

**DESARROLLO DE LA INGENIERIA BÁSICA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN
DEL BIODIESEL A PARTIR DE LA BORRA DE CAFÉ**

JUAN FELIPE PINZÓN VALENCIA

**Proyecto integral para optar por el título de
INGENIERO MECÁNICO**

Orientador

Claudio Alberto Moreno Arias

INGENIERO MECÁNICO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTÁ D.C

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre
Firma del Director

Nombre
Firma del Presidente Jurado

Nombre
Firma del Jurado

Nombre
Firma del Jurado

Bogotá D.C. febrero de 2022

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCIA-PEÑA

Consejero Institucional

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCIA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. ALEXANDRA MEJIA GARZÓN

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretario General

Dr. JOSÉ LUÍS MACÍAS RODRÍGUEZ

Decano de la Facultad de Ingenierías

Ing. NALINY PATRICIA GUERRA PRIETO

Director del Programa de Ingeniería Mecánica

PhD. MARÍA ANGÉLICA ACOSTA PÉREZ

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por darme su amor infinito; a mis padres y hermana por siempre apoyarme en las decisiones que tomo, con consejos y su sabiduría, por motivarme e impulsarme a salir adelante siguiendo siempre el mejor de los caminos; a mi tutor, el ingeniero Claudio Moreno, por siempre estar dispuesto a escuchar mis ideas y aportar sus conocimientos en el desarrollo de mi proyecto. También agradezco a la Fundación Universidad de América, por haberme aceptado en primera instancia y porque su plan de estudios para un ingeniero mecánico me brindó conocimientos con los cuales defenderme en mi futura vida laboral. Muchas gracias por la colaboración y el apoyo.

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	14
INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVOS	18
1. GENERALIDADES DE LA OBTENCIÓN DE BIODIESEL	19
1.1. Antecedentes	19
<i>1.1.1. Marco teórico</i>	19
<i>1.1.2. Estado del arte de la producción de Biodiesel a partir de la borra de café</i>	24
1.2. Diagnostico actual de la producción de biodiesel en Colombia	33
<i>1.2.1. Materias primas en la producción</i>	34
<i>1.2.2. Demanda de Biodiesel de Colombia</i>	34
1.3. La borra de café	35
<i>1.3.1. Disponibilidad como materia prima</i>	36
<i>1.3.2. Propiedades de la borra de café</i>	38
<i>1.3.3. Potencial como biomasa</i>	39
1.4. Extracción de aceites	39
<i>1.4.1. Métodos de Extracción</i>	39
1.5. Proceso de producción de biodiesel	41
<i>1.5.1. Esterificación</i>	41
<i>1.5.2. Transesterificación</i>	41
2. INGENIERÍA CONCEPTUAL DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN	43
2.1. Elección de las variables que afectan las etapas de producción	43
<i>2.1.1. Origen del café</i>	43
<i>2.1.2. Variables que afectan la extracción de aceites</i>	43

2.1.3. <i>Revisión de resultados de la extracción de aceites de la borra</i>	47
2.1.4. <i>Variables que afectan la transesterificación</i>	51
2.1.5. <i>Revisión de resultados de la reacción para obtener biodiesel</i>	52
2.2. Requerimientos del proceso de producción	54
2.2.1. <i>Requerimientos y factores necesarios en la extracción</i>	54
2.2.2. <i>Requerimientos y factores necesarios en la transesterificación</i>	58
2.3. Etapas de producción de biodiesel	62
2.3.1. <i>Selección de las etapas de producción de biodiesel</i>	62
2.4. Capacidad de producción del proceso	63
2.4.1. <i>Selección del flujo de entrada de la borra</i>	64
2.4.2. <i>Balance de materia de la etapa de extracción</i>	65
2.4.3. <i>Balance de materia de la etapa de esterificación</i>	72
2.4.4. <i>Balance de materia de la etapa de transesterificación</i>	80
2.4.5. <i>Capacidad del proceso</i>	86
3. SELECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LOS EQUIPOS	94
3.1. Equipos utilizados en las etapas de producción	94
3.1.1. <i>Valoración de los diferentes equipos</i>	94
3.1.2. <i>Reactores</i>	94
3.1.3. <i>Extractor</i>	100
3.1.4. <i>Secadores</i>	103
3.1.5. <i>Decantador</i>	104
3.1.6. <i>Separador</i>	107
3.1.7. <i>Centrífuga de discos</i>	108
3.1.8. <i>Bombas</i>	110
3.2. Diagramas del proceso	119

3.2.1. Diagrama P&ID	119
3.3. Análisis de desperdicios	120
3.3.1. Distribución de los equipos	120
4. MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	123
4.1. Manual de operación y mantenimiento	123
4.1.2. Establecer actividades	130
4.1.3. Establecer responsables	131
4.2. Estudio de costos del proceso de producción	132
4.2.1. Costos de operación del proceso actual	132
4.2.2. Costos de operación del proceso propuesto	132
5. CONCLUSIONES	136
BIBLIOGRAFIA	137
ANEXOS	144

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. <i>Diagrama global del proceso de producción de biodiesel</i>	29
Figura 2. <i>Etapa de extracción de aceite</i>	30
Figura 3. <i>Generación de Ácidos Grasos Libres</i>	31
Figura 4. <i>Etapa de reacción de la transesterificación</i>	32
Figura 5. <i>Distribución del porcentaje de mezcla de biodiesel en el territorio nacional</i>	33
Figura 6. <i>Demanda nacional del Biodiesel en Colombia</i>	35
Figura 7. <i>Evolución del consumo en tiendas de café en Colombia</i>	37
Figura 8. <i>Esquema de la extracción por solvente</i>	40
Figura 9. <i>Esquema de la reacción de transesterificación</i>	42
Figura 10. <i>Efectos de la relación Borra/Solvente en la extracción de aceite</i>	44
Figura 11. <i>Efectos del contenido de humedad en la extracción de aceite</i>	45
Figura 12. <i>Balance de materia en la etapa de extracción</i>	66
Figura 13. <i>Balance de materia en la etapa de esterificación</i>	73
Figura 14. <i>Balance de materia de la etapa de transesterificación</i>	80
Figura 15. <i>Opción A: Reactor tipo Batch industrial marca Qiangzhong</i>	98
Figura 16. <i>Opción B: Reactor tipo Batch industrial marca KEDA</i>	99
Figura 17. <i>Opción A: Extractor tipo soxhlet marca Zhejiang Sunny Machinery/OEM</i>	101
Figura 18. <i>Opción B: Extractor tipo soxhlet marca Ruian Xuanli Machinery Co.</i>	102
Figura 19. <i>Secador eléctrico con bomba al vacío marca faithful</i>	103
Figura 20. <i>Secador eléctrico con bomba al vacío marca Faithful</i>	104
Figura 21. <i>Opción A: Decantador centrifugo marca jiangsu blovebird centrifuge co. ltd</i>	105
Figura 22. <i>Opción B: Decantador centrifugo de marca Keda</i>	106

Figura 23. <i>Opción A: Separador tipo flash marca Mega Engineering</i>	107
Figura 24. <i>Opción B: Separador tipo flash marca Mahavas Precision</i>	108
Figura 25. <i>Centrífuga de discos marca SinoTech</i>	109
Figura 26. <i>Centrífuga de discos marca Sinoped</i>	110
Figura 27. <i>Estimación geométrica de las entradas y salidas de las bombas</i>	111
Figura 28. <i>Gráfica de tipos de bombas</i>	114
Figura 29. <i>Catálogo de bombas centrifugas marca Hasa</i>	115
Figura 30. <i>Diagrama P&ID del proceso de producción seleccionado</i>	120
Figura 31. <i>Ficha técnica del Reactor (R2)</i>	123
Figura 32. <i>Ficha técnica del reactor (R3)</i>	124
Figura 33. <i>Ficha Técnica del Extractor (E1)</i>	125
Figura 34. <i>Ficha Técnica del secador (S1)</i>	126
Figura 35. <i>Ficha Técnica del secador (S3)</i>	127
Figura 36. <i>Ficha Técnica del Decantador (D2)</i>	128
Figura 37. <i>Ficha Técnica del Separador tipo flash (SF1)</i>	129
Figura 38. <i>Ficha Técnica del Decantador de discos(D3)</i>	130

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. <i>Rangos estándares del biodiesel</i>	22
Tabla 2. <i>Análisis de borra de café utilizada como combustible</i>	38
Tabla 3. <i>Condiciones experimentales de la extracción del aceite de la borra de café</i>	49
Tabla 4. <i>Resultados obtenidos por distintos métodos de extracción</i>	50
Tabla 5. <i>Valoración de los factores que alteran la extracción.</i>	54
Tabla 6. <i>Tabla resumen Revisión de resultados de la extracción de aceites de la borra</i>	56
Tabla 7. <i>Requerimientos y factores necesarios en la extracción de los aceites de la borra</i>	57
Tabla 8. <i>Valoración de los factores que alteran la reacción de la transesterificación</i>	58
Tabla 9. <i>Resumen revisión resultados reacción transesterificación previa esterificación</i>	60
Tabla 10. <i>Requerimientos factores reacción transesterificación con previa esterificación</i>	61
Tabla 11. <i>Alimentación de los equipos</i>	90
Tabla 12. <i>Plantas productoras de biodiesel en Colombia</i>	93
Tabla 13. <i>Resumen de resultados para la bomba 1 B1.</i>	116
Tabla 14. <i>Resumen de resultados para la bomba B2.</i>	117
Tabla 15. <i>Resumen de resultados para la bomba 3 B3.</i>	117
Tabla 16. <i>Resumen de resultados para la bomba 4 B4.</i>	118
Tabla 17. <i>Resumen de resultados para la bomba 5 B5.</i>	118
Tabla 18. <i>Costos del proceso seleccionado</i>	133
Tabla 19. <i>Tabla de porcentajes de los costos de producción</i>	134

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. <i>Ecuación general de balance de materia.</i>	66
Ecuación 2. <i>Ecuación del balance estacionario y no reactivo.</i>	67
Ecuación 3. <i>Ecuación de la cantidad de sustancia en una corriente.</i>	68
Ecuación 4. <i>Ecuación de la reacción de esterificación.</i>	73
Ecuación 5. <i>Conversión de cantidad de la sustancia en masa a cantidad molar.</i>	74
Ecuación 6. <i>Relación reactivo limitante.</i>	76
Ecuación 7. <i>Consumo del reactivo con respecto al rendimiento de la reacción</i>	77
Ecuación 8. <i>Consumo de reactivos.</i>	77
Ecuación 9. <i>Reacción de la transesterificación.</i>	81
Ecuación 10. <i>Ecuación para conocer la generación</i>	83
Ecuación 11. <i>Alimentación de equipos.</i>	87
Ecuación 13. <i>Ecuación de la densidad.</i>	95
Ecuación 14. <i>Ecuación de Bernoulli</i>	112
Ecuación 15. <i>Potencia de bombeo.</i>	112
Ecuación 16. <i>Ecuación de la potencia absorbida.</i>	113

LISTA DE SIMBOLOS

Símbolos	Descripción del símbolo
AGL	Ácidos Grasos Libres
B1	Bomba que impulsa el fluido después de E1
B2	Bomba que impulsa el fluido después de SF1
B3	Bomba que impulsa el fluido después de R2
B4	Bomba que impulsa el fluido después de D2
B5	Bomba que impulsa el fluido después de R3
CH ₃ OH	Metanol
D2	Decantador Etapa 2
D3	Decantador Etapa 3
E1	Extractor Etapa 1
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfúrico
KOH	Hidróxido de Potasio
R2	Reactor Etapa 2
R3	Reactor Etapa 3
S1	Secador Etapa 1
S3	Secador Etapa 3
SF1	Separador Etapa 1

RESUMEN

En esta investigación, cuya finalidad es desarrollar la ingeniería básica del proceso de producción del biodiesel a partir de la borra de café, se presenta una alternativa económica a la producción de biodiesel que actualmente se lleva a cabo en el país. Esta materia prima, de la cual se encuentra aproximadamente 10571400 kg por año en Colombia, cuenta con la ventaja (al menos para el proceso) de que se desperdicia casi en su totalidad y la ventaja de no pertenecer a la cadena alimenticia. Además, se ha demostrado que el biodiesel que se obtiene de la borra cumple con las diferentes normas, tanto nacionales como internacionales.

Principalmente se genera un marco teórico sobre el proceso estudiado, donde se muestra los conceptos más relevantes, las investigaciones previas más pertinentes y un estudio de cómo se realiza el biodiesel con tal biomasa. Posteriormente, se presentan las etapas más adecuadas para la producción, con una selección de las configuraciones de cada etapa seguida; que parte desde los mejores resultados obtenidos en las investigaciones previas, en esta sección también se encuentran los cálculos oportunos para determinar la capacidad de la producción que tendría el proceso y también con el fin de poder seleccionar los equipos que más se adaptarían a cada una de las etapas seleccionadas en el proceso planteado. Finalmente, partiendo de las selecciones se plantea un manual de mantenimiento preventivo y un planteamiento de costos.

Palabras clave: Obtención de Biodiesel, Borra de café, Spent Coffee Grounds, Transesterificación, esterificación, Biomasa.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, cuando se realiza la búsqueda de un proceso para obtener biodiesel, es posible encontrar un cierto camino por el cual llegar al producto final. Este proceso en la mayoría de los casos se centra en 4 etapas: la obtención de la materia prima, la extracción de aceite de esta materia prima, reacciones de transesterificación para obtener el biodiesel desde el aceite extraído y por último una purificación del biodiesel obtenido. Sin embargo, cuando se estudian estas etapas del proceso en diferentes investigaciones; además de encontrar siempre diferentes propiedades del biodiesel, no se encuentra un método preciso o establecido, es decir que no se usan los mismos métodos en cada etapa e incluso no siempre son las mismas; pues en algunas investigaciones se han usado diferentes pasos y hasta menos etapas para llevarlo a cabo.

Actualmente, en Colombia existen 12 plantas encargadas de la producción de biodiesel, todas a partir del aceite extraído y refinado de la palma africana[1]. Lo anterior se debe a que el país cuenta con diversas hectáreas cultivadas con la palma aceitera; Sin embargo, esta materia prima no resulta del todo satisfactoria como biomasa para este proceso; debido a que hace parte de la cadena de suministro alimenticio y es causante de la deforestación[2].

El problema de lo anteriormente mencionado es que cuando se requiere producir biodiesel, no es claro el camino por el cual guiar el proceso y es posible perder el rendimiento de conversión, las propiedades del producto final y asimismo no cumplir con los diferentes estándares que rigen un producto como el biodiesel tanto en Colombia como en el exterior. Al igual como no es claro un proceso, no es fácil saber qué características de máquinas o equipos son las más factibles en la producción de biodiesel. También se percibe que la biomasa aplicada en Colombia para su conversión a biodiesel no es del todo satisfactoria.

Por tales motivos, es que esta investigación se verá dividida en cuatro capítulos con el fin de cumplir los objetivos, de la siguiente manera: en el primer capítulo se encuentra toda la información relevante para poder entender de una mejor manera el proceso por el cual debe pasar la materia prima para ser convertida en biodiesel de buena calidad y un acercamiento de lo que es la ingeniería básica de un diseño de proceso; en un segundo capítulo se consideran las

investigaciones que han tenido lugar en el pasado y aún más aquella con los mejores resultados de obtención tanto de los aceites extraídos como del biodiesel generado por la reacción de transesterificación, además de los parámetros y configuraciones de etapas que son seleccionados partiendo de los resultados mencionados y un análisis de cuál sería la capacidad de producción para el proceso que se selecciona; en un tercer capítulo, empezando por la capacidad de producción y los flujos que se generan en cada etapa, se seleccionan aquellos equipos que cumplen con la función de convertir de biomasa a biodiesel, esto quiere decir que no se tienen en cuenta equipos que a pesar de que hagan parte del proceso no transforman el producto en proceso, tal es el caso de las bombas, los tanques o el mezclador que no se seleccionan porque a pesar de que están en el proceso, no son indispensables para generar biodiesel. En un último capítulo, conociendo ya el proceso y los equipos seleccionados se origina un manual de mantenimiento y operación con un planteamiento de costos. No se consideran ubicaciones físicas de los equipos, pues es un primer acercamiento de un proceso de producción de biodiesel a partir de la borra de café en Bogotá.

Antes de conocer las generalidades del proceso que se pretende diseñar, se vuelve indispensable conocer que es lo que se pretende con realizar un desarrollo de la ingeniería básica del proceso de producción del biodiesel a partir de la borra de café. Por esto se explica lo que es un desarrollo de ingeniería básica.

Según ACIEM la ingeniería básica es en la cual se determina la capacidad del proceso y en donde se establecen las características de los equipos principales, instrumentos y elementos que conllevan a una buena terminación de un proceso. Debe permitir hacer un estimativo de costos con un rango de variación del 15%. De acuerdo con esto, algunos alcances de la ingeniería básica son:[3]

- Recolectar información indispensable.
- Describir el proceso que se piensa llevar a cabo.
- Definir simbología en planos y dibujos.
- Definir códigos, normas u estándares a emplear.
- Definir sistema de codificación de documentos, de identificación de equipos, de fluidos y de instrumentos.

- Realizar los cálculos preliminares de las ramas de Ingeniería especializadas y de otros tipos específicos requeridos por el proyecto o parte de este.
- Especificar todos los equipos principales.
- Elaborar: Diagramas de flujo de proceso y Diagramas de tubería e instrumentación.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar la ingeniería básica del proceso de producción del Biodiesel a partir de la Borra de Café.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los parámetros y requerimientos de ingeniería básica que inciden en el proceso de producción de biodiesel.
- Definir las etapas del proceso de obtención de biodiesel que cumpla con los parámetros y requerimientos establecidos.
- Seleccionar los equipos pertinentes que se ajusten a un proceso de producción eficiente y eficaz.
- Elaborar un manual de mantenimiento y operación de los equipos involucrados en el proceso de producción, seleccionados en esta investigación.

1. GENERALIDADES DE LA OBTENCIÓN DE BIODIESEL

1.1. Antecedentes

1.1.1. Marco teórico

1.1.1.a. Biocombustibles. La energía también puede ser producida a partir de materias primas eco amigables, esas energías se obtienen a partir de biocombustibles, que son todos los combustibles que provengan del tratamiento físico o químico de materia vegetal o de residuos orgánicos; es decir de componentes principalmente naturales[4]. Además, al ser combustibles de origen biológico, estos pueden sustituir a los derivados de los fósiles. En su mayoría reemplazan o se usan como complemento en aplicaciones de movilidad[5]. El objetivo principal de estos sustitutos es el de reducir los problemas ambientales que se generan por las emisiones en la quema o combustión de los derivados del petróleo y, además, reemplazarlos en caso de que se acabe la fuente de producción a futuro o se den incrementos extremos de precio[6]. Los biocombustibles se destacan por ser biodegradables, lo que protege el medio ambiente y los convierte en una buena alternativa a los combustibles actuales[7]. Los biocombustibles pueden ser clasificados en tres tipos: los de primera generación, los cuales se consiguen por la degradación anaeróbica de los elementos de origen vegetal como el biodiesel y el biogás; los de segunda generación o biocombustibles celulósicos, que son aquellos derivados de elementos vegetales con la capacidad de transformarse en celulosa como el biohidrógeno y el bioetanol de celulosa[8]. Por último, se encuentran los biocombustibles de tercera generación que son todos aquellos que se producen o tienen su origen en especies no alimenticias como las algas[6].

1.1.1.b. Biodiesel. Según la norma (ASTM) D6751-15C, el biodiesel es un combustible compuesto por ésteres metílicos de ácidos grasos derivados de aceites con origen vegetal o grasas animales, designado B100 de BXX, donde XX representa el porcentaje en peso de Biodiesel presente en una mezcla de combustible[10]. Aunque se diga que el biodiesel procede tanto de los aceites vegetales como de las grasas animales, para una gran aplicación como el sector transporte; solo es práctico el uso de fuentes vegetales ya que, en comparación con la demanda del combustible, la cantidad de grasas animales es mínima para ser usada o procesada en la

conversión a biodiesel. Se acostumbra a usar este biocombustible en mezcla con diésel para vehículos que no requieren de ningún tipo de modificación en su motor y también puede ser usado en estado puro en motores que se adapten para su uso[11].

Entre las ventajas de sustituir los combustibles derivados de los fósiles por biodiesel, se presenta: la reducción de material particulado, pues por su fuente son despreciables las emisiones contaminantes del material particulado y micro particulado; el ciclo de vida en comparación con los derivados del petróleo que disminuye en un 74% y 83% las emisiones de gases de efecto invernadero[12]; la cantidad de azufre es despreciable, lo cual mejora el proceso de combustión y disminuye la posibilidad de oxidación[13].

Para poder comercializar el biodiesel, es importante que cumpla con diferentes pruebas de estándares y normativas internacionales que acrediten su calidad. En orden de poder confirmar su calidad, las pruebas deben tener en cuenta las siguientes propiedades[14]:

- Estabilidad de oxidación: Es la resistencia a los cambios químicos durante un largo almacenamiento.
- Propiedades de flujo a baja temperatura: se verifican dos factores incluyendo el punto de nube, en el cual los cristales de cera pueden taponar los filtros; y el punto de fluidez, en donde el líquido deja de fluir.
- Viscosidad: Esta es la resistencia del biodiesel a fluir como líquido.
- Contenido de Cenizas sulfatadas: Describe la cantidad de partículas inorgánicas contaminantes.
- Contenido de Azufre: Depende de las condiciones de operación y propiedades de la materia prima, puede alterar el control de emisiones.
- Punto de inflamación: Es la temperatura mínima a la cual el fluido genera suficiente vapor que, a su vez, al ser mezclado con aire se enciende.

- Índice de Cetano: es un importante parámetro de calidad del combustible. Entre mayor sea, mejor es la capacidad para encender.
- Contenido de metanol o etanol: En gran cantidad puede afectar el punto de inflamación y causar corrosión en el sistema de distribución del combustible y baja lubricidad.
- Contenido de fósforo: La cantidad de fosforo puede alterar la conversión catalítica en el sistema de control de emisiones. Debería mantenerse bajo.
- Carbón residual: Es la tendencia del combustible de dejar depósitos en inyectores y la cámara del combustible.
- Contenido de ésteres: Es importante para determinar la presencia de otras sustancias y conocer si la reacción de obtención y las condiciones fueron satisfactorias.
- Temperatura de destilación: También con esta prueba se puede determinar el contenido de otras sustancias para poder cumplir con la definición de biodiesel.
- Contenido de agua y sedimentos: El contenido de agua se puede incrementar en el proceso de purificación del biodiesel y además por su propiedad de higroscopicidad en su almacenamiento puede absorber agua que debe ser secada. Un alto contenido de sedimentos puede conducir a la obstrucción en el desplazamiento del combustible.
- Densidad: La densidad del biodiesel generalmente es mayor al combustible derivado del petróleo, depende del contenido de ácidos grasos (componentes básicos de las grasas).

Las propiedades que presenta el biodiesel varían según su aplicación y más aún de la composición química que sea usada [15]. Es por esto por lo que existe un rango de valores con los cuales analizar una caracterización del biocombustible para determinar si sus propiedades son aptas o no dentro de un marco normativo. Dichos rangos se presentan en la tabla 1. Rangos estándares del biodiesel.

Tabla 1.*Rangos estándares del biodiesel*

Propiedad	Unidades	EN14214	ASTM D 6751
Contenido de éster	%(m/m)	96,6>	-
Densidad a 15 °C	Kg/m ³	860-900	-
Viscosidad a los 40 °C	mm ² /s	3,5-5	1,9-6
Punto de inflamación	°C	120<	130<
Punto de nube	°C	-	Reporte
Punto de fluidez	°C	-	-
carbón residual (al 10 % del residuo de la destilación)	%(m/m)	0,3>	0,5>
Índice de acidez	Mg KOH/g	0,5>	0,8>
Índice de cetano	-	51<	47<
Contenido de azufre	%(m/m)	0,001>	0,0015>
Contenido de cenizas sulfatadas	%(m/m)	0,02>	0,02>
Contenido de agua	Mg/kg	0,05>	0,05>
Lámina de cobre a la corrosión (3 h a 50 °C)	Clasificación	1a	3a
Valor de yodo	-	120>	-
Éster metil de ácido 12inoleico	%(m/m)	12>	-
Polinsaturados ésteres metílicos (≥ 4 doble enlace)	%(m/m)	1>	-
Contenido de metanol	%(m/m)	0,2>	-
Contenido de mono glicéridos	%(m/m)	0,8>	-
Contenido de di glicéridos	%(m/m)	0,2>	-
Contenido de triglicéridos	%(m/m)	0,2>	-
Glicerol libre	%(m/m)	0,002>	0,02>
Glicerol total	%(m/m)	0,025>	0,024>
Contenido de fósforo	mg/kg	10>	10>
Temperatura de destilación (905 recuperado)	°C	-	360>

Nota. Se evidencia en esta tabla los rangos según los cuales se establece que un biodiesel es apto o no dentro de un marco normativo. Tomado de: R. A. Martínez Bernal, “Elaboración y caracterización de biodiesel como energía alternativa a partir de aceite de pescado,” Universidad de Ibagué, 2019. Disponible: <https://repositorio.unibague.edu.co/bitstream/20.500.12313/1288/1/Trabajo%20de%20grado.pdf>

1.1.1.c. Biomasa. La biomasa se puede definir como la parte biodegradable y no fósil de diferentes recursos a partir de elementos biológicos u orgánicos como aceites vegetales y grasas animales o domésticas, que son aptos para procesos de transformación en energía limpia y sin residuos notorios que a su vez cuentan con la propiedad de ser biodegradables. La energía que se puede desarrollar desde la biomasa tiene la ventaja de ser renovable[16][17]. La biomasa es una fuente energética con gran higroscopicidad (capacidad para absorber agua) y alto contenido de humedad, oxígeno, hidrógeno y material volátil con bajo poder calorífico a la cual la torrefacción (tostado de granos) promueve una mayor eficiencia en la conversión de biocombustibles[18]. El alto contenido de oxígeno e hidrógeno es la razón de la alta proporción de material volátil, que conlleva a un alto rendimiento de los gases y los líquidos en la pirolisis (descomposición de materia orgánica)[19].

La biomasa puede clasificarse dependiendo de su origen: Biomasa primordial o también llamada natural, que se obtienen de aquellas materias a las que la luz solar directa o indirectamente les provee energía suficiente para su sostenimiento[20]; Biomasa residual, esto es todo desecho biodegradable que es generado por los de la primera clasificación y se subdividen en biomasa residual seca, biomasa residual húmeda y natural; por último, la biomasa energética, que son siembras con el único propósito de servir en la producción de biocombustibles[21].

1.1.1.d. Obtención del Biodiesel. Se han desarrollado diferentes tecnologías para la producción de Biodiesel como pirólisis, la micro emulsión y la transesterificación:

- La micro emulsión es la forma más antigua de producir biodiesel a partir de grasas y aceites al ser mezcladas con solventes orgánicos que reducen la viscosidad de los aceites para poder ser usados como combustible en motores de combustión [22].
- Pirólisis: es una descomposición a altas temperaturas donde se cambian las propiedades químicas para usar la materia prima como biocombustible [22].
- La transesterificación es la forma más común de convertir aceites en biodiesel, al hacerlos reaccionar con algunos alcoholes, puede ser con catalizador o sin catalizador, cuando no hay

presencia de catalizador se genera mayor presión o temperatura para obtener una mayor tasa de conversión, mientras que en la transesterificación con catalizador se adquiere una conversión en menor tiempo, pero los tratamientos que siguen son más difíciles. Además, actualmente se estudia la transesterificación “in-situ” ya que elimina la parte de la extracción del aceite de la materia prima lo cual reduce el consumo de energía[22].

1.1.2. Estado del arte de la producción de Biodiesel a partir de la borra de café

A continuación, se presentan investigaciones, tesis y artículos científicos, que se han realizado en el pasado, sobre el potencial del uso de la borra de café en la producción de Biodiesel. Dichas investigaciones brindan un entendimiento de las raíces del problema, es decir si las características de la borra de café cumplen para ser utilizadas como biomasa en procesos de producción de Biodiesel; también de la problemática que se plantea en este proyecto, que se basa en los diferentes tipos de procesos para llegar al biodiesel y, además, se presentan distintos caminos por los cuales se puede llegar a una solución.

1.1.2.a. Potencial de la borra como biomasa. Son investigaciones en las cuales se evaluó el beneficio de utilizar la borra de café como biomasa en la producción y obtención de biodiesel, algunas partiendo de la teoría existente y otras en las que se desarrollaron plantas piloto y experimentalmente se encontraron diferentes datos de las caracterizaciones de los aceites extraídos de la borra y también del biodiesel posteriormente obtenido, los valores que se consiguen varían debido al lugar donde se obtienen, las diferentes etapas en los procesos que se usan y también por los productos de entrada.

En la investigación “Evaluación del Potencial de la Borra de Café como Materia Prima para la Producción de Biodiesel” recolectaron residuos de café en cafeterías, los cuales se secaron al sol, se realizó una extracción de las grasas, mediante reflujo a una temperatura de 70°C; se caracterizaron las probetas después de la extracción de las grasas, en pruebas de laboratorio se hizo una producción de biodiesel mediante transesterificación con catalizador. Una evaluación del biodiesel obtenido revisando las concentraciones de ésteres metílicos, entre otros contemplados en la evaluación de los resultados arrojan que las mejores condiciones del proceso de

transesterificación fueron de relación molar de 1:6, concentración de KOH de 1,5%, agitación de 400rpm, a 70°C durante una hora con buenas propiedades obtenidas de la caracterización del biodiesel[23]. Y, además, arrojan que la borra de café es apta para esta producción.

En otra investigación: “Valoración integrada de la borra de café para biocombustibles” con el objetivo de evaluar el potencial de la borra de café como biomasa, aprovechándola toda sin dejar residuos dejó que a un bajo costo de producción en comparación con otras materias primas y procesos; el biodiesel obtenido cumplió con casi todos los estándares de la ASTM a excepción de los residuos de carbón y que además el rendimiento del biodiesel es alto (82%). Por último, para evitar los residuos el glicerol puede ser transformada en combustible en forma de pellets[24]. En este estudio es importante mencionar que se analizó primero el contenido de humedad de la materia prima, la caracterización fisicoquímica del aceite, el método de extracción del aceite que se realizó por medio de solventes; los tipos y cantidades molares de catalizadores de la reacción en dos pasos de esterificación y transesterificación, la purificación y la caracterización y rendimiento del biodiesel obtenido con un análisis del glicerol por otro lado.

1.1.2.b. Método de extracción de aceites. Para esta investigación es importante conocer que etapas escoger y por cuales métodos extraer los aceites, de tal manera que se pueda consolidar un camino con el cual extraer satisfactoriamente los aceites con las mejores propiedades para ser usadas como materia prima en la producción de Biodiesel. Diferentes investigaciones y tesis se han llevado a cabo analizando las diferentes propiedades de los aceites extraídos de la borra de café por distintos métodos: En el estudio “Producción de biodiesel a partir de la borra de café” se estudió el rendimiento del biodiesel procesado, partiendo de los diferentes métodos de extracción del aceite, de lo cual se obtuvo que de la extracción y sus diferentes parámetros como: el tipo de técnica, el origen de la materia prima y las condiciones de extracción; deben ser muy bien escogidos en los procesos de producción, pues afecta directamente en el rendimiento de uso del biocombustible. A parte, se expuso la importancia de esta biomasa en un proceso de producción de biodiesel para satisfacer necesidades de tipo ecológicas[25].

“Efecto de los parámetros de la extracción por solvente en la recuperación del aceite a partir de la borra de café para la producción de biocombustible” Es una investigación en la cual los autores

realizaron un primer acercamiento al diseño de una planta piloto de obtención del biocombustible. Tienen en cuenta los diferentes parámetros utilizados por diferentes autores, de la extracción de los aceites de la borra de café mediante la técnica de Soxhlet y de la transesterificación con diferentes catalizadores para obtener las propiedades del biodiesel que cumplieran con las normas establecidas por la ASTM y las Normas Europeas en función del tiempo de la reacción, la temperatura de secado del aserrín, el tamaño de la probeta y su espesor, la humedad presente en la borra, el origen de los residuos (industria o casera, Robusta o Arábica), tipo de solvente usado en la extracción, la tasa de café usada con respecto a la cantidad de solvente, la duración de la extracción. Es importante para este proyecto para poder conocer que parámetros conllevan a una mejor solución [2].

En este estudio, los autores también realizaron pruebas experimentales propias en las que: removieron el contenido de humedad de las probetas, realizaron y evaluaron la extracción por solvente del aceite de la borra de café por Soxhlet, en las cuales consiguieron un promedio de 8 horas para lograr el mejor rendimiento del aceite recuperado; y se analizó los ácidos grasos encontrados en la recolección de datos del proceso realizado[2].

Por otro lado, en la tesis doctoral “Recuperación de lípidos a partir de la borra de café para ser usados como biocombustible” se demuestra que, a pesar de su acidez, es posible la transformación de la borra del café en biodiesel y que este a su vez tiene características comparables a las del biodiesel comercial actual. Se muestran estudios experimentales como la caracterización de la borra, extracción por solvente a escala con el fin de averiguar los efectos del tipo de solvente, la humedad y tamaño de las probetas, tasa de borra de café por solvente, duración, temperatura y presión de la extracción.

La investigación se llevó a cabo estudiando los principales métodos de extracción de aceites, lo diferentes tipos de remoción de humedad, la caracterización de la muestra estudiada. Los datos obtenidos en los estudios fueron aplicados para la extracción por solvente en pruebas de laboratorio y una planta piloto. Lo conseguido por esta tesis y aplicable al proyecto es que es imprescindible conocer de donde proviene la borra, es decir, si viene de una cafetería, de un proceso de tostar café, de un tratamiento de café instantáneo, entre otros, ya que de esto depende en gran medida el

contenido de humedad, la cantidad de aceite que se pueda extraer y la composición química. Además, hay una correlación importante entre el rendimiento del aceite y el radio de solvente vs la borra y la temperatura por debajo de la evaporación del solvente ayuda a la eficiencia de la extracción, mientras que el solvente impacta en las propiedades químicas del aceite[26].

1.1.2.c. Reacciones del proceso para la obtención de Biodiesel. Otra de las etapas que deben ser seguidas para llegar a la obtención del biodiesel es la reacción en donde se convierte el aceite en biodiesel. Es importante tener los mejores conocimientos sobre este punto para evitar malgastos de materia prima y que se pueden mejorar las propiedades del biodiesel: “Evaluación del Biodiesel Producido a partir de Aserrín de Café bajo un proceso de Transesterificación a nivel Laboratorio como Fuente de Energía Alternativa” Esta tesis propone una segunda generación de un residuo cotidiano, en este caso la borra de café, de la cual se extrajo el aceite mediante un extractor Soxhlet con hexano e isopropanol como solventes y la reacción de la transesterificación a 60°C. A ambos, el aceite y el biocombustible obtenido después de las pruebas de laboratorio se les realizó una caracterización contemplando diferentes propiedades, como en el caso del biodiesel los índices de acidez, yodo que se mantuvieron por debajo del máximo establecido por la norma junto con la densidad y la viscosidad que no cumplieron con los requerimientos concluyendo que se debe a que la producción de biodiesel tiene una eficiencia de proceso de 14,35%, lo cual debe ser tenido en cuenta para escoger las debidas etapas en este proceso[27].

En adición, se puede decir que una manera directa es otra clave para tener en cuenta en el desarrollo de la propuesta de solución del problema en discusión “Producción directa de biodiesel a partir de la borra mojada de café” aquí se estudia un posible proceso de producción del Biodiesel a partir de la borra de café de forma directa; donde extracción y transesterificación se hacen por el método RES (Extracción reactiva Soxhlet por sus siglas en inglés), pues se ha dicho que el 88% de los costos de producción se deben a la preparación de la materia prima. El método RES fue desarrollado en esta investigación utilizando un equipo soxhlet dividido en dos cámaras, una de extracción y la otra de reacción. Se estudió los efectos de los diferentes tipos de catalizadores, de solvente orgánico, sus respectivas concentraciones, la cantidad de borra con respecto al solvente y la electricidad gastada en las diferentes etapas. Este proceso demostró y lo que conviene para propósitos de la actual investigación que, al menos a una escala de laboratorio, ahorra una

importante cantidad de tiempo y de electricidad a pesar de las altas necesidades de temperatura. Además, también se demostró que, en este proceso, la cantidad de humedad contenida en la borra no afecta la producción[28].

Paralelamente en la tesis “Producción de Biodiesel a partir de Residuos de Café” se aplica y evalúa diferentes catalizadores en fases de producción de Biodiesel con los residuos de café molido. La investigación se vio encaminada identificando los índices de acidez, la viscosidad del aceite extraído, cantidad de ácidos grasos, los distintos catalizadores que pueden ser utilizados y se confirmó que la borra de café es apta para producir biodiesel. El estudio va encaminado al potencial del biodiesel cuando es usado el dietiléter como disolvente, lo cual demostró que tiene un rendimiento de generación de biodiesel del 32% [1].

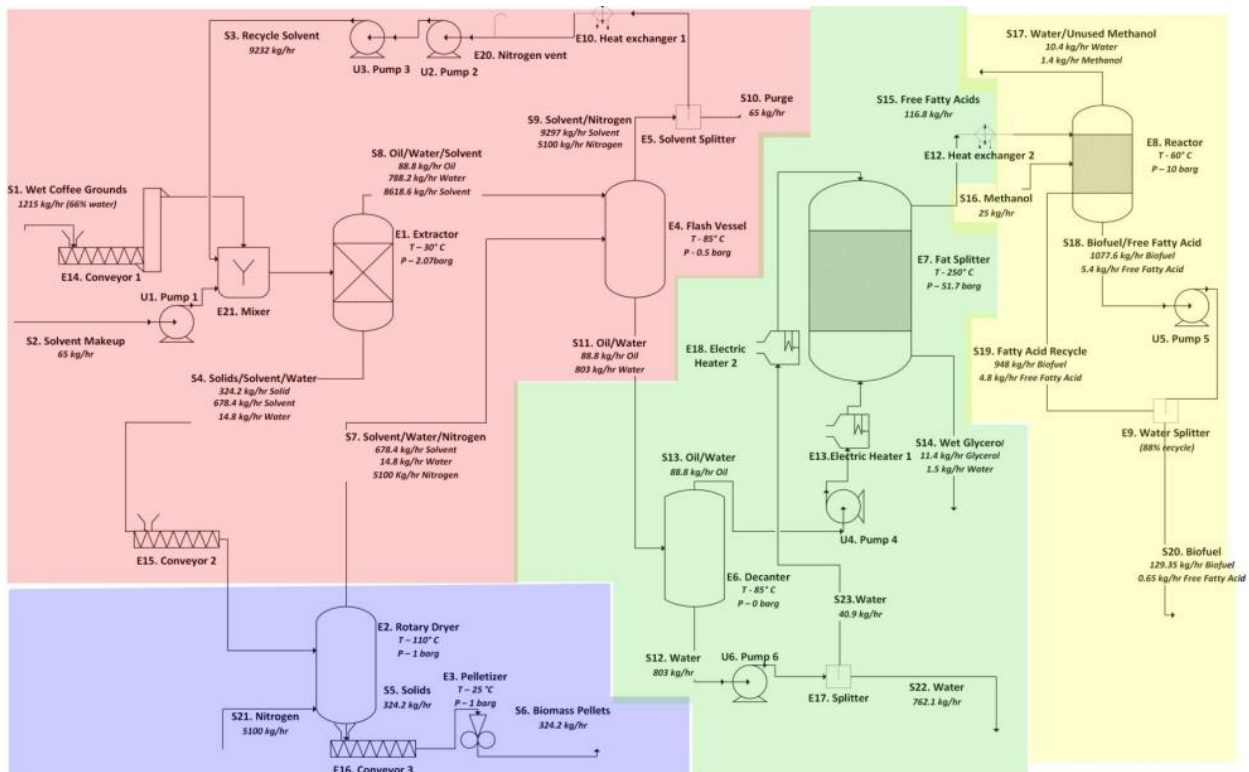
1.1.2.d. Impacto climático. Por último, es importante resaltar el impacto ambiental positivo que trae consigo, no solo el uso de los biocombustibles sino, además, la aplicación de la borra de café como materia prima en todo el proceso. Un acercamiento de esto es: “Impactos ambientales de la producción de biodiesel a partir de los residuos del café y su implementación en un motor de compresión”, pues es una investigación en la que se indagan los factores del cambio de materia prima del biodiesel por la borra de café, con mezclas como B5, B10, B15, y B20. El rendimiento del aceite se examinó dependiendo el tipo de solvente usado en la extracción por método de Soxhlet; siendo el hexano el solvente más adecuado puesto que termino con un aceite de mayor rendimiento y con un mejor tiempo, incluso comparable con materias primas comerciales. La mayor parte del estudio se realizó analizando las emisiones del tubo de escape del motor utilizado. Se demostró que la disminución de partículas contaminantes de la mezcla de combustible con el biodiesel a partir de esta materia prima es un gran beneficio ecológico para tener en cuenta en una producción en masa. Además, después de la producción y el análisis de uso del biodiesel bajo las características establecidas, se demostró que la borra de café cumple a cabalidad con los estándares de la norma ASTM D6751[29].

1.1.2.e. Etapas del proceso. Como ya se ha mencionado el proceso de producción del biodiesel debe realizarse por etapas: adquisición de la materia prima, extracción del aceite de la materia prima, reacciones pertinentes para convertir el aceite en biodiesel y una purificación del biodiesel.

Cada una de estas etapas puede realizarse de múltiples maneras. Del tipo de proceso que se lleve a cabo depende el rendimiento de cada etapa, los equipos que se usarán y la cantidad de materia que va a entrar y salir en cada etapa y equipo. Es por esto por lo que, Giller, Chelsea; Malkani, Bhavish; y Parasar, Josh plantearon un proceso en el cual a partir de la borra del café pretenden obtener biodiesel, y pellets como biomasa. Para esto, proponen las etapas de producción que se muestran en la Figura 1. Diagrama global del proceso de producción de biodiesel que después se mostrara claramente en cada sección que se presenta en la Figura 1 en colores [30]:

Figura 1.

Diagrama global del proceso de producción de biodiesel

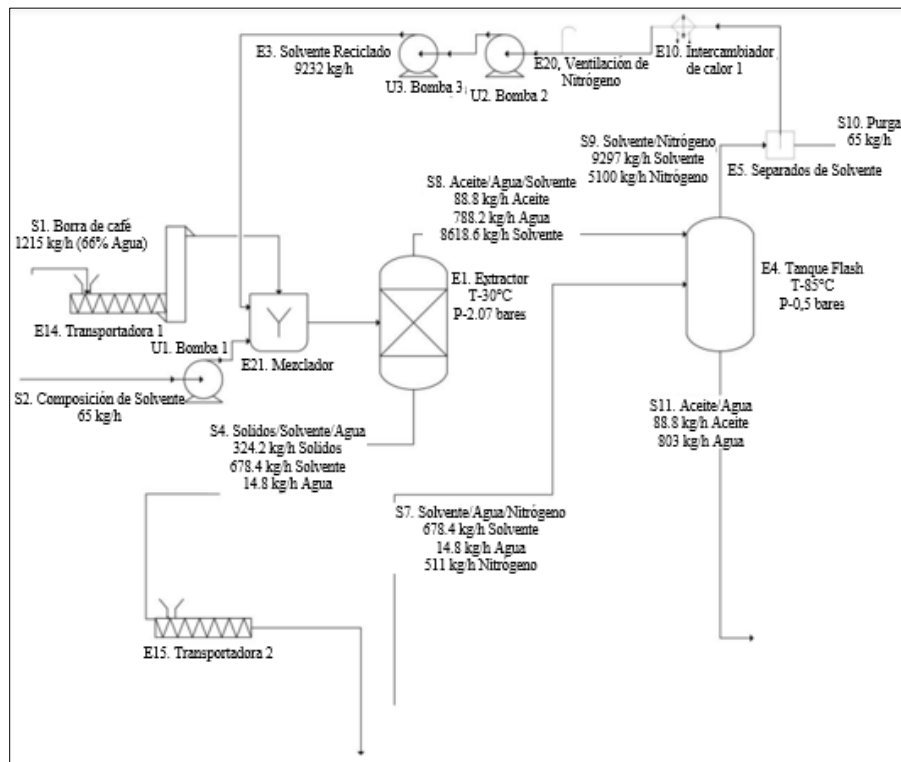


Nota. Esta figura muestra el proceso que los autores de esta investigación proponen para el proceso de producción del biodiesel y la obtención de los pellets (parte azul-lo cual no se tiene en cuenta en esta investigación). Tomado de: C. Giller, B. Malkani, and J. Parasar, “Coffee to Biofuels,” 2017. [Online]. Disponible: https://repository.upenn.edu/cbe_sdr

En la primera etapa, la borra entra con un flujo másico de 1215 kg/h y el solvente (Hexano/isopropanol en igual cantidad) además del solvente reciclado, entran en un mezclador durante 30 minutos; una vez termina este tiempo, la mezcla pasa al decantador centrifugo para la extracción de los aceites a una temperatura de 30°C y una presión de 2.07Bar. Luego el aceite, el agua y el solvente resultantes de la extracción se envían a un recipiente flash para reciclar el solvente que funciona a 85°C y 0.5Bar. En esta etapa entran 1215 kg/h (413.1 kg/h sin tener en cuenta la humedad) de borra con un 66% en peso de agua para obtener 88.8 kg/h (obtiene un rendimiento del 21%) de aceite de borra y 803 kg/h de agua, se muestra a continuación en la Figura 2. Etapa de extracción de aceite [30]:

Figura 2.

Etapa de extracción de aceite

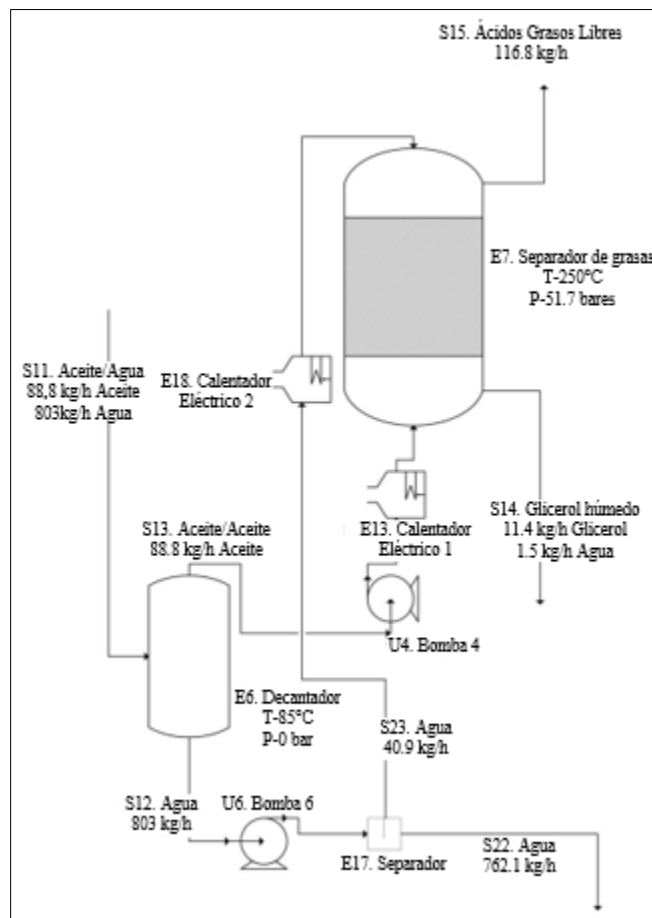


Nota. Esta figura muestra la primera etapa del proceso, la extracción de aceites, además de los quipos usados y la cantidad de materia que entra y que sale. Tomado de: C. Giller, B. Malkani, and J. Parasar, “Coffee to Biofuels,” 2017. [Online]. Disponible: https://repository.upenn.edu/cbe_sdr

En esta etapa se propone convertir los triglicéridos en ácidos grasos libres para optimizar el proceso. En el decantador se obtiene la separación del agua y el aceite a 85°C y 0Bar, de lo cual salen separadas en la misma cantidad anterior agua y aceite de borra, este último se calienta y se envía al separador de grasas con unos 40,9 kg/h de agua para generar 116,8 kg/h de ácidos grasos libres. Se puede apreciar esta etapa en la Figura 3. Generación de ácidos grasos libres [30]:

Figura 3.

Generación de Ácidos Grasos Libres

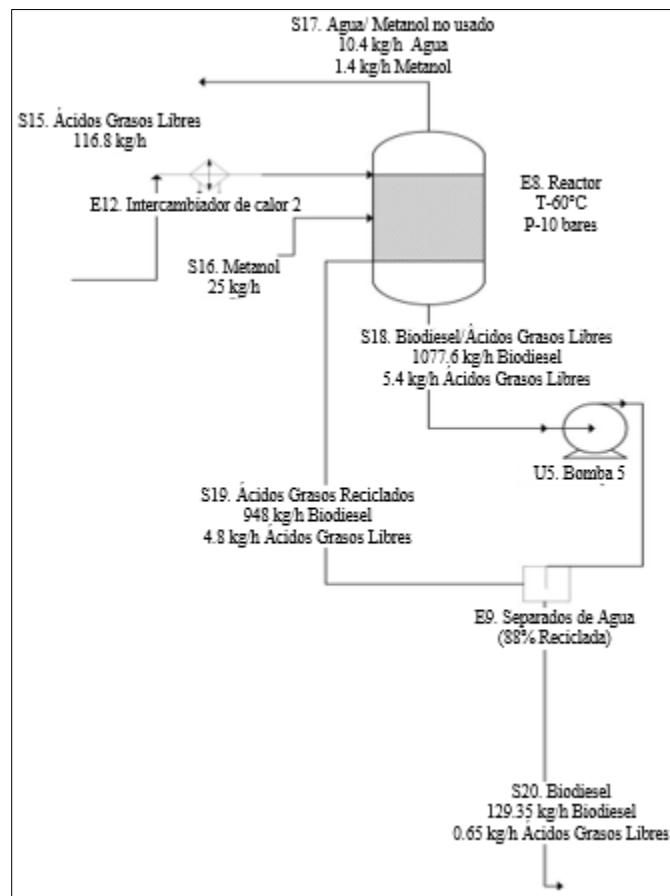


Nota. Esta figura muestra otra etapa, que los autores realizaron previo a la reacción de transesterificación. Tomado de: C. Giller, B. Malkani, and J. Parasar, “Coffee to Biofuels,” 2017. [Online]. Disponible: https://repository.upenn.edu/cbe_sdr

Para la última etapa del proceso, los 116.8 kg/h de ácidos grasos libres entran en conjunto con 25 kg/h de metanol, a un reactor con SiO₂ como catalizador para obtener una cantidad de biodiesel que un contiene un elevado contenido de ácidos grasos libres, por lo cual se implementa un flujo reciclado para incrementar el rendimiento de conversión, en este punto se generan 129 kg/h de biodiesel como se muestra en la figura 4. Etapa de reacción de la transesterificación [30]:

Figura 4.

Etapa de reacción de la transesterificación

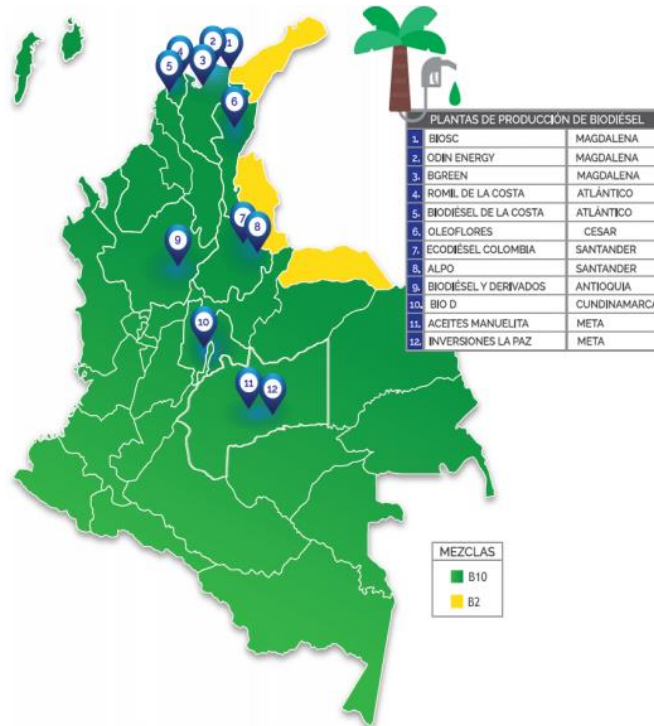


Nota. En esta figura se muestra la etapa final donde se encuentra la reacción para obtener el biodiesel y la parte de la purificación, que los autores realizaron previo a la reacción de transesterificación. Tomado de: C. Giller, B. Malkani, and J. Parasar, “Coffee to Biofuels,” 2017. [Online]. Disponible: https://repository.upenn.edu/cbe_sdr

1.2. Diagnostico actual de la producción de biodiesel en Colombia

Figura 5.

Distribución del porcentaje de mezcla de biodiesel en el territorio nacional



Nota. La figura muestra los lugares del país en donde se encuentra cada una de las 12 plantas, este orden fue establecido en enero del 2020. Además, muestra en los lugares donde se aplica la mezcla B10 y donde la B2. Tomado de: “Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia.”

Disponible en:

http://www.fedebiocombustibles.com/v3/estadistica-mostrar_info-titulo-Biodiesel.htm

1.2.1. Materias primas en la producción

Actualmente, la producción de Biodiesel en Colombia se centra en el aceite de la palma africana, extraído y refinado, como materia prima. En enero del año 2020 se estableció que existen 12 plantas distribuidas en el país encargadas de esta producción del biocombustible como se muestra en la Figura 5. Distribución del porcentaje de mezcla de biodiesel en el territorio nacional[31]. Donde, además, es posible notar que el porcentaje de mezcla que se usa para el combustible en el territorio nacional es demasiado bajo, pues alcanza solo al 10% en la mayoría del país, mientras que en la otra porción del territorio se presenta solo un porcentaje de mezcla del 2%.

Que la materia prima sea el aceite extraído de la palma aceitera se debe a que Colombia cuenta con diversas hectáreas cultivadas con la palma aceitera[32]; Sin embargo, esta materia prima no resulta del todo satisfactoria como biomasa para este proceso; debido a que hace parte de la cadena de suministro alimenticio y es causante de la deforestación.

1.2.2. Demanda de Biodiesel de Colombia

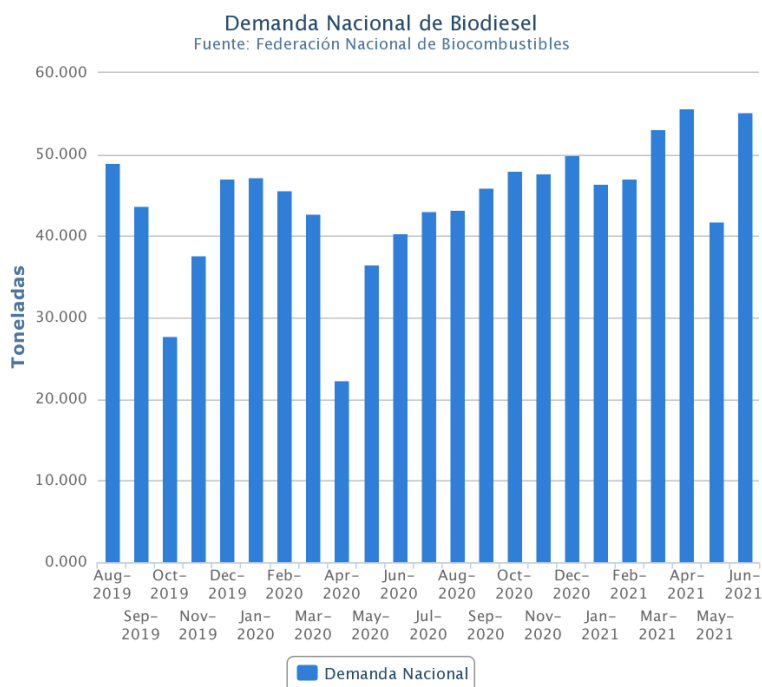
La demanda de biodiesel en el territorio colombiano y en el mundo, va en constante crecimiento; debido a las altas concentraciones de material particulado que se generan al usar el combustible convencional. En la Figura 6. Demanda nacional del biodiesel en Colombia, se nota que en el país ese crecimiento se percibe mensualmente. Es por esto por lo que en el país se busca fomentar el aumento de uso de los biocombustibles con diferentes decretos como el que dice que a partir de abril del año 2021 empezó a regir las mezclas del 12% en peso(B12) en la formula del ACPM, que usan principalmente vehículos de carga y los de transporte público en Colombia[32].

«MinEnergía. 13 de abril de 2021. Bogotá, D.C. Con el propósito de mejorar la calidad de los combustibles que se consumen en el país y lograr que el sector de distribución de combustibles se fortalezca como aliado estratégico del desarrollo sostenible de Colombia, el Ministerio de Minas y Energía, en conjunto con los Ministerios de Ambiente y Desarrollo Sostenible, y de Agricultura y Desarrollo Rural, determinó que el porcentaje

de biodiésel presente en el combustible diésel fósil que consumen los colombianos pasará del 10% al 12% (B12) a partir de abril de 2021[33].»

Figura 6.

Demanda nacional del Biodiesel en Colombia



Nota. Esta figura muestra en toneladas la demanda de Biodiesel en Colombia desde agosto del 2019 hasta junio del 2021. Tomado de: “Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia.” <https://www.fedebiocombustibles.com/estadistica-produccion-titulo-Biodiesel.htm> (accessed Aug. 25, 2021).

1.3. La borra de café

El café es una de las bebidas más consumidas a nivel mundial. Por su parte, La borra de café es el subproducto mayormente generado después de extraer sustancias saborizadas de los polvos o granos del café, con agua caliente o vapor. Representa el 10 % del peso del grano de café[23] y,

además, terminan en la mayoría de los casos en los vertederos, ocasionando problemas ambientales por su descomposición. Actualmente, es utilizada una pequeña porción de estos residuos mundialmente como en limpieza de hogares, acondicionadores de espacios y estética, pero también puede ser usado en procesos industriales como biomasa[34].

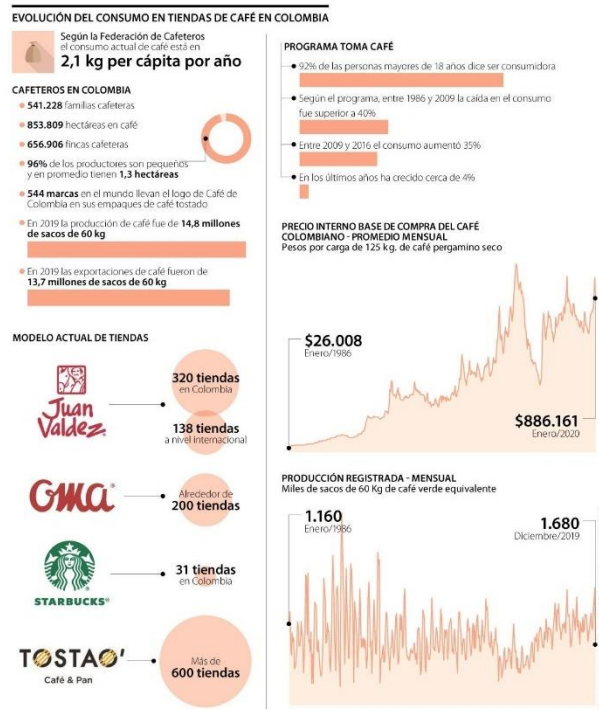
La borra de café es el residuo sólido oscuro altamente húmedo que queda en el filtro durante la preparación, es, además, una fuente importante de lípidos, que la convierte en una sustancia apta para la producción de biodiesel[32]. Ya se mencionó que por algunas de sus características químicas, la borra llega a ser importante como materia prima para obtener biodiesel; pero también al ser un subproducto de la producción de una de las bebidas más consumidas a nivel mundial, la disponibilidad es muy alta, su costo es muy bajo y no hace parte de la cadena alimenticia, con lo cual no solo se puede entrar a competir económicamente con los derivados del petróleo; sino que también puede contribuir a una mejora en los precios del biodiesel actualmente producido en Colombia.

1.3.1. Disponibilidad como materia prima

En la Figura 7, se ve que la borra de café es un subproducto de la elaboración de la bebida que es consumida tanto en los hogares como en cafeterías. En Colombia, el café hace parte de la cultura colectiva. Del cultivo del grano dependen cerca de 541228 familias y en la actualidad hay 853809 hectáreas en el país. El producto, primordial en la economía nacional, también hace parte de la dieta del colombiano, y según la Federación Nacional de Cafeteros el consumo actual de café es de 2,1 kg per cápita por año[33].

Figura 7.

Evolución del consumo en tiendas de café en Colombia



Nota. En esta figura se puede apreciar la cantidad de tiendas de café que hay en Colombia, las estadísticas del café nacionales y el consumo per cápita anual. Tomado de: “Las tiendas de café cambiaron en los últimos cuarenta años al ritmo del consumidor.”

Disponible:

<https://www.larepublica.co/consumo/las-tiendas-de-cafe-cambiaron-en-los-ultimos-cuarenta-anos-al-ritmo-del-consumidor-2971876>.

En Colombia existen alrededor de 1258 tiendas especializadas en la preparación de distintas formas del café entre Juan Valdez, con 320; Oma, con 200; Starbucks, con 31 y Tostao, con 600

tiendas que se pueden convertir en proveedores de estos residuos generados en su estructura de comercio, idea que convendría al medio ambiente.

1.3.2. Propiedades de la borra de café

Algunas de las propiedades de la borra de café se muestran en la tabla 2. Análisis de la borra de café utilizada como combustible:

Tabla 2.

Análisis de borra de café utilizada como combustible

Componentes	%p/p	Componente	%p/p	Componente	%p/p
Humedad	7-8	Ácido tánico	0,90	Valina	9,0
Proteína cruda	10-12	Ácido palmítico	43,2	Metionina	2,0
Fibra cruda	35-44	Ácido palmitoleico	0,40	Isoleucina	6,3
Nitrógeno libre	13-18	Ácido esteárico	9,70	Leucina	13,4
Ceniza	0.25-1	Ácido oleico	14,0	Tirosina	4,2
Calcio	0,08	Ácido linoleico	37,0	Lisina	2,9
Potasio	0,04	Ácido gadoleico	0,4	Histidina	2,2
Sodio	0,01	Ácidos grasos libres	7,6	Hidroxiprolina	1,0
Manganeso	26,8 ppm	Yodo	85-93	Glicerina	7,6
Zinc	10 ppm	No. De saponificación	185-193	Serina	1,9
Cobre	35 ppm	Peróxido	11-17	Ácido glutámico	18,6
Selenio	0,26 ppm	Alanina	6,2	Arginina	Trazas

Nota. En esta tabla se muestran las diferentes características químicas de la borra de café como biomasa. Tomado de: L. M. Morales Rosales and D. O. Pérez Hernández, “valorización de los residuos de café tostado y molido (borra de café), generados en el campus central de la universidad de el salvador,” Universidad de el salvador, 2020. Disponible en: <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/22757>

1.3.3. Potencial como biomasa

Existen varios factores para considerar la borra de café como biomasa en la generación de biodiesel, la mayoría de estos factores se encuentran en sus propiedades físicas y químicas, pero cobra mayor relevancia que la borra de café tiene un elevado contenido de lípidos, entre el 7% y el 27,8%[24]. Estos valores han sido encontrados en diferentes experimentos y varían según los diferentes procedimientos usados para extraer los ácidos grasos; esto se debe a que se comprobó que muy poco aceite pasa a la bebida y puede ser recuperado prácticamente todo desde la borra en procesos de extracción[33].

1.4. Extracción de aceites

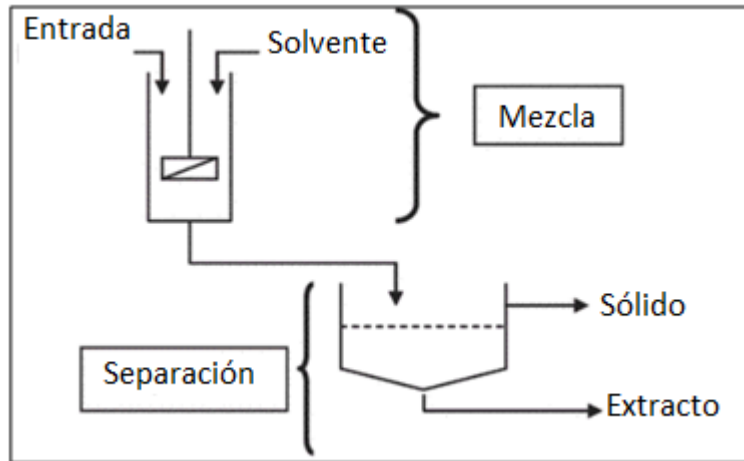
La extracción de los aceites presentes en la borra de café es una de las etapas más importantes para la producción del biodiesel; de aquí depende la composición química y también física de los mismos, además como puede afectar la cantidad de lípidos extraídos puede afectar el rendimiento de la extracción o la cantidad de aceite obtenido. Existen distintos métodos usados para la extracción del aceite, entre ellos se encuentran la extracción por solvente y la extracción por fluido supercrítico que son los procesos utilizados comúnmente en la borra del café por distintos autores.

1.4.1. Métodos de Extracción

1.4.1.a. Extracción por solvente. La extracción de lípidos también conocida como extracción Solido-líquido, se trata del uso de un solvente líquido a alta temperatura para lograr la separación de uno o más componentes de una mezcla sólida[34]. Generalmente el soluto que es separado de la materia prima sólida queda en estado líquido al igual que el solvente. Se puede observar el proceso en la Figura 8. Esquema de la extracción por solvente.

Figura 8.

Esquema de la extracción por solvente



Nota. En esta figura se muestra como es el proceso de la extracción del aceite de la materia prima por solvente. Tomado de: Z. Berk, “11. Extraction -,” in Food Process Engineering and Technology, 3th ed., Elsevier, 2018. Disponible: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011Q1DTC/food-process-engineering/solid-liqu-definitions>

1.4.1.b. Extracción por fluido supercrítico. Es una técnica de extracción en la cual se usan sustancias cerca o en su punto crítico (donde las densidades del líquido y vapor de una sustancia son iguales) de presión y temperatura como solventes, El dióxido de carbono supercrítico es capaz de extraer el aceite de los desechos secos con una eficiencia de extracción del 98% [35]. Este método de extracción puede resultar en un ahorro de tiempo, ya que puede dar una tasa de extracción más rápida por su baja viscosidad y alta difusividad. La más importante característica de esta técnica es la oportunidad de cambiar las densidades de los fluidos al alterar las condiciones de temperatura y presión, la densidad está relacionada con la solubilidad, lo que implica que, cambiando la presión de extracción, se puede modificar la fuerza solvente del fluido en cuestión[36].

1.5. Proceso de producción de biodiesel

1.5.1. Esterificación

En algunos casos en los que se desea convertir las grasas o aceites extraídos de la biomasa se encuentra que la saponificación (proceso en el que una grasa se convierte en jabón) impide la separación del biodiesel y el glicerol. Asimismo, reduce el rendimiento y la tasa de Conversión de ácidos grasos en biocombustible durante el proceso de transesterificación. Cuando la biomasa contiene un nivel de ácidos grasos libres (AGL) superior al 1% en peso de la borra, debe llevarse a cabo este proceso de esterificación antes de un secado del agua que queda del proceso para luego obtener el biodiesel separado del glicerol en el proceso de la transesterificación[37].

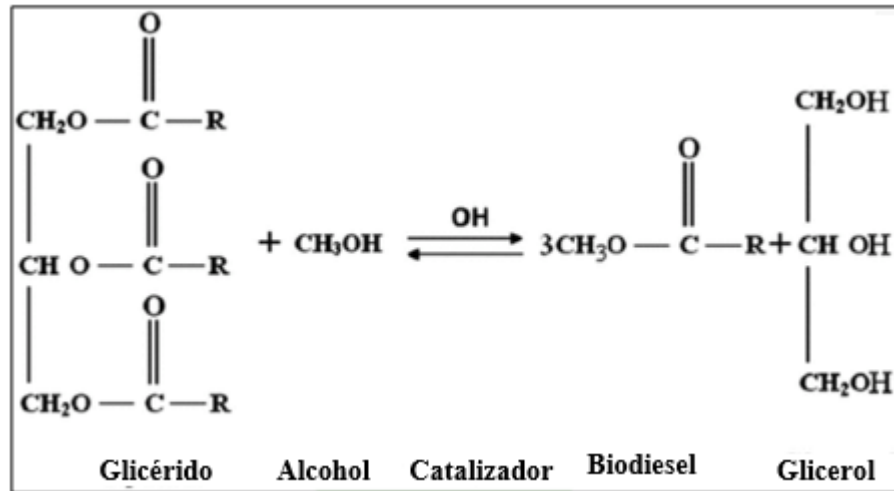
1.5.2. Transesterificación

La transesterificación es el proceso industrial más usado para generar biodiesel de diferentes aceites vegetales o grasas animales ya que es simple y económico. En este proceso, la grasa o aceite se hace reaccionar con un alcohol, comúnmente se usa el metanol (CH_3OH) o el etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$), en presencia de un catalizador como el hidróxido de potasio (KOH) o el hidróxido de sodio (NaOH)[38]. La transesterificación es una reacción de equilibrio que consiste en un número de consecutivas y reversibles reacciones en donde un triglicérido es convertido en un diglicérido, luego en un monoglicérido y finalmente se obtiene el biodiesel o ésteres y glicerol como se muestra en la Figura 9.[39].

Es una reacción donde los aceites extraídos de la materia prima se mezclan a una temperatura elevada con un alcohol, y como resultado se obtiene el biodiesel y otro componente llamado glicerol como se evidencia en la Figura 9. Esquema de la reacción de transesterificación. Se hace en presencia de un catalizador o no con el fin de que la reacción se lleve a cabo a una velocidad conveniente.

Figura 9.

Esquema de la reacción de transesterificación



Nota. En esta figura se esquematiza como al reaccionar un aceite extraído de la biomasa con un alcohol en presencia de un catalizador se obtiene ésteres metílicos más glicerol. Tomado de: E. H. Affam, Augustine Chioma Ezechi, “3.4.1.1 Transesterification,” in Handbook of Research on Resource Management for Pollution and Waste Treatment, Elsevier, 2020. Disponible: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt01265RF1/handbook-research-resource/title-page>

2. INGENIERÍA CONCEPTUAL DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN

2.1. Elección de las variables que afectan las etapas de producción

2.1.1. Origen del café

La borra de café puede separarse en dos categorías: la generada en el proceso del café instantáneo y la que queda de la preparación de la bebida del café en tiendas locales. Es importante tener en cuenta que aproximadamente un 66% en peso de la borra se debe a la humedad, cuando provienen de tiendas dedicadas a la preparación de la bebida[30].

2.1.2. Variables que afectan la extracción de aceites

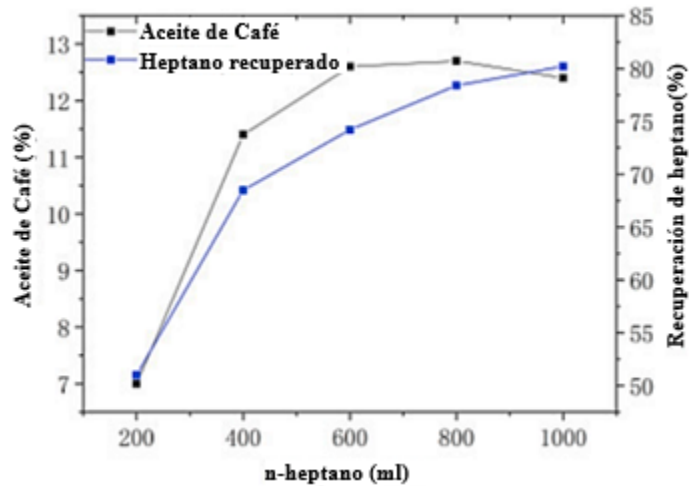
2.1.2.a. Extracción por solvente. Las variables que afectan este método son:

- Tiempo del proceso: El rendimiento de la extracción de los aceites de la materia prima se ve afectada por el tiempo que tarde, el rendimiento puede aumentar a medida que el tiempo aumenta; sin embargo, una duración exagerada puede conducir los aceites a un cambio de composición química. Múltiples estudios se han llevado a cabo en donde varían la duración del proceso desde unos minutos hasta horas donde se ve afectados directamente el rendimiento del aceite para la producción del biodiesel[25]. “En una curva general extracción de aceite en función del tiempo las primeras horas de extracción son donde más material se disuelve y posteriormente la curva se hace prácticamente asintótica. Este mecanismo de extracción es lógico, dado que al comienzo hay mucho material para extraer y dentro de él hay fracciones de fácil separación”[40].
- Relación Borra/Solvente: “Otro factor importante a considerar en este método, es la relación Borra/Solvente, debido a que el solvente se puede saturar con un exceso de borra e impide que el proceso alcance altos rendimientos”[44]. Liang Jin, Haochun Zhang y Zhuang Ma, realizaron un estudio para determinar la cantidad de aceite que se podía extraer de la borra de café y si ese aceite servía para producir biodiesel. En este estudio determinaron que la relación

Borra/Solvente tiene una gran influencia en la extracción del aceite, puesto que cuando el volumen del solvente era pequeño, la tasa de extracción disminuía y cuando se incrementaba el solvente, gradualmente se incrementaba la tasa de extracción. Asimismo, la cantidad de solvente recuperado se aumentaba al aumentar la relación de Borra/Solvente como se puede apreciar en la Figura 10. Efectos de la relación Borra/Solvente en la extracción de aceite[45].

Figura 10.

Efectos de la relación Borra/Solvente en la extracción de aceite



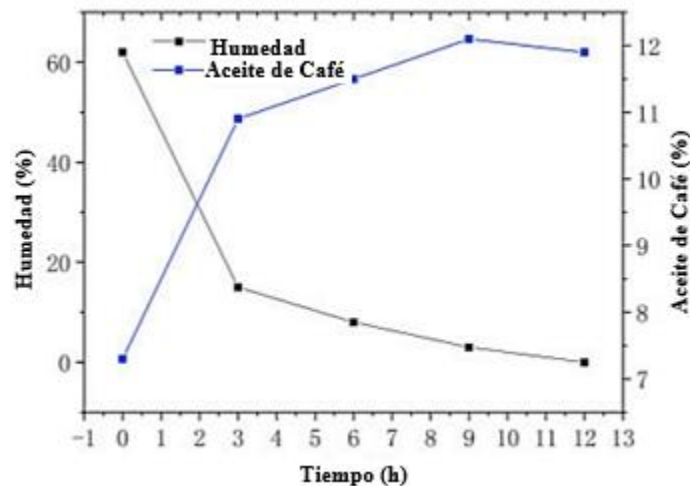
Nota. En esta figura se esquematizan los Efectos de la relación solvente/borra en la extracción de aceite. Tomado de: L. Jin, H. Zhang, and Z. Ma, “Study on capacity of coffee grounds to be extracted oil, produce biodiesel and combust,” in *Energy Procedia*, 2018, vol. 152, pp. 1296–1301. doi: 10.1016/j.egypro.2018.09.185.

- Tamaño de la partícula de la Borra de café: “El tamaño de la partícula es clave para una extracción satisfactoria, principalmente, las partículas deben permitir un paso lento por el sólido sin obstáculos. También, su tamaño debe permitir una extracción de aceite de cada partícula disminuyendo la difusión”[46].

- Contenido de humedad: Según E. Pichai y S. Krit la borra debe secarse a altas temperaturas para eliminar el contenido de la humedad antes de entrar al proceso de extracción, pues la humedad puede alterar gravemente el rendimiento del aceite que se obtenga, además, puede prevenir el deterioro de la de materia prima y el crecimiento de microbios[47]. Se puede notar en la Figura 11. “Si la probeta contiene agua, la calidad del aceite se afectará. En adición, la tasa de extracción también se verá afectada. Es por esto por lo que la materia prima debe ser secada antes de su uso... Después de secarla durante 8 horas, el contenido de humedad de la borra tiene un efecto en la tasa de extracción que se puede despreciar”[45].

Figura 11.

Efectos del contenido de humedad en la extracción de aceite



Nota. En esta figura se esquematizan los Efectos del contenido de humedad en la extracción de aceite. Tomado de: L. Jin, H. Zhang, and Z. Ma, “Study on capacity of coffee grounds to be extracted oil, produce biodiesel and combust,” in Energy Procedia, 2018, vol. 152, pp. 1296–1301. doi: 10.1016/j.egypro.2018.09.185.

- Por otro lado, Rosa Colucci Cante, Isidoro Garella, Marianna Gallo y Roberto Nigro realizaron el estudio de los efectos de la humedad en la borra de café para la extracción, donde usaron 7 probetas con distintas cantidades de humedad y establecieron que, aunque se realizaron las

pruebas con borra húmeda, seca y parcialmente húmeda, los resultados de la extracción se pueden comparar con otros resultados anteriormente hechos[48].

- Temperatura de extracción: Como expuso Galanakis, Charis, a altas temperaturas se mejora la eficiencia de la extracción y aumenta la solubilidad, el coeficiente de difusión y la tasa de transferencia de masa de los componentes a extraer y además disminuye la viscosidad del solvente, lo cual facilita el paso por la masa del sustrato sólido, la tensión de superficie de los solventes disminuye a altas temperaturas, lo cual ayuda al solvente para alcanzar las matrices de la probeta, mejorando la tasa de extracción[42].
- Selección del solvente: Según Tyagi, R. D.; Surampalli, Rao Y.; Zhang, Tian C.; Yan, Song y Zhang, Xiaolei la selección del solvente que se va a utilizar es muy importante por los impactos que se dan en la eficiencia de extracción, la preservación de las propiedades de los aceites, la recuperación del solvente y además este no debe reaccionar químicamente con los aceites. Los solventes mayormente utilizados en este metodo de extracción son los alcoholes como el metano, el cloroformo, el hexano, el éter de petróleo y el éter dietílico[43].

2.1.2.b. Extracción por fluidos supercríticos las variables que afectan este proceso son:

- Biomasa: Es importante que la materia prima de donde se van a extraer los aceites esté en condiciones óptimas para el proceso. Las diferentes condiciones iniciales desempeñan un papel muy importante, por ejemplo, un grano de borra muy fino puede aumentar el rendimiento de extracción ya que proporciona una gran superficie de contacto para el solvente, esto se logra toda vez que no sea tan pequeña, porque se puede compactar y crear canales por los cuales pasan los solventes, lo cual le impediría el contacto con la mayoría de los granos y disminuiría su efectividad[51].
- Temperatura y presión: Los cambios de temperatura y de presión, cambian la densidad del solvente y con ello el poder que tiene como solvente. Una temperatura constante incrementa la presión lo cual incrementa la densidad del solvente, mientras que, a una presión constante, la temperatura incrementa y decrece la densidad del solvente[52].

- Flujo del solvente: El flujo controla la cantidad de solvente que será usado durante la extracción. El flujo además de afectar el rendimiento de la extracción también afecta la solubilidad de los componentes que se desean extraer en el proceso. Si la concentración de los componentes extraídos es mucho mayor que la del solvente, la solubilidad de los aceites se puede ver limitada y disminuye la extracción[53]. Por otro lado, Rosen, Meyer, menciona que incrementando el flujo del solvente se puede mejorar el rendimiento de la extracción por su alta relación de solvente con respecto al soluto. Sin embargo, en muchos casos puede también disminuirla por la reducción del tiempo en contacto entre el solvente y el soluto[51].

2.1.3. Revisión de resultados de la extracción de aceites de la borra

Teniendo en cuenta todos los resultados obtenidos en la búsqueda de mejores condiciones experimentales para el proceso de extracción de aceites de la borra de café, se puede notar que los resultados varían muy poco y que las condiciones experimentales para obtener dichos resultados no son muy diferentes entre sí. Además, dichos valores se encuentran entre el rango de los mejores resultados obtenidos por diferentes autores que realizaron este proceso anteriormente. Es por esto por lo que de cada autor de la revisión de resultados se extraen los mejores resultados y se expone las condiciones bajo las cuales se realizó el mismo.

- En el estudio que realizó Ioannis Efthymiopoulos sobre los efectos que tienen los diferentes factores en la extracción por solvente en un experimento soxhlet de aceites de la borra, obtuvo dos significativos rendimientos de obtención de aceite. Para obtener estos resultados de 25% y 28,3% en peso de borra, la única variable que cambio fue el solvente donde utilizó hexano y etanol respectivamente. Las demás variables fueron estudiadas previamente para determinar los mejores resultados, con lo cual consiguió que: 8 horas de duración de extracción; Relación borra/solvente de $1 g_{borra}/9 g_{hexano}$; una partícula de tamaño entre 0,5 mm y 0,85 mm; el 2 % de humedad en peso de borra y una temperatura de 25 °C a una presión atmosférica mejoran notablemente el proceso de extracción. Cuando llevo a la planta piloto el experimento donde solo se podía modificar la humedad de la borra y la duración de la extracción, obtuvo rendimientos menores del rango del 19 % en peso de borra con una humedad del 10 % en

peso de borra, hexano como solvente y un aumento de 1 hora a 2 horas para una mejor obtención del aceite[25].

- Los autores Krit Somnuk, Pichai Eawlex, Gumpon Prateepchaikul realizaron pruebas similares donde cambiaron las diferentes variables para cada solvente, pruebas de las cuales lograron obtener los mayores valores de eficiencia con el solvente hexano, de un 14,63% en peso borra. Este valor fue alcanzado en un tiempo de 20 minutos, con una relación de Borra/Solvente de $1 \text{ g}_{\text{borra}}:24,9 \text{ g}_{\text{hexano}}$, una partícula de 0,237 mm y una temperatura de 30 °C. Bajo estas mismas condiciones, excepto la relación Borra/Solvente y tiempo, que para este caso variaron a $1 \text{ g}_{\text{borra}}:20 \text{ g}_{\text{hexano}}$ y 34 minutos respectivamente se obtuvo un rendimiento del 14,57 % en peso borra [47].

Tabla 3.*Condiciones experimentales de la extracción del aceite de la borra de café*

Tiempo (min)	Solvente	Rendimiento (% peso de borra)	Relación Borra/Solvente (g_{borra}/ ml_{solvente})	Método extracción
30	Pentano	15,18	1/4,2	Soxhlet
30	Hexano	15,28	1/4,2	Soxhlet
30	Tolueno	14,32	1/4,2	Soxhlet
40	Cloroformo	11,15	1/4,2	Soxhlet
30	Acetona	12,91	1/4,2	Soxhlet
50	Isopropanol	10,92	1/4,2	Soxhlet
40	Etanol	11,9	1/4,2	Soxhlet
180	50:50(Hexano:2-propanol)	21,5	1/20	Soxhlet
408	Isopropanol	21	1/20	Soxhlet
150	80:20(Hexano:2-propanol)	19,5	1/20	Soxhlet
570	n-Octano	26	1/20	Soxhlet
N/A	Hexano	16	1/20	Soxhlet
N/A	etanol	16	1/20	Soxhlet
N/A	60:40(Hexano:2-propanol)	17	1/20	Soxhlet
N/A	70:30(Hexano:2-propanol)	21	1/20	Soxhlet
N/A	Heptano	18	1/20	Soxhlet

Nota. En esta tabla se encuentran los resultados obtenidos en diferentes estudios bajo variaciones de las variables del proceso. Reestructurada por el autor y Tomado de: K. Somnuk, E. Pichai, and S. Krit, "Optimization of solid-to-solvent ratio and time for oil extraction process from spent coffee grounds using response surface methodology," vol. 10, no. 16 2015, [Online]. disponible: www.arpnjournals.com

- Desde otra perspectiva, por la extracción de aceites llevados a cabo en el laboratorio por parte de Carolina Risco, se determina que entre menor sea la cantidad de disolvente el rendimiento del proceso disminuye, para esta prueba de laboratorio el solvente utilizado fue el dietiléter a una concentración de 0,083g/ml, durante dos horas al comienzo para notar que en una hora

se podía lograr el mismo resultado, y el proceso fue llevado a cabo a unos 40°C, el resultado fue un 13,94% en peso de aceite de borra.[27]

- Para comprobar los efectos que tiene la humedad de la borra en la extracción por solvente con un experimento de extracción tipo Soxhlet, Rosa Colucci Cante, Isidoro Garella, Marianna Gallo, Roberto Nigro, realizaron pruebas con distintas muestras de borra las cuales tenían diferentes secados y una cantidad de humedad diferente. Se obtuvo que en el experimento soxhlet durante 5 horas y una cantidad de hexano como solvente de 100ml cada minuto a 60°C y una borra sin restos de humedad son los parámetros adecuados para obtener un rendimiento de 16,6% en peso de aceite de borra[48].

Tabla 4.

Resultados obtenidos por distintos métodos de extracción

Método	Condiciones	Rendimiento
Supercrítico con CO ₂	190 bar, 40 °C	15 %
Supercrítico con CO ₂	33.18 °C; 28.4 MPa; 220,9 min	11,41 %
Asistido con microondas	600 W; 10 min; relación 1:1 Hexano : Metanol	15,11 %
Asistido con ultrasonido	45 min; 40 kHz; 60°C; 160W; 2.7 L; 4 ml solvente/g	12 %
Soxhlet	Hexano; 30 min	15,28%

Nota. En esta tabla se muestran los resultados de diferentes métodos de extracción del aceite de la borra, tomado de: J. D. González Gachancipá and V. Martín Zarta, “Evaluación de la extracción de lípidos presentes en la borra de café utilizando un solvente alternativo,” Bogotá, 2020.

De la Tabla 4. Resultados obtenidos por distintos métodos de extracción. se puede destacar que, comparando el mismo proceso de extracción en diferentes métodos, incluidos: la extracción mediante fluidos supercríticos, la extracción por solvente soxhlet y asistido por ultrasonido, los que mejores resultados obtienen son los métodos de fluido supercrítico y el de extracción por

solvente líquido-sólido Soxhlet, y entre estos dos métodos el mejor resultado lo obtiene el último con un 15,28%. También como se ve en la revisión anterior se obtienen resultados de ese rango y mucho mayores con este método. Por lo cual es el proceso que mejores resultados presenta y por el que se puede seguir el diseño de proceso.

2.1.4. Variables que afectan la transesterificación

- **Temperatura de reacción:** la tasa de reacción está fuertemente influenciada por la temperatura a la que se realiza la reacción. Cuando se tiene suficiente tiempo, en presencia de un catalizador puede reaccionar la mezcla, casi por completo a una temperatura ambiente. Por otra parte, las altas temperaturas agilizan la reacción, reducen el tiempo y también se pueden obtener mejores eficiencias de los ésteres. Sin embargo, si la temperatura sobrepasa el punto de evaporación del alcohol, este se evaporará y la eficiencia del proceso se verá reducida[54].
- **Tiempo de reacción:** El tiempo que dure la reacción influye en el proceso, debido a que la tasa de conversión aumenta con el tiempo. Si no dura lo suficiente, la eficiencia de los ésteres será poca y por esto, una parte del aceite no se transformará[42].
- **Tasa molar del alcohol:** Una excesiva cantidad de alcohol incrementa la conversión de grasas en ésteres en un tiempo corto. Por tanto, la eficiencia del biodiesel incrementa al subir la concentración de alcohol hasta cierto punto, pues pasado ese punto la eficiencia del biodiesel se mantiene y el costo de la recuperación de los alcoholes si aumenta[55].
- **Concentración del catalizador:** La concentración del catalizador varía según el tipo de catalizador que es usado; aunque sean del mismo tipo, las concentraciones varían para lograr la misma eficiencia. Si la cantidad de catalizador es mayor al porcentaje óptimo, se disminuirá la eficiencia del biodiesel, debido a la formación de jabón y al incremento de la viscosidad de los reactivos[54]. Por el contrario, una concentración insuficiente de catalizador termina en una conversión incompleta de los aceites[55].

- Mezcla: Es obligatoria la mezcla para obtener el biodiesel, Por esto es necesario que en el reactor exista un dispositivo que mezcle los reactivos. De no darse la mezcla, la reacción no se daría completa en una tasa muy baja[54]. Una baja velocidad de agitación de la mezcla puede desencadenar en una baja formación de biodiesel, mientras que una alta velocidad de agitación favorece a la formación de jabón[55].

2.1.5. Revisión de resultados de la reacción para obtener biodiesel

Es importante, tal como es mencionado por L. Blinová, A. Bartošová, y M. Sirotiak que en los aceites que son extraídos de materias primas de bajo costo tales como la borra del café, se suele presentar en las pruebas para determinar su composición, un alto contenido de AGL que no pueden ser completamente convertidos en biodiesel con una reacción de transesterificación de un solo paso. Los AGL en un primer paso deben ser convertidos en ésteres en una reacción del aceite con metanol u otro alcohol con un catalizador ácido. En un segundo paso, los restos de triglicéridos se reaccionan con alcoholes en presencia de un catalizador para producir biodiesel y glicerol. Según los autores, esta es la manera en la cual es posible lograr la mayor tasa de conversión de los aceites en el producto final[23].

- Lo discutido anteriormente se puede ver también en el estudio de Ioannis Efthymiopoulos, estudio en el cual se tuvo que disminuir la cantidad de AGL con un pretratamiento de esterificación debido a que se encontró una gran cantidad de estos componentes (29.91 ± 0.51 % en peso del aceite de la borra). La esterificación fue llevada bajo las siguientes condiciones: una previa homogenización de la borra a 55°C en un baño de agua durante 30 minutos; Borra y metanol se mezclaron con ácido sulfúrico como catalizador a una temperatura entre 50 y 60°C y se mezcló a una velocidad de 600 rpm para asegurar una eficiencia de mezclado por no ser sustancias que se puedan mezclar homogéneamente y este proceso se realizó durante 4 horas. A las 2, 3 y 4 horas se midió el porcentaje de AGL. Para el segundo paso, el de la transesterificación, el aceite esterificado y con un contenido de 1,5% en peso de AGL se mezcló con metanol a una temperatura de 60°C , en presencia de hidróxido de potasio durante 4 horas variando la tasa de metanol/borra esterificada al igual que la tasa de catalizador/borra

esterificada; se mantuvo la velocidad de agitación a 600 rpm. Al finalizar ambos pasos, la mezcla se llevó a una separación de 24 horas[25].

- Según M. Kamil, K. M. Ramadan, O. I. Awad, T. K. Ibrahim, A. Inayat, y X. Ma el contenido del agua puede facilitar la creación de AGL, que incide en la reacción de saponificación, generación de jabón y el consumo del catalizador, esto complica la recuperación de biodiesel y su purificación. Por esto el contenido de agua presente en la borra debe ser menor que 0,05%. Por otro lado, si se encuentra en la borra un contenido de AGL del 5 al 6% y se ajusta una cantidad de catalizador, es posible realizar la transesterificación en un paso, los AGL consumirán la cantidad de catalizador que se aumentó en la formación de jabón y con el resto se podrá realizar la reacción con un fin satisfactorio. De lo contrario, si el contenido de AGL es superior al 6% se debe llevar a cabo el proceso previamente descrito de la esterificación antes de la transesterificación. A pesar de tan solo tener un valor de 4,12% de AGL en este estudio se prefirió la segunda opción de transesterificación con previa esterificación con los siguientes valores aplicados: una relación de $1 \text{ g}_{\text{aceite}}/20 \text{ g}_{\text{metanol}}$ en presencia de ácido sulfúrico en un 5% peso de aceite; con lo cual se consiguió una reducción a 0,41% de AGL. Para realizar la transesterificación, se utilizó hidróxido de sodio como catalizador, la reacción se realizó con metanol en una relación de $1 \text{ g}_{\text{aceite}}/6 \text{ g}_{\text{metanol}}$ aceite de borra/metanol, durante 1,5 horas a 60°C. la separación del biodiesel del glicerol se llevó a cabo durante 12 horas. Tras la purificación, el biodiesel obtenido fue probado en un motor y además se demostró que cumple con los estándares de biodiesel de la ASTM[28].
- Por otro lado C. A. Castro, determinó que los parámetros más adecuados para llevar a cabo el proceso de transesterificación son: una relación molar alcohol aceite de $1 \text{ g}_{\text{aceite}}/6 \text{ g}_{\text{metanol}}$, tiempo de reacción igual a 60 min, agitación de 600 rpm, una temperatura de 60°C y concentración de catalizador KOH de 1,5 % p/p. Con estos parámetros, al autor logró obtener un biodiesel que cumple con el marco normativo colombiano[2].
- Para A. Urribarrí et al. Después de realizar varias pruebas de laboratorio para determinar las mejores condiciones entre variaciones de la relación aceite/metanol de $1 \text{ g}_{\text{aceite}}/3 \text{ g}_{\text{metanol}}$ a $1 \text{ g}_{\text{aceite}}/6 \text{ g}_{\text{metanol}}$, la concentración del catalizador de entre 1 y 1,5 % de KOH, en temperaturas

de 50, 65 y 70°C, con una velocidad de agitación de 0, 100 y 400rpm y un tiempo de reacción de 0,5 a 6 horas; las mejores condiciones de operación para la reacción son: relación molar de 1:6, concentración de KOH de 1,5%, agitación de 400 rpm, a 70°C durante 1 h. Al finalizar el proceso a 2500rpm se centrifugó la mezcla y se dejó en reposo de 12 horas para lograr una separación de la mezcla y poder sacar el biodiesel obtenido[22].

2.2. Requerimientos del proceso de producción

2.2.1. Requerimientos y factores necesarios en la extracción

Teniendo en cuenta la revisión bibliográfica anterior, con respecto a los métodos y los factores que alteran los resultados, es posible otorgar a los diferentes factores en el método de extracción Solido-Líquido un peso en porcentaje según su importancia en la consecución del proceso. Esto con la finalidad de posteriormente encontrar cual es el mejor camino en la producción de biodiesel a partir de la borra de café, considerando principalmente los parámetros de los factores con mayor valoración. A continuación, se presentan las valoraciones establecidas.

Tabla 5

Valoración de los factores que alteran la extracción.

Factores	Peso	Valoración Alternativa 1	Ponderación Alternativa 1	Valoración Alternativa 2	Ponderación Alternativa 2
Tiempo	0,25	10	2,5	9	2,25
Solvente	0,25	9	2,25	10	2,5
Relación borra/solvente	0,18	7	1,26	10	1,8
Temperatura	0,15	6	0,9	8	1,2
humedad	0,1	7	0,7	7	0,7
Tamaño de la partícula	0,07	3	0,21	3	0,21
Suma	1	Puntuación final	7,82	Puntuación final	8,66

Nota. En esta tabla se presentan los pesos en porcentaje que se le otorgó a cada factor.

En la Tabla 5. Valoración de los factores que alteran la extracción. se presenta en un principio un peso de la valoración, es decir un porcentaje que se le asigna a cada factor, este porcentaje se

estableció dependiendo el cambio en los resultados que se obtuvo después de alterar los distintos factores. Por la recolección de datos se evidencia que la selección del solvente y el tiempo de la extracción son los elementos que más deben estudiarse para llegar a obtener una cantidad de aceite satisfactoria; como son importantes en la misma medida deben adquirir un mismo porcentaje y este debe ser mayor que los demás por el efecto que tienen en la extracción (25%). Como de estos factores dependen la relación del solvente con respecto a la borra y la temperatura del proceso, entonces los últimos mencionados deben ganar un porcentaje menor (18%); al igual la temperatura es un factor que altera los resultados en menor cuantía que la relación del solvente, entonces así debe ser menor su porcentaje (15%). A pesar de que hay un estudio completamente dedicado al contenido de humedad en la borra, no es un estado difícil de conseguir, pues puede ser secador por medio de temperaturas altas; es un factor determinante en el proceso, mas no es crítico, por esto es de los porcentajes más inferiores (10%). Por último, el tamaño de la partícula es el factor con menor porcentaje (7%), pues de por sí, el residuo que queda de la preparación de la bebida es bastante pequeño.

Se presentan también, dos alternativas, cada una con una valoración en la cual se le asigna valores de acuerdo con la posición en la que deben ser tenidas en cuenta para la elección de las configuraciones de los parámetros, es decir que partiendo del peso que tenga cada factor se le valora para saber cuál debe ser el orden de la elección de las configuraciones posteriormente. Solo se presentan dos alternativas ya que se desea que las elecciones se hagan primero con los factores de mayor peso, es decir los que obtuvieron peso de 0,25 y 0,18 en este caso y que son los factores más relevantes y los que más pueden alterar los resultados.

En esta tabla también se da un valor ponderado. En cuanto a la valoración que recibe cada factor, una alternativa 1, donde lo principal es tomar la decisión de la configuración de cada factor partiendo por la duración del proceso (10) y la selección del solvente (9), la relación solvente/borra (7) y la humedad después (7), la temperatura de extracción (6) y por último el tamaño de la partícula (3); al realizar un ponderado de esta valoración se obtuvo una puntuación final de 7,82. En la alternativa 2, la selección de solvente y la relación de este con respecto a la borra son los factores que se tienen en cuenta antes que los otros (10), la duración del proceso pasa a un segundo punto (9), la temperatura del proceso (8) y el contenido de humedad (7), siguen

casi al final de la lista de verificación; y por último el tamaño de la partícula (3) para obtener una puntuación final de 8,66.

En concordancia con lo anterior, para poder elegir la configuración de los factores partiendo de la revisión bibliográfica se tomará la alternativa 2 de la Tabla 5. Valoración de los factores que alteran la extracción. Lo primero por atender es lo relacionado con el solvente (tipo y relación con respecto a la borra).

Tabla 6

Tabla resumen Revisión de resultados de la extracción de aceites de la borra

Referencia	Tiempo [h]	Solvente	Relación Borra/Solvente	Temperatura [°C]	humedad [% peso de borra]	Tamaño partícula [mm]	Rendimiento [% peso de borra]
[25]	8	Hexano	1 g _{borra} /9 ml _{hexano}	25	2	0,5-0,85	25
[25]	8	Etanol	1 g _{borra} /9 ml _{etanol}	25	2	0,5-0,85	28,3
[25]	2	Hexano	1 g _{borra} /9 ml _{Hexano}	25	10	0,5-0,85	19
[47]	0,33	Hexano	1 g _{borra} /24 g _{hexano}	30	-	0,237	14,63
[47]	0,56	Hexano	1 g _{borra} /22 g _{hexano}	30	-	0,237	14,57
[27]	1	Dietiléter	1 g _{borra} /12 ml _{dietiléter}	40	-	-	13,94
[48]	5	Hexano	100 ml _{hexano} /min	60	0	-	16,6

Nota. En esta tabla se presentan los resultados obtenidos por los diferentes autores de la revisión bibliográfica.

Los resultados que se muestran en la Tabla 6. Tabla resumen de resultados de la extracción de aceites de la borra. son los mejores que obtuvo cada autor en las distintas pruebas que uno a uno hicieron. Por otro lado, en la Tabla 5. Valoración de los factores que alteran la extracción. Por la alternativa 2 principalmente se considera la selección de solvente y que, en la revisión de los resultados de la extracción de la borra, 5 de los 7 mejores resultados se obtuvo con hexano, se toma este como el solvente que proporciona los mejores contenidos de aceite de borra. Además,

se puede notar que anteriores autores mostrados en la Tabla 3. Condiciones experimentales de la extracción del aceite de la borra de café. usaron este solvente y también consiguieron los mejores resultados entre otras pruebas. La relación borra/solvente se toma, partiendo de los resultados que se encuentren en peso de borra con respecto al peso del hexano. Además, se puede notar que en el estudio de la optimización de la extracción nos deja que una relación borra/solvente de $1 \text{ g}_{\text{borra}}/22 \text{ g}_{\text{hexano}}$ precede a los mejores resultados. (4)

Siguiendo el paso a paso que quedó de la alternativa 2 de la valoración de los factores, la duración más apropiada para conseguir buenos resultados, se encuentra entre una hora y dos horas, ya que el mejor resultado obtenido se basa en 8 horas de proceso, y esto puede aumentar significativamente los costos de producción, se decide a tomar los mejores siguientes resultados, teniendo en cuenta también que con 5 horas de la prueba que se llevó a cabo para determinar la mejor humedad, no se vio demasiado alterado el resultado con respecto a 1 hora en el experimento llevado a cabo por Carolina Risco.

En el caso de la temperatura, es evidente que los mejores resultados se han obtenido entre los 25 y los 60° Celsius, pero el mejor ha sido 2 horas de extracción con 25°C como temperatura de extracción. En cuanto a la humedad de la borra, se puede notar que es preferible realizar el proceso cuando la borra está sin humedad, según el estudio realizado con base en este punto. Se selecciona un proceso de secado completo de la borra antes de entrar en el extractor. Por último; la partícula parece tener el mejor efecto en la borra cuando tiene un tamaño entre 0,5 y 0,85mm. Las configuraciones de los parámetros de la etapa de extracción de los aceites de la borra de café se resumen en la Tabla 7. Requerimientos y factores necesarios en la extracción de los aceites de la borra.

Tabla 7.

Requerimientos y factores necesarios en la extracción de los aceites de la borra

Factor	Tiempo [h]	Solvente	Relación Borra/Solvente [g _{borra} /g _{hexano}]	Temperatura [°C]	humedad [%peso de borra]	Tamaño partícula [mm]
---------------	----------------------	-----------------	--	----------------------------	---------------------------------------	---

Configuración	1 a 2	Hexano	1 g _{borra} /22 g _{hexano}	25	0	0,5-0,85
----------------------	-------	--------	--	----	---	----------

Nota. En esta tabla se resumen los valores tomados para los factores de esta etapa de producción de biodiesel.

2.2.2. Requerimientos y factores necesarios en la transesterificación

Teniendo en cuenta la revisión bibliográfica sobre la reacción de transesterificación del proceso; de donde se extrajeron los mejores resultados y los métodos mediante los cuales se lograron estos, es posible valorar los diferentes factores que afectan la reacción, siendo los factores con mayor valoración aquellos que afectan en mayor medida los resultados de la transesterificación. Esta valoración se generará, partiendo de los factores que alteran la esterificación y luego los que afectan la transesterificación.

Tabla 8.

Valoración de los factores que alteran la reacción de la transesterificación

Factor	Peso	Valoración alternativa 1	Ponderación alternativa 1	Valoración alternativa 2	Ponderación alternativa 2
Esterificación					
Temperatura	0,15	7	1,05	6	0,9
Tiempo	0,15	7	1,05	6	0,9
Alcohol	0,2	10	2	8	1,6
Tasa aceite/alcohol	0,075	8	0,6	9	0,675
Catalizador	0,2	10	2	8	1,6
Concentración del catalizador	0,075	8	0,6	9	0,675
Agitación	0,15	9	1,35	10	1,5
Suma	1	Puntuación final	8,65	Puntuación final	7,85
Transesterificación					
Pretratamiento	0,2	10	2	10	2
Temperatura	0,1	7	0,7	6	0,6
Tiempo	0,1	7	0,7	6	0,6
Alcohol	0,175	10	1,75	8	1,4
Tasa aceite/alcohol	0,05	8	0,4	9	0,45
Catalizador	0,175	10	1,75	8	1,4
Concentración del catalizador	0,05	8	0,4	9	0,45
Agitación	0,15	9	1,35	10	1,5
Puntuación final	1	Puntuación final	9,05	Puntuación final	8,4

Nota. En esta tabla se presentan los pesos en porcentaje que se le otorgó a cada factor.

Para la realización de la Tabla 8. Valoración de los factores que alteran la reacción de la transesterificación. Primero se otorgó valoración al preproceso esterificación, donde a cada factor, se le asignó un peso dependiendo el efecto que tiene en la disminución de los AGL del aceite extraído de la borra conocido por la recolección de datos en la revisión bibliográfica. Se conoció que el tipo de catalizador (20%) y el tipo de alcohol (20%) que se usen son primordiales al momento de realizar la reacción; como de estos elementos que se van a reaccionar en esta etapa, no se puede obtener una mezcla homogénea, las revoluciones por minuto a las que se va a agitar (15%) la mezcla, deben ser muy bien consideradas. En el caso de la temperatura de reacción (15%) y el tiempo de reacción (15%) deben estar dentro del estudio de configuración de los parámetros y al igual que la agitación y el tipo de catalizador y alcohol debe ser muy tenidos en cuenta. Las concentraciones del alcohol (75%) y catalizador (75%), sin dejarlas de lado y sin restarles importancia tienen un peso en porcentaje mejor, ya que dentro de las consideraciones que se deben hacer; y siendo importantes, no son principales al compararlas con las demás.

En la segunda sección de la misma Tabla 8. Valoración de los factores que alteran la reacción de la transesterificación. Donde se encuentra el proceso de transesterificación, los pesos en porcentaje asignados corresponden, al menos en importancia, a los de la anterior sección, pues son reacciones similares y cada factor que se considera, es igual a excepción del primero. En este caso los porcentajes disminuyen con respecto al anterior porque se añade el factor del pretratamiento (esterificación con un 20%), ya que como se mencionó en la sección 2.1.5. del documento puede evitarse dependiendo del contenido de AGL en el aceite. Para la reacción de transesterificación de los aceites extraídos de la borra puede ser crucial una previa esterificación, como también se mencionó anteriormente.

También se proponen 2 alternativas en las cuales se le da una valoración a cada uno de los factores partiendo del peso otorgado, con el cual se indica que configuración debe considerarse primero, se presentan 2 valoraciones ya que solo se quiere considerar primero los factores con un peso mayor, es decir los que tienen un peso de 0,15 en adelante para el caso de los factores de la esterificación y de 0,05 para el caso de los factores de la transesterificación.

Al final se calcula una calificación de cada alternativa, la que tenga mayor calificación será la que se seleccione para determinar la configuración de los parámetros en esta etapa de la producción del biodiesel a partir de la borra. Para la primera alternativa en ambos casos (esterificación y transesterificación) la selección de alcohol (10) y el catalizador (10), se analizan de primero; sin embargo, en el caso de la transesterificación también se tiene en cuenta el pretratamiento (10) en primer lugar; después, se analiza la velocidad de agitación (9) por ser un factor tan relevante; seguido del análisis de las concentraciones de catalizador (8) y de alcohol (8) y, por último, la temperatura (7) y tiempo (7) de reacción. En la segunda alternativa la agitación (10) es la que primero se analiza y al igual que en la primera alternativa, el pretratamiento solo en la parte de la transesterificación también se analiza de primera (10); la concentración (9) de catalizador y alcohol, vienen después y son seguidas por la selección (8) de los mismos. Al final, en esta alternativa se considera el tiempo (6) y la temperatura (6) de reacción. Como se evidencia en la Tabla 8. Valoración de los factores que alteran la reacción de la transesterificación. La calificación más alta en ambos casos se da en la primera alternativa, por ende, se seguirá este paso a paso para la obtención de la configuración más idónea para esta etapa.

Tabla 9.

Tabla resumen Revisión de resultados de la reacción de transesterificación y previa esterificación

Referencia	Temperatura [°C]	Tiempo [h]	Alcohol	Tasa aceite/alcohol	Catalizador	Concentración del catalizador [%peso de aceite]	Agitación [rpm]
Esterificación							
[25]	50-60	4					600
[56]	60	2	Metanol	40% peso de aceite	Ácido Sulfúrico	1	500
[28]	60	2	Metanol	1 g _{aceite} /20 g _{metanol}	Ácido Sulfúrico	5	
Transesterificación							
[25]	60	4	Metanol		KOH		600
[56]	60	2	Metanol	1 g _{aceite} /3 g _{metanol}	KOH	1	500
[28]	60	1,5	Metanol	1 g _{aceite} /6 g _{metanol}	NaOH		

[2]	60	1		$1 \frac{\text{g}_{\text{aceite}}}{6 \text{ g}_{\text{solvente}}}$	KOH	1,5	600
[22]	70	0,5-6		$1 \frac{\text{g}_{\text{aceite}}}{6 \text{ g}_{\text{solvente}}}$	KOH	1,5	400

Nota. En esta tabla se presentan los resultados obtenidos por los diferentes autores de la revisión bibliográfica.

Dados los resultados de anteriores autores en diferentes pruebas para conocer cuál es la configuración de los parámetros más adecuada para realizar la etapa de la reacción que se muestran en la Tabla 9. Tabla resumen Revisión de resultados de la reacción de transesterificación y previa esterificación. Entre otros elementos que quedan de la reacción; y sabiendo que camino tomar después de ser evaluadas dos alternativas en las que se presentaba cada factor a analizar, se determina que lo primero que debe evaluarse es si se debe realizar o no una previa esterificación, si el contenido de AGL supera el 1% en peso del aceite; para este caso, la esterificación se debe realizar con metanol a una tasa de $1 \frac{\text{g}_{\text{aceite}}}{20 \text{ g}_{\text{metanol}}}$ y ácido sulfúrico al 5%; las revoluciones adecuadas de agitación deben ser de 600 rpm durante 2 horas a una temperatura de 60°C. Por otro lado, en la transesterificación, debido a que el autor C.A. Castro verificó la configuración adecuada para lograr un producto final adecuado bajo un marco normativo colombiano; sus conclusiones serán las que se tengan en cuenta para este documento siendo así[2]: Hidróxido de potasio como catalizador en una concentración del 1,5% con Metanol como alcohol a una relación aceite esterificado/alcohol $1 \frac{\text{g}_{\text{aceite}}}{20 \text{ g}_{\text{metanol}}}$ en peso durante una hora a 60°C siendo agitada la mezcla a 600 rpm. Los anteriores valores se resumen en la Tabla 10. Requerimientos y factores necesarios en la reacción de transesterificación y previa esterificación.

Tabla 10.

Requerimientos y factores necesarios en la reacción de transesterificación y previa esterificación

Temperatura [°C]	Tiempo [h]	Alcohol	Tasa aceite/alcohol [$\frac{\text{g}_{\text{aceite}}}{\text{g}_{\text{metanol}}}$]	Catalizador	Concentración del catalizador [% peso de aceite]	Agitación [rpm]
---------------------	---------------	---------	--	-------------	---	--------------------

Esterificación						
60	2	Metanol	$1 \frac{g_{aceite}}{20 g_{metanol}}$	Ácido Sulfúrico	5	600
Transesterificación						
60	1	Metanol	$1 \frac{g_{aceite}}{20 g_{metanol}}$	KOH	1,5	600

Nota. En esta tabla se resumen los valores tomados para los factores de esta etapa de producción de biodiesel.

2.3. Etapas de producción de biodiesel

Durante el estudio del estado del arte de la producción de biodiesel a partir de la borra de café en la sección 1.1.2, el análisis que se realizó para conocer los resultados de los mismos y el que se llevó a cabo para avalar las configuraciones de cada parte del proceso y los requerimientos; resalta la forma en que el proceso de producción del biocombustible con base en la borra se divide primero en la extracción del aceite y luego en una reacción que convierta ese aceite en biodiesel; sin embargo, por su origen, es necesario un pretratamiento, con el cual lograr una mayor conversión de los aceites al biodiesel. Siendo así, este proceso de producción de biodiesel está compuesto por 3 principales etapas: extracción, esterificación y transesterificación.

2.3.1. Selección de las etapas de producción de biodiesel

2.3.1.a. Etapa de extracción. En esta etapa se considera el proceso desde que la borra entra hasta que sale el aceite y el agua sin hexano. Para este fin, en esta etapa se ven necesarios 3 principales equipos; en primer lugar, como la borra entra en el proceso con altos contenidos de humedad(66%), debido a que viene de cafeterías, es importante contar con un secador que logre eliminar la humedad, para que la borra entre seca al extractor, como se estableció en las configuraciones de la extracción. Al extractor, de acuerdo con la configuración seleccionada, entra la borra y el hexano en una relación de $1 \frac{g_{borra}}{22 g_{hexano}}$ respectivamente, de este equipo va a salir la borra por un flujo y la mezcla de aceite y hexano por el otro lado. Debido a que el hexano solo hace parte de la primera etapa, debe retirarse de la mezcla; por esto, el flujo pasa a un separador donde se caliente lo suficiente la mezcla para evaporar el hexano y retirarlo de la mezcla para que pueda ser reutilizado después.

2.3.1.b. Etapa de la reacción esterificación. Para esta parte del proceso, el aceite extraído va a entrar un reactor tipo Batch junto con metanol en una relación de $1 \text{ g}_{\text{aceite}}/20 \text{ g}_{\text{metanol}}$ en presencia de ácido sulfúrico al 5 %_{peso del aceite}, como catalizador, en este reactor se va a llevar a cabo la reacción de esterificación, que da como resultado una fase esterificada en la cual se encuentra el aceite con una menor acidez y agua, la fase esterificada se lleva ahora a un decantador donde se separa aceite del metanol. La fase esterificada del aceite sale del decantador y asimismo de la presente etapa, para poder entrar en la tercera y última etapa.

2.3.1.c. Etapa de la reacción transesterificación. Esta etapa es la última y es donde se generará al fin el biodiesel, después de salir del decantador de la etapa anterior entra en un reactor donde se llevará a cabo la reacción de transesterificación. Una vez más en un reactor tipo Batch, se lleva a cabo este paso, allí entrará tanto la fase esterificada como el metanol en una relación de $1 \text{ g}_{\text{aceite esterificado}}/6 \text{ g}_{\text{metanol}}$ y la reacción se llevará a cabo en presencia de hidróxido de potasio (KOH) al 1.5 %_{peso del aceite}, como catalizador. Por un lado, después de la reacción se genera glicerol y por el otro el biocombustible, pero en este caso es común encontrar impurezas en el biodiesel; por esta razón, se somete a un lavado con agua destilada en un 30 %_{peso del biodiesel}. De este último paso mencionado se extraen las impurezas del biodiesel; sin embargo, quedan trazas de agua, por ende, el último paso es la evaporación del agua en un horno, donde se obtiene finalmente el biodiesel que se puede comercializar.

2.4. Capacidad de producción del proceso

Anteriormente se estableció que la borra corresponde al 10% en peso del grano del café; Sin embargo, por lo investigado por Rodríguez V, Nelson también es correcto decir que, de 1 kg del fruto del arbusto café, se puede obtener 0,104 kg de borra tras la preparación de la bebida, cifra congruente con la anterior.[23], [57]. Por otro lado, en Colombia, la producción de café durante el año 2020 fue de 13.890.000 sacos de 60 kg, un 6 % menos que en el año 2019 con 14.752.000 sacos de 60 kg, mientras que, en tema de exportaciones, en el año 2020 se exportaron 12.519.000 de sacos de 60 kg, un 8 % menos que en el año 2019 con 13.674.000 de sacos de 60 kg. Además, anteriormente también se estableció que el consumo per cápita para el 2019 fue del 2.1 kg y de 2.2 kg en el año 2020, lo cual indica que conjuntamente, para el consumo de los colombianos una

parte del café es nacional y alrededor del 30 % es importada. Esto coincide con la información obtenida para el reportaje del periódico El Nuevo Siglo, en el cual se registra que entran entre 1.9 a 2.1 millones de sacos de 60 kg anuales[58].

2.4.1. Selección del flujo de entrada de la borra

Partiendo de la suposición que hacen Giller, Chelsea; Malkani, Bhavish; y Parasar, Josh; de donde hay un aproximado de 20 g de borra de café seca en cada taza de café preparada y partiendo de que de 875 tiendas donde preparan café, con 20 g por taza, 10 kg de desperdicios por cada tienda y cada día durante 365 días al año, la tasa de borra sería de 3194000 kg/año sin tener en cuenta el peso de la humedad o de 9581000 kg/año teniendo en cuenta el peso de la humedad (con humedad del 66 % por venir de cafeterías)[30].

Considerando el consumo per cápita anual de café en Colombia para el año 2019 (antes de la pandemia) de 2.1 kg y que la población para este año fue de 50340000 personas, en el país hay un consumo de 105714000 kg de café y sabiendo que, del grano del café, el 10% en peso resulta de la borra, entonces al año en Colombia se generan 10571400 kg de borra, por lo cual es posible seguir el flujo de entrada de borra previamente mencionado, es decir 9581000 kg/año a partir de 875 de las 1258 tiendas donde se prepara café en el país. Sin embargo, este flujo másico de borra se genera en todo el país, mientras que este proyecto de investigación se centra en Bogotá, en el 2019 Trujillo F., Juan D. Investigó cual es el sector de Bogotá que más cuenta con lugares dedicados a la preparación de la bebida, en los cuales poder adquirir la borra. Teusaquillo fue la localidad bogotana, que el autor escogió, debido a que cuenta con más sitios donde poder obtener la borra, según su estudio la oferta comercial y cultural este es un excelente punto sobre Bogotá, Colombia para hacerse con la materia prima y encontró una población flotante de 400000 personas[59].

Una vez conocido este valor, y sabiendo que el consumo Per cápita es de 2,1 kg para el 2019, La cantidad de café consumida en Teusaquillo fue de 840000 kg en el año, y sabiendo que la borra que queda de la preparación de la bebida es el 10% en peso, La borra que se puede obtener de esta localidad es de 84000 kg/año o de 9,58 kg/h. Debido a que los resultados del balance de materia del proceso de producción fueron bastante minúsculos con respecto a las capacidades de biodiesel

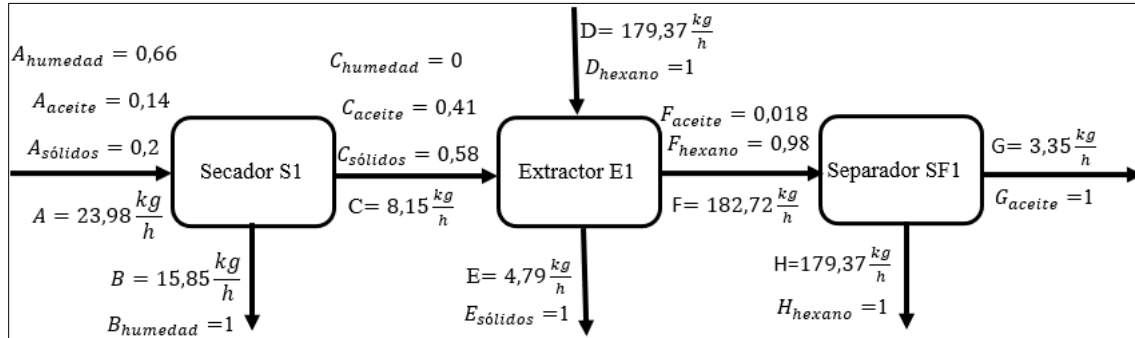
que se generan en las diferentes plantas del país, se pretende además incluir otras 2 localidades en Bogotá que cuenten un gran número de tiendas dedicadas a la bebida del café. Según García, Diana y Duarte Claudia una de las localidades en Bogotá con más tiendas dedicadas a esta labor, es Usaquén[60] con una población de 476184 habitantes[61]. De donde podría obtenerse 999986 kg de café consumido por año de acuerdo con el consumo per cápita y además se escoge chapinero por tener una gran cantidad de tiendas de café[62], localidad que cuenta con 125750 habitantes[63]. De donde se puede obtener 264075 kg de café consumido por año de acuerdo con el consumo per cápita. Siendo un total de flujo de borra para el proceso de 210406 kg por año o de 23,98 kg/h.

2.4.2. Balance de materia de la etapa de extracción

De comienzo para que la borra entre en el Extractor E1 (Extractor tipo Soxhlet), debe ser completamente secada, por lo cual debe entrar en el Secador S1 y como se estableció anteriormente pasar por una hora de secado de la humedad inicial para que la borra pueda entrar en el proceso de extracción del aceite. Hay presente en un 14 %, en promedio de los rendimientos de los autores que anteriormente obtuvieron distintos resultados y los cuales se acogen más al proceso seleccionado en este proyecto. Esto es, aquellos que proceden de configuraciones de la etapa muy alejados de lo seleccionado, no se tuvieron en cuenta para el desarrollo del promedio. Como se puede notar en la Figura 12. Balance de materia de la etapa de extracción. Los residuos sólidos son separados de los solutos líquidos, en los cuales se encuentra aceite extraído y hexano. Estos serán conducidos a un Separador SF1 (Separador tipo flash o vapor-líquido). Del balance de materia se obtiene que de la primera etapa se produce un flujo de 3,35 kg/h de aceite para ser convertido posteriormente.

Figura 12.

Balance de materia en la etapa de extracción



Nota. En esta figura se esquematiza la primera etapa (extracción) de producción de Biodiesel a partir de la borra de café, se encuentran los tres primeros equipos de la producción.

Los balances de materia en cada equipo se realizaron con la Ecuación 1. La ecuación general de balance de materia:

Ecuación 1.

Ecuación general de balance de materia.

$$Ent + Gen - Sal - Con = Acu$$

Nota. Es la ecuación general de los balances de materia. Fuente: Absorción-enfriamiento esiqie. (18 de septiembre del 2020). Balance de Materia y Energía #1 : Introducción al Balance de Materia [archivo de video]. YouTube.

<https://youtu.be/oZ0ltHNB914>.

Donde:

- Ent: Son las entradas del proceso o la alimentación.

- Gen: Es la generación o la materia con nuevas propiedades cuando existe una reacción.
- Sal: Son las salidas de materia del proceso.
- Con: Es lo consumido dentro de las reacciones
- Acu: Lo acumulado es el material que existe en un tiempo dado menos lo que existía en un tiempo anterior.

Ya que en el proceso que se está diseñando las entradas no cambian con respecto al tiempo, se realiza un balance estacionario donde las acumulaciones (Acu) se vuelven cero. Además, como en la primera etapa del proceso, que corresponde a la extracción, no se considera ninguna reacción; entonces no hay consumo (Con) de reactivos y esta variable se vuelve cero al igual que la generación (Gen), ya que al no ser un proceso reaccionante no hay una transformación de la materia. Al reemplazar en la Ecuación 1:

$$ENT + 0 - SAL - 0 = 0$$

Cuando se organiza, teniendo en cuenta que el balance que se va a calcular en la primera etapa es estacionario y no reaccionante, surge la Ecuación 2, donde la cantidad de materia que entra debe ser igual a la cantidad de materia que sale de cada equipo:

Ecuación 2.

Ecuación del balance estacionario y no reactivo.

$$Ent = Sal$$

Nota. Es el balance de materia estacionario y sin reacción. Fuente: Absorción-enfriamiento esiqie. (18 de septiembre del 2020). Balance de Materia y Energía #1 : Introducción al Balance de Materia [archivo de video]. YouTube. <https://youtu.be/oZ0ltHNB914>.

Cada una de las flechas de la Figura 12. Balance de materia en la etapa de extracción. Representa una corriente que esta nombrada con letras en orden alfabético desde la A hasta la H: la corriente A, son 23,98 kg/h de borra que contiene un 66 % de humedad, un 20 % de sólidos y un 14 % de aceite para extraer. En el primer equipo el Secador S1, la humedad es eliminada; por ende, se debe conocer el 66 % de la corriente A para obtener el valor de la corriente B, se calcula con la Ecuación 3:

Ecuación 3.

Ecuación de la cantidad de sustancia en una corriente.

$$CSC = COR * PSC$$

Nota. Es la ecuación con la cual encontrar cantidades de sustancia en una corriente.

Fuente: Absorción-enfriamiento esiqie. (18 de septiembre del 2020). Balance de Materia y Energía #1 : Introducción al Balance de Materia [archivo de video]. YouTube.

<https://youtu.be/oZ0ltHNB914>.

Donde:

- CSC: Es la cantidad de sustancia en una corriente.
- COR: Es el valor de la corriente.
- PSC: Es el porcentaje de sustancia en una corriente.

Como B es la cantidad de humedad que hay en la corriente A, al desarrollar la Ecuación 3 en la corriente B:

$$B = A * A_{humedad}$$
$$B = 23.98 \frac{kg}{h} * 0,66$$

$$B = 15,85 \frac{kg}{h}$$

Conociendo el valor de la corriente B, es posible calcular el valor de la corriente C y en qué cantidad contiene aceite C_{aceite} y sólidos $C_{sólido}$ una vez eliminada la humedad. Para tal fin se utiliza la Ecuación 2, que al ser reemplazada por las corrientes correspondientes:

$$C = A - B$$

$$C = 23,98 \frac{kg}{h} - 15,85 \frac{kg}{h}$$

$$C = 8,15 \frac{kg}{h}$$

Para conocer en qué cantidad se encuentra presente el aceite y en qué cantidad los sólidos de la borra en la corriente C, se deben considerar en que cantidad se encontraban presentes tanto en la corriente A como en la B, para esto se reemplaza la Ecuación 3 en la Ecuación 2.

Para calcular la cantidad de aceite en la corriente C:

$$C * C_{aceite} = A * A_{aceite} - B * B_{aceite}$$

$$C_{aceite} = \frac{A * A_{aceite} - B * B_{aceite}}{C}$$

$$C_{aceite} = \frac{23,98 \frac{kg}{h} * 0,14 - 15,85 \frac{kg}{h} * 0}{8,15 \frac{kg}{h}}$$

$$C_{aceite} = 0,41$$

Para calcular la cantidad de sólidos en la corriente C:

$$C * C_{sólidos} = A * A_{sólidos} - B * B_{sólidos}$$

$$C_{sólidos} = \frac{A * A_{sólidos} - B * B_{sólidos}}{C}$$

$$C_{sólidos} = \frac{23,98 \frac{kg}{h} * 0,2 - 15,85 \frac{kg}{h} * 0}{8,15 \frac{kg}{h}}$$

$$C_{sólidos} = 0,58$$

Conociendo la corriente en C que es el flujo másico de borra seca que va a entrar al extractor E1 se puede conocer la corriente D, que es el flujo másico de hexano. Ya que la relación borra/solvente es de 1 g_{borra}/22 g_{hexano}, entonces la corriente D es de 179,37 kg/h de hexano. Del extractor sale por un lado los sólidos de la borra y por el otro una mezcla de hexano con el aceite ya extraído. Para conocer el valor de las salidas del extractor se recurre a la Ecuación 2, que transformándola en términos de este equipo:

$$C + D = Sal$$

$$8,15 \frac{kg}{h} + 179,37 \frac{kg}{h} = Sal$$

$$187,52 \frac{kg}{h} = Sal$$

Del Extractor E1 sale materia en una cantidad de 187,52 kg/s, este flujo másico está dividido en dos corrientes; por un lado, la corriente E, que son los sólidos que salen del equipo y una segunda, corriente F, en la que se encuentra una mezcla de hexano con aceite extraído. Para poder conocer la cantidad de sólidos que salen del extractor E1, se usa la Ecuación 3 reemplazada en la Ecuación 2.

$$C + D = Sal$$

$$C * C_{sólidos} + D * D_{sólidos} = Sal * Sal_{sólidos}$$

$$\frac{C * C_{sólidos} + D * D_{sólidos}}{Sal} = Sal_{sólidos}$$

$$\frac{8,15 \frac{kg}{h} * 0,58 + 179,37 \frac{kg}{h} * 0}{187,52 \frac{kg}{h}} = Sal_{sólidos}$$

$$0,025 = Sal_{sólidos}$$

Una vez conocida la cantidad de sólidos que salen del extractor E1 se puede calcular la corriente E, desde la Ecuación 3:

$$E = Sal * Sal_{sólidos}$$

$$E = 187,52 \frac{kg}{h} * 0,025$$

$$E = 4,79 \frac{kg}{h}$$

Para conocer cuál es el valor de la corriente F, en la cual se encuentra la mezcla de aceite extraído y hexano se toma la Ecuación 2

$$C + D = E + F$$

$$F = C + D - E$$

$$F = 8,15 \frac{kg}{h} + 179,37 \frac{kg}{h} - 4,79 \frac{kg}{h}$$

$$F = 182,72 \frac{kg}{h}$$

Para hallar la cantidad de aceite que hay en la corriente F, se requiere de la Ecuación 3 reemplazada en la Ecuación 2:

$$C * C_{aceite} + D * D_{aceite} = E * E_{aceite} + F * F_{aceite}$$

$$\frac{C * C_{aceite} + D * D_{aceite} - E * E_{aceite}}{F} = F_{aceite}$$

$$\frac{8,15 \frac{kg}{h} * 0,41 + 179,37 \frac{kg}{h} * 0 - 4,79 \frac{kg}{h} * 0}{182,72 \frac{kg}{h}} = F_{aceite}$$

$$0,02 = F_{aceite}$$

La corriente F, de la mezcla entre el aceite extraído y el hexano luego de salir del extractor E1, entra en un separador tipo flash SF1, donde a una temperatura mayor a la de evaporación del hexano se va a agitar la mezcla y de la cual saldrán la corriente G, todo el aceite extraído y la corriente H, todo el hexano en forma de vapor. Para conocer el valor de la corriente G debe

conocerse que cantidad de aceite existía en la corriente F, para esto la Ecuación 3. se replantea con respecto a la salida del extractor E1:

$$G = 182,72 \frac{kg}{h} * F_{aceite}$$

$$G = 182,72 \frac{kg}{h} * 0,02$$

$$G = 3,35 \frac{kg}{h}$$

Con la Ecuación 2. se puede conocer el valor de la corriente H, esta corriente contiene solo el vapor de hexano que volvería al tanque T1. Para esto solo se requiere de la resta de la corriente F y la corriente G

$$H = F - G$$

$$H = 182,72 \frac{kg}{h} * -3,35 \frac{kg}{h}$$

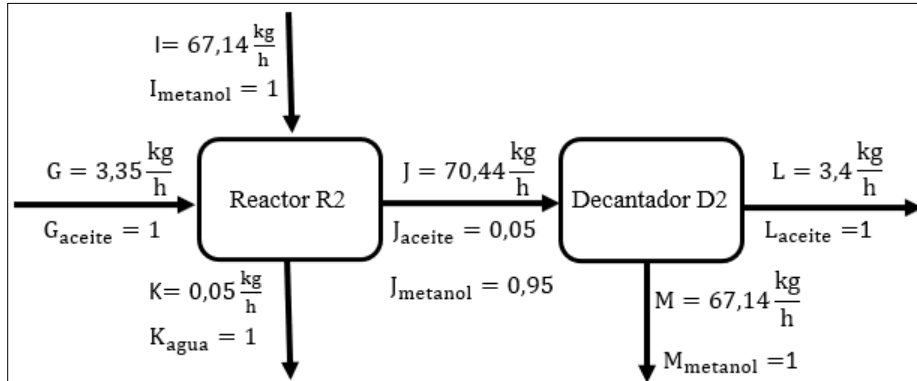
$$H = 179,37 \frac{kg}{h}$$

2.4.3. Balance de materia de la etapa de esterificación

Una vez el flujo de aceite entra en la segunda etapa, es decir la etapa de la esterificación, debe pasar al reactor, al reactor le entra el flujo de aceite y también el flujo de metanol que como anteriormente se estableció es de $1 \text{ g}_{\text{aceite}}/20 \text{ g}_{\text{metanol}}$ con respecto a la borra (67.14 kg/h de metanol). En este punto, en el balance de materia con reacción, el reactivo limitante es el aceite extraído de la borra que entra con 3.35 kg/h como se ve en la Figura13. El resultado de esta etapa, según el balance de materia y la estequiometría de la reacción de esterificación es de 70.55 kg/h de una combinación de metanol en un 95 % y una fase esterificada del aceite en un 5 %. Para poder, luego ser conducida la fase esterificada del aceite a la conversión a biodiesel, es necesario que entre en un decantador, donde sale aparte de los residuos del metanol con un flujo de 3.40 kg/h.

Figura 13.

Balance de materia en la etapa de esterificación

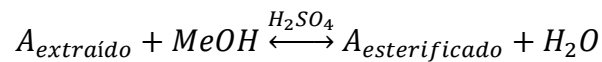


Nota. En esta figura se esquematiza la segunda etapa (esterificación) de producción de Biodiesel a partir de la borra de café, se encuentran los siguientes dos equipos de la producción.

La corriente G, el aceite extraído, sale de la primera etapa para entrar en el Reactor R2 que se muestra en la Figura 13. Balance de materia en la etapa de esterificación, donde comienza la segunda etapa, esta corriente G entra en el reactor junto con la corriente I, que es el metanol. Ambos entran en el reactor en una relación de aceite extraído/borra de 1 g_{aceite}/20 g_{metanol}. En esta etapa existe una reacción, que se presenta en la Ecuación 4:

Ecuación 4.

Ecuación de la reacción de esterificación.



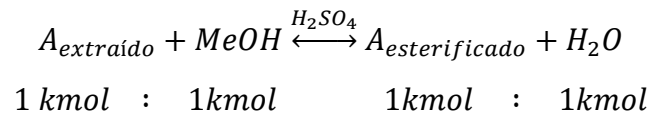
Nota. Es la ecuación de la reacción de esterificación. Fuente: E. A. Bulla Pereira, “Diseño del proceso de producción del biodiesel a partir de aceites de fritura,” 2014.

Donde:

- $A_{\text{extraído}}$: Es el aceite que se ha extraído de la borra en la primera etapa.

- MeOH: Es el metanol, el reactivo con el que reacciona el aceite extraído.
- H₂SO₄: Es el ácido sulfúrico, el catalizador en la reacción.
- A_{esterificado}: Es el aceite resultante de la reacción.
- H₂O: Es el agua resultante de la reacción.

La cantidad molar de cada sustancia que entra en el reactor se ve debajo de la Ecuación 4 así:



Los pesos moleculares de las sustancias que reaccionan y las que se obtienen en esta reacción son:

- A_{extraído} = 934,58 g/mol[2]
- MeOH = 32,04 g/mol[2]
- H₂O = 18,02 g/mol[30]

Para poder convertir la concentración de las sustancias de masa a moles se utiliza la ecuación 5:

Ecuación 5.

Conversión de cantidad de la sustancia en masa a cantidad molar.

$$M_o = \frac{MS}{PM}$$

Nota. Es la ecuación con la cual encontrar las cantidades de sustancia en una corriente. Fuente: Absorción-enfriamiento esiqie. (18 de septiembre del 2020). Balance de Materia y Energía #1 : Introducción al Balance de Materia [archivo de video]. YouTube. <https://youtu.be/oZ0ltHNB914>.

Donde:

- Mo: Son los moles que entran de la sustancia en la reacción.
- MS: Es la masa de la sustancia.
- PM: Es el peso molecular de la sustancia.

Para poder calcular la concentración molar del aceite extraído, se utiliza la Ecuación 5, en donde también se realiza la conversión de g/mol a kg/mol:

$$M_{O_{\text{aceite extraído}}} = \frac{MS_{\text{aceite extraído}}}{PM_{\text{aceite extraído}}}$$
$$M_{O_{\text{aceite extraído}}} = \frac{3,35 \frac{kg}{h}}{\frac{934,58 \frac{g}{mol}}{1000}}$$
$$M_{O_{\text{aceite extraído}}} = 3,59 \frac{kmol}{h}$$

Para poder calcular la concentración molar del metanol se debe reemplazar la fórmula de la relación de aceite extraído/metanol en la masa de la sustancia en la Ecuación 5 así:

$$M_{O_{\text{metanol}}} = \frac{MS_{\text{metanol}}}{PM_{\text{metanol}}}$$
$$M_{O_{\text{metanol}}} = \frac{20 * G}{PM_{\text{metanol}}}$$
$$M_{O_{\text{metanol}}} = \frac{20 * 3,35 \frac{kg}{h}}{\frac{32,04 \frac{g}{mol}}{1000}}$$
$$M_{O_{\text{metanol}}} = 2095,63 \frac{kmol}{h}$$

Para poder conocer cuánto se consume de los reactivos en la reacción, se debe conocer cuál es el reactivo limitante, para lo cual al aplicar la Ecuación 6. Se debe escoger el reactivo cuyo resultado sea menor.

Ecuación 6.

Relación reactivo limitante.

$$\frac{Ent}{CS}$$

Nota. Es la reacción con la cual encontrar el reactivo limite.

Fuente: Absorción-enfriamiento esiqie. (18 de septiembre del 2020). Balance de Materia y Energía #1 : Introducción al Balance de Materia [archivo de video]. YouTube.

<https://youtu.be/oZ0ltHNB914>.

Donde:

- Ent: Es la entrada de reactivo al reactor. Sin unidades.
- CS: Es la cantidad de sustancia que entra en el reactor, de acuerdo con la ecuación. Sin unidades.

Al desarrollar la Ecuación 6 para el aceite extraído:

$$\frac{Ent_{aceite\ extraído}}{CS_{aceite\ extraído}} = \frac{3,59}{1} = 3,59$$

Al desarrollar la Ecuación 6 para el metanol:

$$\frac{Ent_{metanol}}{CS_{metanol}} = \frac{2095,63}{1} = 2095,63$$

De los anteriores resultados, es evidente que el reactivo limitante es el aceite extraído. Por otro lado, según Efthymiopoulos, Ioannis. Para un proceso de transesterificación de dos pasos como el escogido en este proyecto, es habitual encontrar un rendimiento del 86,7% [25]. Para poder conocer la sustancia consumida se presenta la Ecuación 7:

Ecuación 7.

Consumo del reactivo con respecto al rendimiento de la reacción

$$Con = Ent * Rendimiento$$

Nota. Es la reacción con la cual encontrar el reactivo limite. Fuente: Absorción-enfriamiento esiqie. (18 de septiembre del 2020). Balance de Materia y Energía #1 : Introducción al Balance de Materia [archivo de video]. YouTube.
<https://youtu.be/oZ0ltHNB914>.

Donde:

- Con: Es lo que se consume del reactivo durante la reacción.
- Ent: Es lo que entra de reactivo en la reacción.
- Rendimiento: Es el rendimiento que se ha encontrado de la reacción.

Al desarrollar la Ecuación 7 para el reactivo limitante:

$$Con_{aceite\ extraído} = Ent_{aceite\ extraído} * Rendimiento_{esterificación}$$

$$Con_{aceite\ extraído} = 3,59 \frac{kmol}{h} * 0,867$$

$$Con_{aceite\ extraído} = 3,11 \frac{kmol}{h}$$

Con el fin de conocer el consumo de metanol, al ser el reactivo en exceso, se calcula con la relación de las cantidades de sustancia que entran, con la Ecuación 8:

Ecuación 8.

Consumo de reactivos.

$$Con = Con_{reactivo\ limitante} * \left(\frac{CS}{CS_{reactivo\ limitante}} \right)$$

Nota. Es la ecuación para conocer el consumo de reactivos. Fuente: Absorción-enfriamiento esiqie. (18 de septiembre del 2020). Balance de Materia y Energía #1 : Introducción al Balance de Materia [archivo de video]. YouTube. <https://youtu.be/oZ0ltHNB914>.

Donde:

- Con: Es el consumo del reactivo que se quiere conocer.
- $Con_{reactivo\ limitante}$: Es la cantidad de reactivo limitante que se consume.
- CS: Es la cantidad molar de la sustancia que se quiere conocer.
- $CS_{reactivo\ limitante}$: Es la cantidad molar de la sustancia limitante.

Al desarrollar la Ecuación 8 para el consumo de metanol:

$$Con_{Metanol} = Con_{aceite\ extraído} * \left(\frac{CS_{Metanol}}{CS_{aceite\ extraído}} \right)$$

$$Con_{Metanol} = 3,11 \frac{kmol}{h} * \left(\frac{1Kmol}{1Kmol} \right)$$

$$Con_{Metanol} = 3,11 \frac{kmol}{h}$$

Para poder conocer la corriente J o la salida del reactor en kg/h y debido a que la relación entre las sustancias generadas y el reactivo limitante siempre es de 1, el agua que se genera también es de 3,11 kmol/h y el aceite esterificado es de 3,11 kmol/h. Por la misma razón, en esta reacción lo que entra es lo que debe salir, teniendo en cuenta que por un lado sale el agua y por el otro sale la mezcla entre el aceite esterificado y el metanol que no reaccionó. Se reemplaza la ecuación 5 en la ecuación 2:

$$J = Ent_{aceite\ extraído} * PM_{aceite\ extraído} + Ent_{metanol} * PM_{metanol} - Sal_{H_2O} * PM_{H_2O}$$

$$J = 3,59 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} * \frac{934,58 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{1000} + 2095,63 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} * \frac{32,04 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{1000} - 3,11 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} * \frac{18,02 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{1000}$$

$$J = 70,44 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Para conocer la corriente K, se toma la Ecuación 5 reemplazándola en la Ecuación 2:

$$K = Sal_{H_2O} * PM_{H_2O}$$

$$K = 3,11 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} * \frac{18,02 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{1000}$$

$$K = 0,05 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Finalmente, en esta etapa, la mezcla de aceite esterificado y de metanol entra en un decantador donde se van a separar, para lo cual conociendo la cantidad de metanol que hay en la corriente J, que es la misma corriente M, el metanol que sale del decantador y este se puede restar de la corriente J y obtener la cantidad de aceite esterificado que sale de esta etapa. Para esto, de la Ecuación 5, se saca la parte del metanol que hay presente, así:

$$J_{\text{metanol}} = Ent_{\text{metanol}} * PM_{\text{metanol}}$$

$$J_{\text{metanol}} = 2095,63 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} * \frac{32,04 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{1000}$$

$$J_{\text{metanol}} = 67,14 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$J_{\text{metanol}} = M$$

Para conocer la corriente L, como se mencionó anteriormente, se puede restar la corriente M de la corriente J así en la Ecuación 2:

$$L = J - M$$

$$L = 70,44 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - 67,14 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$L = 3,4 \frac{kg}{h}$$

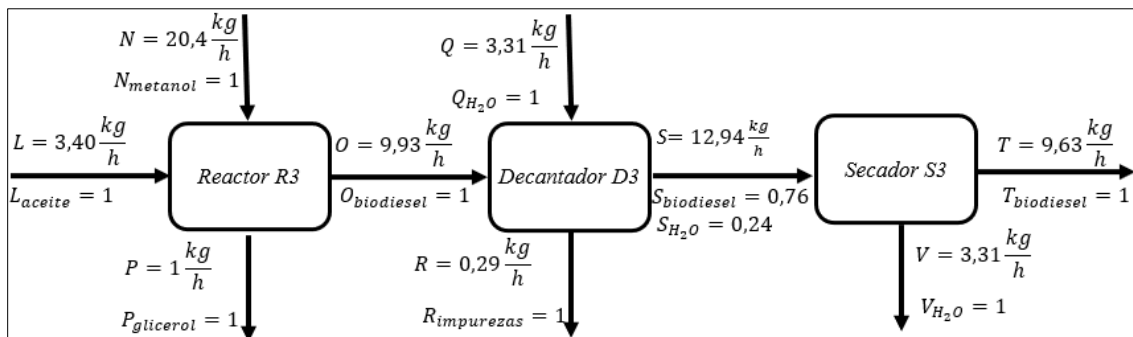
Con la corriente L, sale el aceite esterificado de la segunda etapa para la tercera etapa.

2.4.4. Balance de materia de la etapa de transesterificación

En esta última etapa del proceso de producción del biodiesel con base en la borra de café, la fase esterificada del aceite entra primero al reactor donde va a ocurrir la transesterificación con una relación de metanol con respecto a la fase esterificada $1 \text{ g}_{\text{aceite}}/6 \text{ g}_{\text{metanol}}$ y KOH como catalizador al 1,5%. Del balance de materia con reacción se obtiene un resultado de biodiesel del 9,93 kg/h, flujo del cual se extraerá impurezas (un estimado del 3% en peso del biodiesel) mediante un lavado con agua destilada, de donde sale un flujo de 12,62 kg/h con Biodiesel al 78% y agua destilada al 23%. Ambos entran en un horno para poder separar y obtener el biodiesel final en un flujo de 9,93 kg/h.

Figura 14.

Balance de materia de la etapa de transesterificación



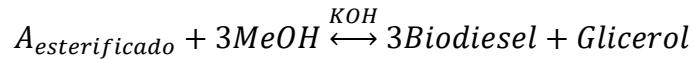
Nota. En esta figura se esquematiza la tercera etapa (transesterificación) de producción de Biodiesel a partir de la borra de café, se encuentran los siguientes dos equipos de la producción.

En la tercera etapa entra el flujo másico de la corriente L, que contiene el aceite que fue esterificado, en el otro reactor, Reactor R3 donde se va a dar la reacción de la transesterificación

que se muestra en la Ecuación (22). Para esta reacción también va a entrar metanol en una relación 1 gaceite/6 gmetanol, es decir una corriente N de 20,4 kg/h con el fin de obtener biodiesel con glicerol.

Ecuación 9.

Reacción de la transesterificación.



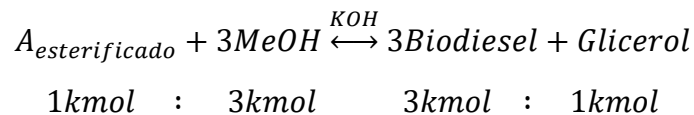
Nota. Es la ecuación de la reacción de esterificación.

Fuente: E. A. Bulla Pereira, “Diseño del proceso de producción del biodiesel a partir de aceites de fritura,” 2014.

Donde:

- $A_{esterificado}$: Es la cantidad de aceite esterificado que entra en el Reactor R3 como reactivo.
- MeOH: Es la cantidad de metanol que entra en el Reactor R3 como reactivo.
- KOH: Es el hidróxido de potasio que entra en el Reactor R3 como catalizador.
- Biodiesel: Es una de las sustancias que se producen de la reacción.
- Glicerol: Es la otra sustancia que se produce de la reacción.

Debajo de la Ecuación 9 se conocen los coeficientes estequiométricos o las cantidades molares de cada sustancia, a continuación:



Para poder convertir la concentración de las sustancias de masa a moles se utiliza la ecuación 5 y para poder desarrollar la ecuación se presentan los pesos molares de cada sustancia:

- $PM_{glicerol}=92,09 \text{ g/mol}[30]$
- $PM_{biodiesel}= 303,15 \text{ g/mol}[64]$
- $A_{esterificado} = 284,04 \text{ g/mol}[30]$

Al desarrollar la Ecuación 5 para el aceite esterificado del Reactor R3:

$$M_{o_{aceite\ esterificado}} = \frac{MS_{aceite\ esterificado}}{PM_{aceite\ esterificado}}$$

$$M_{o_{aceite\ esterificado}} = \frac{3,4 \frac{kg}{h}}{\frac{284,04 \frac{g}{mol}}{1000}}$$

$$M_{o_{aceite\ esterificado}} = 11,99 \frac{kmol}{h}$$

Al desarrollar la Ecuación 5 para el metanol del Reactor R3:

$$M_{o_{aceite\ esterificado}} = \frac{MS_{aceite\ esterificado}}{PM_{aceite\ esterificado}}$$

$$M_{o_{aceite\ esterificado}} = \frac{3,4 \frac{kg}{h} * 6}{\frac{32,04 \frac{g}{mol}}{1000}}$$

$$M_{o_{aceite\ esterificado}} = 638,02 \frac{kmol}{h}$$

Para poder conocer cuánto se consume de los reactivos en la reacción, se debe conocer cuál es el reactivo limitante, para lo cual al aplicar la Ecuación 6 se debe escoger el reactivo cuyo resultado sea menor. Al desarrollar la Ecuación 6 para el aceite esterificado:

$$\frac{Ent_{aceite\ esterificado}}{CS_{aceite\ esterificado}}$$

$$\frac{11,9}{1} = 11,9$$

Al desarrollar la Ecuación 6 para el metanol:

$$\frac{Ent_{metanol}}{CS_{metanol}}$$

$$\frac{638,02}{3} = 212,67$$

Como se puede observar, el reactivo limitante es el aceite esterificado, con el cual se puede llegar a conocer cuanta sustancia se consume en la reacción sabiendo que bajo las configuraciones de parámetros de la reacción de transesterificación que se escogieron Castro Hernández, Camila A. obtuvo un rendimiento del proceso de 91,11%[2]. Con la Ecuación 7 se puede conocer cuál es el aceite esterificado consumido:

$$Con_{aceite\ esterificado} = Ent_{aceite\ esterificado} * Rendimiento_{transesterificación}$$

$$Con_{aceite\ esterificado} = 11,99 \frac{kmol}{h} * 0,91$$

$$Con_{aceite\ esterificado} = 10,92 \frac{kmol}{h}$$

Con el fin de conocer el consumo de metanol, al ser el reactivo en exceso, se calcula con la relación de las cantidades de sustancia que entran, con la Ecuación 8

$$Con_{metanol} = Con_{aceite\ esterificado} * \left(\frac{CS_{metanol}}{CS_{aceite\ esterificado}} \right)$$

$$Con_{metanol} = 10,92 \frac{kmol}{h} * \left(\frac{3kmol}{1kmol} \right)$$

$$Con_{metanol} = 32,78 \frac{kmol}{h}$$

Por otro lado, para poder conocer cuánto se generó de biodiesel en el Reactor R3, se da la Ecuación (23).

Ecuación 10.

Ecuación para conocer la generación

$$Gen = Con_{reactivo\ limitante} * \left(\frac{CS}{CS_{reactivo\ limitante}} \right)$$

Nota. Es la ecuación para conocer la generación. Fuente: Absorción-enfriamiento esiqie. (18 de septiembre del 2020). Balance de Materia y Energía #1 : Introducción al Balance de Materia [archivo de video]. YouTube. <https://youtu.be/oZ0ltHNB914>.

Donde:

- Gen: Es la cantidad de sustancia que se genera en la reacción
- $Con_{\text{reactivo limitante}}$: Es la cantidad de reactivo limitante que se consume durante la reacción.
- CS: Es la cantidad molar de la sustancia que se quiere conocer.
- $CS_{\text{reactivo limitante}}$: Es la cantidad molar de la sustancia limitante.

Al desarrollar la Ecuación 10 para la generación del biodiesel:

$$Gen_{biodiesel} = Con_{aceite\ esterificado} * \left(\frac{CS_{biodiesel}}{CS_{aceite\ esterificado}} \right)$$
$$Gen_{biodiesel} = 10,92 \frac{kmol}{h} * \left(\frac{3kmol}{1kmol} \right)$$
$$Gen_{biodiesel} = 32,78 \frac{kmol}{h}$$

La corriente O se compone del biodiesel que se genera en el Reactor R3, para esto se requiere realizar la conversión de concentración molar a concentración en masa, para esto de la Ecuación 5 se despeja la masa de la sustancia así:

$$Mo = \frac{MS}{PM}$$
$$MS = Mo * PM$$
$$MS_{biodiesel} = Mo_{biodiesel} * PM_{biodiesel}$$
$$MS_{biodiesel} = 32,78 \frac{kmol}{h} * \frac{303,15 \frac{g}{mol}}{1000}$$
$$MS_{biodiesel} = 9,93 \frac{kg}{h}$$
$$MS_{biodiesel} = O$$

Al desarrollar la Ecuación 10 para la generación del glicerol:

$$Gen_{glicerol} = Con_{aceite\ esterificado} * \left(\frac{CS_{glicerol}}{CS_{aceite\ esterificado}} \right)$$

$$Gen_{glicerol} = 10,92 \frac{kmol}{h} * \left(\frac{1kmol}{1kmol} \right)$$

$$Gen_{glicerol} = 10,92 \frac{kmol}{h}$$

La corriente P se compone del glicerol que se genera en el Reactor R3, para esto se requiere realizar la conversión de concentración molar a concentración en masa, para esto de la Ecuación 5 se despeja la masa de la sustancia así:

$$Mo = \frac{MS}{PM}$$

$$MS = Mo * PM$$

$$MS_{glicerol} = Mo_{glicerol} * PM_{glicerol}$$

$$MS_{glicerol} = 10,92 \frac{kmol}{h} * \frac{92,09 \frac{g}{mol}}{1000}$$

$$MS_{glicerol} = 1 \frac{kg}{h}$$

$$MS_{glicerol} = P$$

Posteriormente, como el biodiesel generado en el Reactor R3, sale con impurezas, debe ser lavado y para esto, en un Decantador D3 entra con una corriente Q, que contiene agua en 1/3 la cantidad de biodiesel. Por lo anterior, se sabe que la corriente Q es de 3,31 kg/h de agua. También, se sabe que dentro de este equipo no hay reacción y que se espera un 3% de impurezas en el biodiesel. Por esto mismo se presenta un balance como los de la primera etapa, partiendo de la Ecuación 2 para calcular la corriente S:

$$S = O + Q - O * 0,03$$

$$S = 9,93 \frac{kg}{h} + 3,31 \frac{kg}{h} - 9,93 \frac{kg}{h} * 0,03$$

$$S = 9,93 \frac{kg}{h} + 3,31 \frac{kg}{h} - 9,93 \frac{kg}{h} * 0,03$$

$$S = 12,94 \frac{kg}{h}$$

Mientras que para calcular la corriente R o las impurezas que salen del Decantador D3 se presenta la Ecuación 3:

$$R = O * 0,03$$

$$R = 9,93 \frac{kg}{h} * 0,03$$

$$R = 0,29 \frac{kg}{h}$$

Finalmente, la corriente S, Que es la mezcla entre el agua y el biodiesel entra en un Secador S3 para que el agua se evapore y solo quede el biodiesel ya purificado. La corriente T es la cantidad de Biodiesel de la corriente O sin el 3% de impurezas, para esto la Ecuación 3 se reemplaza en la Ecuación 2:

$$T = O - O * 0,03$$

$$T = 9,93 \frac{kg}{h} - 9,93 \frac{kg}{h} * 0,03$$

$$T = 9,93 \frac{kg}{h} - 9,93 \frac{kg}{h} * 0,03$$

$$T = 9,63 \frac{kg}{h}$$

Lo último es verificar el valor del agua o de la corriente V que se evapora, y para esto se debe restar de la corriente S el biodiesel purificado en la Ecuación 2:

$$V = S - T$$

$$V = 12,94 \frac{kg}{h} - 9,63 \frac{kg}{h}$$

$$V = 3,31 \frac{kg}{h}$$

2.4.5. *Capacidad del proceso*

De acuerdo con los balances de materia realizados previamente para conocer la capacidad de producción que se tiene con el proceso seleccionado, se obtienen los flujos másicos que entrarán en cada uno de los equipos; sin embargo, como los catalizadores no generan ningún tipo de reacción no se consideran en los balances de materia, por esto debe realizarse la suma del catalizador a los flujos másicos conocidos hasta ahora, esto con el fin de lograr la selección adecuada de equipos que serán objeto de estudio en el presente proyecto. Para poder conocer dichos valores se obtiene la Ecuación 11 y estos valores se presentan en la Tabla 11. Alimentación de equipos.

Ecuación 11.

Alimentación de equipos.

$$Almientación_{equipo} = Ent_{equipo}$$

Nota. Es la ecuación para conocer la alimentación a los diferentes equipos.

Donde:

- $Almientación_{equipo}$: Es el valor de la alimentación con el cual se escogieran los equipos.
- Ent_{equipo} : Son todas las entradas de materia en los equipos de cada proceso.

Al desarrollar la Ecuación 11 para el Secador S1:

$$Almientación_{secador S1} = Ent_{secador S1}$$

$$Almientación_{secador S1} = A$$

$$Almientación_{secador S1} = 23,98 \frac{kg}{h}$$

Al desarrollar la Ecuación 11 para el Extractor E1:

$$Almientación_{extractor E1} = Ent_{extractor E1}$$

$$Almientación_{extractor E1} = C + D$$

$$Alimentación_{extractor E1} = 8,15 \frac{kg}{h} + 179,37 \frac{kg}{h}$$

$$Alimentación_{extractor E1} = 187,52 \frac{kg}{h}$$

Al desarrollar la Ecuación 11 para el Separador SF1:

$$Alimentación_{separador SF1} = Ent_{separador SF1}$$

$$Alimentación_{separador SF1} = F$$

$$Alimentación_{separador SF1} = 182,72 \frac{kg}{h}$$

Al desarrollar la Ecuación 11 para el Reactor R2:

$$Alimentación_{Reactor R2} = Ent_{Reactor R2}$$

$$Alimentación_{Reactor R2} = G + I + catalizador$$

$$Alimentación_{Reactor R2} = G + I + G * 0,05$$

$$Alimentación_{Reactor R2} = 3,35 \frac{kg}{h} + 67,14 \frac{kg}{h} + 3,35 \frac{kg}{h} * 0,05$$

$$Alimentación_{Reactor R2} = 70,65 \frac{kg}{h}$$

Al desarrollar la Ecuación 11 para el Decantador D2:

$$Alimentación_{decantador D2} = Ent_{decantador D2}$$

$$Alimentación_{decantador D2} = J$$

$$Alimentación_{decantador D2} = 70,44 \frac{kg}{h}$$

Al desarrollar la Ecuación 11 para el Reactor R3:

$$Alimentación_{Reactor R3} = Ent_{Reactor R3}$$

$$\text{Alimentación}_{\text{Reactor } R3} = L + N + \text{catalizador}$$

$$\text{Alimentación}_{\text{Reactor } R3} = L + N + L * 0,015$$

$$\text{Alimentación}_{\text{Reactor } R3} = 3,4 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 20,4 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 3,4 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 0,015$$

$$\text{Alimentación}_{\text{Reactor } R3} = 23,85 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Al desarrollar la Ecuación 11 para el Decantador D3:

$$\text{Alimentación}_{\text{decantador } D3} = \text{Ent}_{\text{decantador } D3}$$

$$\text{Alimentación}_{\text{decantador } D3} = O + Q$$

$$\text{Alimentación}_{\text{decantador } D3} = 9,93 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 3,31 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\text{Alimentación}_{\text{decantador } D3} = 13,24 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Al desarrollar la Ecuación 11 para el Secador S3:

$$\text{Alimentación}_{\text{secador } S3} = \text{Ent}_{\text{secador } S3}$$

$$\text{Alimentación}_{\text{secador } S3} = S$$

$$\text{Alimentación}_{\text{secador } S3} = 12,94 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

En la Tabla 11 se presentan todos los resultados de alimentación de los equipos de cada una de las etapas, el Secador S, el Extractor E1, el Separador SF1 que hacen parte de la etapa 1; el Reactor R2, el Decantador D2 que hacen parte de la etapa 2: y el Reactor R3, el Decantador D3 y el Secador S3 que hacen parte de la etapa 3.

Tabla 11.*Alimentación de los equipos*

Equipo	Entrada	
Primera Etapa		
Secador S1	23,98	Kg/h
Extractor E1	187,52	Kg/h
Separador SF1	182,72	Kg/h
Segunda Etapa		
Reactor R2	70,65	Kg/h
Decantador D2	70,44	Kg/h
Tercera Etapa		
Reactor R3	23,85	Kg/h
Decantador D3	13,24	Kg/h
Secador S3	12,94	Kg/h

Nota. En esta tabla estan presentes los flujos que van a entrar en cada proceso de cada etapa del proceso seleccionado.

Es importante para esta parte considerar un filtro por el cual la borra debe pasar, antes de entrar en la primera etapa, para asegurar que no contenga material particulado diferente de la borra, este filtro, puede ser un tamiz que, de acuerdo con las configuraciones de la extracción debe tener una abertura de 0,5 mm como mínimo y 0,85 mm como máximo. Para entrar en la primera etapa, se requiere un secador el cual pueda admitir un flujo de alimentación de 23,98 kg/h de borra humedecida, de acuerdo con Morales Luis M. y Pérez David, la mejor opción para este proceso de secado es un horno secador al vacío[65]. Posteriormente, la borra entra al extractor con el hexano como solvente, con un flujo de 187,52 kg/h, el extractor debe ser de tipo soxhlet industrial, de acuerdo con lo escogido anteriormente. Una vez el aceite ha sido extraído, se debe separar del hexano; para lo cual se utilizará un separador tipo flash usado para evaporar el hexano, Es necesario que tenga una capacidad de al menos 182,72 kg/h, de acuerdo con el balance de materia presentado en la Figura 12. Balance de materia en la etapa de extracción.

Para la segunda etapa mostrada en la Figura 13. Balance de materia en la etapa de esterificación. Un reactor y un decantador son necesarios para llevar a cabo la reacción y para poder continuar los productos obtenidos a la siguiente etapa, en este caso el reactor en el cual se llevará a cabo la esterificación es un reactor tipo Batch con una capacidad mínima de 70,5 kg/h más un 30 %, por la generación de gases. Seguidamente en el proceso es necesario un decantador para poder separar el metanol residual del proceso de la fase esterificada, el cual debe admitir un flujo de al menos 70,44 kg/h.

En la última etapa que se ilustra en la Figura 14. Balance de materia de la etapa de transesterificación. Donde ya se obtiene el biodiesel con base en la borra del café, la fase esterificada llega a otro reactor tipo Batch junto con metanol y con KOH para dar lugar a la transesterificación, este último reactor debe admitir un flujo de entrada de 23,84 kg/h y al igual que anteriormente un 30 % de más. Como de esta reacción ya se obtiene el biodiesel; pero con impurezas, debe ser lavado para conseguir un biodiesel más puro, por esto un decantador de discos es necesario para llevar a cabo el paso de la limpieza o purificación del biodiesel con agua, el decantador de discos debe tener una capacidad mínima de 13,24 kg/h. Para finalizar, el secado del agua es importante para ya poder obtener el producto final, un horno de secado es preciso para poder evaporar el agua residual, con una capacidad de 12,94 kg/h.

Como lo muestra el balance de materia, al final del proceso de producción de biodiesel a partir de la borra de café se obtiene 9,63 kg/h. Para poder compararlo con las capacidades de las plantas de biodiesel que funcionan en Colombia actualmente y que se muestran en la Tabla 12. Plantas productoras de biodiesel en Colombia. debe ser convertido a un flujo másico anual. Para esto se genera la Ecuación 12:

Ecuación 12.

Producción de biodiesel anual

$$\text{Producción biodiesel anual} = Gen_{\text{biodiesel}} * f_{\text{conversión h a años}} * f_{\text{conversión kg a T}}$$

Nota. Es la Ecuación para conocer la producción de biodiesel anual.

Donde:

- Producción biodiesel anual: Es la capacidad anual del proceso de producción.
- $Gen_{biodiesel}$: Es la cantidad de biodiesel que se genera en el proceso por horas.
- $f_{conversión\ h\ a\ años}$: Es el factor de conversión de horas a años.
- $F_{conversión\ kg\ a\ T}$: Es el factor de conversión de kilogramos a toneladas.

Al desarrollar la Ecuación 12:

$$Producción\ biodiesel\ anual = 9,63 \frac{kg}{h} * \frac{8776h}{1año} * \frac{1T}{1000kg}$$

$$Producción\ biodiesel\ anual = 84,51 \frac{T}{año}$$

Al comparar la Tabla 12. Plantas productoras de biodiesel en Colombia. Y los resultados obtenidos con la Ecuación 12, se puede notar que con el proceso de producción diseñado no se alcanza al valor mínimo de las plantas que actualmente funcionan en Colombia; sin embargo, al ser una materia prima nueva para este proceso en el país y partiendo de que la capacidad anual cumple con la demanda nacional mostrada en la Figura 6. Demanda nacional del biodiesel en Colombia. Este biodiesel producido a partir de la borra de café entraría en el comercio con una buena capacidad para darse a conocer.

Tabla 12.*Plantas productoras de biodiesel en Colombia*

Región	Empresa	Capacidad [T/año]
Santa Marta, Magdalena	Biocombustibles sostenibles del Caribe	110000
Codazzi, Cesar	Oleoflores	70000
Barranquilla, Atlántico	Romil de la costa	0
Gálapa, Atlántico	Biodiésel de la costa	0
Santa Marta, Magdalena	Odín Energy	0
Facatativá, Cundinamarca	BioD	200000
Barrancabermeja, Santander	Ecodiesel Colombia	130000
San Carlos de Guaroa, Meta	Aceites Manuelita	115200
San Carlos de Guaroa, Meta	Inversiones la Paz	70000
Barrancabermeja, Santander	ALPO	12000
Santa Marta, Magdalena	Biocosta Green Energy	60000
Total		767200

Nota. En esta tabla se contemplan las diferentes capacidades (T/año) de producción de biodiesel en las diferentes plantas ubicadas en el territorio nacional. Reelaborada por el autor. Tomada de: “Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia.” https://www.fedebiocombustibles.com/estadistica-mostrar_info-titulo-Biodiesel.htm

3. SELECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LOS EQUIPOS

A partir de las selecciones de las etapas, cada subproceso de las etapas, sus configuraciones y al conocer que equipos son los necesarios, se pretende escoger en cada etapa los equipos que mejor se adapten al proceso.

3.1. Equipos utilizados en las etapas de producción

3.1.1. Valoración de los diferentes equipos

En esta parte, se presentarán dos opciones de los equipos con el fin de determinar cuál conviene más en la producción de biodiesel que se está configurando. Para ello se extraerá de diferentes catálogos, los equipos que más se acerquen a la necesidad del proceso.

3.1.2. Reactores

Este proceso de producción se centra en tres partes importantes, de las cuales dos comparten el mismo tipo de equipo y pueden ser seleccionados a la par, estas partes son las reacciones de esterificación y la de la transesterificación, como se mencionó anteriormente 70,65 kg/h y 23,85 kg/h respectivamente más un 30% cada uno, son los datos de alimentación mínimos necesarios para encontrar los reactores adecuados. Teniendo en cuenta el 30% en cada equipo, los datos de flujo de alimentación son de 91,84 kg/h para el primer reactor y de 31 kg/h para el reactor de la transesterificación. Con esto y el saber el tipo de reactores (tipo Batch) es posible entrar en un catálogo de reactores y encontrar el que se acomode a los procesos. Y partiendo de estos datos, en la investigación de reactores tipo Batch industriales, se encuentran los equipos de la Figura 15. Opción A: Reactor tipo Batch industrial marca Qiangzhong. Y la Figura 16. Opción B: Reactor tipo Batch industrial marca KEDA, por catálogo.

Debido a que en los catálogos se encuentra la capacidad en litros, el flujo de alimentación se puede convertir a esta unidad partiendo de la densidad del metanol (792 kg/m^3 [2]), del aceite de la borra ($894,76 \text{ kg/m}^3$ [2]), el ácido sulfúrico (1830 kg/m^3 [66]) y el hidróxido de potasio (2120 kg/m^3 [67]).

Ecuación 13.

Ecuación de la densidad.

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Nota. Es la ecuación para conocer la densidad.

Fuente: Jorge Cogollo. (25 de diciembre del 2013).

Densidad de una mezcla [archivo de video].

YouTube. <https://youtu.be/LuuagJCE06s>

Donde:

- ρ : Es la densidad de la sustancia.
- m : Es la masa de la sustancia.
- v : Es el volumen de la sustancia.

Al despejar el volumen de la Ecuación 13 para el metanol que entra al Reactor R2 y convirtiendo las unidades de m^3 a L:

$$\begin{aligned}v_{metanol} &= \frac{m_{metanol}}{\rho_{metanol}} \\v_{metanol} &= \frac{67,14 \frac{kg}{h}}{792 \frac{kg}{m^3} * \frac{1m^3}{1000L}} \\v_{metanol} &= 84,77 \frac{L}{h}\end{aligned}$$

Al despejar el volumen de la Ecuación 13 para el aceite que entra al Reactor R2 y convirtiendo las unidades de m^3 a L:

$$v_{aceite} = \frac{m_{aceite}}{\rho_{aceite}}$$

$$v_{aceite} = \frac{3,35 \frac{kg}{h}}{894,76 \frac{kg}{m^3} * \frac{1m^3}{1000L}}$$

$$v_{aceite} = 3,74 \frac{L}{h}$$

Al despejar el volumen de la Ecuación 13 para el ácido sulfúrico que entra al Reactor R2 como catalizador y convirtiendo las unidades de m³ a L:

$$v_{ácido\ sulfúrico} = \frac{m_{aceite}}{\rho_{aceite}}$$

$$v_{ácido\ sulfúrico} = \frac{0,167 \frac{kg}{h}}{1830 \frac{kg}{m^3} * \frac{1m^3}{1000L}}$$

$$v_{ácido\ sulfúrico} = 0,091 \frac{L}{h}$$

Obteniendo los resultados, deben sumarse e incrementarse esta suma en un 30% para obtener la capacidad mínima del Reactor R2 en L/h

$$Capacidad_{reactor\ R2} = (v_{metanol} + v_{aceite} + v_{ácido\ sulfúrico}) * (1 + 0,3)$$

$$Capacidad_{reactor\ R2} = \left(84,77 \frac{L}{h} + 3,74 \frac{L}{h} + 0,091 \frac{L}{h}\right) * (1 + 0,3)$$

$$Capacidad_{reactor\ R2} = 115,18 \frac{L}{h}$$

Al despejar el volumen de la Ecuación 13 para el metanol que entra al Reactor R3 y convirtiendo las unidades de m³ a L:

$$v_{metanol} = \frac{m_{metanol}}{\rho_{metanol}}$$

$$v_{metanol} = \frac{20,4 \frac{kg}{h}}{792 \frac{kg}{m^3} * \frac{1m^3}{1000L}}$$

$$v_{metanol} = 25,75 \frac{L}{h}$$

Al despejar el volumen de la Ecuación 13 para el aceite que entra al Reactor R3 y convirtiendo las unidades de m³ a L:

$$v_{aceite} = \frac{m_{aceite}}{\rho_{aceite}}$$

$$v_{aceite} = \frac{3,4 \frac{kg}{h}}{894,76 \frac{kg}{m^3} * \frac{1m^3}{1000L}}$$

$$v_{aceite} = 3,8 \frac{L}{h}$$

Al despejar el volumen de la Ecuación 13 para el hidróxido de potasio que entra al Reactor R3 como catalizador y convirtiendo las unidades de m³ a L:

$$v_{hidroxido\ de\ potasio} = \frac{m_{aceite}}{\rho_{aceite}}$$

$$v_{hidroxido\ de\ potasio} = \frac{0,051 \frac{kg}{h}}{2120 \frac{kg}{m^3} * \frac{1m^3}{1000L}}$$

$$v_{hidroxido\ de\ potasio} = 0,024 \frac{L}{h}$$

Obteniendo los resultados, deben sumarse e incrementarse esta suma en un 30% para obtener la capacidad mínima del Reactor R3 en L/h

$$Capacidad_{reactor\ R2} = (v_{metanol} + v_{aceite} + v_{hidroxido\ de\ potasio}) * (1 + 0,3)$$

$$Capacidad_{reactor\ R2} = \left(25,75 \frac{L}{h} + 3,8 \frac{L}{h} + 0,024 \frac{L}{h}\right) * (1 + 0,3)$$

$$Capacidad_{reactor\ R2} = 38,44 \frac{L}{h}$$

Al realizar los cálculos adecuados desde la Ecuación 13, la capacidad en litros para el Reactor R2 de esterificación es de 115,18 L/h, mientras que para el Reactor R3 de transesterificación es de 38,44 L/h.

Figura 15.

Opción A: Reactor tipo Batch industrial marca Qiangzhong



FRK®
50L Experimental Electric-heating Mixing Tank
Widely used in industries of brewery, dairy products, beverage, daily chemicals, bio-pharmaceuticals, etc. Mix, disperse, emulsify, homogenize, transport, batch.....

Capacity (L)	Motor Power(kw)	Tank Body Height(mm)	Tank Body Diameter(mm)	Mixer Speed (r/min)	Working Pressure(Mpa)	Working Temperature	Accessories
300	0.55	600	800	36r/min (0~120r/min is optional)	≤0.09Mpa (atmospheric pressure)	< 160°C	Thermometer Safety Valve Pressure Gauge
400	0.55	800	800				
500	0.75	900	900				
800	0.75	1000	1000				
1000	0.75	1220	1000				
1500	1.5	1220	1200				
2000	2.2	1500	1300				
3000	3	1500	1600				

Nota. Esta figura es extraída del catálogo de reactores de la marca Qiangzhong. Fuente: “Industrial Stainless Steel Jacketed Batch Reactor 50l 100l 1000l 3000l – Buy Industrial Batch Reactor Price, Semi Batch Reactor Agitator, Stirred Batch Reactor 2500 L 4000 L 5000 L 8000 L 10000 L Product on Alibaba.com.”
https://www.alibaba.com/product-detail/Industrial-Batch-Reactor-Reactor-Industrial-Batch_1600301094600.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.69814659XW63y0&s=p

Figura 16.

Opción B: Reactor tipo Batch industrial marca KEDA



Product Description										
Reactor stirred tank industrial jacketed ss biodiesel batch cstr stainless steel mixing tank chemical reactor price										
Capacity	50L	100L	300L	500L	1000L	2000L	3000L	4000L	5000L	10000L
Motor Power	1.1KW	1.5KW	4KW	4KW	5.5KW	7.5KW	7-11KW	11-15KW	15-18.5KW	30KW
Inner Material	Stainless Steel 304/316									
Outer Material	Generally carbon steel (can be customized all stainless steel)									
Dimension(mm)	800*800*1600	900*900*1700	1100*1100*2000	1200*1200*2000	1400*1400*2600	2000*2000*3200	2200*2200*3400	2600*2600*4000	2700*2700*4200	2100*2100*5000
Weight(KG)	270	350	700	1000	1600	2100	2600	3200	4000	5000
Reactor type	Jacket electric heating reactor(water and oil)		Steam heating reactor(steam)		Outer coil reactor(Water, oil and steam)		Electric heating enamel reactor(water and oil)		Harmonic kettle(oil)	
Speed	63rpm/min(with gear reducer)									
Sealing way	Mechanical seals and packing seals									
Stirring way	Generally frame type, 63rpm/min (different speeds for different mixing methods)									

Nota. Esta figura es extraída del catálogo de reactores de la marca Qiangzhong. Fuente: “Reactor Stirred Tank Industrial Jacketed Ss Biodiesel Batch Cstr Lab Stainless Steel Resin Chemical Reactor Price – Buy Reactor, Reactor Stirred Tank Industrial Jacketed Ss Biodiesel Batch Cstr Lab Stainless Steel Resin Chemical Reactor, Stirred Tank Industrial Jacketed Ss Biodiesel Batch Cstr Chemical Lab Resin Stainless Steel Reactor Product on Alibaba.com.” https://www.alibaba.com/product-detail/Reactor-stirred-tank-industrial-jacketed-ss_62258146004.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.69814659XW63y0.

Ya que ambas reacciones tienen diferentes flujos de entrada lo más adecuado es elegir, desde los catálogos, dos reactores con diferente capacidad. Por lo anterior, para el caso del Reactor R3 donde

se realizará la transesterificación, el reactor más adecuado es el que cuenta con capacidad de 50 L marca Keda ya que el reactor con menos capacidad de la otra marca tiene una capacidad muy elevada para la disposición de este proceso de la etapa. Por otro lado, para el Reactor R2 de la esterificación, se escoge de la misma marca aquel con capacidad mínima de 300 L, ya que es el que más se adapta a la configuración del proceso.

3.1.3. Extractor

Otro de los equipos principales para la obtención de biodiesel es el extractor en donde se conseguirá el aceite a partir de la borra, para ser parte del proceso escogido debe cumplir con ser un equipo donde se pueda llevar a cabo un proceso de extracción soxhlet a nivel industrial y debe contar con una admisión de flujo de alimentación de 187,52 kg/h. Al igual que en la sección de los reactores, con esta información es posible encontrar catálogos en los cuales se pueda encontrar el equipo necesario para este proceso de producción. Para esto en la Figura 17 y en la Figura 18. Se presentan las opciones de los catálogos con las configuraciones de equipos más cercana a las configuraciones seleccionadas en el capítulo 2 de la presente investigación.

Figura 17.

Opción A: Extractor tipo soxhlet marca Zhejiang Sunny Machinery/OEM



El modelo	DTWZ D-6000L	DTWZ D-3000L	DTWZ D-2000L	DTWZ D-1000L
La presión en intercalar(SM)	< 0, 1			
La presión en la chaqueta (MPa)	< 0.25			
Pressurein cilindro (MPa)	0, 6-0, 7			
Diámetro de boca(mm)	450	400	400	350
Zona de calentamiento(m ²)	30	15	10	6
Zona de condensación (m ²)	60	30	20	12
Área de refrigeración (m ²)	1.5	1	1	1
La capacidad de evaporación (kg/h)	2000	1000	600	350
La dimensión(m)	6.5*4.8*8.8	6.15*4.5*7.13	5*3.8*5.5	4.13*3.4*5.5

Nota. Esta figura es extraída del catálogo de reactores de la marca Zhejiang Sunny Machinery/OEM. Tomada de: “China A escala industrial de alta eficiencia extractor Soxhlet Máquina de extracción de reflujo – Comprar Extractor de solvente en es.made-in-china.com.” https://es.made-in-china.com/co_senlichina/product_High-Efficiency-Industrial-Scale-Soxhlet-Extractor-Reflux-Extraction-Machine_osshnoggg.html

Figura 18

Opción B: Extractor tipo soxhlet marca Ruian Xuanli Machinery Co.



Specification

	TQ0.5	TQ1.0	TQ2.0	TQ3.0	TQ4.0	TQ5.0	TQ6.0	TQ8.0
Volume L	560	1300	2300	3300	4400	5500	6500	8900
Inner tank design pressure MPa	0.09							
Jacket design pressure MPa	0.3							
Heat exchange area m2	2.1	4	5	5.8	7.3	8.5	9.5	11
Condense area m2	3.0	5.0	5.0	8.0	10.0	10.0	10.0	12.0
Cooling area m2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5	1.5
Filter area m2	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.50	0.50	0.50
Waste discharge port mm	600	800	1000	1200	1200	1300	1400	1500
Man hole mm	300	400	400	400	450	450	450	500
Steam consumption kg/h	100	180	225	300	330	380	420	495
Cool water consumption T/h	2.6	4.2	4.2	6.8	6.8	8.5	8.5	10

Nota. Esta figura es extraída del catálogo de reactores de la marca Ruian Xuanli Machinery Co. Tomado de: “Stainless Steel Steam Soxhlet Plasma Extractor, Essential Oil Extractor - Buy Extractor, Plasma Extractor, Soxhlet Extractor Product on Alibaba.com.” https://www.alibaba.com/product-detail/stainless-steel-steam-soxhlet-plasma-extractor_1600088744839.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.f36c62fdjebQfq

Teniendo en cuenta los anteriores equipos de las diferentes marcas, el extractor tipo soxhlet que más incide en el proceso es el de la Figura 17. Opción A: Extractor tipo soxhlet marca Zhejiang Sunny Machinery/OEM con referencia DTWZ D1000L y de la marca Zhejiang Sunny

Machinery/OEM, ya que los otros tienen una capacidad muy elevada y se desaprovecharía el espacio que sobra.

3.1.4. Secadores

Como se menciona en la primera parte de esta sección para un secado de la borra de acuerdo con Morales Luis M. y Pérez David, la mejor opción para este proceso de secado es un horno secador al vacío [65]. Por lo anterior, este equipo será tomado para el secado de la borra de este proceso ya que además cumple con la admisión de alimentación de 23,98 kg/h como se muestra en la Figura 19. Secador eléctrico con bomba al vacío marca faithful.

Figura 19.

Secador eléctrico con bomba al vacío marca faithful

	
Características:	
Marca: Faithful	Dimensiones de interior (mm):
Modelo de Secador de vacío: DZ-2BCII (con controlador inteligente)	415×370×340
Capacidad de procesamiento: 30kg (15 kg/estante).	Dimensiones de exterior (mm):
Grado de vacío: < 133 Pa	680 × 560 × 540
Potencia nominal: 1400 W	Tensión de alimentación: 120 ~ 240V
Rango de temperatura: RT + 10 - 250°C	Peso: 92 kg
Relación de resolución (°T): 0.1°C	Materiales: Acero inoxidable tipo estándar
Movimiento (°T): ± 1%	Precio de proveedor (bomba incluida):
	\$480 US

Nota. Esta figura es extraída del catálogo de reactores de la marca faithful. Tomada de: L. M. Morales Rosales and D. O. Pérez Hernández, “Valorización de los residuos de café tostado y molido (borra de café), generados en el campus central de la universidad de el salvador,” San Salvador, 2020.

Por otro lado, para retirar el agua residual del biodiesel después del lavado es necesario un horno en el cual pueda entrar 12,62 kg/h del aceite, por la anterior selección, es posible encontrar en el catálogo de la marca Faithful un horno para este proceso, visto en la Figura 20. Secador eléctrico con bomba al vacío marca faithful, y ya que la capacidad está en unidades de volumen (litros), con los respectivos cálculos, partiendo con la densidad del biodiesel(0,826 g/ml[2]) y la del agua (1 g/ml[68]) , se obtiene que el flujo de entrada es de 15 L/h

Figura 20.

Secador eléctrico con bomba al vacío marca Faithful



Especificación	Cámara interna (W * D * HMM)	300 * 300 * 270	415 * 370 * 340	450 * 450 * 450
	Tamaño exterior (W * D * HMM)	480 * 480 * 606	560 * 540 * 680	640 * 590 * 780
	Tamaño de embalaje (W * D * HMM)	590 * 550 * 750	704 * 620 * 814	739 * 700 * 889
	Capacidad	24L	52L	91L
	Número de estante	2		
	Carga por bastidor	15kg		
	Espacio en los estantes	100mm	140mm	185mm
	Fuente de alimentación (50 / 60HZ)	AC220V / 3.6A	AC220V / 6.3A	AC220V / 9.1A
	Valoración actual			
	NW / GW (kg)	42/52	67/92	82/105

Nota. Esta figura es extraída del catálogo de reactores de la marca faithful. Tomada de: “horno de secado al vacío - Compre el producto del horno de secado al vacío en Huanghua Faithful Instrument Co., LTD.” <https://es.fairful.cc/Horno-de-secado-al-vac%C3%ADo-Precisian-SERIE-DZ-BIV-pd48033995.html>

3.1.5. Decantador

Otro de los equipos que hacen parte del proceso de producción según seleccionado es el decantador para separar el metanol del aceite esterificado después del Reactor R2. Se espera la selección de un decantador centrifugo con una capacidad de fluido de 70,55 kg/h (88L/h). Las opciones que se toman son las presentadas en la Figura 21. Opción A: Decantador centrifugo marca jiangsu blovebird centrifuge co. Ltd. Y en la Figura 22. Opción B: Decantador centrifugo de marca Keda.

Figura 21.

Opción A: Decantador centrifugo marca jiangsu blovebird centrifuge co. ltd



Product Parameter		
Model	HY80	HY120
Drum diameter (mm)	80	120
Half cone Angle	5°	6°
Feed tube diameter (mm)	12	18
Speed (rpm)	10000	8000
Capacity (L/H)	5-100	50-500
Length to diameter ratio	3.75	3.85
Motor power (kw)	4	7.5
Maximum separation factor	4400	4400
Weight (kg)	160	360
Overall dimensions (mm)	950*650*550	1150*750*650

Nota. Esta figura es extraída del catálogo de decantadores centrifugos de la marca jiangsu blovebird centrifuge co. ltd l. Tomada de: “Automatic Industrial Decanter Settling Centrifuge For Biotechnology Industry - Buy Series Horizontal Multistage Centrifugal Pump, Decanter Centrifugal Separator, Decanter Centrifuge Product on Alibaba.com.” https://www.alibaba.com/product-detail/Decanter-Centrifuge-Centrifuge-Decanter-Centrifuge-Price_62478413552.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_image.2e2c41f73oLYH1&s=p

Figura 22.

Opción B: Decantador centrifugo de marca Keda



Mode	KDCM-10	KDCM-30	KDCM-50	KDCM-135	KDCM-200	KDCM-400	KDCM-500
Diameter (mm)	300	450	600	800	1000	1200	1250
Capacity (L)	5	20	40	100	150	200	300
Max Load (kg)	7.5	30	60	135	200	350	380
Motor (kw)	0.75	1.5	3	5.5	7.5	15	18.5
Weight (kg)	200	300	650	1600	2200	3000	3200

Nota. Esta figura es extraída del catálogo de decantadores centrífugos de la marca jiangsu blovebird centrifuge co. ltd l. Tomada de: “Industrial Price Decanter Centrifuge - Buy Centrifuge, Decanter Centrifuge, Industrial Centrifuge Price Product on Alibaba.com.” https://www.alibaba.com/product-detail/Industrial-Price-Decanter-Centrifuge_62423796532.html?spm=a2700.7724857.normal_off er.d_title.2e2c41f73oLYH1


En el caso del decantador, la opción A, se encuentra un decantador que cumple las condiciones de flujo de entrada. El decantador elegido es el HY80 de la marca jiangsu blovebird centrifuge co. Ltd, que se muestra en la Figura 21. Opción A: Decantador centrifugo marca jiangsu blovebird centrifuge co. Ltd. en donde además se tiene claro cuáles son las revoluciones por minuto a las que se puede usar.

3.1.6. Separador

El separador, en este proceso es el que va a estar encargado de separar el hexano, evaporándolo para luego ser condensado y poder ser reutilizado en el mismo proceso. En este caso el separador tipo flash, para que pueda entrar en el proceso, debe cumplir con una capacidad mínima de 219.12 kg/h y se muestran en la Figura 23 y la Figura 24, que hacen referencia a los catálogos.

Figura 23.

*Opción A: Separador tipo flash marca
Mega Engineering*



Product Specification	
Material	all type
Material Grade	all
Max Design Pressure	10-20 bar
Gases Used	Oxygen
Storage Material	Water
Capacity	150-500 L
Surface Treatment	Color Coated
Wall Thickness	6-15 mm
Minimum Order Quantity	1 Unit

Nota. Esta figura es extraída del catálogo de separadores tipo flash de la marca Mega Engineering. Tomado de: “Flash Tanks, Max Design Pressure: 10-20 bar, Rs 70000 /unit Mega Engineering | ID: 22007230848.”

<https://www.indiamart.com/proddetail/flash-tanks-22007230848.html>.

Figura 24.

Opción B: Separador tipo flash marca Mahavas Precision

	
Capacity	100-500 L
Material	FRP, Stainless Steel, Aluminium Alloy
Features	Verical Orientation, High Temperature Resistance
Max Design Pressure	10-15 bar, 15-20 bar
Automation Grade	Semi-Automatic
Brand	Mahavas Precision

Nota. Esta figura es extraída del catálogo de separadores tipo flash de la marca Mahavas precision. Tomada de: “Stainless Steel Flash Vessel, Capacity: 100-500 L, | ID: 6273404073.” <https://www.indiamart.com/proddetail/flash-vessel-6273404073.html>.

La selección del separador se basa en la capacidad que este tenga, pero al ser de prácticamente la misma capacidad de los equipos de ambas opciones, se decide por el de menor costo, siendo este el separador tipo flash mostrado en la Figura23. Opción A: Separador tipo flash marca Mega Engineering, por un precio de aproximadamente 3600000 Cop contra aproximadamente 4500000 Cop de la opción B.

3.1.7. *Centrífuga de discos*

El último equipo que es utilizado para la obtención del biodiesel es la centrifuga de discos en donde se llevará a cabo el lavado o purificación del biodiesel que sale del Reactor R3, con la transesterificación, para eliminar las impurezas como los restos de glicerol que generarían jabón en el biodiesel y perjudicaría la combustión del biocombustible. Para este efecto, se debe seleccionar un equipo pertinente con respecto al flujo que debe entrar en esta parte del proceso de producción. Saliendo del balance de materia se obtiene un flujo de 13,24 kg/h de Biodiesel. Lo anteriormente corresponde a 14 L/h, ya que los catálogos se encuentran en esta unidad, como lo muestra los catálogos de las Figura 25 y la Figura 26.

Figura 25.

Centrifuga de discos marca SinoTech

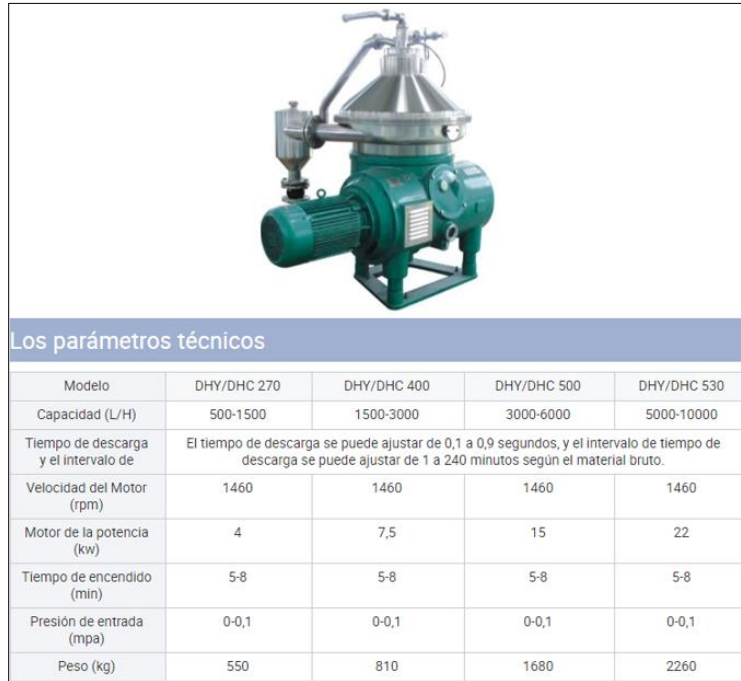


MAIN SPECIFICATION						
Model	Capacity (L/H)	Inlet pressure	Outlet pressure	Motor power (Kw)	Weight (kg)	Dimension
SY204	700-2000	0.05	0.1-0.25	4	408	810*850*1350
SY360	1200-2500	0.05	0.1-0.25	7.5	1280	1500*1150*1500
SY470	4000-7000	0.05	0.1-0.3	15	1880	1800*1200*1800
SY550	6000-15000	0.05	0.1-0.3	22	2200	1850*1550*2050
SY770	8000-25000	0.05	0.1-0.3	37	3300	2050*1700*2300

Nota. Esta figura es extraída del catálogo de centrifuga de discos de la marca SinoTech. Tomada de: “Planta De Biodiésel, Separador De Centrifuga, Pila De Disco, Tazón De Disco - Buy Disk Bowl Centrifuge, Almond Milk Separator, Chemical Separator Product on Alibaba.com.” <https://spanish.alibaba.com/product-detail/biodiesel-plant-centrifuge-separator-disc-stack-centrifuge-disk-bowl-centrifuge-1600286685769.html?spm=a2700.8699010.29.72.50f23a23CIVWT K>.

Figura 26.

Centrífuga de discos marca Sinoped



Nota. Esta figura es extraída del catálogo de centrífuga de discos de la marca Sinoped. Tomada de: “Decantador De Aceite De Oliva De Disco,Centrífuga Industrial De Gran Capacidad,Extractor De Etanol.”
<https://spanish.alibaba.com/product-detail/disc-olive-oil-decanter-centrifuge-large-capacity-industrial-ethanol-centrifuge-extractor-62462678571.html>

En este caso ambas centrífugas tienen una capacidad de flujo bastante superior al requerido por la selección de procesos; sin embargo, se escoge el equipo con una capacidad que se acerque más al flujo de entrada que queda de los balances de materia.

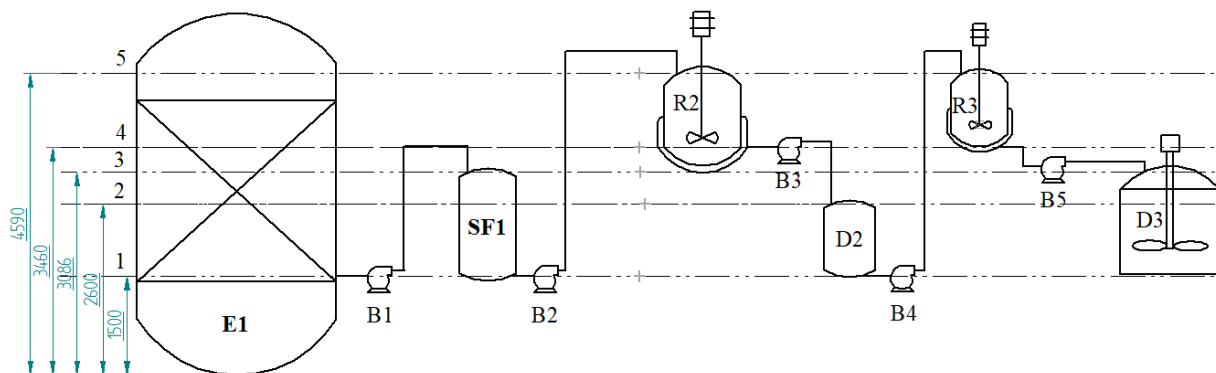
3.1.8. Bombas

En el caso del proceso seleccionado se vuelve necesario seleccionar 5 bombas que se encuentran en la Figura 27. Estimación geométrica de las entradas y salidas de las bombas. B1, que es la

bomba que transporta la mezcla de hexano con aceite extraído que sale del Extractor E1 hasta el Separador SF1; B2, que es la bomba que transporta el aceite extraído que sale del Separador SF1 hasta el Reactor R2; B3 que es la bomba que transporta la mezcla de metanol con aceite esterificado que sale del Reactor R2 hasta el Decantador D2; B4 que es la bomba que transporta el aceite esterificado que sale del Decantador D2 hasta el Reactor R2 y B5 que es la bomba que transporta la mezcla del biodiesel con metanol que sale del Reactor R3 hasta el Decantador D3. Las velocidades del fluido que se toman son de líquidos viscosos, es decir de 0,15 m/s para la entrada de la bomba y de 0,6 m/s para la salida de la bomba[69]. Como se muestra en la Figura 27, las bombas tienen una presión positiva a la entrada, por esto, a pesar de que impulsan fluidos como alcoholes con puntos de ebullición bajos, la cavitación no tiene grandes efectos y no se realizan los cálculos para determinar la cabeza de succión positiva neta (NPSH).

Figura 27.

Estimación geométrica de las entradas y salidas de las bombas



Nota. Esta figura muestra las medidas de las entradas y las salidas de las bombas que se encuentran en el proceso de producción.

Para la selección de las bombas, se requiere conocer la carga total de la bomba que a su vez se conoce con la Ecuación de Bernoulli que se presenta a continuación en la Ecuación 14, es importante conocer que como los equipos trabajan bajo la presión atmosférica, las presiones manométricas son de 0 y por ende se cancela el término de la cabeza de presión de las bombas:

Ecuación 14.

Ecuación de Bernoulli

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho * g} + (Z_2 - Z_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 * g} + h_f$$

Nota: Ecuación de continuidad de Bernoulli. Fuente: I. Mera López and A. Santos, “Diseño de una planta para la producción y purificación de biodiesel a partir de borra seca de café,” Cádiz, España, 2015.

Donde:

- H: Es la carga total de la bomba.
- $\frac{P_2 - P_1}{\rho * g}$: Es la cabeza de presión de la bomba.
- $(Z_2 - Z_1)$: Es la diferencia de alturas en la alimentación y descarga de la bomba.
- $\frac{v_2^2 - v_1^2}{2 * g}$: Es la cabeza de la bomba debido a las velocidades.
- h_f : Son las pérdidas exteriores de la bomba por fricción.

Por otro lado, es importante conocer la potencia con la cuál la bomba va a bombear el fluido, para esto se necesita la Ecuación de la potencia hidráulica en la Ecuación 15:

Ecuación 15.

Potencia de bombeo.

$$WHP = H * \rho * g * Q_{vol}$$

Nota: Ecuación de la potencia de la bomba. Fuente: I. Mera López and A. Santos, “Diseño de una planta para la producción y purificación de biodiesel a partir de borra seca de café,” Cádiz, España, 2015.

Donde:

- WHP: Es la potencia hidráulica que se necesita.
- H: Es la carga tota.
- ρ : Es la densidad de la corriente que pasa por la bomba.
- g : Es el valor de la gravedad.
- Q_{vol} : Es el caudal volumétrico de impulsión.

También se requiere la potencia que es absorbida por la bomba, con la Ecuación 16.

Ecuación 16.

Ecuación de la potencia absorbida.

$$BHP = \frac{WHP}{\eta}$$

Nota: Ecuación de potencia absorbida.

Fuente: I. Mera López and A. Santos, “Diseño de una planta para la producción y purificación de biodiesel a partir de borra seca de café,” Cádiz, España, 2015.

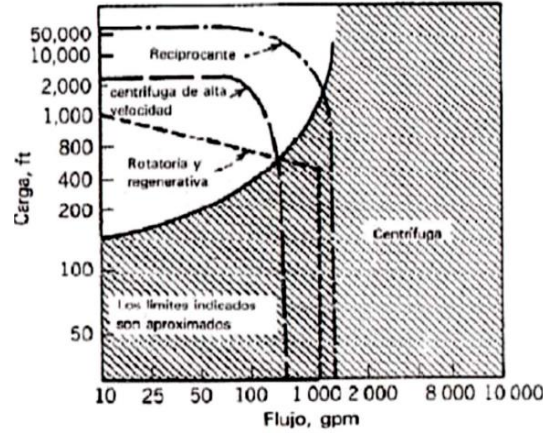
Al aplicar la Ecuación 14 en la bomba 1:

$$H_1 = \frac{P_2 - P_1}{\rho * g} + (Z_3 - Z_1) + \frac{v_3^2 - v_1^2}{2 * g} + h_f$$
$$H_1 = \frac{P_2 - P_1}{\rho * g} + (3,086m - 1,5m) + \frac{(0,6 \frac{m}{s})^2 - (0,15 \frac{m}{s})^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} + 8,9m$$
$$H_1 = 10,5m$$

Una vez conocida la carga total en pies (34,44 pies) de la bomba y teniendo el caudal volumétrico en gpm (1,21 gpm) que va a ser impulsado por la Bomba 1 B1, se puede seleccionar el tipo de bomba a partir de la Figura 28.

Figura 28.

Gráfica de tipos de bombas



Nota: Es la Figura con la cual se puede determinar qué tipo de bomba utilizar a partir del flujo en gmp y la carga total de la bomba en pies.

El tipo de bomba escogido para la Bomba 1 B1, es la bomba centrífuga y conociendo la densidad del hexano de 659 kg/m^3 [2] a partir de la Ecuación 15, de donde hay que reemplazar la Ecuación 13 y en esta sumar las dos sustancias mezcladas en esta corriente después del Extractor E1 y al igual en el caudal presente en la bomba 1:

$$\begin{aligned}
 WHP_1 &= H_1 * \rho_1 * g_1 * Q_{vol,1} \\
 WHP_1 &= H_1 * \frac{m_{hexano} + m_{aceite}}{v_{hexano} + v_{aceite}} * g_1 * Q_{vol,1} \\
 WHP_1 &= H_1 * \frac{\frac{m_{hexano}}{\rho_{hexano}} + \frac{m_{aceite}}{\rho_{aceite}}}{\frac{m_{hexano}}{\rho_{hexano}} + \frac{m_{aceite}}{\rho_{aceite}}} * g_1 * \left(\frac{m_{hexano}}{\rho_{hexano}} + \frac{m_{aceite}}{\rho_{aceite}} \right) \\
 WHP_1 &= 10,5m * \frac{(179,37kg) + (3,35kg)}{\frac{179,37kg}{659 \frac{kg}{m^3}} + \frac{3,35kg}{894,76 \frac{kg}{m^3}}} * 9,81 \frac{m}{s^2} * \left(\frac{179,37 \frac{kg}{h}}{659 \frac{kg}{m^3}} + \frac{3,35 \frac{kg}{h}}{894,76 \frac{kg}{m^3}} \right) * \frac{1h}{3600s} \\
 WHP_1 &= 5,23W
 \end{aligned}$$

Tomando un rendimiento global (hidráulico, volumétrico y mecánico) del 70% [70].

$$BHP = \frac{WHP}{\eta}$$

$$BHP = \frac{5,23W}{0,7}$$

$$BHP = 7,47W$$

Teniendo los datos presentados anteriormente se pretende realizar la selección de las bombas en el catálogo de bombas centrífugas de marca Hasa, que se presenta en la Figura 29.

Figura 29.

Catálogo de bombas centrífugas marca Hasa



Nota: De esta figura se selecciona la bomba que se va a utilizar para cada tránsito. Tomado de: Bombas Hasa, “Catálogo general 2015-2016,” España, 2015. Accessed: Dec. 10, 2021. [Online]. Disponible: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fwww.diceltro.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2017%2F10%2FBOMBAS-HASA-CATALOGO.pdf&clen=3325916&chunk=true](https://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fwww.diceltro.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2017%2F10%2FBOMBAS-HASA-CATALOGO.pdf&clen=3325916&chunk=true)

A partir de la Figura 29. Para la Bomba 1 B1, se toma la bomba marca Hasa modelo ECO-MAT 10. En la Tabla 13. Se presentan todos los datos calculados para la Bomba 1 B1.

Tabla 13.

Resumen de resultados para la bomba 1 B1.

Factor	Resultado	Unidades
Carga total	10,5	m
Potencia bombeo	5,23	W
Potencia absorbida	7,47	W
Caudal	7,66e-5	m ³ /s
Tipo de bomba	Centrífuga	
Modelo	ECO-MAT 10	
Material	AISI 316	

Nota: Esta tabla muestra los resultados obtenidos para B1, la bomba 1.

Realizando las mismas Ecuaciones 14, 15 y 16 para la Bomba 2 que va a impulsar el aceite separado del hexano, se dan los siguientes resultados mostrados en la Tabla 14.

Tabla 14.

Resumen de resultados para la bomba B2.

Factor	Resultado	Unidades
Carga total	12	m
Potencia bombeo	0,109	W
Potencia absorbida	0,15	W
Caudal	1,04e-6	m ³ /s
Tipo de bomba	Centrífuga	
Modelo	ECO-MAT 15	
Material	AISI 316	

Nota: Esta tabla muestra los resultados obtenidos para B2, la bomba 2.

Realizando las mismas Ecuaciones 14, 15 y 16 para la Bomba 3 que va a impulsar la mezcla entre metanol y aceite, se dan los siguientes resultados mostrados en la Tabla 14.

Tabla 15.

Resumen de resultados para la bomba 3 B3.

Factor	Resultado	Unidades
Carga total	8,05	m
Potencia bombeo	1,54	W
Potencia absorbida	2,2	W
Caudal	2,4e-5	m ³ /s
Tipo de bomba	Centrífuga	
Modelo	ECO-MAT 10	
Material	AISI 316	

Nota: Esta tabla muestra los resultados obtenidos para B3, la bomba 3.

Realizando las mismas Ecuaciones 14, 15 y 16 para la Bomba 4 que impulsa el aceite separado del metanol, se dan los siguientes resultados mostrados en la Tabla 15.

Tabla 16.

Resumen de resultados para la bomba 4 B4.

Factor	Resultado	Unidades
Carga total	12	m
Potencia bombeo	0,11	W
Potencia absorbida	0,16	W
Caudal	1,05e-6	m ³ /s
Tipo de bomba	Centrífuga	
Modelo	ECO-MAT 15	
Material	AISI 316	

Nota: Esta tabla muestra los resultados obtenidos para B4, la bomba 4.

Realizando las mismas Ecuaciones 14, 15 y 16 para la Bomba 5 que impulsa la mezcla de biodiesel con metanol, se dan los siguientes resultados mostrados en la Tabla 16.

Tabla 17.

Resumen de resultados para la bomba 5 B5.

Factor	Resultado	Unidades
Carga total	8,54	m
Potencia bombeo	0,55	W
Potencia absorbida	0,8	W
Caudal	8,2e-6	m ³ /s
Tipo de bomba	Centrífuga	
Modelo	ECO-MAT 10	

Material	AISI 316	
----------	----------	--

Nota: Esta tabla muestra los resultados obtenidos para B5, la bomba 5.

3.2. Diagramas del proceso

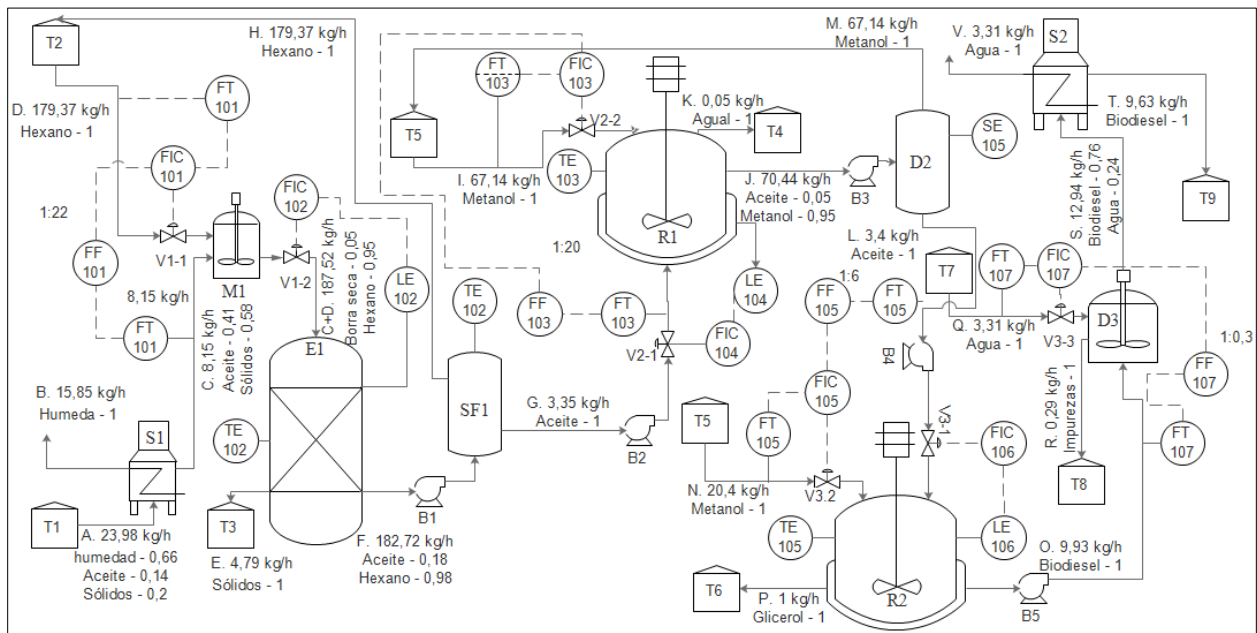
3.2.1. Diagrama P&ID

Siguiendo el diagrama P&ID, en el tanque (T1) entra la borra de café al proceso, este tanque es en donde se encuentra el tamiz como filtro para evitar que al proceso entre material particulado equivocado o indeseado. La borra que esta en este tanque, manualmente se debe introducir en el horno de secado (S1), durante una hora para su completo secado a 100°C; después la borra ya seca entra en el mezclador (M1) donde se va a mezclar con hexano almacenado en el tanque (T2), en este punto se encuentra el primer lazo de control, con una estrategia de relación para mantener siempre una entrada de hexano en una relación con borra de $1 \text{ g}_{\text{borra}}/22 \text{ g}_{\text{hexano}}$. Luego de que se genera la mezcla, esta entra en un extractor tipo Soxhlet (E1), donde se va a extraer el aceite de la borra a una temperatura de 25°C durante 2 horas, otro lazo de control permite conocer el nivel de llenado y la temperatura del equipo; los sólidos resultantes, también llamados torta, se van a almacenar en un tanque (T3). Por el otro lado, la mezcla de solvente y aceite entran en un separador tipo flash (SF1), donde por evaporación a 75°C, durante 1 hora se separarán ambos fluidos, el hexano regresa al tanque (T1), por otro lado el aceite extraído entra en el primer reactor tipo Batch (R1) donde se realizará la reacción de esterificación a 60°C durante 2 horas; en este punto se encuentra otra estrategia de control de relación para tener la seguridad de que en el Reactor (R2) siempre va a entrar a una relación $1 \text{ g}_{\text{aceite}}/20 \text{ g}_{\text{metanol}}$ con ácido sulfúrico en una concentración del 5% peso del aceite. De esta reacción sale agua que se almacena en un tanque (T4) y también sale una mezcla de aceite esterificado con metanol, esta mezcla es enviada a un decantador centrífugo (D2) donde se va a separar un fluido del otro a 60°C, el metanol es recirculado al tanque (T5) mientras que el aceite esterificado se envía al reactor (R3) donde se llevará a cabo la reacción de transesterificación a 60°C durante una hora con metanol como reactivo en una relación aceite esterificado/alcohol $1 \text{ g}_{\text{aceite}}/6 \text{ g}_{\text{metanol}}$ y como catalizador, hidróxido de potasio con una concentración de 1,5 % peso del aceite; para mantener esta relación con el alcohol, se genera otra

estrategia de control de tipo relación. Del reactor (R3) sale glicerol que se almacena en un tanque (T6) mientras que el biodiesel se lleva a un proceso de purificación o lavado con agua en un decantador de discos (D3). Punto donde se encuentra otro lazo de control para asegurar la relación de 3% de agua por peso de biodiesel que entre en el decantador (D3). Impurezas y mezcla de biodiesel con agua salen de este equipo por separado, el flujo de impurezas es remitidas a un tanque de desperdicios (T8) y la mezcla se transporta manualmente a un horno secador (S3) de donde el biodiesel sale sin agua para almacenamiento en un tanque (T9).

Figura 30.

Diagrama P&ID del proceso de producción seleccionado



Nota. En este diagrama se representa el proceso con los instrumentos de control pertinentes que se adicionan al proceso para un mejor procesado.

3.3. Análisis de desperdicios

3.3.1. Distribución de los equipos

3.4.1.a. Transporte. Todo movimiento innecesario que se haga con la borra de café o los aceites ya sea después de extraído, en fase esterificada o convertido en biodiesel, implica un desperdicio

del proceso productivo que debe evitarse a toda costa, Es por esto por lo que dentro del proceso de producción seleccionado se encuentra solo dos operaciones completamente necesarias en las que se debe hacer el descargue de los hornos y alimentación de la maquina o equipo siguiente, y en las que el producto en proceso es manejado por el operario. Con esto, se evitan traslados o manipulaciones innecesarias y posibles accidentes.

3.4.1.b. Inventario. Un alto nivel de inventario en la borra de café o en los insumos con los cuales se realizan la extracción o las reacciones, implica un sobre costo en el proceso de producción puede generar un problema en el mismo proceso. Como bien se ha venido mencionando a lo largo del documento, un almacenamiento prolongado de la borra puede provocar daños en su composición por la generación de hongos que se crean a raíz de su elevada humedad por venir de preparación de la bebida. El largo prolongamiento se daría si existe una cantidad elevada en el inventario. Debido a esto, se ha seleccionado también una cantidad específica de borra desde tiendas dedicadas a la preparación de la bebida y se conocen las relaciones que existen en cada equipo principal; es decir, la relación de Borra/Solvente en la extracción; la relación Aceite extraído/alcohol y Aceite Esterificado/alcohol.

3.4.1.c. Movimiento. Al no conocer los datos de una instalación física, pues no está contemplado en este proyecto, no es fácil conocer los desperdicios que se pueden generar por movimientos de personal o los recursos dentro del proceso. Sin embargo, una solución si se encontrase este tipo movimientos que no agregan valor al producto final, lo más recomendable es implementar las metodologías 5S que optimizan el proceso.

3.4.1.d. Esperas. Durante la aplicación del proceso pueden existir esperas por cuellos de botella en la línea de producción, diferencia de tiempos en los distintos equipos, falta de borra o de los insumos necesarios en las distintas operaciones. En este caso es evidente que se generan desperdicios por esperas, ya que existen procesos con diferentes tiempos de acción pero que no pueden saltar su orden, por esto se pueden generar cuellos de botella, por esto tambien los equipos principales cuentan con sensores de nivel para conocer el estado de la obtención de biodiesel.

3.4.1.e. Sobre procesamiento. Es indispensable la reevaluación de los procesos productivos en la industria, debido a que constantemente se conocen nuevas tecnologías que pueden mejorar el

ritmo de producción, como también pueden optimizarla. Conocido esto, la mejor opción es estar en todo momento, revisando que parte del proceso puede ser mejorada y cual resulta innecesaria, analizar tecnologías nuevas que posiblemente puedan mejorar el proceso, eliminando tareas que con estas implementaciones serían obviadas.

3.4.1.f. Sobreproducción. Producir más de lo necesario es un factor que garantiza un desperdicio ya que hay que tener en cuenta el almacenamiento del biodiesel. En el caso de este proceso de producción seleccionado, al ser una alternativa al proceso actual, empezando por la materia prima, y que además entra a competir con gigantes que producen el biodiesel habitual en Colombia; inicia con una capacidad de producción reducida en comparación. Desperdicios en el caso del biodiesel a partir de la borra de café en este proceso seleccionado no se contemplan.

3.4.1.g. Defectos. Se pueden obtener defectos del proceso por una mala inspección y en los puntos inadecuados de la línea. No se consideran ahora, debido a que la selección de las configuraciones de cada etapa se basó en los resultados que obtuvieron distintas pruebas en investigaciones pasadas. Por ende, las etapas y configuraciones que se seleccionaron son las adecuadas, al menos a la luz de los resultados obtenidos previamente. En el caso de la selección de los equipos, al igual que lo anterior se seleccionaron con el conocimiento de los requerimientos de cada etapa.

4. MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

4.1. Manual de operación y mantenimiento

4.1.1. *Fichas técnicas de los equipos*

En esta parte es importante conocer, tanto los dimensionamientos de los equipos, como también su funcionalidad dentro del proceso seleccionado. Es por esto, que a continuación se presentan las fichas técnicas en la Figura 31, Figura 32, Figura 33, Figura 34, Figura 35, Figura 36, Figura 37 y Figura 38 de los equipos más relevantes del proceso de producción de biodiesel a partir de la borra de café. Dichas fichas técnicas contienen además del funcionamiento y las dimensiones algunas otras características como el precio:

Figura 31.

Ficha técnica del Reactor (R2)

FICHA TECNICA: REACTOR ESTERIFICACIÓN			
MÁQUINA-	Reactor	UBICACIÓN	N/R
FABRICANTE	Keda	SECCIÓN	ETAPA #2
MODELO	N/R	CÓDIGO EN	R2
MARCA	Keda	PROCESO	
CARACTERISTICAS GENERALES			
PESO	700 Kg	ATURA	2000mm ANCHO 1100mm LARGO 1100mm
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS		FOTO MÁQUINA-EQUIPO	
<p>Es de acero inoxidable tipo 304 en el interior y de acero al carbon en su exterior, con motor de potencia de 4KW, velocidad de 63rpm y capacidad para 300L/h.</p> <p>FUNCIÓN</p> <ul style="list-style-type: none"> • Convertir, mediante la reacción de la esterificación el aceite extraído de la borra del café en una fase esterificada para disminuir la acidez del aceite y que este pueda entrar sin problema al reactor de transesterificación. • Admitir el flujo de metanol con ácido sulfúrico para que el primero reaccione con el aceite extraído, obteniendo el aceite esterificado más agua. 			
		PRECIO	\$ 15.486.000

Nota. En esta figura se muestra la ficha técnica con funcionamiento, características técnicas, generales y datos relacionados al reactor (R2).

Figura 32.

Ficha técnica del reactor (R3)

FICHA TECNICA: REACTOR TRANSESTERIFICACIÓN			
MÁQUINA- EQUIPO	Reactor	UBICACIÓN	N/R
FABRICANTE	Keda	SECCIÓN	ETAPA #3
MODELO	N/R	CÓDIGO EN PROCESO	R3
MARCA	Keda		
CARACTERISTICAS GENERALES			
PESO	270 Kg	ATURA	1600mm ANCHO 800mm LARGO 800mm
CARACTERISTICAS TÉCNICAS		FOTO MÁQUINA-EQUIPO	
<p>Es de acero inoxidable tipo 304 en el interior y de acero al carbon en su exterior, con motor de potencia de 1,1KW, velocidad de 63rpm y capacidad para 50L/h.</p> <p>FUNCIÓN</p> <ul style="list-style-type: none"> •Convertir, mediante la reacción de la transesterificación el aceite esterificado para la obtención del biodiesel. •Admitir el flujo de metanol con hidroxido de potasio que el primero reaccione con el aceite extraido, obteniendo el biodiesel y glicerol. 			
		PRECIO	\$ 6.194.581

Nota. En esta figura se muestra la ficha técnica con funcionamiento, características técnicas, generales y datos relacionados al reactor (R3).

Figura 33.


Ficha Técnica del Extractor (E1)

FICHA TECNICA: EXTRACTOR					
MÁQUINA- EQUIPO	EXTRACTOR	UBICACIÓN	N/R		
FABRICANTE	Zhejiang Sunny	SECCIÓN	ETAPA #1		
MODELO	DTWZ D1000L	CÓDIGO EN	E1		
MARCA	Zhejiang Sunny	PROCESO			
CARACTERISTICAS GENERALES					
Diametro	700	ATURA	5,5m	ANCHO	3,4m LARGO 4,13m
CARACTERISTICAS TÉCNICAS			FOTO MÁQUINA-EQUIPO		
<p>Es de acero inoxidable tipo 304 o 316, puede trabajar con presiones negativas o normales erior y de acero al carbon en su exterior, con motor de potencia de 4KW, velocidad de 63rpm y capacidad para 350Kg/h.</p> <p>FUNCIÓN</p> <ul style="list-style-type: none"> • Extraer el aceite de la borra de café, por el método de extracción de soxhlet de líquido-sólido. • Admitir el flujo de Hexano con la borra parcialmente secada para obtener de ella el aceite que en el proceso se convertirá en biodiesel. 					
			PRECIO \$ 85.338.000		

Nota. En esta figura se muestra la ficha técnica con funcionamiento, características técnicas, generales y datos relacionados al extractor (E1).

Figura 34.


Ficha Técnica del secador (S1)

FICHA TÉCNICA: SECADOR BORRA						
MÁQUINA-	Secador	UBICACIÓN	N/R			
FABRICANTE	Faithful	SECCIÓN	ETAPA #1			
MODELO	DZ-2BCII	CÓDIGO EN	S1			
MARCA	Faithful	PROCESO				
CARACTERÍSTICAS GENERALES						
PESO	92Kg	ATURA	680mm	ANCHO	560mm LARGO	540mm
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS			FOTO MÁQUINA-EQUIPO			
<p>Con la bomba de vacío incluida, cámara interior de acero inoxidable, visor con vidrio blindado, capacidad 15Kg en cada estante, dos estantes, potencia de 1,4KW</p> <p>FUNCIÓN • Secar parcialmente la borra de café para que entre en el extractor con la cantidad de humedad requerida por la selección de configuración de proceso.</p> <p>• Admitir el flujo de 23,98Kg/h de borra. Para obtener una borra parcialmente seca de 9,73Kg/h.</p>						
			PRECIO	\$ 1.861.920		

Nota. En esta figura se muestra la ficha técnica con funcionamiento, características técnicas, generales y datos relacionados al Secador (S1).

Figura 35.


Ficha Técnica del secador (S3)

FICHA TECNICA: SECADOR BIODIESEL							
MÁQUINA-	Secador	UBICACIÓN	N/R				
FABRICANTE	Faithful	SECCIÓN	ETAPA #3				
MODELO	DZ-1BIV	CÓDIGO EN	S3				
MARCA	Faithful	PROCESO					
CARACTERISTICAS GENERALES							
PESO	52Kg	ATURA	606mm	ANCHO	480mm	LARGO	480mm
CARACTERISTICAS TÉCNICAS				FOTO MÁQUINA-EQUIPO			
<p>Con la bomba de vacío incluida, cámara interior de acero inoxidable, visor con vidrio blindado, capacidad 15Kg en cada estante, dos estantes, potencia de 0,8KW.</p>							
<p>FUNCIÓN</p> <ul style="list-style-type: none"> • Eliminar los restos de agua con las impurezas que quedan del lavado del biodiesel para purificarlo. • Admitir el flujo de 12,62Kg/h de biodiesel con agua e impurezas. Para obtener unbiodiesel purificado de 9,93Kg/h. 							
PRECIO						\$ 1.861.920	

Nota. En esta figura se muestra la ficha técnica con funcionamiento, características técnicas, generales y datos relacionados al Secador (S3).

Figura 36.

Ficha Técnica del Decantador (D2)

FICHA TÉCNICA: DECANTADOR			
MÁQUINA-	Decantador centrífugo	UBICACIÓN	N/R
FABRICANTE	Jiangsu Blovebird Centrifuge	SECCIÓN	ETAPA #2
MODELO	HY80	CÓDIGO EN	D2
MARCA	Jiangsu Blovebird Centrifuge	PROCESO	
CARACTERÍSTICAS GENERALES			
PESO	160Kg	ANCHO	650mm
ATURA	950mm	LARGO	550mm
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS		FOTO MÁQUINA-EQUIPO	
<p>De potencia de 4KW, velocidad de 10000rpm y capacidad de 5 a 100L/h, factor de separación máximo de 4400. Diámetro de alimentación de 12mm y tambor de 80mm.</p>			
<p>FUNCIÓN</p> <ul style="list-style-type: none"> • Su fin es el de separar el agua del aceite después de que sale del tanque flash, con el objetivo de que el fluido que sale de este, solo contenga aceite para ser esterificado. 			
<ul style="list-style-type: none"> • Admitir el flujo del aceite y agua para obtener solo el aceite. 			
		PRECIO	\$ 64.268.785

Nota. En esta figura se muestra la ficha técnica con funcionamiento, características técnicas, generales y datos relacionados al Decantador(D2).

Figura 37.


Ficha Técnica del Separador tipo flash (SF1)

FICHA TECNICA: SEPARADOR			
MÁQUINA-FABRICANTE	Separador tipo Mega Engineering	UBICACIÓN	N/R
MODELO	N/R	SECCIÓN	ETAPA #1
MARCA	Keda	CÓDIGO EN PROCESO	SF1
CARACTERISTICAS GENERALES			
PESO	700 Kg	ATURA	1400mm
		DIAMETRO EXTERNO	170mm
CARACTERISTICAS TÉCNICAS		FOTO MÁQUINA-EQUIPO	
<p>Construcción completa en acero inoxidable con capacidad de 150 a 500L y potencia de 1KWh</p> <p>FUNCIÓN</p> <ul style="list-style-type: none"> • Su objetivo principal en el proceso, es el de separar el aceite extraído con agua (en forma de líquido), del hexano (en forma de vapor). • Admitir el flujo de aceite extraído con el hexano, para separarlos y entregear solo el aceite con agua al decantador. 			
PRECIO		\$ 3.654.470	

Nota. En esta figura se muestra la ficha técnica con funcionamiento, características técnicas, generales y datos relacionados al Separador tipo flash (SF1).

Figura 38.

Ficha Técnica del Decantador de discos(D3)

FICHA TÉCNICA: DECANTADOR			
MÁQUINA- EQUIPO	Decantador de discos	UBICACIÓN	N/R
FABRICANTE	Sinoped	SECCIÓN	ETAPA #3
MODELO	DHY/DHC 270	CÓDIGO EN	D3
MARCA	Sinoped	PROCESO	
CARACTERISTICAS GENERALES			
PESO	550Kg	ATURA	1750mm ANCHO 1250mm LARGO 1850mm
CARACTERISTICAS TÉCNICAS		FOTO MÁQUINA-EQUIPO	
El tiempo de descarga se puede ajustar de 0,1 a 0,9 segundo con intervalos de 1 a 240 minutos dependiendo del producto, con motor de potencia de 4KW, velocidad de 1460rpm y capacidad para 500L/h hasta 1500L/h.			
FUNCIÓN			
<ul style="list-style-type: none">• Agitar la mezcla de biodiesel con agua para poder eliminar del biodiesel las impurezas que quedan de la reacción de transesterificación• Admitir el flujo de biodiesel desde el reactor, y de agua desde un tanque, para agitarlos y obtener un biodiesel puro.			
PRECIO		\$ 22.838.648	

Nota. En esta figura se muestra la ficha técnica con funcionamiento, características técnicas, generales y datos relacionados al Decantador (D3).

Por otro lado, un mantenimiento preventivo trae consigo beneficios como el de disminuir los riesgos de evento inesperados que acarrear mayores costos de mantenimiento, mantener el inventario con los repuestos necesarios y aún más importante, aumentan la vida útil de los equipos y repuestos, que también se ve reflejado en la producción y en la seguridad de los procesos. Por estas razones se decide optar por este tipo de mantenimiento:

4.1.2. Establecer actividades

4.3.1.a. Inspección de las condiciones de los equipos. Es importante conocer cómo se encuentran los equipos, y como se comportan en el funcionamiento. Una inspección visual es la forma en la

cual se puede determinar condiciones no habituales como vibraciones, suciedad, incorrecta instalación, mal estado de los repuestos o mal procesamiento (parámetros de proceso incorrectos).

4.3.1.b. Lubricación periódica. Con esta actividad se logra reducir la fricción de los equipos que giran a altas velocidades dentro de la producción de biodiesel seleccionado y previene el desgaste de piezas o repuestos. Teniendo en cuenta siempre el lubricante recomendado por los distintos fabricantes o aquellos que más se ajusten al equipo y su uso, en caso de no disponer de la recomendación del fabricante.

4.3.1.c. Verificar repuestos. Después de la revisión visual, donde se conoce el estado de los repuestos y de la lubricación de los equipos del proceso que lo requieran, instalar partes que sean necesarias cambiar con el tiempo resulta una actividad muy importante que puede prevenir averías futuras por mala adecuación de las partes removibles

4.3.1.d. Calibración. Las condiciones específicas bajo las cuales debe trabajar un equipo deben siempre ser tenidas en cuenta junto con los instrumentos de medida, para obtener una buena respuesta por parte del proceso. Por esto es necesario calibrar los equipos según se necesite en cada uno y bajo las condiciones de proceso con las que viene por selección y por catálogo.

4.3.1.e. Seguridad. Conocer el estado en que se encuentran las conexiones de todo tipo, como mecánicas, eléctricas, neumáticas; puede prevenir accidentes, por esto es necesario realizar inspección visual a los sistemas de conexión también.

4.3.1.f. Historial. Es importante conocer periodo a periodo (de mantenimiento) el estado en que se encuentra la máquina, por lo que es necesario llevar control escrito de cuál es el estado del equipo, sea una valoración positiva o negativa. Es necesario que todo quede consignado, para poder llevar un control de los mismos equipos y los repuestos que se necesitan.

4.1.3. Establecer responsables

4.3.2.a. Inspección de las condiciones de los equipos. La inspección que se propone es visual, por ende, el operario encargado en jefe del proceso puede ser el responsable de la misma actividad antes de finalizar la jornada laboral; sin embargo, los operarios bajo su mando pueden estar pendientes de cada etapa e informar de cualquier acontecimiento extraño.

4.3.1.b. Lubricación periódica. Esta actividad debe ser realizada por un operario que cuente con capacitación o con el conocimiento sobre lubricantes para los equipos. Esta actividad puede ser en lapsos de una semana o dos según corresponda por la inspección visual

4.3.1.c. Verificar repuestos. Al igual que la inspección visual, esta puede ser realizada por el operario encargado en jefe. Siempre teniendo una valoración por los operarios bajo su mando y la del jefe de mantenimiento.

4.3.1.d. Calibración. Sobre la calibración de los equipos puede recaer la producción, por esto, la calibración debe ser llevada por un experto en el tema.

4.3.1.e. Seguridad. La revisión de conexiones puede ser llevada a cabo cada jornada por los mismos operarios que conocen las instalaciones y conexiones.

4.3.1.f. Historial. Es importante que cada una de las actividades sean reportadas al jefe de mantenimiento quien debe llenar el historial de cada equipo al ser notificado de cualquiera de ellas.

4.2. Estudio de costos del proceso de producción

4.2.1. Costos de operación del proceso actual

En Colombia, según Lombana, Jahir; Vega, Jaider; Britton, Emyle y Herrera, Silvia, costos de producción en Colombia con el proceso y la materia prima actual se dividen en los siguientes porcentajes: Materia prima, es el 70,6% del total de costos; en mantenimiento se recoge el 4% del total; con los químicos del proceso se recoge alcanza un 12,6%; mientras que en servicios un 2,7% y en el caso de la depreciación 7,6%; en mano de obra se completa el 100% con un 2,5%[71].

4.2.2. Costos de operación del proceso propuesto

Tabla 18.*Costos del proceso seleccionado*

COSTOS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN			
Producto	Costo Unitario	Requerido en un año	Total
Materia Prima			
Hexano	\$3800	187964368 kg	\$7142646
Metanol	\$1161	76860208 kg	\$892347
Catalizadores	\$150	1939496 kg	\$291
Agua	\$13	26328 kg	\$342
Total	-	-	\$8035626
Mantenimiento			
Actividades	\$4000000	12 meses	\$48000000
Total	-	-	\$48000000
Depreciación			
Extractor (E1)	\$85338000	872 productos	\$97837
Reactor (R2)	\$15486000	1744 productos	\$8877
Reactor (R3)	\$6194581	1744 productos	\$3551
Separador (SF1)	\$3654470	1047 productos	\$3491
Decantador (D2)	\$64268785	872 productos	\$73682
Decantador (D3)	\$22838648	1047 productos	\$21820
Secador (S1)	\$1861920	872 productos	\$2135
Secador (S3)	\$1861920	1308 productos	\$1423
			\$212816
Total	-	-	\$18562787
Mano de obra			
Operarios (5)	\$1200000	60 meses	\$72000000
Supervisor	\$1500000	12 meses	\$18000000
Jefe mantenimiento	\$3000000	12 meses	\$36000000
Total	-	-	\$126000000
Servicios			
Extractor (E1)	\$48786	35104 kWh	\$17125837
Reactor (R2)	\$48786	35104 kWh	\$17125837
Reactor (R3)	\$48786	9653,6 kWh	\$4709605
Separador (SF1)	\$48786	8776 kWh	\$4281459
Decantador (D2)	\$48786	35104 kWh	\$17125837
Decantador (D3)	\$48786	35104 kWh	\$17125837
Secador (S1)	\$48786	12286,4 kWh	\$5994043
Secador (S3)	\$48786	7020,8 kWh	\$3425167
Total	-	-	\$868913625
Total			\$287512039

Nota. En esta tabla se encuentra un estimado de los costos del proceso seleccionado durante un año de producción, suponiendo que se mantiene el proceso durante un año seguido.

Partiendo desde la tabla 17 donde se muestran los costos de proceso seleccionado se pueden calcular los porcentajes a los que corresponde cada tipo de costo del proceso completo, lo cual se ve reflejado en la siguiente tabla:

Tabla 19.

Tabla de porcentajes de los costos de producción

Tipo de costo	Costo	Porcentaje
Materia prima	\$8035626	2,79%
Mantenimiento	\$48000000	16,69%
Depreciación	\$18562787	6,46%
Mano de obra	\$126000000	43,82%
Servicios	\$86913625	30,23%
Total	\$287512039	

Nota. En esta tabla se muestran los porcentajes que corresponden a los costos del proceso, dependiendo del tipo de costo.

Se puede notar que no existe un tipo de costos “químicos” como el análisis de los porcentajes de costos en la tabla 18 que muestra costos del proceso de producción actual y se debe a que la borra resultaría gratis debido a que es un desperdicio, por ende, lo único que aumentaría sería en su transporte y estaría dentro de los servicios del proceso. En cuanto a la materia prima que se propone en la tabla de porcentajes de los costos de la producción se refiere a los químicos que van a ser usados en el proceso; estos equivalen a un 2,79% de los costos del proceso; en cuanto al mantenimiento con un 16,69%, se proponen \$4000000 mensuales que pueden ser distribuidos entre los elementos varios de las actividades de mantenimiento. Se proponen 7 trabajadores solo

dentro del proceso, que equivale a un 4382% de los costos totales. La depreciación de los activos se genera partiendo de la vida útil de los mismos y las cantidades de biodiesel en Toneladas que pueden generar al año, significa un 6,46% de los costos y en servicios, conociendo la potencia requerida de los equipos principales en un año equivale a un 30,23% de los costos totales.

5. CONCLUSIONES

Los mejores parámetros de configuración de las etapas de producción de biodiesel a partir de la borra de café son una extracción en donde la borra entre completamente seca, con hexano como solvente a una relación de $1 \text{ g}_{\text{borra}}/22 \text{ g}_{\text{hexano}}$ y una temperatura de 25°C durante 2 horas; una transesterificación de dos pasos, donde el primer paso es una reacción de esterificación para disminuir la acidez durante 2 horas a 60°C con metanol como reactivo a $1 \text{ g}_{\text{aceite}}/22 \text{ g}_{\text{metanol}}$ y ácido sulfúrico como catalizador a un 5% peso del aceite; y un segundo paso de reacción de transesterificación con hidróxido de potasio como catalizador presente en un $1,5\%$ peso del aceite previamente esterificado, y metanol como reactivo en una relación de $1 \text{ g}_{\text{aceite}}/6 \text{ g}_{\text{metanol}}$ para obtener biodiesel a 60°C durante 1 hora, ambos a 600 rpm.

La capacidad de producción de 84,51 T/año, con respecto a las capacidades de producción de las plantas que actualmente se encuentran en operación en Colombia donde la que menos capacidad tiene produce 12000T/año evidentemente no es comparable, pero se debe a que es un primer acercamiento de la alternativa de materia prima para este proceso y aun así es una entrada con la cual dar a conocer la materia prima y los beneficios que se obtienen con esta alternativa.

Los equipos que se seleccionaron sirven para este proceso en la medida que cumplen con los requerimientos y factores de las mismas etapas, sin embargo, para un proceso con mayor flujo de entrada de borra, el procedimiento de extracción tipo Soxhlet ya no cuenta con equipos de mayor capacidad, lo cual puede generar cambios en el proceso.

BIBLIOGRAFIA

- [1] “Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia.” http://www.fedebiocombustibles.com/v3/estadistica-mostrar_info-titulo-Biodiesel.htm (accessed Aug. 30, 2021).
- [2] C. A. Moreno and C. A. Castro, “Evaluación del biodiésel producido a partir de aserrín de café bajo un proceso de transesterificación a nivel laboratorio como fuente de energía alternativa.” Bogotá, 2020. Accessed: Aug. 30, 2021. [Online]. Disponible: <https://hdl.handle.net/20.500.11839/7787>
- [3] “Manual de referencia de tarifas en Ingeniería (contratación de servicios profesionales),” *ACIEM, Asociación Colombiana de Ingenieros*, 2015.
- [4] “biocombustible | Definición | Diccionario de la lengua española | RAE - ASALE.” <https://dle.rae.es/biocombustible> (accessed Aug. 30, 2021).
- [5] “¿Qué son los biocombustibles? - EADIC - Cursos y Master para Ingenieros y Arquitectos.” <https://www.eadic.com/que-son-los-biocombustibles/> (accessed Aug. 30, 2021).
- [6] “El Cotidiano”, [Online]. Disponible: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=32512739009>
- [7] R. Ruan *et al.*, “Biofuels: Introduction,” in *Biomass, Biofuels, Biochemicals: Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels*, Elsevier, 2019, pp. 3–43. doi: 10.1016/B978-0-12-816856-1.00001-4.
- [8] “BIOCOMBUSTIBLES » Qué son, Tipos, Usos - Cumbre Pueblos.” <https://cumbrepuebloscop20.org/energias/combustibles/bio/> (accessed Aug. 30, 2021).
- [9] “Biocarburantes de 3ª Generación.” <https://www.eoi.es/blogs/merme/biocarburantes-de-3a-generacion/> (accessed Aug. 30, 2021).
- [10] “Designation: D6751 – 20a Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels 1”, doi: 10.1520/D6751-20A.
- [11] R. Aguirre and J. D’Alessandro, “Aplicaciones de los biocombustibles en los motores de combustión interna,” Tucuman.
- [12] “Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia.” http://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-2122-titulo-los_beneficios_de_los_biocombustibles_son_para_todos_los_colombianos.htm (accessed Aug. 30, 2021).

- [13] M. Haile, “Integrated volarization of spent coffee grounds to biofuels,” *Biofuel Research Journal*, vol. 1, no. 2, pp. 65–69, 2014, doi: 10.18331/BRJ2015.1.2.6.
- [14] A. Sarin, “Biodiesel Properties and Specifications,” in *Biodiesel - Production and Properties*, Society of Chemistry, 2012. [Online]. Disponible: www.rsc.org
- [15] J. Pérez Pariente, “Qué son y cómo se obtienen los biocombustibles,” in *BIOCOMBUSTIBLES: sus implicaciones energéticas, ambientales y sociales*, Fondo de cultura economica, 2016.
- [16] R. A. Houghton, “Biomass,” *Encyclopedia of Ecology, Five-Volume Set*, pp. 448–453, Jan. 2008, doi: 10.1016/B978-008045405-4.00462-6.
- [17] M. Bustamante García *et al.*, “Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión,” *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, [Online]. Disponible: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63450027007>
- [18] Dr. J. G. Speight, “Biomass,” in *Synthetic Fuels Handbook: Properties, Process, and Performance*, McGraw-Hill Education, 2020, p. 464. Accessed: Aug. 30, 2021. [Online]. Disponible: <https://www-accessengineeringlibrary-com.ezproxy.uamerica.edu.co/content/book/9781260128963/toc-chapter/chapter7/section/section1>
- [19] D. R. Nhuchhen, P. Basu, and B. Acharya, “A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction,” *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*, vol. 2014, 2014, doi: 10.5171/2014.506376.
- [20] W. David and N. Abril, “DISEÑO DE UN GASIFICADOR DUAL PARA BIOMASA RESIDUAL AGROPECUARIA A NIVEL LABORATORIO.”
- [21] R. D. S. R. Y. Tyagi, T. C. Zhang, S. Yan, and X. Zhang, “3.2 Transesterification of Oil/Fat to Biodiesel - Knovel,” in *Biodiesel Production - Technologies, Challenges, and Future Prospects*, American Society of Civil Engineers (ASCE), 2019. Accessed: Aug. 19, 2021. [Online]. Disponible: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0126UI91/biodiesel-production/transesterification-oil>
- [22] A. Urribarrí *et al.*, “Evaluación del potencial de la borra de café como materia prima para la producción de biodiesel,” *MULTICIENCIAS*, vol. 14, pp. 129–139, 2014.
- [23] L. Blinová, A. Bartošová, and M. Sirotiak, “Biodiesel Production from Spent Coffee Grounds,” *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak*

- University of Technology*, vol. 25, no. 40, pp. 113–121, Jun. 2017, doi: 10.1515/rput-2017-0013.
- [24] I. Efthymiopoulos, P. Hellier, N. Ladommatos, A. Kay, and B. Mills-Lampzey, “Effect of Solvent Extraction Parameters on the Recovery of Oil from Spent Coffee Grounds for Biofuel Production,” *Waste and Biomass Valorization*, vol. 10, no. 2, pp. 253–264, Feb. 2019, doi: 10.1007/s12649-017-0061-4.
- [25] I. Efthymiopoulos, “Recovery of lipids from spent coffee grounds for use as a biofuel,” 2018.
- [26] J. B. Tarigan *et al.*, “Direct biodiesel production from wet spent coffee grounds,” *RSC Advances*, vol. 9, no. 60, pp. 35109–35116, 2019, doi: 10.1039/c9ra08038d.
- [27] C. Risco Manzano, “Producción de biodiesel a partir de residuos de café,” Madrid, oct. 2009.
- [28] M. Kamil, K. M. Ramadan, O. I. Awad, T. K. Ibrahim, A. Inayat, and X. Ma, “Environmental impacts of biodiesel production from waste spent coffee grounds and its implementation in a compression ignition engine,” *Science of the Total Environment*, vol. 675, pp. 13–30, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.156.
- [29] “Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite”, Accessed: Aug. 30, 2021. [Online]. Disponible: www.fedepalma.org
- [30] C. Giller, B. Malkani, and J. Parasar, “Coffee to Biofuels,” 2017. [Online]. Disponible: https://repository.upenn.edu/cbe_sdr
- [31] “Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia.” https://www.fedebiocombustibles.com/estadistica-mostrar_info-titulo-Biodiesel.htm (accessed Sep. 01, 2021).
- [32] “Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia.” <https://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-3158.htm> (accessed Aug. 30, 2021).
- [33] “Histórico de Noticias GM.” <https://www.minenergia.gov.co/web/10180/historico-de-noticias?idNoticia=24282979> (accessed Aug. 30, 2021).
- [34] “13 usos de la borra de café: Reciclado multiuso.” <https://infokofe.com/curiosidades/borra-de-cafe/> (accessed Aug. 30, 2021).
- [35] C. M. Galanakis, “Handbook of Coffee Processing By-Products: Sustainable Applications,” 2017.

- [36] L. Becerra, “Las tiendas de café cambiaron en los últimos cuarenta años al ritmo del consumidor,” 2020. Accessed: Aug. 31, 2021. [Online]. Disponible: <https://www.larepublica.co/consumo/las-tiendas-de-cafe-cambiaron-en-los-ultimos-cuarenta-anos-al-ritmo-del-consumidor-2971876>
- [37] Z. Berk, “11. Extraction - Knovel,” in *Food Process Engineering and Technology*, Eth Edition., Elsevier, 2018. Accessed: Aug. 19, 2021. [Online]. Disponible: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011Q1DR3/food-process-engineering/extraction-introduction>
- [38] J. K. Fink, “20.2.3 Supercritical Fluid Extraction - Knovel,” in *Petroleum Engineer’s Guide to Oil Field Chemicals and Fluids*, 3rd Edition., Elsevier, 2021. Accessed: Aug. 20, 2021. [Online]. Disponible: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt009IJ735/petroleum-engineers-guide/environmental-impact>
- [39] A. Inamuddin, I. LastName Abdullah M., and Arun M., “4.3. Extraction Methods,” in *Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science - Supercritical Carbon Dioxide as Green Solvent*, vol. 4. Application of S..., Elsevier, 2020. Accessed: Aug. 20, 2021. [Online]. Disponible: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0122ISR3/green-sustainable-process/extraction-methods>
- [40] A. C. Affam and E. H. Ezechi, “3.4.1.2 Esterification ,” in *Handbook of Research on Resource Management for Pollution and Waste Treatment*, IGI Global, 2020. Accessed: Aug. 21, 2021. [Online]. Disponible: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt01265T0A/handbook-research-resource/catalytic-cracking>
- [41] A. Affam and E. H. Ezechi, “3.4.1.1 Transesterification,” in *Handbook of Research on Resource Management for Pollution and Waste Treatment*, IGI Global, 2020. Accessed: Aug. 31, 2021. [Online]. Disponible: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHRRMPWTA/handbook-research-resource/handbook-research-resource>
- [42] J. C. Bart, J. Palmeri, and S. Natale Cavallaro, “7. Transesterification Processes for Biodiesel Production from Oils and Fats page,” in *Biodiesel Science and Technology - From Soil to Oil*, Woodhead Publishing, 2010.

- [43] Y. Díaz Domínguez, M. R. Macias, and E. F. Santana, “Extracción de aceites de origen vegetal,” 2017, doi: 10.13140/RG.2.2.11047.55201.
- [44] J. D. González Gachancipá and V. Martín Zarta, “Evaluación de la extracción de lípidos presentes en la borra de café utilizando un solvente alternativo,” Bogotá, 2020.
- [45] L. Jin, H. Zhang, and Z. Ma, “Study on capacity of coffee grounds to be extracted oil, produce biodiesel and combust,” in *Energy Procedia*, 2018, vol. 152, pp. 1296–1301. doi: 10.1016/j.egypro.2018.09.185.
- [46] M. Bockisch, “5.2.3.3.7 The Influence of Particle Size and Shape - Knovel,” in *Fats and Oils Handbook*, AOCS Press, 1998. Accessed: Sep. 01, 2021. [Online]. Disponible: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0068MX41/fats-oils-handbook/influence-particle-size>
- [47] K. Somnuk, E. Pichai, and S. Krit, “Optimization of solid-to-solvent ratio and time for oil extraction process from spent coffee grounds using response surface methodology,” vol. 10, no. 16, 2015, [Online]. Disponible: www.arnjournals.com
- [48] R. Colucci Cante, I. Garella, M. Gallo, and R. Nigro, “Effect of moisture content on the extraction rate of coffee oil from spent coffee grounds using Norflurane as solvent,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 165, pp. 172–179, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.cherd.2020.11.002.
- [49] C. M. Galanakis, “7.4.4.3 Extraction temperature- Knovel,” in *Polyphenols - Properties, Recovery, and Applications*, Elsevier, 2018. Accessed: Aug. 31, 2021. [Online]. Disponible: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011PUGQ1/polyphenols-properties/extraction-temperature>
- [50] R. D. Tyagi, R. Y. Surampalli, T. C. Zhang, S. Yan, and X. Zhang, “15.4.1.1 Organic Solvent Extraction Development - Knovel,” in *Biodiesel Production - Technologies, Challenges, and Future Prospects*, American Society of Civil Engineers (ASCE), 2019. Accessed: Aug. 31, 2021. [Online]. Disponible: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0126UP82/biodiesel-production/effect-oil-bearing-substances>
- [51] M. R. Rosen, “13.3.3 Extraction Technologies - Knovel,” in *Harry’s Cosmeticology*, 9th Edition., vol. Volume 3, Chemical Publishing Company Inc., 2015. Accessed: Sep. 02,

2021. [Online]. Disponible: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt010X5IBD/harrys-cosmeticology/part-13-3-intelligent>
- [52] Inamuddin Asiri, Abdullah M. Isloor, and Arun M, “4. Application of Supercritical CO₂ for Enhanced Oil Recovery - Knovel,” in *Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science - Supercritical Carbon Dioxide as Green Solvent*, Elsevier, 2020. Accessed: Sep. 02, 2021. [Online]. Disponible: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpGSPCEES4/green-sustainable-process/green-sustainable-process>
- [53] S. S. H. Rizvi, “20. Supercritical-Fluid Extraction of Lycopene from Tomatoes,” in *Separation, Extraction and Concentration Processes in the Food, Beverage and Nutraceutical Industries*, Woodhead Publishing, 2010. Accessed: Sep. 02, 2021. [Online]. Disponible: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSECPFBNQ/separation-extraction/separation-extraction>
- [54] Z. A. Gondra, “Study of factors influencing the quality and yield of biodiesel produced by transesterification of vegetable oils,” 2010.
- [55] M. Mathiyazhagan and A. Ganapathi, “Factors Affecting Biodiesel Production,” *Research in Plant Biology*, vol. 1, no. 2, pp. 1–05, 2011, [Online]. Disponible: www.resplantbiol.com
- [56] N. S. Caetano, V. F. Silva, T. M. Mata, and ., “Valorization of Coffee Grounds for Biodiesel Production,” *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*, vol. 26, 2012.
- [57] N. Rodríguez Valencia, “Manejo de Residuos en la Agroindustria Cafetera,” 2017. Accessed: Oct. 14, 2021. [Online]. Disponible: <http://infocafes.com/portal/biblioteca/manejo-de-residuos-en-la-agroindustria-cafetera/>
- [58] “Más del 30% del café que se consume en Colombia es importado | El Nuevo Siglo.” <https://www.elnuevosiglo.com.co/articulos/04-11-2021-mas-del-30-del-cafe-que-se-consume-en-colombia-es-importado> (accessed oct. 17, 2021).
- [59] J. D. Trujillo Flechas, “Innovación estratégica para negocios con borra de café en la localidad de Teusaquillo-Bogotá,” Bogotá, 2019.
- [60] D. Garcia and C. Duarte, “LA CAFETERÍA,” Bogotá, 2018.
- [61] “Usaquén: ficha local,” 2019.
- [62] Cámara de Comercio de Bogotá, *Censo empresarial de Chapinero*. Cámara de Comercio, 2008.

- [63] “Ficha Local Chapinero,” *Veeduría Distrital*, 2019.
- [64] E. A. Bulla Pereira, “Diseño del proceso de producción del biodiesel a partir de aceites de fritura,” 2014.
- [65] L. M. Morale Rosales and D. O. Pérez Hernández, “Valorización de los residuos de café tostado y molido (borra de café), generados en el campus central de la universidad de el salvador,” San Salvador, 2020.
- [66] H. de Datos De Seguridad De Sustancias Químicas, “Facultad de Química Coordinación de Protección Civil ÁCIDO SULFÚRICO.”
- [67] Contek, “HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD HIDROXIDO DE POTASIO 1. Identificación de la sustancia/preparado y de la sociedad o empresa 1.1 Identificación de la sustancia o del preparado Denominación: Potasio Hidróxido 85% *lentejas 1.2 Sinónimo: 1.3 Uso de la sustancia o preparado: Usos: para usos de laboratorio, análisis, investigación y química fina. 1.4 Identificación de la sociedad o empresa.” [Online]. Disponible: www.ctr.com.mxTels.
- [68] “Especificaciones Técnicas”.
- [69] “DISEÑO DEL SISTEMA DE TUBERÍAS Y CÁLCULO DE LAS BOMBAS.”
- [70] I. Mera López and A. Santos, “Diseño de una planta para la producción y purificación de biodiesel a partir de borra seca de café,” Cádiz, España, 2015.
- [71] Jahir. Lombana Coy and Jaider. Vega Jurado, *Análisis del sector biodiesel en Colombia y su cadena de suministro*. Universidad del Norte, 2015.

ANEXO 1.

RECOMENDACIONES

Como se puede observar en el diagrama P&ID, no se realizaron estudios en los cuales se determine como realizar la recirculación del hexano y metanol a sus tanques iniciales, se recomienda realizar este estudio; así como también, se recomienda analizar que se puede generar con los desperdicios del proceso, es decir la torta de la borra, el glicerol y el agua que se genera. Si se desea instalar este proceso en una planta piloto, se debe considerar cada uno de los equipos principales, como de los equipos secundarios al igual que su ubicación para poder realizar los cálculos más adecuados. También, realizar un estudio de mercado con el fin de conocer como aumentar el flujo de entrada de la borra al proceso para aumentar los productos obtenidos. Además, Se recomienda analizar diferentes alternativas de selección de las configuraciones de parámetros para cada una de las alternativas, ya que las seleccionadas en el presente documentos son alternativas tomadas por el autor.