 \times 2304 \text{ kg/ms} \times 0.09 \text{ m/s} \times H}{9.81 \text{ m/s}^2 \times D^2}$$

$$H = 7.4 D^2$$

C.22 Cálculo de la fuerza de compresión de peletización.

Se determina a partir del diámetro del dado, el cual corresponde al diámetro del pelet deseado según la literatura de 0.0067 m, y la altura del pelet de 0.04 m, además de la presión recomendada por la literatura de 90 000 Pa, resultando en un valor de 12.1 kN.

$$F_c = \frac{P_c \times d_{\text{dado}} \times L_{\text{dado}}}{2}$$

$$F_c = \frac{90\,000 \text{ Pa} \times 0.0067 \text{ m} \times 0.04 \text{ m}}{2} = 12.1 \text{ kN}$$

C.23 Cálculo del radio de giro de la peletizadora

A partir de la energía requerida para girar el molde según el equipo encontrado en la literatura que corresponde a 40 kW, además de la fuerza de compresión determinada en el punto C.22 y la velocidad del molde del anillo encontrado en la literatura de 45.4 rev/min se determina el radio requerido de 175 mm.

$$R = \frac{E}{8\pi \times n \times F_c}$$

$$R = \frac{40000 \text{ W} \times 60 \text{ s}}{8\pi \times 45.4 \text{ rev/min} \times 12100 \text{ N}} = 175 \text{ mm}$$