

**DESARROLLO DE UNA PROPUESTA DE PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN
DE BIODIÉSEL PARTIENDO DE RESIDUOS GRASOS DE POLLO**

**EILEEN TATIANA SÁNCHEZ PATIÑO
VANESSA NAYIBE TORRES GEMADE**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2020**

**DESARROLLO DE UNA PROPUESTA DE PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN
DE BIODIÉSEL PARTIENDO DE RESIDUOS GRASOS DE POLLO**

**EILEEN TATIANA SÁNCHEZ PATIÑO
VANESSA NAYIBE TORRES GEMADE**

**Proyecto Integral de Grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO**

**Director
NUBIA LILIANA BECERRA OSPINA
Ingeniera química**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2020**

Nota de aceptación:



Ing. Luis Alberto Figueroa Casallas
Jurado1



Ing. Oscar Libardo Lombana Charfuelan
Jurado 2

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente Institucional de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Consejero Institucional

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. MARÍA CLAUDIA APONTE GONZÁLEZ

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretaria General

Dra. ALEXANDRA MEJIA GUZMÁN

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa Ingeniería Química

Ing. IVÁN RAMÍREZ MARÍN

Las directivas de la Fundación Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente son exentos de la responsabilidad de los criterios e ideas expuestos en el presente documento. La responsabilidad es exclusiva de los autores.

DEDICATORIA

Le dedico este logro a mis padres, por darme la oportunidad de cumplir este sueño, por impulsarme siempre a ser y dar lo mejor de mí, los admiro, los amo, gracias a ustedes soy lo que soy, son mi motivación y me llena de una inmensa felicidad poder dedicarles este logro, hacerlos sentir orgullosos y poder devolverles con creces todo el amor que me han dado siempre.

Gracias a mis hermanos, a mi sobrina a mi tía y a mi primo, los amo, también les dedico esto, soy muy afortunada de tenerlos a cada uno de ustedes en mi vida enseñándome siempre algo diferente y estando en cada momento incondicionalmente para mí.

Gracias a mis amigos, por acompañarme y apoyarme durante el transcurso de mi carrera, me llevo personas y momentos increíbles conmigo. Le agradezco a mi novio por brindarme su más sincero apoyo en la finalización de este proyecto, su cariño y comprensión, no solo en esta etapa, me han dado toda la paz que he necesitado. También te agradezco a ti Vanessa, no solo eres mi compañera de tesis, solo el universo sabe que somos como hermanas.

También le quiero dar gracias a mi gata, por enseñarme cada día que trasnoche o llegué tarde lo que es la lealtad.

Eileen Tatiana Sánchez Patiño

DEDICATORIA

Diría que no tengo palabras para agradecer por todo que he recibido, pero la verdad es que me encanta escribir y si por mí fuera llenaría más de una página de nombres y anécdotas en esta larga historia, hasta el final de mi carrera. Este trabajo, esfuerzo, noches en vela, este enorme aprendizaje e increíble experiencia se la dedico a mis padres, hermanos y a Dios. Se escribió en una época difícil y que seguramente todos recordaremos, pero gracias a sus risas y distracciones lograron hacer un ambiente ameno y divertido para escribir y leer cuando me veían cansada o confundida. Infinitas gracias por acompañarme y motivarme siempre.

Y claro está, también lo dedico a mis amigos y colegas ingenieros que estuvieron pendientes de este hermoso proyecto, gracias por interesarse en leerlo y en ayudarme a resolver dudas o buscar la respuesta conmigo sin importar la hora. Gracias, espero verlos y abrazarlos pronto.

A mi compañera Eileen Sánchez le agradezco infinitamente por arriesgarse conmigo y “seguirme la cuerda” en todas las ideas, visitas y reuniones que programaba; reí, lloré, aprendí y sobretodo valoré muchas cosas gracias a ti.

Vanessa Nayibe Torres Gemade

AGRADECIMIENTOS

Le agradecemos a la ingeniera y docente Nubia Liliana Becerra por su compromiso, apoyo y paciencia para guiarnos en todas las etapas y cambios a los que nos vimos enfrentadas para la realización del proyecto.

A los profesores e ingenieros Alberto Vera y Luis Alberto Figueroa por sus sinceros aportes, que nos ayudaron de gran manera en la orientación de nuestros conocimientos.

A nuestros amigos por su colaboración, compañía y cariño incondicional durante el transcurso de la carrera.

A los docentes que conocimos a lo largo de nuestra carrera, gracias por su dedicación y brindarnos su conocimiento, en especial al docente Álvaro Enrique Cisneros (Q.E.P.D)

Infinitas gracias a todos por haber estado presentes en este importante logro dentro de nuestras vidas.

CONTENIDO

| | pág. |
|---|-------------|
| RESUMEN | 21 |
| INTRODUCCIÓN | 22 |
| OBJETIVOS | 24 |
| 1. DIAGNÓSTICO DE LA INDUSTRIA AVÍCOLA | 25 |
| 1.1 HISTORIA DE LA INDUSTRIA AVÍCOLA | 25 |
| 1.2 INDUSTRIA AVÍCOLA EN COLOMBIA | 25 |
| 1.3 PRODUCCIÓN DE POLLO EN COLOMBIA | 26 |
| 1.4 CONSUMO DE POLLO EN COLOMBIA | 29 |
| 1.5 PROCESO PRODUCTIVO DE LA AVICULTURA | 31 |
| 1.5.1 Plantas de beneficio y residuos generados | 35 |
| 1.5.2 Alternativas de aprovechamiento | 38 |
| 1.5.2.1 Harina para la fabricación de alimento animal | 38 |
| 1.5.2.2 Biodiésel | 39 |
| 2. PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL | 43 |
| 2.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL BIODIÉSEL | 43 |
| 2.1.1 Ventajas | 43 |
| 2.1.2 Desventajas | 44 |
| 2.2 PRODUCCIÓN Y CONSUMO DE BIODIÉSEL EN COLOMBIA | 45 |
| 2.3 MATERIAS PRIMAS EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL | 47 |
| 2.4 COMPOSICIÓN DEL ACEITE | 49 |
| 2.5 BIODIÉSEL A PARTIIR DE GRASA DE POLLO | 53 |
| 2.5.1 Caracterización de los residuos grasos de pollo | 55 |
| 2.5.2 Extracción de grasa animal | 58 |
| 2.5.2.1 Tipos de extracción | 58 |
| 2.5.3 Caracterización del aceite | 62 |
| 2.6 PROCESO DE OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL | 66 |
| 2.6.1 Pretratamiento | 66 |

| | | |
|----------|--|----|
| 2.6.1.1 | Neutralización de ácidos grasos | 67 |
| 2.6.1.2 | Esterificación | 68 |
| 2.6.2 | Transesterificación | 72 |
| 2.6.2.1 | Reacciones secundarias o indeseables en la transesterificación | 74 |
| 2.6.2.2 | Purificación | 76 |
| 2.6.3 | Factores que afectan la reacción de transesterificación | 77 |
| 2.6.3.1 | Calidad de la materia prima | 79 |
| 2.6.3.2 | Tipo de catálisis | 79 |
| 2.6.3.3 | Cantidad de catalizador | 82 |
| 2.6.3.4 | Tipo de alcohol | 84 |
| 2.6.3.5 | Relación molar alcohol: aceite | 84 |
| 2.6.3.6 | Humedad | 84 |
| 2.6.3.7 | Contenido de ácidos grasos libres (AGL) | 85 |
| 2.6.3.8 | Temperatura | 85 |
| 2.6.3.9 | Tiempo de reacción | 85 |
| 2.6.3.10 | Agitación | 86 |
| 2.6.4 | Caracterización del biodiésel | 86 |
| 2.6.4.1 | Densidad | 87 |
| 2.6.4.2 | Índice de cetano | 87 |
| 2.6.4.3 | Viscosidad | 88 |
| 2.6.4.4 | Contenido de agua | 88 |
| 2.6.4.5 | Número ácido | 88 |
| 2.6.4.6 | Punto de inflamación | 89 |
| 2.6.4.7 | Poder calorífico | 89 |
| 2.6.4.8 | Punto de nube | 89 |
| 2.6.4.9 | Índice de yodo | 90 |
| 2.6.4.10 | Cantidad de glicéridos | 90 |
| 2.6.4.11 | Glicerina libre | 90 |
| 2.6.4.12 | Glicerina total | 90 |
| 2.6.4.13 | Contenido de varios elementos | 91 |
| 2.7 | EXPERIMENTACIÓN PARA OBTENER ACEITE A PARTIR DE RESIDUOS GRASOS DE POLLO | 93 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 3. | PROPUESTA DE PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A ESCALA PILOTO | 101 |
| 3.1 | DESCRIPCIÓN DEL PROCESO | 101 |
| 3.1.1 | Etapa I. Extracción del aceite | 103 |
| 3.1.2 | Etapa II. Obtención del biodiésel | 103 |
| 3.1.3 | Etapa III. Purificación del biodiésel | 105 |
| 3.2 | CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL PROCESO | 105 |
| 3.3 | BALANCE DE MASA DEL PROCESO PROPUESTO | 112 |
| 3.3.1 | Balance global del proceso | 112 |
| 3.3.2 | Balance de masa de etapa I | 113 |
| 3.3.2.1 | Suposiciones y/o consideraciones de la etapa I | 114 |
| 3.3.3 | Balance de masa de etapa II | 115 |
| 3.3.3.1 | Suposiciones y/o consideraciones de la etapa II | 117 |
| 3.3.4 | Balance de masa de etapa III. | 118 |
| 3.3.4.1 | Suposiciones y/o consideraciones de la etapa III | 120 |
| 3.3.5 | Rendimiento | 121 |
| 3.4 | DIAGRAMA PFD | 122 |
| 3.5 | SELECCIÓN DE EQUIPOS | 125 |
| 3.5.1 | Lavadora de alimentos | 127 |
| 3.5.2 | Cortadora de alimentos | 128 |
| 3.5.3 | Extractor de aceite | 129 |
| 3.5.4 | Tanque de almacenamiento de aceite | 130 |
| 3.5.5 | Reactor batch con evaporador | 132 |
| 3.5.6 | Reactor batch | 136 |
| 3.5.7 | Tanque de almacenamiento de metanol | 137 |
| 3.5.8 | Tanque de mezcla | 139 |
| 3.5.9 | Tanque de lavado de biodiésel | 140 |
| 3.5.10 | Tanque de almacenamiento del biodiésel | 141 |
| 3.5.11 | Bombas | 142 |
| 3.5.11.1 | Bomba de desplazamiento positivo | 143 |
| 3.5.11.2 | Bomba centrífuga | 145 |
| 3.6 | DIAGRAMA TERNARIO MEZCLA AGUA-METANOL-ÁCIDO OLÉICO | 146 |
| 3.7 | DIAGRAMA TERNARIO MEZCLA GLICERINA-METANOL-METILÉSTER | 148 |

| | | |
|-------|----------------------------------|-----|
| 4. | COSTOS DE PRODUCCIÓN | 150 |
| 4.1 | COSTOS FIJOS | 150 |
| 4.1.1 | Equipos nacionales e importados | 150 |
| 4.2 | COSTOS VARIABLES | 152 |
| 4.2.1 | Materia prima | 152 |
| 4.2.2 | Mano de obra directa | 153 |
| 4.2.3 | Servicios | 154 |
| 4.3 | ANÁLISIS DEL COSTO DE PRODUCCIÓN | 157 |
| 5. | CONCLUSIONES | 159 |
| 6. | RECOMENDACIONES | 160 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 161 |
| | ANEXOS | 177 |

LISTA DE TABLAS

| | pág. |
|--|------|
| Tabla 1. Producción de carne de pollo en Colombia (toneladas) | 27 |
| Tabla 2. Precio mayorista del pollo entero – Bogotá – Guadalupe en \$/kg | 28 |
| Tabla 3. Precio proyectado del pollo según la inflación | 28 |
| Tabla 4. Consumo per cápita de carne de pollo a nivel mundial en año 2018 | 29 |
| Tabla 5. Composición de la harina generada a partir de subproductos orgánicos de las plantas de beneficio. | 39 |
| Tabla 6. Nutrientes aportados por diferentes partes del pollo | 40 |
| Tabla 7. Contribución de los diferentes sitios de deposición de grasa al peso vivo y a la grasa corporal total | 41 |
| Tabla 8. Producción de biodiésel de aceite de palma. | 45 |
| Tabla 9. Aceites más usados en la producción de biodiésel | 47 |
| Tabla 10. Materias primas utilizadas en la producción de biodiésel en Brasil. | 49 |
| Tabla 11. Ácidos grasos saturados e insaturados más presentes en grasas y aceites | 51 |
| Tabla 12. Composición de ácidos grasos y el porcentaje de aceite de las principales materias primas utilizadas en la producción de biodiésel | 53 |
| Tabla 13. Métodos de producción de biodiesel y extracción de aceite de grasa residuos grasos de pollo | 54 |
| Tabla 14. Parámetros en la reacción de transesterificación a partir de grasa de pollo | 55 |
| Tabla 15. Contenido de la caracterización de los residuos grasos de pollo | 56 |
| Tabla 16. Tipos de extracciones empleadas | 60 |
| Tabla 17. Caracterización del aceite de pollo | 65 |
| Tabla 18. Condiciones de esterificación usando ácido sulfúrico | 70 |
| Tabla 19. Pretratamiento del aceite de pollo y condiciones de esterificación | 71 |
| Tabla 20. Factores que afectan la reacción de transesterificación básica en grasa de pollo. | 78 |
| Tabla 21. Tipo de catálisis en producción de biodiésel | 80 |
| Tabla 22. Caracterización de biodiésel a partir de grasa de pollo | 92 |
| Tabla 23. Perfil de ácidos grasos de aceite de pollo | 96 |
| Tabla 24. Perfil de ácidos grasos de diferentes aceites/grasas | 97 |
| Tabla 25. Rendimiento de la extracción del aceite de los residuos grasos de pollo | 99 |
| Tabla 26. Operaciones unitarias para obtener biodiésel a partir de grasa de pollo mediante transesterificación básica | 107 |
| Tabla 27. Condiciones de operación en la etapa I. Extracción del aceite | 108 |
| Tabla 28. Condiciones de operación en la etapa II. Obtención del biodiésel | 110 |
| Tabla 29. Condiciones de operación en la etapa II. Purificación del biodiésel | 111 |
| Tabla 30. Identificación de corrientes en etapa I | 113 |
| Tabla 31. Identificación de corrientes en etapa II | 116 |
| Tabla 32. Identificación de corrientes en etapa III | 119 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 33. Identificación de corrientes del diagrama PFD | 124 |
| Tabla 34. Capacidad másica de equipos necesarios a escala piloto | 126 |
| Tabla 35. Capacidad volumétrica de equipos necesarios a escala piloto | 126 |
| Tabla 36. Tiempo de residencia del reactor de esterificación | 134 |
| Tabla 37. Información de sustancias para selección de bombas | 143 |
| Tabla 38. Composición de la mezcla metanol, agua y aceite producido en la reacción de esterificación | 147 |
| Tabla 39. Composición de la metiléster, glicerina y metanol producido en la reacción de transesterificación | 148 |
| Tabla 40. Costos de equipos nacionales | 151 |
| Tabla 41. Costo de equipos importado | 152 |
| Tabla 42. Costo de materia prima | 153 |
| Tabla 43. Costo de mano de obra | 154 |
| Tabla 44. Consumo energético por equipos de servicios | 155 |
| Tabla 45. Costo de servicios | 155 |
| Tabla 46. Costo total de producción de biodiésel al año | 156 |
| Tabla 47. Costo total de producción de 81,216 toneladas aceite de pollo | 157 |
| Tabla 48. Producción de biodiésel partiendo de aceite de pollo de \$470 | 200 |

LISTA DE ILUSTRACIONES

| | pág. |
|---|-------------|
| Ilustración 1. Residuos grasos de pollo | 94 |
| Ilustración 2. Extracción en horno (A), Aceite de pollo extraído (B) | 94 |
| Ilustración 3. Extracción en estufa (A), Aceite de pollo extraído (B) | 95 |
| Ilustración 4. Lavadora de residuos grasos | 127 |
| Ilustración 5. Cortadora de residuos grasos de pollo | 128 |
| Ilustración 6. Extractor de aceite de pollo | 129 |
| Ilustración 7. Tanque de almacenamiento de aceite | 131 |
| Ilustración 8. Reactor batch con evaporador | 135 |
| Ilustración 9. Reactor batch | 137 |
| Ilustración 10. Tanque de almacenamiento de metanol. | 138 |
| Ilustración 11. Tanque de mezcla | 139 |
| Ilustración 12. Tanque de lavado de biodiésel | 140 |
| Ilustración 13. Tanque de almacenamiento de biodiésel | 141 |
| Ilustración 14. Bomba de desplazamiento positivo | 144 |
| Ilustración 15. Bomba centrífuga | 145 |

LISTA DE FIGURAS

| | pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Reacción de neutralización de los ácidos grasos | 68 |
| Figura 2. Reacción de esterificación | 68 |
| Figura 3. Reacción de transesterificación | 73 |
| Figura 4. Reacciones de transesterificación en serie. | 73 |
| Figura 5. Reacción de saponificación de aceites o grasas | 75 |
| Figura 6. Reacción de neutralización de los ácidos grasos | 75 |
| Figura 7. Diagrama ternario mezcla agua, metanol y ácido oleico a 20°C y 1atm | 147 |
| Figura 8. Diagrama ternario mezcla glicerina, metanol y metiléster (biodiésel) | 149 |

LISTA DE GRÁFICAS

| | pág. |
|--|-------------|
| Gráfica 1. Consumo per cápita en kg/año de carne de pollo en Colombia | 30 |
| Gráfica 2. Demanda nacional de biodiésel. | 46 |
| Gráfica 3. Efecto en el rendimiento de biodiésel al usar diferentes concentraciones de KOH como catalizador (60 °C, tiempo de reacción: 90 minutos, relación molar 6.1 de metanol: aceite) | 83 |

LISTA DE DIAGRAMAS

| | pág. |
|---|------|
| Diagrama 1. Procesos productivos generales de las plantas de beneficio | 31 |
| Diagrama 2. Diagrama de flujo de las granjas de abuelas y granjas de reproductoras | 33 |
| Diagrama 3. Diagrama de flujo de las incubadoras de huevo fértil | 34 |
| Diagrama 4. Diagrama de flujo de las granjas de pollo de engorde. | 35 |
| Diagrama 5. Diagrama de las plantas de beneficio. | 37 |
| Diagrama 6. Diagrama para la obtención de biodiésel partiendo de residuos grasos de pollo | 100 |
| Diagrama 7. Diagrama bloques del proceso de producción de biodiésel partiendo de residuos grasos de pollo | 102 |
| Diagrama 8. Balance global del proceso | 112 |
| Diagrama 9. Diagrama de bloques etapa I | 113 |
| Diagrama 10. Diagrama de balance de masa de la etapa I | 115 |
| Diagrama 11. Diagrama de bloques etapa II. | 116 |
| Diagrama 12. Diagrama de balance de masa de la etapa II | 118 |
| Diagrama 13. Diagrama de bloques etapa III. | 119 |
| Diagrama 14. Diagrama de balance de masa de la etapa III | 121 |
| Diagrama 15. Diagrama PFD de producción de biodiésel a partir de residuos grasos de pollo | 123 |

LISTA DE ECUACIONES

| | pág. |
|---|--------------------------------------|
| Ecuación 2. Rendimiento de la extracción | 98 |
| Ecuación 1. Balance de masa de la etapa I | 114 |
| Ecuación 2. Rendimiento de la extracción | ¡Error! Marcador no definido. |
| Ecuación 3. Balance de masa de la etapa II | 117 |
| Ecuación 4. Rendimiento de la transesterificación | 118 |
| Ecuación 5. Balance de masa de la etapa III | 121 |
| Ecuación 6. Volumen del reactor batch | 132 |
| Ecuación 7. Tiempo de residencia | 133 |

LISTA DE ANEXOS

| | pág |
|---|------------|
| Anexo A. Parámetros de calidad de biocombustible biodiésel | 178 |
| Anexo B. Resultados cromatografía aceite de pollo | 179 |
| Anexo C. Cálculo de rendimiento en experimentación | 183 |
| Anexo D. Cantidad de reactivo empleado | 184 |
| Anexo E. Balances de masa | 186 |
| Anexo F. Cálculo de rendimiento teórico | 193 |
| Anexo G. Cotización de equipos | 194 |
| Anexo H. Tarifas acueducto año 2020 | 196 |
| Anexo I. Tarifas alcantarillado año 2020 | 197 |
| Anexo J. Consumo energético | 198 |
| Anexo K. Cálculos de costos producción | 199 |

RESUMEN

En este trabajo se presenta una alternativa para el sector de biocombustibles en Colombia, mediante el estudio teórico de la producción de biodiésel a partir de residuos grasos de pollo, ya que este biocombustible además de cumplir con los parámetros de calidad según la normatividad correspondiente (norma ASTM D6751), se obtiene de un residuo significativo generado en las plantas de beneficio, cuyo valor puede llegar a alcanzar las 6,13 toneladas al mes.

Con base a revisión bibliográfica de diferentes autores que obtuvieron biodiésel a partir de la misma materia prima (grasa de pollo), se recopilaron las condiciones de operación y procesos unitarios como: la extracción del aceite, el pretratamiento del aceite mediante esterificación, debido al alto contenido de AGL (ácidos grasos libres) del aceite de pollo, seguido de la transesterificación y purificación del biodiésel. De esta manera, se propuso un proceso para producir este biocombustible a escala piloto, partiendo de 400 kilogramos de residuos grasos de pollo, al día. Se obtuvo un rendimiento del biodiésel respecto a la materia prima y al aceite extraído del 61,48% y 87,2%, respectivamente. Los costos de producción a escala piloto para obtener 344.030 galones al año de este biocombustible, procesando 400 kilogramos de residuos grasos de pollo al día, fueron de \$863'415.000, teniendo en cuenta los costos fijos y variables del proceso.

Este trabajo representa la base conceptual para continuar con la investigación y llevar a cabo un estudio sobre la viabilidad a escala industrial de la producción de biodiésel a partir de residuos grasos de pollo

Palabras clave: Residuos grasos de pollo, biodiésel, esterificación, transesterificación.

INTRODUCCIÓN

A comienzos del año 2019, la Unión Europea estableció límites al uso del aceite de palma para producir biocombustibles, dado que su producción causa deforestación y agrava el cambio climático¹. En la actualidad, en Colombia existen 11 plantas productoras de biodiésel en funcionamiento², todas obtienen este biocombustible sólo a partir de aceite de palma.

Según Fedebiocombustibles (Federación nacional de combustibles), el biodiésel también se puede producir a partir de algas, aceites usados, grasa animal, plantas no comestibles y no sólo de aceites vegetales como el aceite palma³.

Por tales motivos y teniendo en cuenta los retos del biodiesel en el mundo, que podrían superarse con la diversificación de las materias primas⁴, se presenta una alternativa energética a partir de la grasa animal como la grasa de pollo, mediante el desarrollo de una propuesta de proceso para la producción de biodiésel partiendo de residuos grasos de pollo. Para llevar a cabo esto, el trabajo se dividirá en cuatro capítulos.

En el primer capítulo se hablará sobre la industria avícola comenzando por un breve recuento sobre sus comienzos en Colombia y el mundo, para dar paso a la producción y consumo a nivel mundial y nacional de la carne de pollo en la última década. Además, se realizará una descripción del proceso productivo de la avicultura y de manera más amplia en las plantas de beneficio de aves, abordando las alternativas de aprovechamiento de la grasa de pollo, uno de los subproductos o residuos generados en dicha planta.

Con base a diferentes investigaciones y proyectos sobre la producción de biodiésel mediante transesterificación básica, en el capítulo dos se llevará a cabo una recopilación teórica de los procesos y las condiciones de operación para obtener este biocombustible y, conjuntamente se presentará lo reportado por otros autores usando grasa/aceite de pollo como materia prima en la producción de biodiésel.

¹LA REPÚBLICA. La Unión Europea establece límites al uso del aceite de palma para producir biocombustibles. [Sitio WEB] Bogotá D.C. 2019. La República. [20, abril, 2020] Disponible en: www.larepublica.co/globoeconomia/la-ue-establece-limites-al-aceite-de-palma-en-biocombustibles-2839164

²FEDEBIOCOMBUSTIBLES Información estadística sector biocombustibles: Biodiésel de palma de aceite. [Sitio WEB] Bogotá D.C. 2019. El tiempo [4, marzo, 2020]. Disponible en: www.fedebiocombustibles.com/estadistica-mostrar_info-titulo-Biodiesel.htm

³EL COLOMBIANO. [sitio web]. Bogotá: Fedebiocombustibles, Bioenergía, el reto de nuevos combustibles. Fedebiocombustibles. [4, marzo, 2020] Disponible en: <https://fedebiocombustibles.com/nota-web-id-806.htm>

⁴OCDE/FAO (2019), OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2017-2026, OECD Publishing, París. Consultado [20 de abril del 2020]. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2017-13-es

De esta manera, en los últimos dos capítulos, gracias a la recopilación presentada en el capítulo dos, se tomará como base lo reportado por diferentes autores que también han producido biodiésel a partir de grasa de pollo mediante transesterificación básica, para proponer los procesos unitarios adecuados y posteriormente seleccionar los equipos necesarios para producir este biocombustible partiendo de residuos grasos de pollo. Finalmente, en el último capítulo, se dará a conocer los costos de producción con base a la propuesta a escala piloto y los equipos necesarios para llevarlo a cabo.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una propuesta de proceso para la producción de biodiésel partiendo de residuos grasos de pollo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Elaborar el diagnóstico de la generación de subproductos de la industria avícola con énfasis en los residuos grasos.
2. Establecer las variables de proceso y condiciones de operación para la producción de biodiésel.
3. Determinar los equipos requeridos para desarrollar el proceso a escala piloto.
4. Analizar los costos de producción de biodiésel a escala piloto partiendo de residuos grasos de pollo

1. DIAGNÓSTICO DE LA INDUSTRIA AVÍCOLA

Con el objetivo de dar a conocer a detalle el sector avícola en Colombia, se presenta un diagnóstico del mismo para identificar el aprovechamiento actual de la grasa sólida de pollo, uno de los residuos generados en las plantas de beneficio de aves⁵ y con un alto potencial como materia prima en la producción de biodiésel.

1.1 HISTORIA DE LA INDUSTRIA AVÍCOLA

Durante siglos, el pollo ha sido considerado como un ave valiosa, antes sólo se consumía en ocasiones especiales por las mejores familias y en su mayoría se criaba para obtener sus huevos o para ser parte de peleas de gallos⁶. A mediados de 1870, en los Estados Unidos, la demanda de proteínas económicas para alimentar a miles de trabajadores de fábricas, aumentó debido al cruce por la llegada de aves exóticas y de gran tamaño, provenientes de China e Indonesia. Sin embargo, fue hasta después de la segunda guerra mundial, donde el pollo comenzó a ser considerado animal de crianza industrial, gracias a un concurso nacional de cría masivo llevado a cabo en Estados Unidos por científicos de la industria avícola y el gobierno, llamado “Pollo del mañana”⁷.

El objetivo del concurso era crear un pollo para producir carne con grandes muslos y una pechuga enorme de características económicas. Miles de participantes enviaron huevos fertilizados, que tras ser incubados y criados, fueron sacrificados y analizados. El ganador, anunciado en junio de 1951, fue un granjero de California llamado Charles Vantress. De esta manera, debido a la gran variedad de pollos presentados en ese concurso y con el pasar de los años, la crianza industrial de pollos para carne de consumo y la demanda de esta proteína en el mundo, aumentó significativamente⁸.

1.2 INDUSTRIA AVÍCOLA EN COLOMBIA

En 1926, el Gobierno de Colombia declara por primera vez a la avicultura como una “actividad económica de importancia”⁹. A partir del año 1950 se establecen compañías multinacionales productoras de químicos de uso avícola, fábricas de

⁵ EL SITIO AVÍCOLA. AMEVEA Colombia: 45 años de historia y logros [Sitio web]. 14 de noviembre de 2013. [Consultado el 21 Abril de 2020] Disponible en: <http://www.elsitioavicola.com/articulos/2480/amevea-colombia-45-aos-de-historia-y-logros/>

⁶ CERVERA, José. La invención del pollo. {En línea}. 9 Febrero de 2015. [Consultado el 21 Abril de 2020] Disponible en: https://www.eldiario.es/cultura/invencion-pollo_1_4443583.html

⁷ Ibid., p.1.

⁸ WEINTRAUB, Pam. Chicken of tomorrow. {En línea}. 5 Noviembre de 2014 {Consultado el 21 Abril de 2020} Disponible en: <https://aeon.co/essays/how-the-backyard-bird-became-a-wonder-of-science-and-commerce>

⁹EL SITIO AVÍCOLA. Op Cit., p.1.

alimentos concentrados para aves y plantas procesadoras de pollos, asaderos y prestigiosas distribuidoras de huevos y pollos, se empiezan a realizar congresos y seminarios sobre avicultura y aparecen las asociaciones avícolas¹⁰: Incubar, Asohuevo, Propollo, Asapollo, Acepollo, Incoas y Acofal, que desaparecen en 1983 para dar paso a la Federación Colombiana de Avicultores: FENAVI, entidad que además de representar el sector avícola colombiano y el gremio de los avicultores, administra los recursos del Fondo Nacional Avícola, entre otros.

Según la última actualización, presentada el 18 de marzo del año 2019 por el INVIMA (Instituto nacional beneficio de vigilancia de medicamentos y alimentos), sobre el estado de las plantas de beneficio animal inscritas en esta institución, en Colombia hay 96 plantas de aves, 13 de ellas en estado cerrado¹¹.

1.3 PRODUCCIÓN DE POLLO EN COLOMBIA

FENAVI ofrece en su página de manera pública, estadísticas sobre la producción, precios y consumo a nivel mundial y nacional del sector avícola. Según la última estadística presentada por esta entidad en el año 2018, Colombia es el cuarto país productor de pollo en Latinoamérica, después de Brasil, México y Argentina¹². Hasta el año 2005, la carne bovina fue la proteína de mayor producción en Colombia, a partir del 2006, el pollo pasó a primer lugar, seguido de la carne de res y cerdo¹³.

Según la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), en América Latina y el Caribe, para el año 2028 se proyecta un crecimiento constante de la carne de aves de corral, liderando por encima de la carne de cerdo y la carne de res¹⁴.

De acuerdo a datos estadísticos presentados por FENAVI¹⁵, en el 2005 la producción de carne de pollo en la industria avícola fue de 762.870 toneladas al año, en el 2019 este valor ascendió a 1'693.178¹⁶, además la producción de esta

¹⁰EL SITIO AVÍCOLA. Op Cit., p.1.

¹¹ INSTITUTO NACIONAL DE VIGILANCIA DE MEDICAMENTOS Y ALIMENTOS INVIMA. Planta de beneficio de aves. [Sitio web]. 10 de Julio del 2020. [Consultado el 21 Julio de 2020]

¹² BIG DUTCHMAN. Avicultura.com. [Sitio web]. [Consultado 21 Abril de 2020] Disponible en: <https://avicultura.com/colombia-se-preve-superar-los-17-m-de-tn-de-pollo-en-2019/>

¹³ BANCO DE LA REPÚBLICA. Documentos de trabajo sobre economía regional. [en línea]. Colombia. Disponible en: https://www.banrep.gov.co/docum/Lectura_finanzas/pdf/dtser_214.pdf

¹⁴OCDE/FAO (2017). "Biocombustibles", en OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2017-2026, OECD Publishing, París. Consultado [16 de abril del 2020]. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2017-13-es

¹⁵FEDERACIÓN NACIONAL DE AVICULTORES. INFORMACIÓN ESTADÍSTICA, ESTADÍSTICAS DEL SECTOR. [Sitio web]. [Consultado 21 Abril de 2020]. Disponible en: <https://fenavi.org/informacion-estadistica/#1538603557100-1385449a-253d>

¹⁶BANCO DE LA REPÚBLICA. Op Cit., p.1.

proteína en el país, ha presentado un aumento progresivo en los últimos años, cómo se evidencia en la **tabla 1**.

Tabla 1. Producción de carne de pollo en Colombia (toneladas)

| Mes/año | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 |
|--------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Enero | 124.207 | 131.660 | 126.092 | 134.115 |
| Febrero | 120.032 | 130.485 | 128.870 | 135.908 |
| Marzo | 117.025 | 121.953 | 125.704 | 129.794 |
| Abril | 121.570 | 123.963 | 133.765 | 131.683 |
| Mayo | 119.590 | 122.846 | 137.389 | 140.610 |
| Junio | 120.656 | 126.746 | 141.775 | 147.000 |
| Julio | 119.708 | 130.163 | 137.682 | 139.212 |
| Agosto | 118.100 | 128.388 | 138.701 | 139.891 |
| Septiembre | 126.960 | 136.740 | 143.772 | 149.043 |
| Octubre | 130.587 | 134.601 | 134.468 | 143.802 |
| Noviembre | 129.761 | 138.999 | 140.107 | 152.613 |
| Diciembre | 130.728 | 137.025 | 141.323 | 149.507 |
| Total | 1'478.924 | 1'563.569 | 1'629.648 | 1'693.178 |

Fuente: FENAVI. Estadísticas del sector (producción). [En línea]. Consultado [2 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://fenavi.org/informacion-estadistica/#1552493998475-e6f6f123-90da>

De la **tabla 1**, además de resaltar los valores constantes de producción de pollo entre los meses de los años presentados, se evidencia un leve aumento en los últimos meses de cada año debido al mayor consumo de esta proteína por las festividades llevadas a cabo a fin de año. Este comportamiento también se refleja en el precio de esta proteína, como se observa en la **tabla 2**, en la cual se presenta el precio mayorista del pollo entero en la ciudad de Bogotá en los últimos tres años.

Tabla 2. Precio mayorista del pollo entero – Bogotá – Guadalupe en \$/kg

| Mes/año | 2017 | 2018 | 2019 |
|------------|-------|-------|-------|
| Enero | 5.553 | 5.875 | 6.107 |
| Febrero | 5.383 | 5.908 | 6.175 |
| Marzo | 5.323 | 6.147 | 6.150 |
| Abril | 5.455 | 6.188 | 6.046 |
| Mayo | 5.754 | 6.160 | 5.915 |
| Junio | 5.641 | 6.206 | 6.016 |
| Julio | 5.680 | 6.200 | 6.051 |
| Agosto | 5.802 | 5.950 | 6.050 |
| Septiembre | 6.024 | 6.056 | 6.229 |
| Octubre | 5.740 | 6.191 | 6.287 |
| Noviembre | 5.742 | 6.088 | 6.504 |
| Diciembre | 5.975 | 6.167 | 6.510 |

Fuente: FENAVI. Estadísticas del sector DANE (precio mayorista del pollo). [En línea]. Consultado [2 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://fenavi.org/informacion-estadistica/#1552493998475-e6f6f123-90da>

Como también se evidenció en la **tabla 1**, la producción de carne de pollo en Colombia, al igual que el precio mayorista de esta proteína, aumenta en los últimos meses del año, pero mantiene un rango no muy amplio entre los meses de cada año. En la **tabla 3**, se presenta la proyección del precio del pollo para los años 2020, 2021, 2022, 2023 y 2024, con base a la inflación al consumidor reportada por el Grupo Bancolombia¹⁷.

Tabla 3. Precio proyectado del pollo según la inflación

| Año | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Inflación al consumidor | 3,80% | 1,33% | 2,46% | 3,28% | 3,40% | 3,60% |
| Precio proyectado (\$/kg) | 6.510 | 6.597 | 6.759 | 6.981 | 7.218 | 7.478 |

Fuente: elaboración propia

¹⁷ GRUPO BANCOLOMBIA, et al.. Proyecciones económicas para Colombia durante lo que queda de 2020 y 2021 [en línea]. Disponible en: https://connections.grupobancolombia.com/files/basic/anonymous/api/library/d79759b7-d193-4c70-9fbd-063f6c641d89/document/c33bbf50-433a-49b1-a7c5-ecf69b98c6a5/media?_ga=2.18362425.1230318854.1601389703-817851817.1601249138

Aunque la inflación en el año 2020 disminuyó considerablemente, según lo proyectado, en el año 2024, la inflación al consumidor, en Colombia, volverá a estar por encima del 3% después del 2021, aumentando aproximadamente \$1.000 el precio del pollo por kilogramo, desde el 2019 hasta el 2024.

1.4 CONSUMO DE POLLO EN COLOMBIA

De acuerdo a la última estadística sobre el sector avícola, presentada por FENAVI en el año 2018, Colombia ocupa el puesto número 28 de los países donde más se consume pollo por persona, al año, con un consumo per cápita de carne de pollo de 32,07 kg/año, como se muestra en la **tabla 4**

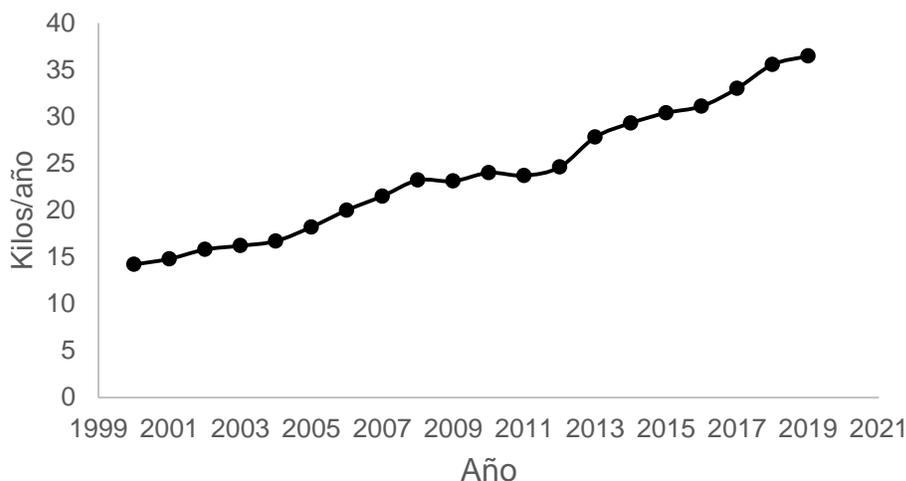
Tabla 4. Consumo per cápita de carne de pollo a nivel mundial en año 2018

| ID | País | Consumo per cápita de pollo (kg/año) |
|----|-------------------|--------------------------------------|
| 1 | Brasil | 71,2 |
| 2 | Israel | 65,23 |
| 3 | Estados Unidos | 59,82 |
| 4 | Países Bajos | 59,52 |
| 5 | Guyana | 59,46 |
| 6 | Brunei Darussalam | 58,41 |
| 7 | Barbados | 57,44 |
| 8 | Malasia | 56,03 |
| 9 | Belice | 51,37 |
| 10 | Panamá | 49,92 |
| 11 | Perú | 49,45 |
| 12 | Belarus | 49,04 |
| 13 | Nueva Zelandia | 48,4 |
| 14 | Australia | 47,93 |
| 15 | Trinidad y Tobago | 46,8 |
| 16 | Argentina | 46,64 |
| 17 | Lituania | 45,22 |
| 18 | Jamaica | 45,1 |
| 19 | Bolivia | 42,48 |
| 20 | Bélgica | 40,2 |
| 28 | Colombia | 32,07 |

Fuente: DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA –DANE-. Información pública [En línea] Consultado (2 de agosto del 2020) Disponible en: <https://fenavi.org/informacion-estadistica/#1552493998475-e6f6f123-90dana>

El pollo es una de las proteínas más consumidas en Colombia y en el mundo, su consumo ha aumentado de gran manera en las últimas décadas, como se evidencia en la **gráfica 1**. De hecho, en los años setenta un colombiano consumía 1 kilogramo de pollo al año, en el 2019 esta cifra fue de 36,47 kilogramos¹⁸. Entre los años 2000 y 2013, el consumo de carne de pollo se duplicó, pasando de 14,2 kg/año a 27,8 kg/año, por persona.

Gráfica 1. Consumo per cápita en kg/año de carne de pollo en Colombia



Fuente: FENAVI. Estadísticas del sector DANE (consumo per cápita de pollo en Colombia). [En línea]. Consultado [2 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://fenavi.org/informacion-estadistica/#1552493998475-e6f6f123-90da>

Según el censo nacional de población y vivienda, llevado a cabo por el DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística) en el año 2018, en Colombia residen 48'258.494 personas¹⁹. Por ende y teniendo en cuenta el consumo per cápita de pollo en este mismo año (35,5 kg/año), el consumo total de esta proteína en el país, para el año 2018, debió ser de 1'713.176,537 ton. Esta cantidad está por encima de la producción de pollo en Colombia para el mismo año, cuyo valor, presentado al comienzo del capítulo, en la **tabla 1**, fue de 1'629.648 toneladas. De esta manera, se proyecta un horizonte favorable para la

¹⁸ DINERO. Crece el consumo de pollo en Colombia pero preocupa el IVA (2018). Consultado [4 de marzo del 2020]. Disponible en: <https://www.dinero.com/pais/articulo/consumo-de-pollo-y-huevos-esta-creciendo-en-colombia/263805>

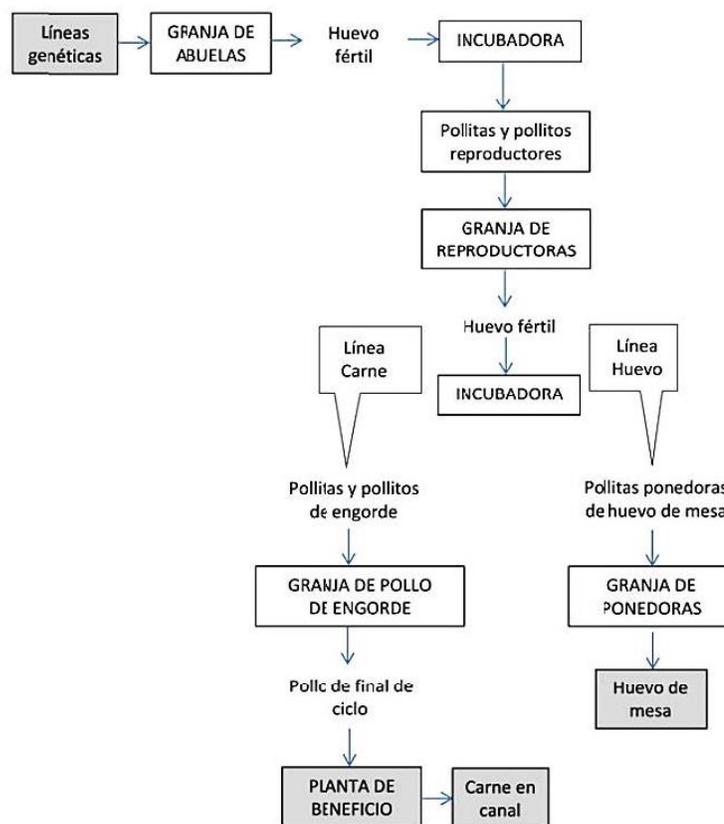
¹⁹ DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE ESTADISTICA. [En línea]. Colombia. DANE. Censo nacional de población y vivienda. 2018. [Consultado 20 de julio de 2020]. Disponible en: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Bol_Insumos_jun_2015.pdf

industria avícola en Colombia, según de los datos presentados de producción y consumo de pollo en el país.

1.5 PROCESO PRODUCTIVO DE LA AVICULTURA

La cadena productiva de la avicultura consta de seis procesos interdependientes y tecnificados llevados a cabo en²⁰: granjas de abuelas, granjas incubadoras, granjas reproductoras, granjas ponedoras de huevo, granjas de pollo de engorde y plantas de beneficio, como se observa en el **diagrama 1**.

Diagrama 1. Procesos productivos generales de las plantas de beneficio



Fuente: BANCO DE LA REPÚBLICA. Proceso productivo generales de las plantas de beneficio. [Imagen]. Determinantes del desarrollo en la avicultura en Colombia: instituciones, organizaciones y tecnología. Colombia. Diciembre del 2014. [Consultado 16 de abril del 2020]. Disponible en: https://www.banrep.gov.co/docum/Lectura_finanzas/pdf/dtser_214.pdf

²⁰AGUILERA DÍAZ, María. Documentos de trabajo sobre economía regional. [En línea]. Diciembre de 2014 [Consultado 21 Abril de 2020]. Disponible en: https://www.banrep.gov.co/docum/Lectura_finanzas/pdf/dtser_214.pdf

Los principales productos de la avicultura, carne de pollo y huevo, llegan a manos del consumidor gracias a la articulación de los procesos mencionados en el **diagrama 1**, los cuales hacen de la avicultura un sistema productivo, además de tecnificado, con un alto control de aspectos como genética, sanidad, nutrición, bioseguridad y medio ambiente²¹. Aunque la cadena productiva de la avicultura es amplia, se mostrará y describirá de manera corta los diagramas de flujo de los seis procesos, haciendo énfasis en las plantas de beneficio y los residuos generados en estas. No se mencionará la granja de ponedoras o granja ponedora de huevos de mesa, presente en la “Línea huevo”.

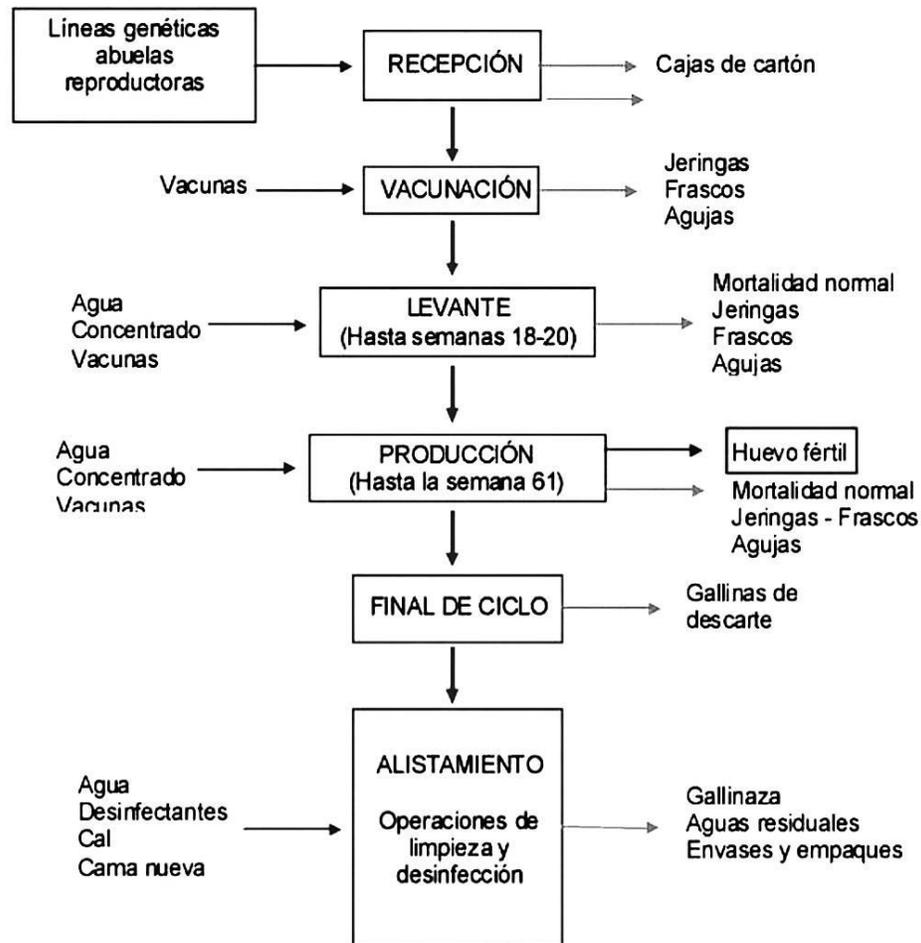
Para dar inicio al proceso general de la cadena productiva de la avicultura, se presenta el diagrama de las granjas de abuelas, el mismo de las granjas de reproductoras, presentado en el **diagrama 2**. Según la resolución 3650 dada por el ICA (Instituto Colombiano Agropecuario), las granjas de material genético o granjas abuelas adoptan la definición de “abuelas” a las aves progenitoras de las aves reproductoras y reproductores de una línea macho y una línea hembra en la cadena productiva, dando origen a un macho y hembra reproductora, respectivamente²². Las aves reproductoras son primero vacunadas, para así iniciar el ciclo de producción de huevo fértil, cuya duración es promedio 61 semanas. Ya cumplido el ciclo productivo, las comienzan actividades de limpieza y desinfección en la granja²³.

²¹ FENAVI, MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Guía ambiental para el subsector avícola. Bogotá. 2014. Consultado [14 de marzo del 2020]. Disponible en: https://fenavi.org/wp-content/uploads/2018/05/GUIA_AMBIENTAL_SUBSECTOR_AVICOLA.pdf

²² Instituto Colombiano agropecuario – ICA. resolución 3650 del 13 de noviembre del 2014. Consultado [20 de marzo del 2020]. Disponible en: [https://www.ica.gov.co/getattachment/3c2f3642-85a5-4622-91b5-5a31597c2cb4/2014R3-\(1\).aspx](https://www.ica.gov.co/getattachment/3c2f3642-85a5-4622-91b5-5a31597c2cb4/2014R3-(1).aspx)

²³ FENAVI, MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Op Cit., p.31.

Diagrama 2. Diagrama de flujo de las granjas de abuelas y granjas de reproductoras

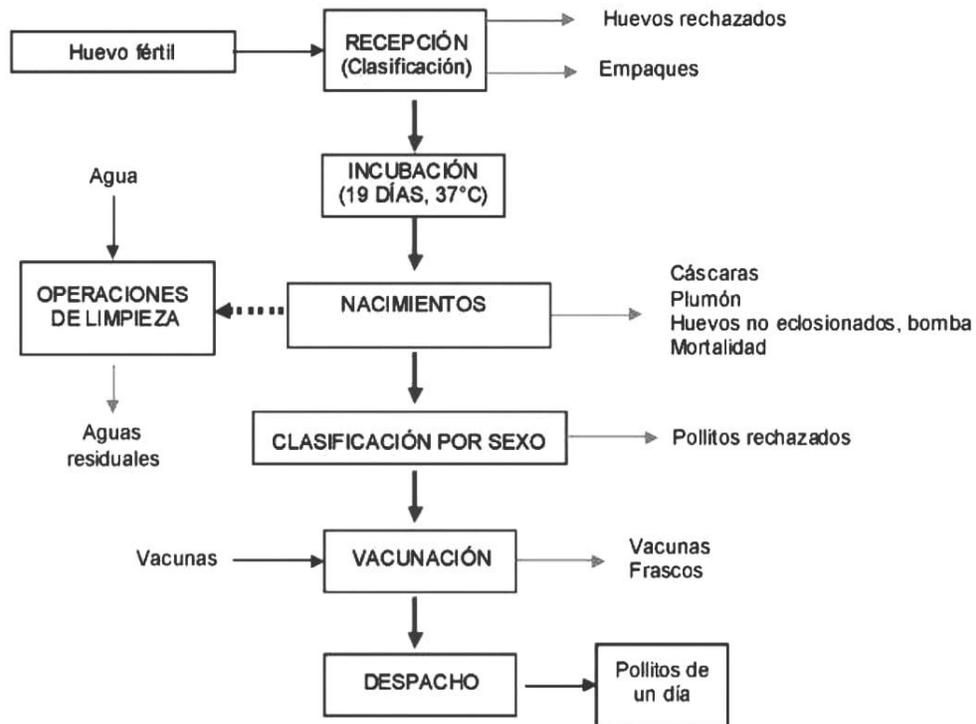


Fuente: FENAVI, MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Guía ambiental para el subsector avícola. [Imagen]. Diagrama de las granjas abuelas y las granjas de reproductoras. Bogotá. 2014 Consultado [14 de marzo del 2020]. Disponible en: <https://fenavi.org/publicaciones-programa-ambiental/guia-ambiental-para-el-subsector-avicola/>

El huevo fértil producido en las granjas de abuelas y granjas de reproductoras es llevado a las instalaciones donde se encuentran presentes las incubadoras. Allí, los huevos se incuban por 18 días, los pollos nacen a los 21 días y luego son clasificados por sexo, condiciones físicas y calidad, como se observa en el

diagrama 3, para luego ser trasladadas a las granjas de reproductoras y/o las granjas de pollo de engorde²⁴.

Diagrama 3. Diagrama de flujo de las incubadoras de huevo fértil



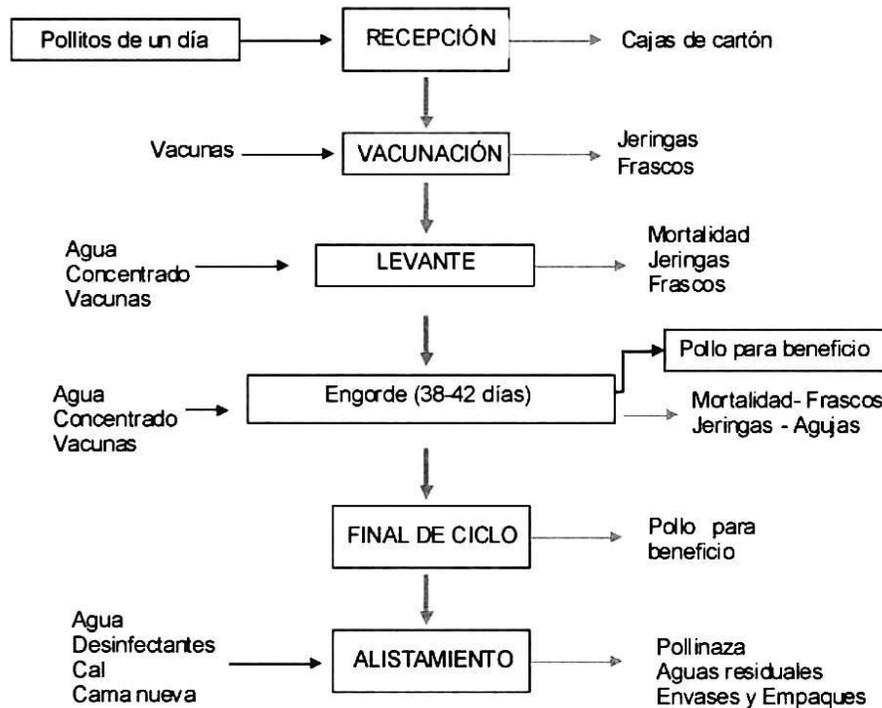
Fuente: FENAVI, MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE Guía ambiental para el subsector avícola. [Imagen]. Diagrama de las incubadoras de huevo fértil. Bogotá. 2014. Consultado [14 de marzo del 2020]. Disponible en: <https://fenavi.org/publicaciones-programa-ambiental/guia-ambiental-para-el-subsector-avicola/>

Siguiendo la línea de carne, en la granja de pollo de engorde, las pollitas o pollitos son vacunados y luego ubicados sobre una cama de viruta de madera o cascarilla de arroz, como se observa en el **diagrama 4**. El ciclo dura entre 38 a 42 días. Los pollitos de engorde en su primera semana de vida tienen un crecimiento el 20%,

²⁴ PÉREZ VILLA, María Victoria y VILLEGAS CALLE, Rodolfo Alejandro. Procedimientos para el manejo de residuos orgánicos avícolas. Medellín, 2009, Trabajo de grado (pregrado en zootecnia). Universidad de Antioquia. Facultad de ciencias agrarias. Escuela de producción agropecuaria. [Consultado 10 abril del 2020]. Disponible en: http://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/1411/1/PerezMaria_2009_ProcedimientosManejoResiduos.pdf

llegando a pesar 180-200 gramos, al final del ciclo el ave llega a pesar aproximadamente 2.500 gramos²⁵

Diagrama 4. Diagrama de flujo de las granjas de pollo de engorde.



Fuente: FENAVI, MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Guía ambiental para el subsector avícola. [Imagen]. Diagrama de las granjas de pollo de engorde. Bogotá. 2014 Consultado [14 de marzo del 2020]. <https://fenavi.org/publicaciones-programa-ambiental/guia-ambiental-para-el-subsector-avicola/>

Seguido de las granjas de pollo de engorde, los pollos vivos son llevados a las plantas de beneficio, último de los seis procesos interdependientes de la cadena productiva de la avicultura.

1.5.1 Plantas de beneficio y residuos generados. En las plantas de beneficio se reciben los pollos vivos y se entregan en canal o despresados. Las aves que llegan a esta planta se pesan e inspeccionan, las aves que llegan muertas son descartadas.

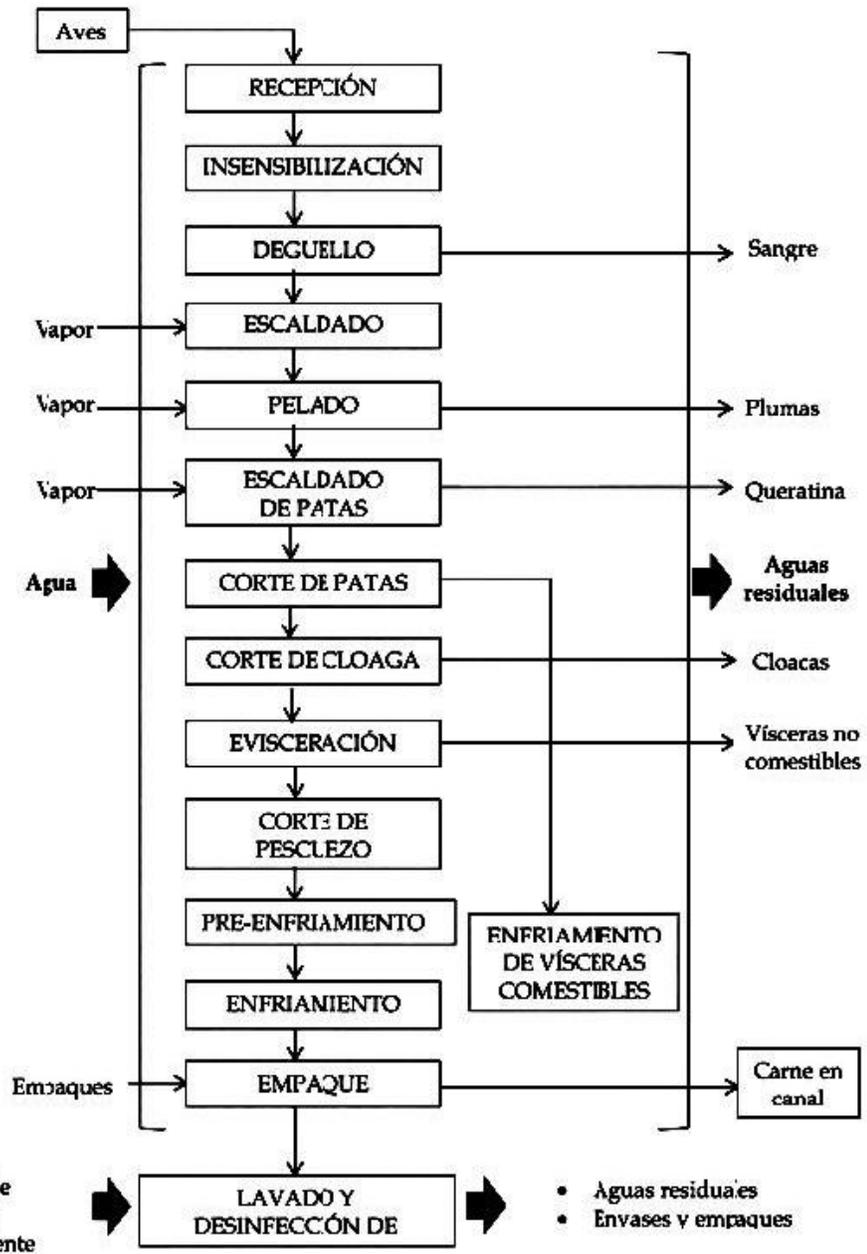
La primera operación del beneficio es la insensibilización de las aves mediante choques eléctricos, seguido del degüello, la remoción de plumas con agua caliente

²⁵ FENAVI, MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Op Cit., p.32.

y corte de las patas. En la etapa de evisceración, aislada de las demás áreas de la planta, se realiza el corte de cabezas, cloacas y extracción de vísceras. Los canales pasan a un enfriador o tanque de lavado con agua fría para remover residuos de sangre y grasa, y por el contrario, el hígado, corazón y las mollejas se separan para ser lavadas y enfriadas en una línea de proceso independiente de los canales. Finalmente, las vísceras y canales, se empacan y son almacenadas para ser despachadas a los puntos de venta²⁶. Este proceso se sintetiza en el **diagrama 5**.

²⁶ FENAVI, MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Op Cit., p.31.

Diagrama 5. Diagrama de las plantas de beneficio.



Fuente: BANCO DE LA REPÚBLICA. Documentos de trabajo sobre economía regional. [Imagen]. Diagrama de las plantas de beneficio. Colombia. 2013. (Consultado 02 de agosto del 2020) Disponible en: https://www.banrep.gov.co/docum/Lectura_finanzas/pdf/dtser_214.pdf

En las plantas de beneficio se generan residuos orgánicos como sangre, vísceras no comestibles, plumas y grasa. Para evitar la contaminación de las aguas residuales, se emplean digestores y dispositivos de retención de grasas que retiran constantemente estos residuos orgánicos²⁷. La recuperación de la sangre equivale una reducción hasta del 42% de la carga total contaminante.

Aunque en el diagrama la grasa no es incluida en los residuos generados, esta se encuentra presente en la fase de evisceración. La grasa adherida a las diferentes vísceras y región abdominal de un pollo se encuentra distribuida de la siguiente manera, aproximadamente: abdomen (59%), molleja (18%), vísceras (17,4%) y corazón (3,6%)²⁸.

Las plumas limpias y las vísceras no comestibles son sometidas a un proceso de cocción y trituración para obtener harina proteica. Además, de las vísceras no comestibles también se extrae la grasa contenida en estas²⁹.

1.5.2 Alternativas de aprovechamiento. Las alternativas para reutilizar y así aprovechar algunos de los residuos generados en las plantas de beneficio de aves, son: como fuente de alimento animal y como fuente energética³⁰

1.5.2.1 Harina para la fabricación de alimento animal. Algunos residuos orgánicos generados como vísceras no comestibles, sangre y huesos, suelen ser utilizados en la producción de harinas para la fabricación de alimentos de animal al ser ricos en proteína³¹. En una investigación llevada a cabo por el Instituto Central de Investigaciones Avícolas de India, se determinó la composición de tres harinas generadas a partir los residuos avícolas de tres tipos diferentes de aves: gallinas ponedoras, pollos de engorde y gallinas de desecho. El resultado se presenta en la **tabla 5**.

²⁷ PÉREZ VILLA, Op Cit., p. 43

²⁸ PALLARES, LEIDY. Análisis del rendimiento de grasa en canal campesina. Trabajo de grado en zootecnia. Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña. Ocaña. 2015. Consultado [20 de junio del 2020]. Disponible en: <http://repositorio.ufpso.edu.co:8080/dspaceufpso/bitstream/123456789/850/1/27814.pdf>

²⁹ PÉREZ VILLA, Op Cit., p. 43

³⁰ PÉREZ VILLA, Op Cit., p. 18

³¹ PÉREZ VILLA, Op Cit., p. 43

Tabla 5. Composición de la harina generada a partir de subproductos orgánicos de las plantas de beneficio.

| Composición | Rango |
|-----------------------------------|---------------|
| Humedad (%) | 7,7 – 7,9 |
| Proteína (%) | 54 - 61 |
| Extracto etéreo o grasa bruta (%) | 18 - 26 |
| Total de ceniza (%) | 9,59 – 17,6 |
| Ceniza, ácido insoluble (%) | 0,16 – 0,22 |
| Calcio (%) | 3,22 |
| Fósforo (%) | 1,87 |
| Energía bruta (Kcal/kg) | 6.060 – 6.220 |

Fuente: EL SITIO AVÍCOLA. Harinas de subproductos avícolas. [En línea]. Colombia. 28 de diciembre de 2011. [Consultado 6 de abril de 2020]. Disponible en: <http://www.elsitioavicola.com/articles/2078/harina-de-subproductos-avacolas/>

En el estudio concluyen que la composición de los nutrientes presentes en la harina producida a partir de residuos avícolas y, usados en la fabricación de alimento para animales, varía según el tipo de ave usada. Esta harina es incorporada hasta en un 5% en la dieta de pavitos³² y debido a su alto costo, es más utilizada en la formulación de alimentos para animales de compañía³³

1.5.2.2 Biodiésel. La grasa producida en la fase de evisceración, además de ser materia prima para la fabricación de jabones y grasas industriales, sirve como una forma concentrada de energía almacenable³⁴, siendo una materia prima apta en la producción de biocombustible, como el biodiésel, ya que el valor calorífico neto del aceite de pollo es alrededor de 37,91 MJ/kg, ligeramente inferior al de los

³² EL SITIO AVÍCOLA. Harinas de subproductos avícolas. [En línea]. Colombia. 28 de diciembre de 2011. [Consultado 6 de abril de 2020]. Disponible en: <http://www.elsitioavicola.com/articles/2078/harina-de-subproductos-avacolas/>

³³ SITANDPLAS. Ingredientes principales en la alimentación de nuestros perros. [En línea]. 14 de octubre del 2018. Consultado [30 de julio del 2020]. Disponible en: <https://www.sitandplas.com/ingredientes-principales-en-la-alimentacion-de-nuestros-perros/>

³⁴ PÉREZ VILLA, Op Cit., p.44

combustibles derivados del petróleo³⁵, sin embargo, el valor energético de una grasa depende de factores como tipo y edad del animal, y características de la dieta³⁶.

Aunque el pollo provee varios nutrientes necesarios en la dieta, su aporte de proteína y grasa varía según la parte del pollo que se consuma. En la **tabla 6** se presenta los nutrientes aportados por la pechuga y pata muslo, con y sin presencia de piel, siendo la pechuga, la parte del pollo que más se suele consumir³⁷

Tabla 6. Nutrientes aportados por diferentes partes del pollo

| | Pechuga (porción de 100g) | | Pata muslo (porción de 100g) | |
|-----------------|--------------------------------------|-----------------|---|-----------------|
| | <i>Sin piel</i> | <i>Con piel</i> | <i>Sin piel</i> | <i>Con piel</i> |
| Energía | 107 kcal | 161 kcal | 127 kcal | 200 kcal |
| Proteína | 23,7 g | 20,2 g | 19,9 g | 17,0 g |
| Grasas | 1,4 g | 8,9 g | 5,3 g | 14,7 g |
| Sodio | 47 mg | 47 mg | 74 mg | 74 mg |
| Potasio | 355 mg | 355 mg | 307 mg | 307 mg |
| Fósforo | 235 mg | 235 mg | 195 mg | 195 mg |
| Hierra | 0,3 mg | 0,3 mg | 0,6 mg | 0,6 mg |

Fuente: GALLINGER C, et al. Determinación de la composición nutricional de la carne de pollo argentina. *Diaeta* (B.Aires) [en línea]. 2016; 34 (156): 10-18, [Consultado 11 de Marzo de 2020]. Disponible en: <https://www.cincap.com.ar/informacion-nutricional/>

La grasa presente en la piel de la pechuga y la pata muslo representa el 7,5% y 9,4%, respectivamente, de una porción de 100 g de cada una de estas partes del pollo con piel. Aunque los porcentajes son bajos, el consumo de la piel o cuero de pollo en la dieta, es un tema a debatir y muchas veces es desechado, volviéndose

³⁵KIRUBAKARAN, M y MOZHI, Arul. A comprehensive review of low cost biodiesel production from waste chicken fat [en línea]. ScienceDirect. Febrero de 2018, Volumen 82,, pg. 390-401. [Consultado 11 de Marzo de 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211731287X>

³⁶ FEDNA. Grasas elaboradas, técnicas o industriales. [En línea]. Consultado [20 de agosto del 2020]. Disponible en: http://www.fundacionfedna.org/ingredientes_para_piensos/grasas-elaboradas-t%C3%A9cnicas-o-industriales

³⁷MANUEL, José. Pollería Somolinos: Las partes del pollo [En línea]. Madrid. 07 de noviembre del 2019. [Consultado 22 de julio de 2020]. Disponible en: <https://polleriasomolinos.com/partes-del-pollo/>

un potencial contaminante debido al aumento progresivo de la producción de pollo en Colombia en los últimos años. Aunque un gran número de nutricionistas asegura que la piel de esta proteína es una fuente de grasa dañina para el organismo y debido a su alto nivel de grasas saturadas su consumo no se aconseja a quienes padecen enfermedades cardiovasculares, otros nutricionistas, por el contrario la recomiendan por sus altos niveles de grasa insaturada, ayudando a bajar la presión arterial y regular la producción de hormonas³⁸.

La grasa corporal del pollo constituye entre el 15 -20% del total del peso vivo. Ésta se distribuye en su organismo formando depósitos lipídicos bien diferenciados (como el abdominal, cuello, molleja y sartorial) o bien, formando parte de otros tejidos (hígado, piel, esqueleto, plumas y resto de la carcasa, es decir, músculos, intestinos, riñones, pulmones, tejido conjuntivo y otros depósitos lipídicos)³⁹. En la **tabla 7**, se presenta la contribución de los diferentes sitios donde se deposita grasa en peso vivo del pollo y en la grasa corporal total, siendo el resto de la carcasa el que presenta mayor contribución en ambos casos.

Tabla 7. Contribución de los diferentes sitios de deposición de grasa al peso vivo y a la grasa corporal total

| Tejido | Contribución al peso vivo (%) | Contribución a la grasa corporal total (%) |
|------------------|-------------------------------|--|
| TA abdominal | 1,67 | - |
| TA de la molleja | 0,52 | - |
| TA sartorial | 0,32 | 20 |
| TA del cuello | 0,7 | - |
| TA mesentérico | 0,25 | - |
| Hígado | 2,5 | 2,5 |
| Plumas | 4,5 | 2,5 |
| Piel | 6,5 | 18 |
| Esqueleto | 20 | 15 |
| Resto de carcasa | 50 | 40 |

Fuente: ARIAS, DIANA y HERRERA, HEIDY. Evaluación de un proceso de transformación de grasas de pollo en materia prima óptima para la incorporación en procesos industriales. [En línea]. Trabajo de grado para optar por el título de especialista en transformación de residuos agroindustriales. Universidad de Pamplona. Colombia.:2008. [Consultado 20 de julio de 2020]. Disponible en: http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_101/recursos/01general/27112014/proyectodianaheydi.pdf

³⁸ MOLLEJO, Verónica. Alimento: Desmontando mitos: ¿de verdad la piel del pollo produce cáncer? [En línea]. 17 de febrero del 2020. [Consultado 20 de julio de 2020]. Disponible en: https://www.alimento.elconfidencial.com/bienestar/2018-09-03/piel-pollo-cancer-mitos_1606508/

³⁹ ARIAS, DIANA y HERRERA, HEIDY. Evaluación de un proceso de transformación de grasas de pollo en materia prima óptima para la incorporación en procesos industriales. [En línea]. Trabajo de grado para optar por el título de especialista en transformación de residuos agroindustriales. Universidad de Pamplona. Colombia.:2008. [Consultado 20 de julio de 2020]. Disponible en: http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_101/recursos/01general/27112014/proyectodianaheydi.pdf

El pollo comercial, conocido como pollo de engorde tiene un peso promedio de 2.460 gramos, sin embargo, este puede variar por factores como la genética, la salud, el manejo y la nutrición del ave.⁴⁰ Es en las plantas de beneficio en donde se concentra la mayor producción de pollos de engorde para luego comercializar su carne y demás residuos.

En Colombia, existen dos tipos de plantas de beneficio: plantas industriales y plantas de categoría especial, la capacidad de producción total colombiana se divide en un 97% y 3%, respectivamente. Las plantas industriales tienen una capacidad de sacrificio igual o mayor a 3000 pollos diarios, por el contrario, en las plantas de categoría especial se pueden llegar a procesar menor de 3000 aves⁴¹.

Las plantas de beneficio de dos empresas colombianas dedicadas a la producción avícola, Pollos El Bucanero S.A y Don Pollo S.A.S, cuentan con una capacidad instalada de 135.000 pollos diarios⁴² y 43 millones de pollos anuales⁴³. Por ende y, con base a los datos presentados sobre el porcentaje de grasa del pollo vivo (15-20%) y el peso de este (2.460 g), se estima una generación aproximada de 66,42 toneladas diarias y 21.156 toneladas al año de grasa de pollo, en las plantas de beneficio de las empresas Pollos El Bucanero S.A y Don Pollo S.A.S, respectivamente.

En el año 2015, Pallares llevó a cabo un estudio en la planta de beneficio de AVIDESA MAC POLLO S.A ubicada en Bucaramanga, Santander, para analizar el rendimiento en las canales de aves teniendo en cuenta la pérdida de grasa abdominal adherida a la molleja en el proceso de evisceración, los resultados obtenidos demostraron un alto rendimiento de la canal con la separación de la grasa abdominal. Pallares logró aprovechar 4.146 gramos de grasa de una muestra de 140 aves de un total de 207.092 aves procesadas en un mes en la planta de beneficio⁴⁴. De esta manera, si se separará la grasa abdominal en el proceso de evisceración, se obtendría 6,13 toneladas de grasas al mes, es decir, aproximadamente 383,30 kilogramos al día.

⁴⁰ DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADISTICA [Sitio web]. Colombia. DANE. Boletín mensual insumos y factores asociados a la producción agropecuaria. [Consultado 20 de julio del 2020]. Disponible en: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Bol_Insumos_jun_2015.pdf

⁴¹ UNIVERSIDAD DE LOS ANDES FACULTAD DE ADMINISTRACIÓN. [En línea]. Colombia. ¿Qué es una planta de beneficios? 17 de marzo del 2016. [Consultado 20 de julio del 2020]. Disponible: <https://agronegocios.uniandes.edu.co/2016/03/17/que-es-una-planta-de-beneficios/>

⁴² POLLOS BUCANERO. Así producimos alimentos. [Sitio web]. Colombia; [Consultado 26 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.pollosbucanero.com/asi-producimos-alimentos>

⁴³ El Quindiano: Don pollo: pionera en tecnología, innovación y generación de empleo en la región. [En línea]. Colombia: 28 de Julio de 2018. [Consultado 26 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.elquindiano.com/noticia/4595/don-pollo-pionera-en-tecnologia-innovacion-y-generacion-de-empleo-en-la-region>

⁴⁴ PALLARES, Op. Cit., p.57.

2. PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL

El biodiésel es un biocarburante o biocombustible líquido, descrito por la ASTM⁴⁵ (American Society for Testing and Materials) como “ésteres monoalquílicos de ácidos grasos, de cadena larga derivados de lípidos renovables, tales como aceites vegetales o grasas de animales, y que se emplean en motores de ignición de compresión”⁴⁶, es decir, motores diésel.

2.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL BIODIÉSEL

El biodiésel puro, conocido como B100, ha sido denominado combustible alternativo por los Departamentos de Energía y de Transporte de los Estados Unidos; de esta manera puede usarse en estado puro, sin embargo, es usado con mayor frecuencia como aditivo en el combustible diésel convencional, según la norma ASTM D6751, la cual establece un nivel mínimo de calidad en el biodiésel⁴⁷.

2.1.1 Ventajas. A continuación, se presentan algunas ventajas del biodiésel respecto a los combustibles tradicionales procedentes del petróleo (diésel):

- Prolonga la vida útil del motor y reduce la necesidad de mantenimiento al poseer mejores cualidades lubricantes que el combustible tradicional las cualidades lubricantes⁴⁸
- Genera menos emisiones de gases de efecto invernadero y sustancias perjudiciales para la salud, como CO₂, hollín o benceno⁴⁹.
- Su transporte puede ser más sencillo que el diésel⁵⁰
- Al emplear como materias primas fuentes naturales, es un combustible respetuoso con el medio ambiente y además, es biodegradable⁵¹

⁴⁵ KESSEL, Nelson. ASTM establece las normas para el biodiésel. [en línea] USA: 2009. [Consultado 02 de marzo del 2020]. Disponible en: https://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPJF09/nelson_spjf09.html

⁴⁶ Fedebiocombustibles. Bioenergía, el reto de nuevos combustibles. [En línea]. Bogotá. [Consultado: 4 de Julio del 2020]. Disponible en: <https://fedebiocombustibles.com/nota-web-id-806.htm>

⁴⁷ KESSEL, Nelson. Op Cit., p. 1.

⁴⁸ EK LEÓN, Luis Eduardo. Estudio de factibilidad de producción de biodiesel a partir de residuos grasos de la industria avícola. [En línea]. Tesis. Universidad Veracruzana, Orizaba, Veracruz: 2019. [Consultado 15 Julio del 2020]. Disponible en: <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/1944/49331/EkLeonLuis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

⁴⁹ LOCTITE TEROSON. Pros y contras del biodiesel respecto al diésel y la gasolina. [Sitio WEB] España. Ruta 401. [Consultado 02 de marzo del 2020]. Disponible en: <https://blog.reparacion-vehiculos.es/pros-y-contras-del-biodiesel>

⁵⁰ *Ibíd.*, p. 1.

⁵¹ *Ibíd.*, p. 1.

- Sustitución del diésel convencional en quemadores, turbinas y motores, sin necesidad de modificar el motor⁵².
- A diferencia del diésel convencional, el biodiésel no contiene azufre, evitando la pérdida de lubricación que afecta el rendimiento del motor⁵³
- Mayor poder disolvente, haciendo que no se produzca carbonilla ni se obstruyan los conductos y mantiene limpio el motor⁵⁴
- Se producen menos partículas de desgaste que pueden contaminar el aire⁵⁵

2.1.2 Desventajas. A continuación, se presentan algunas desventajas del biodiésel respecto a los combustibles tradicionales procedentes del petróleo (diésel):

- No se puede usar en todos los motores del mercado. Antes, siempre se debe consultar el manual del vehículo para saber si el fabricante permite usarlo como combustible⁵⁶.
- Por lo general es más costoso que los combustible fósiles, aunque esto depende de su origen y elaboración⁵⁷
- Solidificación a bajas temperaturas, ocasionando la formación de cristales que pueden llegar taponar tuberías.⁵⁸
- Se pueden obstruir los filtros debido a la presencia de sodio (K) o potasio (Na) al causar precipitación de jabones. Esto se debe a un incorrecto proceso de lavado y del biodiésel.⁵⁹
- Emisión de óxidos de nitrógeno que contaminan la capa de ozono⁶⁰

⁵²HERRERA RESTREPO, Juan Alberto y VELEZ, Julián Andrés. Caracterización y aprovechamiento del aceite residual de frituras para la obtención de un combustible (biodiesel). [en línea] Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira: 2008 [Consultado 02, marzo, 2020]. Disponible en: <https://core.ac.uk/reader/71395470>

⁵³ Ibíd., p. 10.

⁵⁴ Ibíd., p. 10.

⁵⁵ Ibíd., p. 10.

⁵⁶ LOCTITE TEROSON, Op. Cit., p.1

⁵⁷ Ibíd., p. 1.

⁵⁸ Ibíd., p. 1.

⁵⁹ HERRERA RESTREPO, Op Cit., p. 10.

⁶⁰ EK LEÓN, Luis Eduardo. Op Cit., p. 1.

- Al poseer menor estabilidad a la oxidación, en comparación con el diésel convencional, cuando se almacena por periodos prolongados debe hacerse de manera adecuada o disminuirá la calidad del biodiésel⁶¹.
- Al tener una viscosidad mayor que el diésel, pueden ocasionar pérdidas de flujo a través de los filtros e inyectores⁶².

2.2 PRODUCCIÓN Y CONSUMO DE BIODIÉSEL EN COLOMBIA

En la actualidad, en Colombia existen 11 plantas productoras de biodiésel en funcionamiento, todas obtienen este biocombustible sólo a partir de aceite de palma⁶³. En la **tabla 8**, se presentan los indicadores de la producción y ventas de biodiésel en el país, desde el año 2009 al año 2017, observándose un aumento de mayor al 30% tanto en la producción como en la venta de este biocombustible, en menos de una década.

Tabla 8. Producción de biodiésel de aceite de palma.

| Indicador | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 |
|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Producción Biodiésel (Toneladas) | 163.077 | 337.713 | 443.037 | 489.990 | 503.337 | 518.093 | 513.354 | 458.800 | 460.121 |
| Ventas Biodiésel (Toneladas) | 169.065 | 337.718 | 273.170 | 488.187 | 505.709 | 518.745 | 523.403 | 506.990 | 513.336 |

Fuente: FEDEBIOCOMBUSTIBLES. Biodiesel de palma de aceite. [En línea]. Colombia. Enero del 2020. [Consultado 14 de abril del 2020]. Disponible en: https://www.fedebiocombustibles.com/estadistica-mostrar_info-titulo-Biodiesel.htm

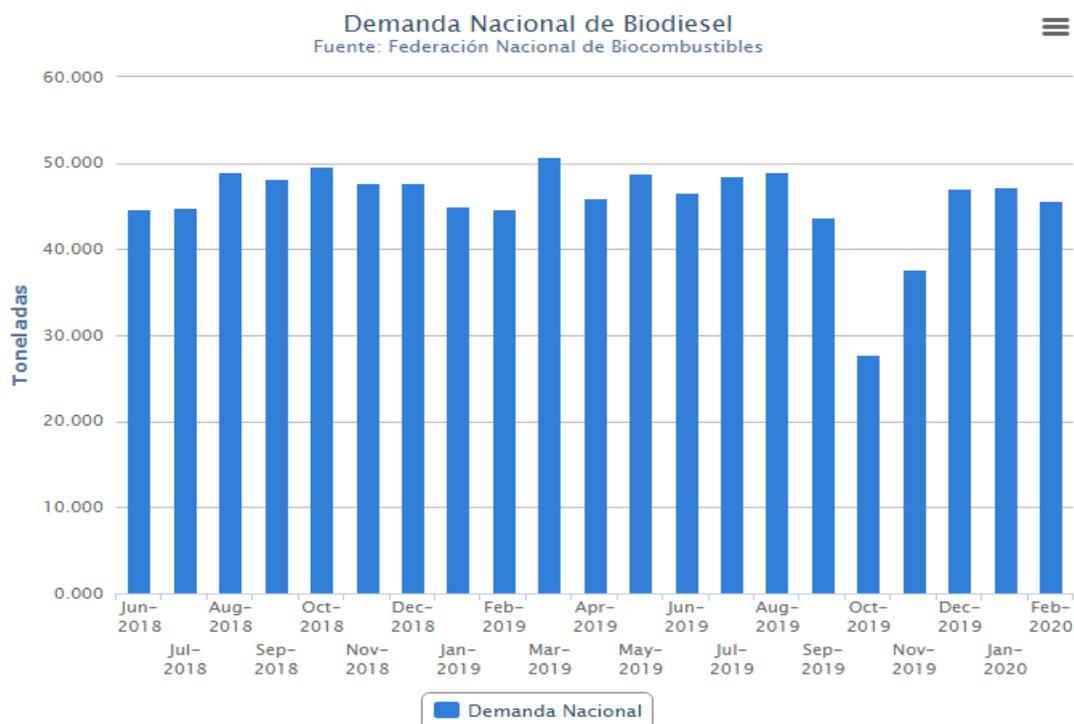
Según Fedebiocombustibles (Federación nacional de biocombustibles), la Demanda nacional = Importaciones + Demanda de producción nacional, ha estado por encima de las 40.000 toneladas desde el 2018 hasta comienzos de este año (a excepción de octubre y noviembre del 2019), como se evidencia en la **gráfica 2**.

⁶¹ *Ibíd.*, p. 1.

⁶² HERRERA RESTREPO, Op Cit., p. 11.

⁶³ EL TIEMPO. Plantas productoras de biodiesel en funcionamiento (2019), Consultado [4 de marzo del 2020]. Disponible en: www.fedebiocombustibles.com/estadistica-mostrar_info-titulo-Biodiesel.htm

Gráfica 2. Demanda nacional de biodiésel.



Fuente: FEDEBIOCOMBUSTIBLES. Demanda nacional de biodiésel [Gráfico de barras]. Marzo del 2020. [Consultado 14 de abril del 2020]. Disponible en: <https://www.fedebiocombustibles.com/estadistica-produccion-titulo-Biodiesel.htm>

Colombia es el cuarto país del mundo que produce aceite de palma y el primero en Latinoamérica. Al tener materia prima suficiente y una infraestructura organizada, según Fedebiocombustibles, permite que la oferta de biodiésel genere excedentes en el mercado colombiano y surge la oportunidad de exportar materia prima⁶⁴. En el año 2017, Jorge Bendeck, presidente de Fedebiocombustibles, aseguró: “la capacidad instalada para producir biodiésel en Colombia actualmente es de 850.000 toneladas al año y si el mercado consume 550.000 toneladas, las refinerías que tenemos pueden producir 300.000 más”⁶⁵, sin embargo, el mercado

⁶⁴ EL TIEMPO. Fedebiocombustibles. Biodiésel de manuelita, tras la conquista del mercado europeo. [En línea]. Bogotá. Consultado [22 de abril del 2020]. Disponible en: <https://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-3276.htm>

⁶⁵ ALFONSO, Katherin. Producción nacional de biodiésel podría atender la demanda del biocombustible. [En línea]. 26 Septiembre de 2017. [Consultado 22 Abril de 2020]. Disponible en: <https://www.larepublica.co/economia/produccion-nacional-de-biodiesel-podria-atender-la-demanda-del-biocombustible-2552357>

de los biocombustibles es regulado por el gobierno nacional y es este quien decide cuanto producir.

2.3 MATERIAS PRIMAS EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL

Según Fedebiocombustibles (Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia), biocombustibles como el biodiésel se pueden producir a partir de algas, de excremento de cerdos o gallinas, de aceites usados de cocina, de desechos industriales o de plantas no comestibles, y no solo de aceites vegetales como el aceite de palma, soja, colza, entre otros⁶⁶. En la **tabla 9** se presentan los aceites más usados como materia prima en la producción de biodiésel y algunos ejemplos⁶⁷

Tabla 9. Aceites más usados en la producción de biodiésel

| Tipo de aceite | | Ejemplos |
|--------------------------|----------------|---|
| Aceite de origen vegetal | Convencionales | Girasol, colza, soja, coco, palma y ricino |
| | Alternativos | Brassicacarinata, Cynaracurdunculus, Camelina sativa, Crambeabyssinica, Pogianus, Jatropha curca |
| Aceites usados | | Aceites vegetales usados Aceites de fritura/cocina usados |
| Aceites de otras fuentes | | De producciones microbianas, micro algas, grasas residuales provenientes de plantas de tratamiento de aguas |
| Grasas animales | | Sebo de vaca, ovino y caprino, manteca de cerdo, grasa de pollo, grasa de pescado |

Fuente: elaboración propia, con base en: VIVAS CASTAÑO, Andrea Maritza. Estudio y obtención de biodiesel a partir de residuos grasos de origen bovino. [En línea] Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira: [Consultado 02, marzo, 2020]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/f37d/645cb7ca48e5da5e8a7184688956b8f7533e.pdf>

⁶⁶ FEDEBIOCOMBUSTIBLES. Preguntas Frecuentes de los Biocombustibles. [Sitio WEB] Bogotá D.C. La entidad. [Consultado 02, marzo, 2020]. Disponible en: <https://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-923.htm>

⁶⁷ VIVAS CASTAÑO, Andrea Maritza. Estudio y obtención de biodiesel a partir de residuos grasos de origen bovino. [en línea] Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira: [Consultado 02, marzo, 2020]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/f37d/645cb7ca48e5da5e8a7184688956b8f7533e.pdf>

A nivel mundial, la materia prima más común para la producción de biodiésel es el aceite de origen vegetal convencional, siendo pioneros el aceite de palma y soja y, en menor medida, el aceite de colza, sobre todo en Europa.⁶⁸ Sin embargo, la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), en una publicación sobre las perspectivas agrícolas 2019-2028, concluye que la producción de biodiésel se ve restringida por la oferta limitada de aceites vegetales al competir de manera directa con la demanda alimentaria⁶⁹, además, se suma el hecho que la producción de estos aceites vegetales agravarán la deforestación mundial y la pérdida de biodiversidad⁷⁰.

Respecto a la producción de biocombustibles a partir de microalgas, a pesar de ser una alternativa interesante en comparación con las fuentes convencionales, presentan diversos inconvenientes, ya que el combustible resultante puede tener un alto contenido de oxígeno, presentando problemas al fluir a bajas temperaturas o contaminarse al estar reaccionar con un catalizador que contenga azufre⁷¹. Por otro lado, el aceite usado, aunque da solución al problema de su disposición como residuo, su dificultad está en recolectar estos aceites, presentando diferentes características según su procedencia⁷².

En el año 2009, en Estados Unidos y Brasil, el 26% y 17% de la producción total de biodiésel, respectivamente, era a partir de grasa animal, siendo esta la segunda materia prima más utilizada para la obtención de este biocombustible en ambos países, después del aceite de soja. En el mismo año, en Canadá, cerca del 76% de la producción de biodiésel se hizo a partir de grasa animal⁷³.

En Brasil, en el año 2018, el aceite de soja representó el 70% del volumen para la producción de biodiesel (B10: mezcla 10% biodiésel - 90% diésel), seguido de la grasa animal con un 16%. Este comportamiento ha sido constante desde el año 2014, como se evidencia en la **tabla 10**.

⁶⁸ OCDE/FAO. Op. Cit., p.1

⁶⁸ Ibíd., p. 1.

⁶⁹ Ibíd., p. 1.

⁷⁰ ECOLOGISTAS EN ACCION. Los biocombustibles de palma y soja agravarán la deforestación mundial y la pérdida de biodiversidad. [En línea]. Agrocombustibles. 10 de marzo del 2020. Consultado [20 de mayo del 2020]. Disponible en: <https://www.ecologistasenaccion.org/138863/los-biocombustibles-de-palma-y-soja-agravarán-la-deforestación-mundial-y-la-pérdida-de-biodiversidad/>

⁷¹ FEDEBIOCOMBUSTIBLES. Método de producción de biodiésel podría reducir los inconvenientes de los combustibles. [En línea]. Bogotá. [Consultado: 4 de Julio de 2020]. Disponible en: www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-986.htm

⁷² GALEANO, Christian y GUAPACHA, Esteban. Aprovechamiento y caracterización de los residuos grasos del pollo para la producción de un biocombustible (Biodiesel). [en línea] Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira: 2011 [Consultado 02, marzo, 2020]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/0fb1/64d8c7a0f659c63d8a53884b4beaf80a00e7.pdf>

⁷³ FEDEBIOCOMBUSTIBLES. Boletín No 30: Biocombustibles HOY. Bogotá [En línea]. [Consultado: 4 de Julio de 2020]. Disponible en: <https://fenavi.org/comunicados-de-prensa/el-sector-avicola-crecio-45-en-2018/>

Tabla 10. Materias primas utilizadas en la producción de biodiésel en Brasil.

| Materias primas utilizadas en la producción de biodiésel (B10) Ton | | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Materias primas | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| Total | 3'415.467 | 3'938.873 | 3'817.055 | 4'289.351 | 5'303.632 |
| Aceite de soja | 2'625.558 | 3'061.027 | 3'020.819 | 3'072.446 | 3'703.066 |
| Aceite de algodón | 76.792 | 78.840 | 39.628 | 12.426 | 49.175 |
| Grasa animal ¹ | 675.861 | 738.920 | 622.311 | 720.932 | 860.194 |
| Otro ² | 37.255 | 60.086 | 134.297 | 438.544 | 691.197 |

¹Incluye grasa bovina, grasa de pollo y grasa de cerdo. ²Incluye aceite de palma, aceite de maní, aceite de rábano, aceite de girasol, aceite de mamona, aceite de sésamo, aceite de fritura usado y otros materiales grasos

Fuente: ARISTIMUNHA, Patricia. Uso de biosurfactantes: La decisión inteligente en el actual escenario de cambios en la cadena de soja/biodiesel. En: AviNews. [En línea]. Brasil. Consultado [02 de marzo del 2020]. Disponible en: <https://avicultura.info/biosurfactantes-lysoforte-kemin/>

En la actualidad, JBS, una multinacional de origen brasileño, reconocida como uno de los líderes mundiales en la industria de alimentos⁷⁴, además de dirigir dos plantas de biocombustibles en Brasil que usan sebo de res, está construyendo otra planta en Santa Catarina, donde la compañía utilizará desechos de grasa de pollo y cerdo. JBS también posee plantas similares en Canadá y Estados Unidos⁷⁵.

2.4 COMPOSICIÓN DEL ACEITE

La composición de un aceite o grasa se puede determinar mediante una de las técnicas más usada en el análisis de aceites esenciales, conocida como cromatografía de gases, esta técnica separa e identifica los compuestos de mezclas complejas, como los aceites y grasas, por la diferencia de peso molecular de los distintos compuestos presentes en la muestra.⁷⁶

⁷⁴ JBS S.A. JBS: Fazer o Bem Faz Bem. [En línea]. Brasil. [Consultado: 4 de Julio de 2020]. Disponible en: <https://jbs.com.br/sobre/jbs/>

⁷⁵ GESTION. En producción de biocombustible de Brasil, la grasa es buena. 20 de enero del 2020. Consultado [15 de junio del 2020]. Disponible en: <https://gestion.pe/mundo/internacional/en-produccion-de-biocombustible-de-brasil-la-grasa-es-buena-noticia/>

⁷⁶ FENGHI. FENGHI: ¿Cómo funciona la cromatografía? [En línea]. [Consultado: 4 de Julio del 2020]. Disponible en:

La RAE (Real Academia Española) define aceite como “una sustancia grasa, líquida a temperatura ordinaria, de mayor o menor viscosidad, no miscible con agua y de menor densidad que ella, que puede obtenerse sintéticamente”⁷⁷, su composición de un aceite o grasa se puede expresar en función de su perfil de ácidos grasos o triglicéridos. Aunque este último brinda información más detallada sobre el tipo de ácido graso y su forma de distribución, al requerir más tiempo experimental y técnicas analíticas de manera continua, es poco usado⁷⁸.

Los ácidos grasos están compuestos por cadenas hidrocarbonadas y se diferencian entre sí por su longitud y presencia de enlaces dobles u otros grupos funcionales⁷⁹. Según la presencia de enlaces dobles se clasifican en saturados (sin enlaces dobles) e insaturados (con uno o más enlaces dobles), estos últimos, a su vez, pueden ser monosaturados (poseer sólo un doble enlace) o poliinsaturados (poseer más de un doble enlace). En la **tabla 11** se recopilan los ácidos grasos saturados e insaturados más presentes en la composición de aceites y grasas.

<https://www.fenghi.es/pages/cromatografia#:~:text=%C2%BFC%C3%B3mo%20funciona%20la%20cromatograf%C3%ADa%3F,aceites%20esenciales%2C%20son%20muy%20complejas.&text=La%20base%20de%20esta%20separaci%C3%B3n,m%C3%B3vil%20y%20la%20fase%20estacionaria>

⁷⁷ Diccionario de la lengua española [sitio web]. Madrid, España. DEL. Significado palabra “Aceite”. [Consultado: 5 de Julio de 2020]. Disponible en: <https://dle.rae.es/aceite>

⁷⁸ RÍOS, Luis Alberto, BENJUMEA HERNANDEZ, Pedro Nel y AGUDELO SANTAMARÍA, John Ramiro. Producción de biodiésel. En; Biodiésel: Producción, calidad y caracterización. Medellín: Universidad de Antioquia, 2009. 16-44. [Consultado 16 de abril 2020]. Disponible en: <https://books.google.com.co/books?id=yiaApKhNqRYC&printsec=frontcover&dq=biodiesel&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjWgIP80OvoAhXGI-AKHSpcC0kQ6AEIKDAA#v=onepage&q&f=false>

⁷⁹ *Ibíd.*, p. 5.

Tabla 11. Ácidos grasos saturados e insaturados más presentes en grasas y aceites

| <i>Nombre común</i> | <i>Nombre técnico</i> | <i>Fórmula</i> | |
|--|--------------------------------|-------------------|------|
| Ácidos grasos saturados de mayor ocurrencia en aceites y grasas | | | |
| Láurico | Dodecanoico | $C_{12}H_{24}O_2$ | 12:0 |
| Mirístico | Tetradecanoico | $C_{14}H_{28}O_2$ | 14:0 |
| Palmitico | Hexadecanoico | $C_{16}H_{32}O_2$ | 16:0 |
| Esteárico | Octadecanoico | $C_{18}H_{36}O_2$ | 18:0 |
| Araquídico | Eicosanoico | $C_{20}H_{40}O_2$ | 20:0 |
| Behénico | Docosanoico | $C_{22}H_{44}O_2$ | 22:0 |
| Lignocérico | Tetracosanoico | $C_{24}H_{48}O_2$ | 24:0 |
| Cerótico | Hexacosanoico | $C_{26}H_{52}O_2$ | 26:0 |
| Ácidos grasos insaturados de mayor ocurrencia en aceites y grasas | | | |
| Lauroleico | 9-dodecenoico | $C_{12}H_{22}O_2$ | 12:1 |
| Miristoleico | 9-tetradecenoico | $C_{14}H_{26}O_2$ | 14:1 |
| Palmitoleico | 9-hexadecenoico | $C_{16}H_{30}O_2$ | 16:1 |
| Oleico | 9-octadecenoico | $C_{18}H_{34}O_2$ | 18:1 |
| Linoleico | 9,12-octadecadienoico | $C_{18}H_{32}O_2$ | 18:2 |
| α -Linolénico | 9,12,15-octadecatrienoico | $C_{18}H_{30}O_2$ | 18:3 |
| Gadoleico | 11-eicosenoico | $C_{20}H_{38}O_2$ | 20:1 |
| Araquidónico | 5,8,11,14-eicosatetraenoico | $C_{20}H_{32}O_2$ | 20:4 |
| EPA | 5,8,11,14,17-eicosapentaenoico | $C_{20}H_{30}O_2$ | 20:5 |
| Erúcico | 13-docosenoico | $C_{22}H_{42}O_2$ | 22:1 |

Fuente: elaboración propia, con base en: RÍOS, Luis Alberto, BENJUMEA HERNANDEZ, Pedro Nel y AGUDELO SANTAMARÍA, John Ramiro. Producción de biodiésel. En; Biodiésel: Producción, calidad y caracterización. Medellín: Universidad de Antioquia, 2009. 16-44. [Consultado 16 de abril 2020]. Disponible en: <https://books.google.com.co/books?id=yiaApKhNqRYC&printsec=frontcover&dq=biodiesel&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjWgIP80OvoAhXGI-AKHSpC0kQ6AEIKDAA#v=onepage&q&f=false>

Si bien, en la producción de biodiésel, la cantidad de aceite presente en la materia prima es una característica importante al momento de elegir⁸⁰, también lo es el contenido de ácidos grasos saturados e insaturados presentes en este. El perfil de ácidos grasos de un aceite influye directamente en las características y calidad del biocombustible, esto se debe a que los ésteres formados durante la reacción de transesterificación mantienen el mismo perfil de ácidos grasos del aceite usado como materia prima, por ende “el proceso de transesterificación no afecta la composición de ácidos grasos”⁸¹.

Por ejemplo, aceites con altos contenidos de ácidos grasos saturados o monoinsaturados, proporcionan un biodiésel con buena estabilidad oxidativa, es decir, una buena resistencia a los cambios físicos y químicos producidos por la interacción con el ambiente durante su almacenamiento; pero así mismo, esta alta cantidad de saturados empeoran las propiedades a bajas temperaturas del biocombustible, ya que los compuestos grasos saturados tienen un punto de fusión más alto que los compuestos insaturados, dando valores bajos para los puntos de nube y fluidez en el biodiésel producido⁸².

En cuanto a la alta susceptibilidad a la oxidación, mayor en los compuestos di y triinsaturados, como los ácidos grasos linoleico y linolénico, se debe a los sitios reactivos que inician la reacción de oxidación; sin embargo, la adición de antioxidantes sintéticos puede llegar a mejorar dicha estabilidad oxidativa⁸³. Como se observa en la **tabla 12**, la cual presenta el perfil o composición de ácidos grasos de las principales materias primas más usadas en la producción de biodiésel, como el aceite de palma, soja, colza, girasol, entre otros, el contenido de ácidos grasos saturados e insaturados varía según la materia prima.

⁸⁰ SANTOS, Eoinice. Las materias primas utilizadas en la producción de biodiesel: la influencia del contenido y la concentración de los ácidos grasos. [En línea]. Trabajo de master y doctorado. Centro Universitario de Química de Gerais. Brasil. 2012. Consultado [10 de julio del 2020]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5038487.pdf>;LAS

⁸¹ RAMOS, María., et.al. Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties. En: ScienceDirect [En línea]. Enero, 2009, Volumen 100, p. 261-268. [Consultado: 15 de Julio de 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852408005464?via%3Dihub>

⁸² SANTOS, Eoinice. Op Cit., p. 57

⁸³ *Ibíd.*, p. 54

Tabla 12. Composición de ácidos grasos y el porcentaje de aceite de las principales materias primas utilizadas en la producción de biodiésel

| Ácidos grasos% (Numero de carbono: número de dobles enlaces) | | | | | | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|--------------|
| Oleaginosas | 14:0 | 16:0 | 16:1 | 18:0 | 18:1 | 18:1OH | 18:2 | 18:3 | Otros |
| Soja | - | 11 | - | 4 | 24 | - | 54 | 7 | - |
| Palma | 1,1 | 36,7 | 0,3 | 4,5 | 43,5 | - | 10,9 | - | - |
| Girasol | - | 6,5 | - | 2,9 | 17,7 | - | 72,9 | - | - |
| Colza | - | 4,9 | - | 1,6 | 33 | - | 20,4 | 7,9 | 29,3 |
| Jatropha | - | 16,4 | 0,9 | 5,4 | 40,3 | - | 37 | - | - |
| Maní | - | 11,4 | - | 2,4 | 48,3 | - | 32 | 0,9 | 4 |
| Algodón | - | 28,7 | - | 0,9 | 13 | - | 57,4 | - | - |

Fuente: SANTOS, Eloinice. Las materias primas utilizadas en la producción de biodiesel: la influencia del contenido y la concentración de los ácidos grasos. [En línea]. Trabajo de master y doctorado. Centro Universitario de Química de Gerais. Brasil. 2012. Consultado [10 de julio del 2020]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5038487.pdf>;LAS

El aceite de palma tiene el mayor contenido de ácidos grasos saturados (51,5%). Por el contrario, en los aceites de soja y colza se encuentran altas concentraciones de ácidos grasos insaturados, como también ocurre en los aceites de girasol, Jatropha, algodón y maní. En concentraciones significativas, se encuentran presente el ácido linolénico (18:2) y oleico (18:1) en lo aceites de soja, colza y palma.

2.5 BIODIÉSEL A PARTIIR DE GRASA DE POLLO

En las dos últimas décadas la obtención de biodiésel a partir de grasa de pollo se ha investigado de gran manera como alternativa en el sector de los biocombustibles, además ha contado con un gran número de patentes⁸⁴ y

Autores como Kirubakaran y Arul⁸⁵ recopilaron los métodos de producción más empelados para obtener biodiésel a partir de grasa de pollo y los diferentes métodos de extracción para obtener su aceite, presentados en la **tabla 13**.

⁸⁴ TOLDRÁ-REIG, FIDEL Y MORA, LETICIA. Trends in biodiesel production from animal waste. Instituto de tecnología Química; Instituto de Agroquímica y Tecnología de alimentos. Valencia. 2020. Consultado. 15 de abril del 2020]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/10/3644>

⁸⁵ KIRUBAKARAN y ARUL. Op. Cit., p.6

Tabla 13. Métodos de producción de biodiesel y extracción de aceite de grasa residuos grasos de pollo

| Fuente de aceite | Métodos de producción de biodiesel | Modo de calentamiento |
|--------------------------|---|--|
| Residuos grasos de pollo | Transesterificación Ultrasonido - sistema asistido Transesterificación supercrítica Transesterificación enzimática | Convencional* Ondas ultrasonido CO ₂ supercrítico |

*Calentamiento

Fuente: elaboración propia, con base en: KIRUBAKARAN, M. y ARUL, V. A comprehensive review of low cost biodiesel production from waste chicken fat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. [En línea]. 2018, 82 (1). 390-401 [Consultado 20, mayo,2020] Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211731287X?via%3Dihub>

Kirubakaran y Arul⁸⁶ también reportan los rendimientos para algunos métodos presentados en la tabla anterior, para la producción de biodiésel a partir de la grasa de pollo, como el transesterificación, el ultrasonido y la transesterificación supercrítica empleando metanol supercrítico, obteniendo rendimientos mayores al 70%, como se observa en la **tabla 14**.

⁸⁶ KIRUBAKARAN, M y MOZHI, Arul. Op. Cit., p.6.

Tabla 14. Parámetros en la reacción de transesterificación a partir de grasa de pollo

| Catalizador/ p/p de grasa | T(°C) | Relación molar aceite:alcohol | Agitación (RPM) | Tiempo (h) | Rendimiento (%) | Método de producción |
|--------------------------------------|-------|-------------------------------------|--------------------|---------------|--------------------|-------------------------|
| NaOH/1 | 25 | 01:06 | - | 4 | 71,3 | Convencional |
| KOMe/0,5 | 60 | 01:06 | - | 1 | 88,5 | Convencional |
| KOH/0,8 | 60 | 01:06 | 60 | 2 | 76,8 | Convencional |
| NaOMe/1 | 70 | 01:01 | 600 | 3 | 98,1 | Convencional |
| H ₂ SO ₄ /1,25 | 50 | 01:30 | 130 | 24 | 99,01 | Convencional |
| KOH/0,8 | 60 | 01:08 | 600 | 1 | 97,68 | Convencional |
| - | 45 | 1:7 | - | 0,15 | 94,8 | Ultrasonido |
| - | 400 | 1:6 | - | 0,1 | 88 | Metanol Supercrítico |

Fuente: KIRUBAKARAN, M. y ARUL, V. A comprehensive review of low cost biodiesel production from waste chicken fat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. [En línea]. 2018, 82 (1). 390-401 [Consultado 20, mayo,2020] Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211731287X?via%3Dihub>

Aunque los rendimientos para los tres tipos de métodos de producción de biodiésel son relativamente altos, la transesterificación (método convencional) es el método más empleado a nivel industrial⁸⁷.

2.5.1 Caracterización de los residuos grasos de pollo. Generalmente en la producción de biodiésel sólo se analiza el aceite ya extraído como materia prima. Sin embargo, de los autores mencionados a lo largo del trabajo, sólo Galeano y Guapacha⁸⁸ realizaron la caracterización de residuos grasos de pollo, en estado sólido, y en la literatura consultada se encuentra la caracterización, como composición nutricional, sólo de la carne de pollo.

Galeano y Guapacha realizaron la caracterización mediante análisis proximal; este indica el contenido de humedad, ceniza, proteína cruda (nitrógeno total), lípidos crudos (grasa total), fibra cruda o bruta y, extracto libre de nitrógeno

⁸⁷ JÉRÔME, HERVÉ. Diseño conceptual de una planta de biodiesel. Título para optar a Ingeniero Civil Mecánico. Universidad de Chile. Santiago de Chile. 2007. Consultado [20 de agosto del 2020]. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/104538/Diseno-conceptual-de-una-planta-de-biodiesel.pdf?sequence=3>

⁸⁸ GALEANO, Christian y GUAPACHA, Esteban. Op Cit., p. 32

presente en la muestra⁸⁹. En la **tabla 15** se presentan el valor promedio de los resultados de algunos parámetros obtenidos por Galeano y Guapacha para residuos grasos de pollo.

Tabla 15. Contenido de la caracterización de los residuos grasos de pollo

| Humedad (%) | Cenizas (%) | Proteína (%) | Grasa total (%) | Fibra Bruta (%) | Porcentaje no reportado (%) | Total (%) |
|--------------------|--------------------|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------------------|------------------|
| 14,29 | 0,1 | 6,97 | 48,53 | 7,03 | 23,08 | 100 |

Fuente: GALEANO, Cristhian y GUAPACHA, Esteban. Aprovechamiento y caracterización de los residuos grasos del pollo para la producción de un biocombustible (biodiesel). [En línea]. Trabajo de grado para optar el título de Químico Industrial. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira Risaralda. 2011. Consultado [15 de junio del 2020]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/0fb1/64d8c7a0f659c63d8a53884b4beaf80a00e7.pdf>

La descripción de cada una de los parámetros para llevar a cabo la caracterización de los residuos grasos de pollo mediante análisis proximal, se presentan a continuación:

- **Humedad.** El agua está presente en todo tipo de alimento; su aspecto, olor, sabor y textura se ve afectado de gran manera por la cantidad, estado físico y dispersión de la misma⁹⁰. Galeano y Guapacha obtuvieron valores bajos de humedad, un resultado significativo, ya que el agua presente en el aceite extraído podría reaccionar con el catalizador e hidrolizar los metilésteres formados, ocasionando pérdidas en el rendimiento de la transesterificación⁹¹.
- **Cenizas.** La cantidad de materia inorgánica o cenizas presentes en una muestra, determina posibles los contaminantes metálicos que pueden reaccionar durante el proceso de producción o almacenamiento del producto final⁹².

El contenido de cenizas del residuo graso es bajo según Galeano y Guapacha, lo que indica una baja presencia de minerales provenientes de

⁸⁹ FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, United Nations. Manual de técnicas para laboratorio de nutrición de peces y crustáceos. [En línea]. México. [Consultado 02 de Marzo de 2020]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/AB489S/AB489S03.htm>

⁹⁰ LA FUNDACIÓN DEL AGUA. Aquae fundación. [Sitio web]. Madrid. [Consultado 1 de Julio de 2020]. Disponible en: <https://www.fundacionaquae.org/agua-y-alimentos/>

⁹¹ GALEANO, Christian y GUAPACHA, Esteban. Op Cit., p. 61

⁹² *Ibíd.*, p.63.

la materia, que de no ser así podría formar incrustaciones en el sistema de inyección de combustible, influyendo sobre la calidad del biodiésel⁹³.

- **Proteína.** Si bien, para Galeano y Guapacha, “este parámetro no incide en el proceso de obtención del biodiésel ni en la calidad del mismo”, estos mismos autores obtuvieron el porcentaje de proteína para el residuo desengrasado, cuyo valor fue del 7,03%, un poco mayor al inicial, por lo cual estos mismo autores mencionan que “el aumento del contenido proteico es consecuencia de la eliminación de la grasa, dando lugar a un residuo con mayor valor agregado en la industria agropecuaria”⁹⁴, de esta manera, al extraer el aceite de los residuos grasos de pollo se puede seguir empleando, debido a su alta proteína, en la elaboración de concentrados para animales y, como fuente de nitrógeno para fertilizantes orgánico⁹⁵.
- **Grasa total.** Aunque el valor obtenido por Galeano y Guapacha es relativamente alto (48,53 %), este puede variar según el método de análisis usado. Ellos emplearon hexano como solvente de extracción.
- **Fibra bruta.** Aunque este parámetro no se aplica en alimentos de origen animal, Galeano y Marulanda realizaron su determinación para obtener una caracterización integral de los residuos grasos de pollo utilizados en ese estudio.

A pesar que Galeano y Guapacha no reportaron el total de composición de la grasa animal, cuyo porcentaje faltante fue del 23,08%, se debe tener en cuenta que en el análisis proximal realizado, omitieron el extracto libre de nitrógeno (ELN), constituido principalmente por carbohidratos digeribles, vitaminas y demás compuestos orgánicos solubles no nitrogenados⁹⁶. Este parámetro agrupa todos los nutrientes no evaluados anteriormente y se calcula de la siguiente manera: $ELN = 100 - (\text{ceniza} + \text{extracto etéreo} + \text{proteína} + \text{fibra})$ ⁹⁷.

Además, la FAO también menciona que el análisis proximal normalmente se hace con muestras preparadas para tal fin, siendo necesario realizar ciertas

⁹³ *Ibíd.*, p.63.

⁹⁴ NARASIMHARAO, K. STRULL, J. MISRA, M. SUSANTA, K.M. A Green Process for Producing Biodiesel from Feather Meal: *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. American Chemical Society, [en línea] Vol. 57, No.14, 2009, pp 6163–6166 (Consultado el 20 de julio del 2020) Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jf900140e>

⁹⁵ GALEANO y GUAPACHA, *Op. Cit.*, p.63

⁹⁶ FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, United Nations. Manual de técnicas para laboratorio de nutrición de peces y crustáceos. [En línea]. México. [Consultado 02 de Marzo de 2020]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/AB489S/AB489S03.htm#ch3>

⁹⁷ SUPER USER. Laboratorio de Química. [En línea]. Universidad de Costa Rica: CINA. Costa Rica. [Consultado 02 de Marzo de 2020]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/AB489S/AB489S03.htm>

correcciones en los resultados según las condiciones de la muestra, Por ejemplo, si los análisis se realizaron en base húmeda o seca⁹⁸.

2.5.2 Extracción de grasa animal. Las grasas animales se encuentran íntimamente ligadas al tejido o estructura celular, que a su vez constituyen la membrana grasa. Para liberar la grasa de este tejido membranoso es necesario el calentamiento del mismo, modificando la viscosidad y densidad del aceite al ocasionar el rompimiento de las paredes celulares⁹⁹.

2.5.2.1 Tipos de extracción. Aunque no se han establecido los tipos de extracción para obtener grasa animal, varios autores coinciden en una misma clasificación¹⁰⁰: fusión húmeda, fusión seca y mediante el uso de solventes, siendo las dos primeras las más reportadas cómo se observa en la recopilación de algunos referentes en la **tabla 16**.

- **Fusión seca.** La cocción se lleva a cabo sin contacto directo con agua, puede hacerse a baja o alta temperatura, en molinos coloidales o en recipientes cerrados a alta temperatura, respectivamente¹⁰¹. La humedad de los tejidos es expulsada por un respiradero o se extrae aplicando vacío o condensándola¹⁰².
- **Fusión húmeda.** La cocción se lleva a cabo en contacto directo con agua o vapor, ambos fluidos aportan la temperatura necesaria para derretir la grasa¹⁰³.
- **Extracción por Soxhlet.** Abraham¹⁰⁴ empleó esta extracción tras obtener una cantidad de grasa no mencionada de residuos grasos de pollo,

⁹⁸ FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, United Nations. Op Cit., p. 1.

⁹⁹ RICCI, Osvaldo Enrique. Obtención de grasa de origen animal. [En línea]. Engormix. (10 de Octubre de 2018). [Consultado 03 de Marzo de 2020]. Disponible en: <https://www.engormix.com/balanceados/articulos/obtencion-grasa-origen-animat-t42855.htm>

¹⁰⁰ Ibid., p. 1.

¹⁰¹ Ibid., p. 1.

¹⁰² RAMIREZ NIEVES, Tereza. Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de aceites y grasas residuales potenciales para la producción de biocombustibles. [En línea]. Trabajo académico de maestro en ciencia y tecnología en especialidad de ingeniería ambiental. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Electroquímica, S.C. México. 2018. Consultado [16 de mayo del 2020]. Disponible en: https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/369/1/Evaluaci%C3%B3n%20de%20las%20propiedades%20fisicoqu%C3%ADmicas%20de%20aceites%20y%20grasas%20residuales%20potenciales%20para%20la%20producci%C3%B3n%20de%20biocombustibles_rees.pdf

¹⁰³ RICCI, Op. Cit., p.1.

¹⁰⁴ ABRAHAM, John, et al. Biodiesel Production from Broiler Chicken Waste. World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering. 2015, 19. 1190-1193 [Consultado 20 mayo, 2020]. ISNI:0000000091950263. Disponible en: <https://publications.waset.org/10002965/biodiesel-production-from-broiler-chicken-waste>

mediante fusión seca a 100°C por 20 minutos. La grasa presente en el sólido resultante (chicharrón) fue extraída usando hexano, con relación grasa: disolvente de 1:10 (p/v) y agitación por 2 horas. El rendimiento de la extracción por solvente fue del 96,10% y de la recuperación de este, fue del 88,98%

Tabla 16. Tipos de extracciones empleadas

| Autor (año de publicación) | Materia prima | Pretratamiento | Tipo de extracción | Equipo de extracción | Tiempo (h) | Temperatura (°C) | Rendimiento (%) | Proceso posterior |
|---|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|---------------|---------------------|--------------------|--|
| MARTINEZ, Gilma. PONCE, Roberto y REYES, Laura. (2007) | Grasa de pollo crudo | - | Seca | Fuente calorífica | 3 | - | 69,24 | Filtración |
| ALPTEKIN, Ertan y CANAKCI, Mustafa. (2010) | Grasa de pollo | - | Seca | - | 1 | 110 | - | Filtrado |
| GALEANO, Cristhian y GUAPACHA, Esteban (2011) | Residuos grasos de pollo | - | Humeda | Olla express | 3 | - | 64,7 | Filtración, decantación y centrifugación |
| TEJADA TOVAR, Candelaria et al. (2013) | Pellejos y sebo | Lavado y escurrido | Seca | Mufla | 1,5 | 75 | 70,5 | Winterizado |
| LIN, Chia-Wei y TSAI, Shuo-Wen. (2015) | Grasa de pollo | Filtrado | Humeda | - | 0,333 | 100 | - | Filtración |
| HERNANDEZ, Maritza et al. (2017) | Grasa de pollo | - | Seca | - | 3 | 95 | 52,06 | Filtración |
| MERA, José, et al. (2018) | Tejido graso de pollo | - | - | Estufa eléctrica | 0,333 | 70 | - | Filtración y calentamiento |

- Dato no determinado o reportado

Fuente: elaboración propia

En la tabla anterior se evidencia que los rendimientos no varían notoriamente en cada referente y muchos de estos no lo mencionan ni se pueden calcular, ya que los autores no reportan la cantidad de aceite obtenido. Por el contrario, condiciones operación como la temperatura y tiempo no son semejantes. Sin embargo, se debe tener en cuenta que independientemente del tipo de extracción, el contenido de grasa de origen animal depende de factores como: la raza del ave, su alimentación y parte del cuerpo animal de donde se extrae el aceite¹⁰⁵

En cuanto al tipo de extracción la más empleadas es la extracción en seco, además es la que presenta el mayor rendimiento (>70%). Aunque pocos autores reportan un tratamiento a la grasa sólida de pollo previo a la extracción, es importante realizar su limpieza para eliminar restos de sangre y disminuir su tamaño para aumentar el área de contacto en la extracción¹⁰⁶. De igual manera después de la extracción, el aceite puede ser filtrado, enfriado y/o calentado para mejorar su apariencia.

Autores como Kirubakaran y Arul¹⁰⁷ también mencionan otros tipos de extracción de grasa animal, presentadas a continuación:

- **Calentamiento por microondas.** este calentamiento ofrece una rápida transformación de energía mediante la interacción molecular con campos electromagnéticos entre solventes y materias primas que ayudan a reducir el mayor tiempo requerido para la extracción de petróleo.
- **Ultrasonido.** Este método usa ondas de presión de sonido oscilantes con frecuencias más altas que las percibidas por el oído humano.
- **CO₂ supercrítico.** En este método, el alcohol se mantiene a alta temperatura y presión para extraer el aceite en ausencia de catalizador.

En la actualidad, a nivel industrial, las grasas animales son extraídas mediante un proceso conocido como “rendering”. Este consiste en la trituration y molienda de los subproductos animales, seguido del tratamiento térmico para eliminar microorganismos y reducir el contenido de humedad. La separación de la grasa fundida y los sólidos se lleva a cabo mediante centrifugación y prensado. La

¹⁰⁵HERNÁNDEZ, M.C. et. al. Chicken fat and biodiesel viscosity modification with additives for the formulation of biolubricants. En: ResearchGate [en línea]. Diciembre, 2016 [Consultado el 11 de julio de 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/312276258_Chicken_fat_and_biodiesel_viscosity_modification_with_additives_for_the_formulation_of_biolubricants

¹⁰⁶RAMIREZ NIEVES. Op. Cit., p.32.

¹⁰⁷KIRUBAKARAN, M y ARUL Op. Cit., p.5.

fracción sólida finalmente es molida y transformada en polvo para ser comercializada como harina de carne o harina de hueso y carne.¹⁰⁸

2.5.3 Caracterización del aceite. El aceite utilizado para la fabricación del biodiésel debe presentar unas características determinadas para que el biocombustible final cumpla con las especificaciones deseadas, como:

- **Densidad del aceite.** Los aceites no tienen un valor específico de densidad debido a la gran variedad de aceites existentes, esta puede oscilar entre 0,840 y 0,960 g/cm³, según el tipo de aceite¹⁰⁹; sin embargo, debe ser menor a la del agua para favorecer procesos de separación.¹¹⁰ Este parámetro influye directamente en la calidad del biodiésel producido, al generar problemas de fluidez en el motor, ya que un aceite más denso generará un biodiésel más denso¹¹¹
- **Viscosidad del aceite.** Este parámetro afecta directamente la calidad del biodiesel, así, un aceite más viscoso, producirá un biocombustible más viscoso, generándose pérdidas de potencia y disminución en la lubricidad del mismo¹¹².
- **Índice de acidez.** Es la cantidad de miligramos de hidróxido potásico necesarios para neutralizar 1 g de aceite o grasa¹¹³ y se expresa mediante el grado de acidez, es decir el porcentaje de ácidos grasos libres presentes en un aceite o grasa. Este parámetro es uno de los más importantes para tener en cuenta antes de llevar a cabo la reacción de transesterificación, dado que materias primas de baja acidez al reaccionar con un catalizador básico, reduce la formación de jabones y agua que pueden llegar a afectar la separación de la mezcla biodiesel/glicerina y la degradación del biocombustible¹¹⁴.
- **Índice de saponificación.** Es la cantidad de miligramos de NaOH o KOH necesarios para saponificar 1 g de aceite o grasa¹¹⁵. Este parámetro ofrece

¹⁰⁸ Información acerca de Rendering. [En línea]. Mavitec. [Consultado 03 de Julio de 2020]. Disponible en: <https://mavitecrendering.com/es/rendering-process/informacion-acerca-de-rendering/>

¹⁰⁹ Norma Técnica Colombiana ICONTEC N.432. Grasas y Aceites Comestibles. Método de determinación de Densidad. Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Santa Fe de Bogotá, 1999.

¹¹⁰ MONTENEGRO, Manuel; SIERRA, Fabio y GUERRERO, Carlos. Producción y caracterización de biodiesel a partir de aceite de pollo. En: Informador técnico. Colombia. Edición 76. Diciembre 2012. Pg. 62 – 71. Consultado [23 de mayo del 2020]. Disponible en: http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/29/34

¹¹¹ GALEANO y GUAPACHA. Op Cit., p. 71.

¹¹² *Ibíd.*, p. 67.

¹¹³ Norma Técnica Colombiana ICONTEC N.432. Grasas y Aceites Comestibles. Op Cit., p. 43

¹¹⁴ GALEANO y GUAPACHA. Op Cit., p. 72.

¹¹⁵ Norma Técnica Colombiana ICONTEC N.235. Grasas y Aceites. Método de determinación del Índice de saponificación. Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Santa Fe de Bogotá (1970).

una medida de la masa molecular media de los ácidos grasos presentes en el aceite, así, las grasas con ácidos grasos de cadena corta consumen más álcali en su saponificación, lo que equivale a valores de índice de saponificación más elevados¹¹⁶. Aunque este parámetro no afecta directamente la calidad del biodiésel, un incremento en la longitud de la cadena incrementa el número de cetano del biocombustible¹¹⁷, una medida de calidad relacionada con el retraso en el tiempo de ignición del motor¹¹⁸.

- **Índice de yodo.** Es la cantidad de gramos de yodo que se pueden fijar en 100 g de grasa o aceite.¹¹⁹ Influye de manera directa en la calidad del biodiésel obtenido, ya que altos valores de índice de yodo se relacionan con una mayor tendencia a la oxidación del biocombustible, es decir, menor estabilidad oxidativa, contribuyendo a la formación de gomas en el motor y la disminución de lubricidad del mismo¹²⁰.
- **Índice de peróxido.** Se expresa en miliequivalentes de oxígeno activo por kilo de aceite¹²¹. Este parámetro mide el estado de oxidación inicial de un aceite, “los peróxidos o compuestos de oxidación inicial se originan si el aceite no se protege de la luz y el calor o no se guarda en envases adecuados”¹²², así, un aceite con mayor índice de peróxidos, tendrá una menor capacidad antioxidante. Dicha capacidad antioxidante determina la vida de almacenamiento del biocombustible y la degradación potencial durante su almacenamiento¹²³.

En la **tabla 17** se recopilan algunas investigaciones, incluyendo los autores mencionados en el ítem. en la extracción de la grasa de pollo, en las cuales

¹¹⁶ RODRÍGUEZ ARZAVE, J. A, et al. Índice de saponificación de cinco mantecas determinado mediante un micrométodo. [En línea]. P. 937-942. Nuevo León. [Consultado 6 Julio de 2020]. Disponible en: <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume1/1/10/161.pdf>

¹¹⁷ KNOTHE, Gerhard; MATHEAUS, Andrew C. y RYAN III, Thomas W. Cetane numbers of branched and straight-chain fatty esters determined in an ignition quality tester. [en línea]. ScienceDirect. Diciembre de 2002, pg 972-975. [Consultado 5 de abril de 2020]. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1563/1563>

¹¹⁸ GALEANO y GUAPACHA. Op Cit., p. 71.

¹¹⁹ Norma Técnica Colombiana ICONTEC N.283. Grasas y Aceites. Método de determinación del Índice de Yodo. Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Santa Fe de Bogotá (1969).

¹²⁰ GALEANO y GUAPACHA. Op Cit., p. 72.

¹²¹ Norma Técnica Colombiana ICONTEC N.236. Grasas y Aceites. Método de determinación del Índice de Peróxidos. Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Santa Fe de Bogotá (1999).

¹²² ESENCIA DE OLIVO. Calidades del Aceite de Oliva [sitio web]. España. [Consultado el 8 de Julio de 2020]. Disponible en: <http://www.esenciadeolivo.es/aceite-de-oliva/tipos-de-aceite-de-oliva/calidad-del-aceite-de-oliva/>

¹²³ AVELLANEDA VARGAS, Fredy A.. Producción y caracterización de Biodiesel de palma y aceite reciclado mediante un proceso Batch y un proceso continuo con reactor helicoidal [en línea]. Tesis doctoral. Tarragona: Universitat Rovira I Virgili. Facultad de ingenierías. Departamento de ingeniería química, 2010. 87 p. [Consultado el 8 de Julio de 2020]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/2d95/be0fd7b37feb254a2dbc88613682affafcd.pdf>

parámetros como la densidad e índice de acidez son expresadas en diferentes unidades, la densidad se ve afectada por la temperatura del lugar en la cual se hizo la medición y el índice de acidez, al tratarse de una materia prima “nueva”, en comparación al aceite de palma, puede expresarse según la procedencia del aceite o grasa (ácido oleico, ácido palmítico, ácido láurico, entre otros) o según los gramos de ácido graso por cien gramos de grasa (%p/p).

Tabla 17. Caracterización del aceite de pollo

| Autor (año de publicación) | Densidad a 40°C (g/mL) | Densidad a 30°C (g/mL) | Densidad a 20°C (g/mL) | Densidad a 15°C (g/mL) | Densidad a 13°C (g/mL) | Densidad (g/mL) | Viscosidad a 40°C (cSt) | Índice de acidez (% ácido oleico) | Índice de ácidez (mgKOH/g aceite) | Índice de Saponificación (mg de KOH/ g de aceite) | Índice de yodo (g de yodo/ 100g aceite) | Índice de peróxidos (meq de peróxidos/ kg de aceite) |
|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|-------------------------------|--|--|--|---|--|
| MARTINEZ, Gilma. PONCE, Roberto y REYES, Laura. (2007) | - | 0,8804 | - | - | - | - | - | - | 1,6 | - | - | - |
| ALPTEKIN, Ertan y CANAKCI, Mustafa. (2010) | - | - | - | 0,932 | - | - | 59,2 | - | 26,89 | - | - | - |
| GALEANO, Cristhian y GUAPACHA, Esteban (2011) | - | - | 0,9342 | - | - | - | 43,3855 | 0,362 | - | 170,94 | 105,33 | 2,561 |
| TEJADA TOVAR, Candelaria et al. (2013) | - | - | - | - | - | 0,876 | - | - | 2,77 | - | 47,92 | 14,27 |
| LIN, Chia-Wei y TSAI, Shuo-Wen. (2015) | - | - | - | - | - | - | - | - | 5,66 | 148,62 | - | - |
| HERNANDEZ, Maritza et al. (2017) | 0,8991 | - | - | - | - | - | 38,1 | - | - | - | - | - |
| MERA, José, et al. (2018) | - | - | - | - | 0,9229 | - | - | - | - | - | - | 3 |

- Dato no determinado o reportado

Fuente: elaboración propia

En cada parámetro se puede evidenciar la variedad de resultados dados por cada autor. Sólo la viscosidad y densidad pueden establecerse en un rango no muy amplio, la densidad a 13- 40 °C está entre 0,8 – 0,87 g/mL y, la viscosidad a 40°C está entre 38 – 59 cSt. Al comparar estos valores con la densidad a 20-50°C y la viscosidad a 40 °C del aceite de palma, siendo 0,891-0,889 y 39,35 cSt, respectivamente¹²⁴, ambas propiedades del aceite de pollo se encuentran en un rango adecuado.

Por el contrario, los índices de acidez, saponificación, de yodo y de peróxidos reportados presentan valores distantes, entre 1 a 26 mg KOH/g aceite, 148 a 170 1 a 26 mg KOH/g aceite, 47 a 105 g de yodo/ 100g y, 2 a 14 meq de peróxidos/ g de aceite, respectivamente.

2.6 PROCESO DE OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL

Todos los aceites contienen ácidos grasos libres, fosfolípidos, esteroides, agua, y otras impurezas. Debido a esto, el aceite no puede ser empleado directamente como combustible, para solucionarlo el aceite es modificado químicamente bajo ciertas condiciones y especificaciones.

2.6.1 Pretratamiento. En la reacción de transesterificación se usan aceites anhidros (sin presencia agua) y con baja acidez, es decir, con bajo contenido de AGL (ácidos grasos libres) o FFA (por siglas en inglés Free Fatty acids), ya que la presencia de estos favorece la formación de jabones por la reacción de saponificación y/o la neutralización del catalizador¹²⁵, reacciones secundarias o indeseables en la transesterificación, generando un biodiésel de baja calidad y ocasionando obstrucciones en los conductos del motor¹²⁶.

¹²⁴ RINCÓN M, Sanda y MARTÍNEZ, Daniel. Análisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria. [en línea]. 2009, 30. (2) [Consultado el 10 de julio de 2020] Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1432>

¹²⁵ TORRES RIVERO, Ligia A., et al. Efecto de la temperatura y del tiempo de reacción sobre la esterificación y la transesterificación de aceites comestibles usados. En: Revista de ciencias naturales y agropecuarias [en línea]. Cancún: Tecnológico nacional de México/Instituto tecnológico de Cancún, diciembre, 2017, Vol. 4, No. 13, p. 19-35. [Consultado el 10 de julio de 2020]. Disponible en: http://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Ciencias_Naturales_y_Agropecuarias/vol4num13/Revista_de_Ciencias_Naturales_y_Agropecuarias_V4_N13_3.pdf

¹²⁶ VIVAS CASTAÑO, Op. Cit., p.34-35.

De esta manera, para obtener rendimientos altos, además de emplear alcohol y catalizador anhidros, el aceite se debe purificar o refinar para reducir el contenido de humedad y AGL por debajo del 1 y 3%, respectivamente¹²⁷. El agua presente en el aceite, también se puede eliminar mediante evaporación y los ácidos grasos libres, mediante esterificación o neutralización de estos¹²⁸.

Si la acidez de la materia prima es relativamente baja (<5%), está se trata mediante la neutralización de los ácidos grasos, pero el aceite se perderá en iguales proporciones. Por el contrario, si la acidez es elevada, como en el caso de la grasa animal, no es posible llevar a cabo la neutralización ya que disminuye el rendimiento debido a la pérdida excesiva de materia prima y por ende, la mejor alternativa para su aprovechamiento es esterificar los ácidos grasos presentes¹²⁹.

2.6.1.1 Neutralización de ácidos grasos. Las grasas y aceites además de estar formados por triglicéridos contienen una pequeña cantidad de ácidos graso libres que al reaccionar con el catalizador básico (NaOH o KOH) en presencia de agua, se saponifican, formando agua y porciones considerables de jabón, como se observa en la **figura 1**¹³⁰.

Para neutralizar los AGL presentes en un aceite, este es tratado con soluciones de diferentes concentraciones de NaOH o KOH, según su grado de acidez, junto con una elevación de la temperatura (por encima de los 70 °C) para quebrar las emulsiones que se forman en el proceso de agitación y su eliminación mediante un proceso de separación y lavado de fases¹³¹. Sin embargo, este tratamiento es poco utilizado, debido a su elevado precio¹³² y puede presentar dificultades en el proceso de separación de emulsiones producidas¹³³.

¹²⁷ ROJAS GONZALEZ, Andrés Felipe, GIRÓN GALLEGRO, Erika y TORRES CASTAÑEDA, Harlen Gerardo. Variables de operación en el proceso de transesterificación de aceites vegetales: una revisión - catálisis química. Revista ingeniería e investigación [En línea]. 2009, 11 (3). 17-22 [Consultado 30 de marzo de 2020]. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/19223/1/15177-45993-1-PB.pdf>

¹²⁸ VIVAS CASTAÑO, Op. Cit., p.34-35.

¹²⁹ PISARELLO, Laura. Producción de biodiesel: equilibrio fisicoquímico y cinética de esterificación y transesterificación con diferentes catalizadores y alcoholes [en línea]. Tesis. Universidad nacional del litoral, Argentina. [Consultado el 10 de abril de 2020]. Disponible en: <http://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8080/bitstream/handle/11185/291/tesis.pdf>

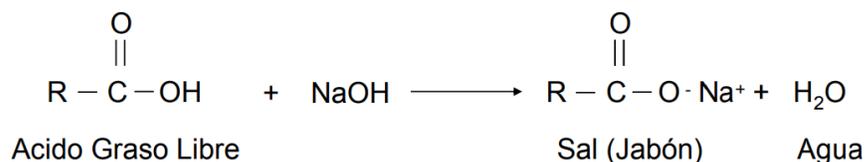
¹³⁰ VIVAS CASTAÑO, Op. Cit., p.34-35.

¹³¹ CORDOVI FELIPE, Carlos Miguel; FERRER HERNANDEZ, Anselmo Enrique y TEIXEIRA MILITÃO. Pretratamientos de grasa residual de cocción de alimentos para la producción de biodiesel. En: Revista de ingeniería mecánica [en línea]. La Habana: Universidad tecnológica de la habana José Antonio Echeverría-Cujae, mayo-agosto, 2017, Vol. 20, No. 2, p. 58-64. [Consultado el 10 de julio de 2020]. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/im/v20n2/im02217.pdf>

¹³² PISARELLO, Op. Cit., p. 111.

¹³³ CORDOVI, Op. Cit., p. 5.

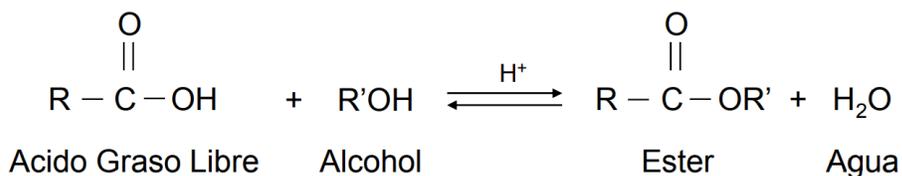
Figura 1. Reacción de neutralización de los ácidos grasos



Fuente: PISARELLO, Laura. Producción de biodiesel: equilibrio fisicoquímico y cinética de esterificación y transesterificación con diferentes catalizadores y alcoholes [en línea]. Tesis. Universidad nacional del litoral, Argentina. [Consultado el 10 de abril de 2020]. Disponible en: <http://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8080/bitstream/handle/11185/291/tesis.pdf>

2.6.1.2 Esterificación. Si la materia prima posee un alto índice de acidez (superior al 4%) es necesario disminuir este valor a porcentajes inferiores al 2% mediante una reacción conocida como esterificación¹³⁴. En esta, los AGL se esterifican para ser convertidos en alquilésteres o ésteres, como se observa en la **figura 2**, en donde el ácido graso reacciona con el alcohol, generalmente metanol y, bajo la presencia de un catalizador ácido (por lo general H_2SO_4), forma éster y agua con restos de alcohol, catalizador y otras impurezas¹³⁵.

Figura 2. Reacción de esterificación



Fuente: BINET, María Virginia. Estudio de viabilidad de la producción de biodiesel a partir de aceite de pollo procedente de efluente industrial. [En línea] Proyecto. Paraguay: 2016 [Consultado 02, marzo, 2020]. Disponible en: http://premioslatinoamericaverde.com/archivos/2018/proyecto_3609_archivo.pdf

¹³⁴ BINET, María Virginia. Estudio de viabilidad de la producción de biodiesel a partir de aceite de pollo procedente de efluente industrial. [en línea] Proyecto. Paraguay: 2016 [Consultado 02, marzo, 2020]. Disponible en: http://premioslatinoamericaverde.com/archivos/2018/proyecto_3609_archivo.pdf

¹³⁵ *Ibíd.*, p. 39.

La esterificación además de aumentar la producción de alquilésteres y disminuir la saponificación, aumenta la eficiencia de la reacción de transesterificación¹³⁶. No obstante, si sólo se emplea la esterificación ácida, a pesar de presentar altos rendimientos, se necesitaría temperaturas mayores a 100°C, en donde se puede quemar el aceite, y más de tres horas para completar la conversión¹³⁷.

Encinar obtuvo biodiésel a partir de grasas animales mediante dos métodos: transesterificación ácida usando H₂SO₄ como catalizador y esterificación con ácido como catalizador seguido de la transesterificación básica con KOH como catalizador, obteniendo rendimientos de 89,0% y 97.3%, respectivamente¹³⁸.

Aunque el ácido más usado en la esterificación es el ácido sulfúrico, Alptekin esterificó grasa de pollo para disminuir su porcentaje ácido graso libres (%FFA), mediante tres catalizadores diferentes: Ácido sulfúrico, ácido clorhídrico y ácido sulfámico, variando la proporción molar alcohol:aceite (20:1, 30:1 y 40:1), la cantidad de catalizador (15%, 20% y 35%) y el tiempo (60, 70 y 80 minutos), dejando fijo el tipo de alcohol (metanol) y la temperatura (60°C). Obtenido mejores resultado, con <1% de FFA, usando ácido sulfúrico¹³⁹.

Abraham evaluó las mejores condiciones de esterificación para grasa de pollo, usando H₂SO₄, variando la relación molar de metanol:aceite, concentración de catalizador, temperatura y tiempo de reacción, presentadas en la **tabla 18**; los experimentos se realizaron tres veces para cada combinación¹⁴⁰.

¹³⁶ TORRES RIVERO, Op. Cit., p. 25

¹³⁷ MEDINA VILLADIEGO, Mauricio; OSPINO ROA, Yesid y TEJADA BENITEZ, Lesly. Esterificación y transesterificación de aceites residuales para obtener biodiesel. En: Revista Luna Azul [en línea]. Manizales: Universidad de Caldas, enero-junio, 2015, p. 25-34. [Consultado el 11 de julio de 2020]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3217/321733015003.pdf>

¹³⁸ ENCINAR, J. M.; SÁNCHEZ, N.; MARTINEZ, G. y GARCÍA, L. Study of biodiesel production from animal fats with high free fatty acid content. En: ScienceDirect [en línea]. Diciembre, 2011, vol. 102, p. 10907-10914. [Consultado el 11 de julio de 2020]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3217/321733015003.pdf>

¹³⁹ ALPTEKIN, Ertan y CANAKCI, Mustafa. Optimization of pretreatment reaction for methyl ester production from chicken fat. En: ScienceDirect [en línea]. Agosto, 2011, vol. 90, p. 2630-2638. [Consultado el 11 de julio de 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236111001815>

¹⁴⁰ ABRAHAM, Op. Cit., p.1190

Tabla 18. Condiciones de esterificación usando ácido sulfúrico

| Methanol Molar Ratio | Catalyst Concentration of FFA | Reaction Temperature | Reaction Time |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|---------------|
| 10 : 1 | 0 % | 30 °C | 30 min |
| 20 : 1 | 5 % | 40 °C | 60 min |
| 30 : 1 | 10% | 50 °C | 90 min |
| 40 : 1 | 15% | 60 °C | 120 min |
| 30 : 1 | 20% | 60 °C | 60 min |

Fuente: ABRAHAM, John, et al. Biodiesel Production from Broiler Chicken Waste. World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering. 2015, 19. 1190-1193 [Consultado 20 mayo, 2020]. ISNI:0000000091950263. Disponible en: <https://publications.waset.org/10002965/biodiesel-production-from-broiler-chicken-waste>

Las mejores condiciones que disminuyeron el contenido de ácidos grasos en la grasa de pollo, se presentan en la **tabla 19**, junto a un recopilado de otros pretratamientos y las condiciones de esterificación.

Tabla 19. Pretratamiento del aceite de pollo y condiciones de esterificación

| Autor (año de publicación) | Tipo de pretratamiento | Esterificación | FFA iniciales (%) | Condiciones de la esterificación | | | | FFA finales (%) |
|--|---|----------------|-------------------------|----------------------------------|---|---------------------|---------------------|-----------------------|
| | | | | Relación molar metanol:AGL | Concentración de H ₂ SO ₄ (% p/p) | Temperatura (°C) | Tiempo (minutos) | |
| ALPTEKIN, Ertan y CANAKCI, Mustafa. (2010) | Calentamiento a 110 °C por 1 h y filtración | Si | 13,45 | 40:1 | 20 | 60 | 80 | <0,01 |
| GALEANO, Cristhian y GUAPACHA, Esteban (2011) | Neutralización: Clarificación con un solución de hidróxido de potasio al 0,01%, | No | - | - | - | - | - | - |
| NUHU, S.K. y KOVO, A.S (2015) | | Si | 4,16 | 40:1 | 20 | 60 | 80 | 0,43 |
| ABRAHAM, John, et al. (2015) | - | SI | 6,46 - 9,14 | 30:1 | 10 | 60 | 120 | <0,01 - 0,7 |
| MARTINEZ, Gilma. PONCE, Roberto y REYES, Laura. (2007) | Pre calentamiento a 50°C | No | 60,61 | - | - | 50 | - | 2,99 |

- Dato no determinado o reportado

Fuente: elaboración propia

Aunque algunos autores no llevaron a cabo un tratamiento previo a la transesterificación de la grasa de pollo, en la **tabla 19** se puede observar una notable disminución de los ácidos grasos presentes en este y, como se ha mencionado anteriormente la cantidad de FFA presentes el aceite, afecta directamente la calidad del biodiésel, así como el rendimiento de la reacción de transesterificación. Además las condiciones presentadas para la esterificación, no varían de gran manera entre los autores que las reportaron.

2.6.2 Transesterificación. Existen diferentes métodos para producir biodiésel, dependiendo el tipo de materia prima, el tipo de catalizador a utilizar o el uso de resinas de intercambio iónico como lipasas (enzimas) y fluidos supercríticos. Los métodos más utilizados son¹⁴¹: pirolisis (craqueo térmico), fluidos supercríticos, micro emulsión y transesterificación (ácida, básica y enzimática), siendo la transesterificación ácida la vía más empleada para producirlo al ser la más económica, presentar conversiones altas (98%), pocas reacciones secundarias y mejores tiempos de reacción.¹⁴²

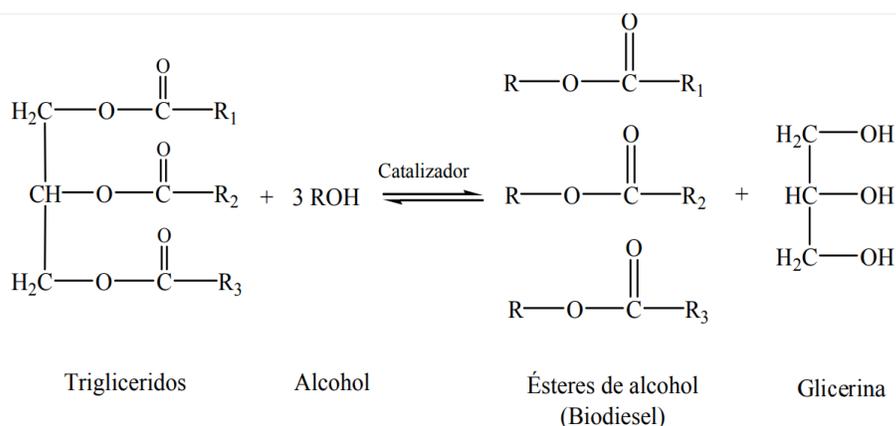
La transesterificación es la reacción entre un triglicérido, compuesto por una molécula de glicerol esterificada por tres moléculas de ácidos grasos (R_1, R_2, R_3), con un alcohol de bajo peso molecular (ROH) y en presencia de un catalizador, el cual mejora la velocidad de reacción y el rendimiento final, obteniéndose como productos glicerina y ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de los tres ácidos grasos de partida¹⁴³, conocido como metiléster o biodiésel, como se muestra en la **figura 3**. En esta reacción, al ser reversible, es importante adicionar un exceso de alcohol para favorecer el equilibrio hacia la formación de ésteres.

¹⁴¹ ALFONSO ÁLVAREZ, Juan Antonio. Obtención de biodiesel a partir de aceites usados en casa habitación de la comunidad del Refugio. [en línea]. Tesis de maestría. Centro de Investigación en materiales avanzados, S. C. Chihuahua: 2013 [Consultado 02, marzo, 2020]. Disponible en: <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/349/1/Tesis%20Juan%20Antonio%20Alfonso%20Alvarez.pdf>

¹⁴² TEJADA TOVAR, Candelaria, et al. Obtención de biodiesel a partir de diferentes tipos de grasa residual de origen animal. [en línea]. Proyecto académico sin fines de lucro. Universidad de Caldas. Manizales: 2013 [Consultado 03, marzo, 2020]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3217/321728584002.pdf>

¹⁴³ TOROSI BAUDINO, Favio Daniel. Reacciones en contexto: la transesterificación en la biodiésel a partir de aceite de fritura usado. Revista ANALES de la Real Sociedad Española de Química [En línea] 2006, 102 (3). 43-49 [Consultado 03, marzo, 2020]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2082917>

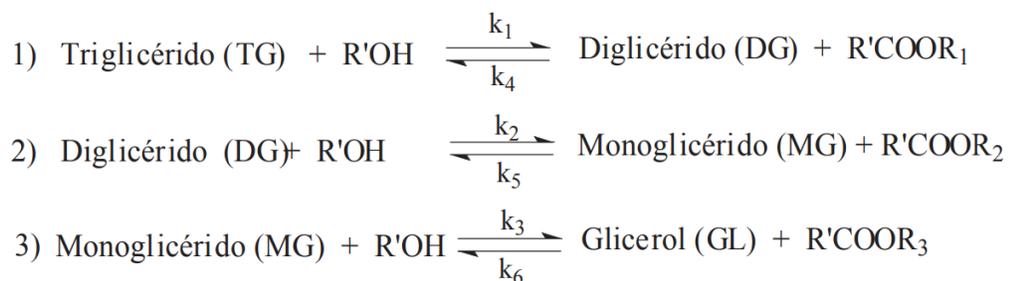
Figura 3. Reacción de transesterificación



Fuente: VIVAS CASTAÑO, Andrea Maritza. Estudio y obtención de biodiesel a partir de residuos grasos de origen bovino. [En línea] Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira: [Consultado 03, marzo, 2020]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/f37d/645cb7ca48e5da5e8a7184688956b8f7533e.pdf>

La transesterificación a su vez, está formada por un conjunto de tres reacciones reversibles en serie como se evidencia en la **figura 4**, donde el triglicérido es convertido en diglicérido, monoglicérido y glicerina o glicerol, de esta manera en cada reacción se libera una molécula de éster metílico dando como resultado tres moléculas de éster metílico y una molécula de glicerol.

Figura 4. Reacciones de transesterificación en serie.



Fuente: TOROSI BAUDINO, Favio Daniel. Reacciones en contexto: la transesterificación en la producción de biodiésel a partir de aceite de fritura usado. Revista ANALES de la Real Sociedad Española de Química [En línea] 2006, 102 (3). 43-49 [Consultado 03, marzo, 2020]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2082917>

En la reacción 1) el átomo de carbono carbonilo de la molécula de triglicérido ataca el anión del alcohol (ion metóxido), en la reacción 2) el diglicérido reacciona con un alcohol para regenerar el anión del alcohol (ion metóxido) y en la reacción 3) Cuando el catalizador (básico) es mezclado con alcohol, el grupo alcóxido se forma, junto al glicerol¹⁴⁴

2.6.2.1 Reacciones secundarias o indeseables en la transesterificación.

Durante la reacción de transesterificación pueden ocurrir una serie de reacciones, conocidas como reacciones secundarias o indeseables, debido a un exceso de catalizador en la reacción o un aceite con alta cantidad agua o ácidos grasos libres, ocasionando, además de bajos rendimientos en la reacción, formación de jabones y neutralización del catalizador, mediante la reacción de saponificación y/o neutralización de los ácidos libres, este último ya se ha mencionado en el ítem sobre el pretratamiento del aceite¹⁴⁵

La saponificación, conocida como hidrólisis en medio alcalino, ocurre cuando el triglicérido reacciona con un catalizador básico (KOH o NaOH), en presencia de agua, produciendo jabón y glicerina (glicerol), como se evidencia en la **figura 5**.

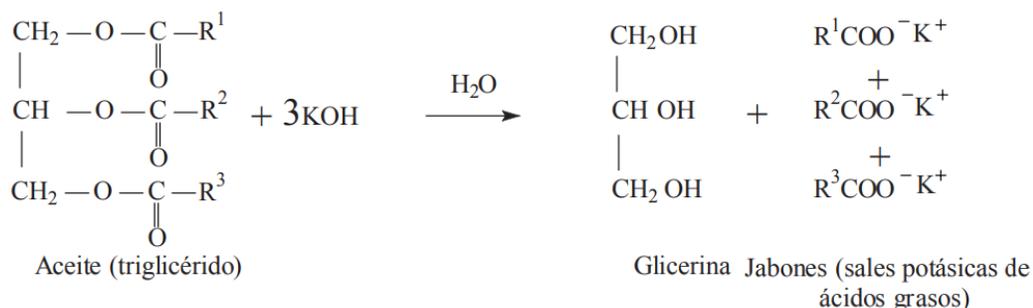
Cuando el agua y el aceite se mezclan, una pequeña parte del aceite se disuelve en el agua, de esta manera, al añadir la solución alcalina, los iones del catalizador básico reaccionan con el átomo de carbono que se encuentra en el extremo carboxilo de los ácidos grasos del aceite, liberándolos del triglicérido. Una vez separados, estos ácidos grasos reaccionan con el ion de sodio o potasio, según el tipo de catalizador, para producir jabón. Los iones OH reaccionan con el glicerol, también presente en el triglicérido, para producir glicerina¹⁴⁶.

¹⁴⁴ TORRES RIVERO, Op. Cit., p.25

¹⁴⁵ ROJAS GONZALEZ, Op. Cit., p19.

¹⁴⁶ GRASAS Y ACEITES VEGETALES. Saponificación [sitio web]. [Consultado: 15 de Julio de 2020]. Disponible en: <https://grasas-y-aceites-vegetales.webnode.com.co/aplicaciones/saponificacion/>

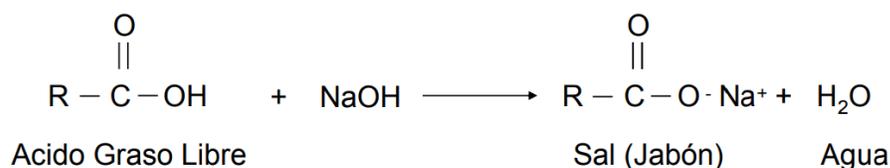
Figura 5. Reacción de saponificación de aceites o grasas



Fuente: TOROSI BAUDINO, Favio Daniel. Reacciones en contexto: la transesterificación en la producción de biodiésel a partir de aceite de fritura usado. Revista ANALES de la Real Sociedad Española de Química [En línea] 2006, 102 (3). 43-49 [Consultado 03,marzo,2020]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2082917>

De igual manera, ocurre en la reacción de neutralización de ácidos grasos; en este caso, el ion de sodio o potasio ya no reacciona con los ácidos grasos liberados del triglicérido, si no con los ácidos grasos libres presentes en aceites con alto índice de acidez o FFA, como se observa en la **figura 6**.

Figura 6. Reacción de neutralización de los ácidos grasos



Fuente: PISARELLO, Laura. Producción de biodiesel: equilibrio fisicoquímico y cinética de esterificación y transesterificación con diferentes catalizadores y alcoholes [en línea]. Tesis. Universidad nacional del litoral, Argentina. [Consultado el 10 de julio de 2020]. Disponible en: <http://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8080/bitstream/handle/11185/291/tesis.pdf>

Aunque en la transesterificación, la catálisis básica es la más usada, además de tener en cuenta la cantidad de catalizador, se debe controlar la temperatura para reducir la saponificación, además de eliminar los altos contenidos de humedad presentes en el aceite.¹⁴⁷ Estos ácidos grasos libres actúan como agente

¹⁴⁷ TORRES RIVERO. Op. Cit., p.23.

emulsionante, aumentando la superficie de contacto entre los reactivos e incrementando la velocidad de la reacción de saponificación¹⁴⁸.

2.6.2.2 Purificación. El objetivo del proceso de purificación del biodiésel es llevar el pH de la mezcla de metilésteres y las concentraciones de contaminantes hasta niveles aceptables por las normas¹⁴⁹.

- **Lavado.** En la purificación del biodiésel se incluye varias etapas de lavado con agua para de eliminar trazas de metanol, catalizador y glicerina, que no han reaccionado, junto con trazas jabón, si las hay, formadas durante la transesterificación del aceite¹⁵⁰.

En la primera etapa se neutraliza la mezcla de metilésteres y en las etapas siguientes se completa la remoción de los contaminantes. Primero se agrega un volumen de agua equivalente a un 20% del volumen de biodiésel¹⁵¹, esta solución se mezcla y posteriormente se deja en reposo para separarse por fases, mediante decantación, quedando el biocombustible en la parte superior, al ser menos denso que el agua, y esta última en la parte inferior. Finalmente, se drena el agua sucia y se repite el proceso hasta que el agua de lavado este cristalina o mediante la toma de su pH.

- **Secado.** El secado del biodiésel se lleva a cabo para eliminar la humedad presente en este, mediante su calentamiento a una temperatura entre 95 ° C y 100 ° C, la cual debe ser controlada permanentemente para evitar alcanzar la temperatura de ignición del biodiesel (120 ° C). El tiempo de secado puede durar entre 1 a 3 horas, esto depende de la cantidad de agua presente en el biocombustible¹⁵²

¹⁴⁸ TORRES RIVERO. Op. Cit., p.3

¹⁴⁹ SORICHETTIA, Patricio Aníbal y ROMANO, Silvia Daniela. Uso de agua en la purificación de biodiesel: optimización mediante el control de propiedades eléctricas de efluentes. [en línea]. Acta 7mo congreso de Medio Ambiente AUGM. Universidad de Buenos Aires. La Plata, Argentina: 2012 [Consultado 03, marzo, 2020]. Disponible en: http://www.fundacionfedna.org/ingredientes_para_piensos/grasas-elaboradas-t%C3%A9nicas-o-industriales

¹⁵⁰ LEIVA BAUTISTA, Claudia. Subproductos generados en el proceso de producción de biodiesel a partir de aceite de Tempate / [en línea]. Libro. Universidad Francisco Gavidia. San Salvador, El Salvador: 2012 [Consultado 03, marzo, 2020]. Disponible en: https://issuu.com/terera/docs/informe_investigaci_n_11

¹⁵¹ *Ibid.*, p. 34.

¹⁵² *Ibid.*, p. 35.

2.6.3 Factores que afectan la reacción de transesterificación. Las principales variables que influyen en el rendimiento, conversión y cinética de la reacción de transesterificación son: la calidad de materia prima, el tipo y cantidad de alcohol y catalizador y, las condiciones de reacción como temperatura, presión y agitación. En la **tabla 20** se recopilaron estos parámetros reportados por diferentes autores que emplearon catálisis básica para obtener biodiésel a partir de grasa de pollo.

Tabla 20. Factores que afectan la reacción de transesterificación básica en grasa de pollo.

| Autor (año de publicación) | Catalizador | Tipo de alcohol (relación molar alcohol:aceite) | Cantidad de catalizador (% p/p) | Tipo de agitación | Agitación (RPM) | Temperatura de reacción (°C) | Tiempo de reacción (h) | Rendimiento (%) |
|--|-------------|---|--|----------------------|--------------------|------------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| MARTINEZ, Gilma. PONCE, Roberto y REYES, Laura. (2007) | NaOH | Metanol (03:01) | 1 | | 644,4 | 55 | 1,5 | 98,34 |
| ALPTEKIN, Ertan y CANAKCI, Mustafa. (2010) | KOH | Metanol (06:01) | 1 | Magnética | - | 60 | 4 | 87,4 |
| GALEANO, Cristhian y GUAPACHA, Esteban (2011) | KOH | Metanol (07:01) | 1 | - | 300 | 65-70 | 2 | 93,62 |
| MONTENEGRO, Manuel; SIERRA, Fabio y GUERRERO, Carlos (2012) | NaOH | Metanol (06:01) | 0,5 | Mecánica | - | 60 | - | - |
| TEJADA TOVAR, Candelaria et al. (2013) | NaOH | Metanol (06:01) | 1 | - | 300 | 60 | 1,5 | 96 |
| LIN, Chia-Wei y TSAI, Shuo-Wen. (2015) | KOH | Metanol (06:01) | 1 | | | 60 | 2 | - |
| NUHU, S.K. y KOVO, A.S (2015) | KOH | Metanol (06:01) | 1 | - | 150 | 60 | 2 | 93,4 |
| ABRAHAM, John, et al. (2015) | NaOH | Metanol (06:01) | 1 | - | - | 60 | 1,5 | 97,62 |
| MERA, José, et al. (2018) | NaOH | Metanol (03:01) | 0,5 | - | - | 50 | 1 | - |

- Dato no determinado o reportado

Fuente: elaboración propia

Aunque hay parámetros como la velocidad y el tipo de agitación, que algunos autores no reportaron, el resto presenta semejanza y están dentro de un rango no muy amplio, específicamente la temperatura, la relación molar alcohol:aceite y el tipo de alcohol. La catálisis básica presenta un alto rendimiento alto, siendo el NaOH el catalizador con mejores resultados. En cuanto al tiempo de reacción, entre 1 y 2 horas presenta altos rendimientos, a 4 horas este disminuye, además se puede resaltar las diferentes procedencias de la materia prima, ya que está puede afectar de gran manera la calidad del biodiésel.

2.6.3.1 Calidad de la materia prima. Como se ha mencionado a lo largo del trabajo, la calidad del biodiésel depende del origen del aceite, debido a su variada composición, expresada mediante su perfil de ácidos grasos¹⁵³.

Si bien, para obtener biocombustible de alta pureza lo ideal es usar aceites refinados, con bajo contenido de agua, ácidos grasos libres y material insaponificable. Pero desde el punto de vista económico es más viable hacer uso de materias primas de baja calidad, es decir, bajo costo, como aceites crudos o parcialmente refinados, por ejemplo, grasa animal o aceite de fritura usado.

2.6.3.2 Tipo de catálisis. Los catalizadores usados en la producción de biodiésel son de tipo homogéneo, heterogéneo y enzimático. Y a su vez, los homogéneos pueden ser ácidos o básicos. En la **tabla 21** se presentan los catalizadores más empleados, junto a sus ventajas y desventajas en la producción de este biocombustible.

¹⁵³ KNOTHE, Op. Cit., p.163

Tabla 21. Tipo de catálisis en producción de biodiésel

| Tipo de catálisis | Más empleados ^{154,155} | Ventajas ¹⁵⁶ | Desventajas |
|-------------------|--|---|---|
| Básica | <ul style="list-style-type: none"> - NaOH, - KOH, - KOCH₃, - NaOCH₃ - NaOC₂H | <ul style="list-style-type: none"> - Altos rendimientos, hasta el 98 %, - Más rápida que la catálisis ácida, los tiempos oscilan de una a una hora y media. - Mayor uso en el medio industrial por ser menos costosos - Tiempos cortos de reacción (30 min), - Se añade a bajas concentraciones molares (0,5M) | <ul style="list-style-type: none"> - Sensible al contenido de agua y ácidos grasos libres (AGL) - Se comportan bien temperaturas menores a 100 ° C¹⁵⁷, - Formación de jabones por la saponificación de los ácidos grasos o presencia de agua en el aceite, siendo necesario su purificación y remoción de los productos de la reacción. Esto implica mayores costos de producción |
| Ácida | <ul style="list-style-type: none"> - Ácido sulfónico - Ácido fosfórico - H₂SO₄ - HCl | <ul style="list-style-type: none"> - Rendimientos altos de alquilésteres | <ul style="list-style-type: none"> - Se requiere temperaturas y presiones elevadas - Necesita por lo menos tres horas para conseguir una conversión completa. - Problemas de corrosión y necesidad de purificación y remoción de los productos de la reacción, por ende, mayores costos de producción - Se necesita una amplia proporción molar de alcohol/aceite |

¹⁵⁴ ROJAS GONZALEZ, Op. Cit., p.18.

¹⁵⁵ BINET. Op. Cit., p.42.

¹⁵⁶ ALFONSO ALVAREZ, Juan Antonio. Op. Cit., p.32.

¹⁵⁷ BINET. Op. Cit., p.42.

Tabla 21. (Continuación)

| Tipo de catálisis | Más empleados ^{158, 159} | Ventajas ¹⁶⁰ | Desventajas |
|-------------------|---|---|---|
| Heterogéneo | <ul style="list-style-type: none"> - Resinas de intercambio iónico - Óxidos metálicos (Mg y Ca) - Zeolitas - Ácidos de Lewis (SnCl) | <ul style="list-style-type: none"> - Simplifica y hace más económico el proceso de purificación por la facilidad de separación de reactivos y productos - Eliminan los problemas de corrosión y tratamientos de efluentes, provocando una reducción en los costos de producción e impacto ambiental | <ul style="list-style-type: none"> - Control de temperatura cuando las reacciones son muy exotérmicas - El catalizador Requiere alta resistencia mecánica |
| Enzimático | <ul style="list-style-type: none"> - Lipasas, como la Cándida Antártica. Y P. cepacia | <ul style="list-style-type: none"> - Más fácil recuperación de la glicerina, - Presenta altos rendimientos, sin embargo | <ul style="list-style-type: none"> - Requiere tiempos largos (18-24 h) para obtener altos rendimientos - Aún no se ha desarrollado comercialmente¹⁶¹. - Se ve limitada por el tipo de la materia prima, debido a su baja temperatura de reacción (< 50 °C)¹⁶² |

Fuente: elaboración propia

¹⁵⁸ ROJAS GONZALEZ, Op. Cit., p. 19.

¹⁵⁹ BINET. Op., Cit., p. 42.

¹⁶⁰ ALFONSO ALVAREZ, Op. Cit., p.32.

¹⁶¹ Ibíd., p. 204.

¹⁶² ROJAS GONZALEZ, Op. Cit., p. 204.

A nivel industrial los catalizadores más empleados son los homogéneos básicos NaOH y KOH. Aunque el hidróxido de potasio genera como subproducto sales con características fertilizantes, este catalizador es poco usado a gran escala debido a su alto costo¹⁶³.

2.6.3.3 Cantidad de catalizador. Este parámetro afecta el rendimiento de la reacción hasta ciertos valores al promover la formación de sales, la emulsificación de la mezcla y genera costos adicionales por su consumo.¹⁶⁴

La cantidad de catalizador varía de acuerdo al tipo empleado. Los básicos se emplean del 0,3 % al 2 % de la cantidad de aceite empleado¹⁶⁵. Ya que con una baja cantidad de catalizador (< 0,1% p/p) o una cantidad excesiva de este (> 50% p/p) es imposible alcanzar máximos rendimientos.

González y Gallego reportan rendimientos dados del 99,4%, 98,8% y 97,8 usando grasa de pollo, sebo y manteca de cerdo, respectivamente, utilizando el 0,4% de NaOH, a una relación molar de 6:1, 60 °C y 30 min, usando metanol¹⁶⁶. Sin embargo, Tamariz obtuvo biodiésel a partir de grasa de pollo usando diferentes concentraciones de KOH. 0,50%, 0,75% y 1% dejando fijo variables como la temperatura (60 °C), tiempo de reacción (90 minutos), tipo de alcohol (metanol) y relación molar metanol-aceite (6:1)¹⁶⁷. En la **gráfica 3** se evidencia el efecto en el rendimiento de biodiésel a al usar diferentes concentraciones de KOH como catalizador.

¹⁶³ ALFONSO ALVAREZ, Op. Cit., p. 31

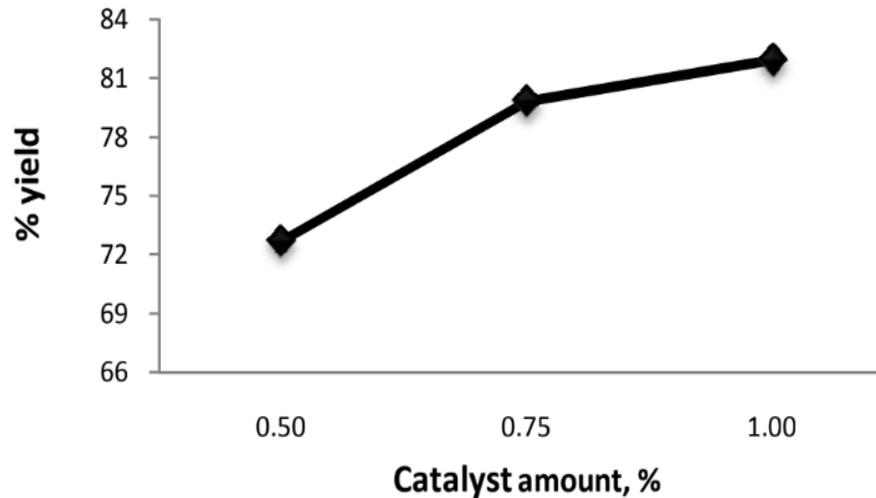
¹⁶⁴ ROJAS GONZALEZ, Op. Cit., p. 34.

¹⁶⁵ BINET. Óp. Cit. p. 42.

¹⁶⁶ ROJAS GONZALEZ, Op. Cit., p. 34.

¹⁶⁷ BUENDÍA TAMARIZ, Mali Nay; TREJO CALZADA, Ricardo y PEDROZA SANDOVAL, Aurelio. Characterization of Biodiesel Produced from Chicken Fat and Pennycress Oil using Different Concentrations of Basic Catalysts. En: ResearchGate [en línea]. Julio, 2015 [Consultado el 11 de julio de 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/281559864_Characterization_of_Biodiesel_Produced_from_Chicken_Fat_and_Pennycress_Oil_using_Different_Concentrations_of_Basic_Catalysts

Gráfica 3. Efecto en el rendimiento de biodiésel al usar diferentes concentraciones de KOH como catalizador (60 °C, tiempo de reacción: 90 minutos, relación molar 6.1 de metanol: aceite)



Fuente: TAMARIZ, M.N.B., et. al. Characterization of Biodiesel Produced from Chicken Fat and Pennycress Oil using Different Concentrations of Basic Catalysts. *Journal of Agriculture and Environmental Sciences*. 2015, 4 (1). 127-133 [Consultado 20, mayo, 2020] ISSN: 2334-2404 Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/281559864_Characterization_of_Biodiesel_Produced_from_Chicken_Fat_and_Pennycress_Oil_using_Different_Concentrations_of_Basic_Catalysts

El máximo rendimiento en la reacción se obtuvo usando 1% de KOH. Aunque las características del biodiésel, presentadas por Tamariz, no mostraron mayor diferencia variando la cantidad de catalizador; valores de parámetros como la viscosidad del biodiésel, su punto de nube y de inflamabilidad, fueron menores.

Marwahaa empleó como catalizador heterogéneo en la producción de biodiésel con aceites vegetales, residuos de cáscara de huevos usados, ricos en calcio, obteniendo rendimientos mayores al 91%¹⁶⁸, una alternativa interesante de aprovechamiento de otro residuo presente en la industria avícola.

¹⁶⁸MARWAHAA, Akshey., et al.. Waste materials as potential catalysts for biodiesel production: Current state and future scope. [En línea]. 2018, 181 (1). 175-186. [Consultado 4, junio, 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382018311251>

2.6.3.4 Tipo de alcohol. Los alcoholes más empleados en la reacción de transesterificación son el metanol y etanol. Aunque también se han utilizado otros alcoholes como: dietilenglicol, n-propanol, n-butanol, isobutanol e isopropanol¹⁶⁹, son poco usados debido a su alto costo por su complejo proceso de obtención y gran cantidad de energía usada en este.¹⁷⁰

El metanol es el reactivo más utilizado debido a su bajo costo y altos rendimientos¹⁷¹. Durante la reacción de transesterificación se forma una emulsión que desaparece cuando se utiliza metanol, lo cual no sucede al usar etanol, que por el contrario dificultaría la separación y purificación del biodiésel¹⁷².

2.6.3.5 Relación molar alcohol: aceite. Esta es una de las variables de mayor importancia e influencia en el rendimiento de la producción de biodiésel. Por estequiometría de la reacción se requiere una relación molar alcohol: grasa (triglicérido) de 3:1 para convertir los triglicéridos a alquilésteres¹⁷³. Aunque al ser una reacción reversible, se debe agregar un exceso de alcohol para desplazar el equilibrio hacia la formación de ésteres y en la práctica este incrementa a 6:1. El exceso de metanol debe ser evitado, ya que este puede dificultar el proceso de separación de la glicerina en la purificación del biodiesel, elevando su costo de producción¹⁷⁴.

Según lo citado por González y Gallejo, dos autores diferentes presentaron rendimientos mayores al 90%, en la transesterificación homogénea, a una relación de 6:1 empleando grasa de pollo, manteca de cerdo, aceite de pescado y sebo de res¹⁷⁵

2.6.3.6 Humedad. La presencia de humedad en el aceite genera problemas en la reacción, ya que ocasiona la formación de jabón (proceso de saponificación), consumiendo el catalizador y reduciendo su eficacia.¹⁷⁶ A altas temperaturas, el agua hidroliza los triglicéridos a diglicéridos formando ácidos grasos libres, inhibiendo la reacción de transesterificación

Según lo reportado por González y Gallejo¹⁷⁷, para obtener altos rendimientos en la reacción de transesterificación, el contenido de agua en un aceite debe ser inferior al 0,06%. Para disminuir la humedad presente en el aceite estos mismos

¹⁶⁹ *Ibíd.*, p. 202

¹⁷⁰ RÍOS, BENJUMEA HERNANDEZ y AGUDELO SANTAMARÍA. *Op. Cit.*, p.4

¹⁷¹ ROJAS GONZALEZ, *Op. Cit.*, p.18

¹⁷¹ *Ibíd.*, p. 18

¹⁷² *Ibíd.*, p. 18

¹⁷³ *Ibíd.*, p. 201

¹⁷⁴ TOROSI BAUDINO, *Op. Cit.*, p.18

¹⁷⁵ ROJAS GONZALEZ, *Op. Cit.*, p. 201

¹⁷⁶ ALFONSO ALVAREZ, *Op. Cit.*, p. 43

¹⁷⁷ ROJAS GONZALEZ, *Op.*, *Cit.* p. 206.

autores sugieren emplear alcohol y catalizador en estado anhidro, es decir alcohol al 99% y NaOH o KOH al 99% de pureza, y calentar el aceite antes de entrar a la reacción de transesterificación, para evaporar el agua presente.

2.6.3.7 Contenido de ácidos grasos libres (AGL). El contenido de ácidos grasos libres presente en el aceite no debe ser mayor al 2%¹⁷⁸, sin embargo, según el autor, esta condición puede variar levemente, prefiriendo aceites con FFA menores al 1 o 3%, como máximo.

Como se mencionó en el ítem de pretratamiento, en la reacción de transesterificación cuando los ácidos grasos libres reaccionan con el catalizador básico, estos tienden a formar jabón en lugar de ésteres metílicos, disminuyendo el rendimiento en la formación de biodiésel, de lo contrario se requerirá más catalizador básico para neutralizar los ácidos grasos libres¹⁷⁹

2.6.3.8 Temperatura. “El aumento de la temperatura incrementa el rendimiento y la miscibilidad entre los reactantes”¹⁸⁰. La temperatura de la transesterificación está sujeta al tipo de aceite y tipo de catalizador que se emplee en el proceso¹⁸¹, por tal motivo la temperatura no debe ser superior a la temperatura de ebullición del alcohol empleado, para evitar su pérdida y consecuente disminución del rendimiento. A presión atmosférica la temperatura de ebullición del metanol y etanol, son 64,7 °C y 78,37 °C, respectivamente. Como se observó en la **tabla 20**, usando grasa de pollo la reacción de transesterificación se lleva a cabo a una temperatura de 60°C.

2.6.3.9 Tiempo de reacción. Al igual que la temperatura, el tiempo de reacción de la transesterificación, además de ser directamente proporcional al rendimiento, es dependiente de factores como el tipo de aceite y tipo de catalizador. Según la literatura, el tiempo de reacción para la transesterificación está entre 5 min - 20 h, esto varía según el tipo de aceite, equipo y proceso de catálisis a utilizar¹⁸²

Al igual que los tiempos de reacción presentados en la **tabla 20**, en aceites vegetales el tiempo de reacción oscila entre los 30 min a 2 horas, presentando en los primeros 30 minutos una conservación cerca del 80% y después de la primera hora entre el 93 y el 98%.¹⁸³

¹⁷⁸ ALFONSO ÁLVAREZ. Op., Cit., p. 35

¹⁷⁹ ROJAS GONZALEZ, Op. Cit., p. 19

¹⁸⁰ *Ibíd.*, p. 204

¹⁸¹ TORRES RIVERO, Óp., Cit., 26.

¹⁸² *Ibíd.*, p. 26.

¹⁸³ TEJADA TOVAR, Op. Cit., p. 15

2.6.3.10 Agitación. Durante la transesterificación, la agitación es necesaria al comienzo de la reacción, ya que al alimentar el reactor se forma un sistema de dos fases líquidas inmiscibles entre el aceite y la solución alcohol/catalizador. Por tal motivo, se requiere un rápido y eficaz mezclado para una correcta transferencia de masa, sin limitar la conversión. Una vez mezcladas las fases e iniciada la reacción, no se requiere agitación fuerte ni sostenida, pues al final de la reacción se busca desestabilizar la emulsión formada para dar paso a la separación de las fases (biodiésel/glicerina).

Como se observó en la **tabla 20**, no se encuentran valores concretos frente a la velocidad ni el tipo de agitación adecuada para llevar a cabo la transesterificación usando grasa de pollo, sin embargo, Rojas González, mencionó que en la catálisis homogénea de grasas animales la intensidad de agitación se realiza entre 130 y 600 rpm (revoluciones por minuto) ¹⁸⁴.

Según literatura, usando aceites vegetales y catálisis homogénea se dan altos y constante rendimientos (alrededor del 89%), con velocidades de agitación entre 360 y 600 rpm, esto se debe a que a velocidades superiores a 360 rpm se supera el valor mínimo del número de Reynolds de 10.000, garantizando que la transferencia de masa de los reactantes y productos no limite la velocidad de reacción. ¹⁸⁵

La forma de realizar la agitación también afecta el rendimiento de la reacción, según lo recopilado por González y Galeano, empleando agitación magnética y mecánica a la misma velocidad de agitación (1.000 rpm) se obtiene un rendimiento del 85% a 89,5%, respectivamente ¹⁸⁶.

2.6.4 Caracterización del biodiésel. Además de los factores que influyen en la reacción de transesterificación y por ende en la calidad del biodiésel producido, existen otros factores tras llevarse a cabo la reacción, que también pueden afectar la calidad de este biocombustible como son las condiciones de almacenamiento del biodiésel y la presencia de agua o materiales extraños durante su exposición ¹⁸⁷.

Los problemas técnicos que más presenta el biodiésel, como la dificultad de fluir a bajas temperaturas y la baja estabilidad oxidativa, se pueden asociar con uno o más parámetros de calidad del biodiésel, según la norma ASTM (American Society for Testing and Materials) D6751 y la Norma Europea para Biodiésel en 14214 (European Committee for Standardization), las cuales recopilan los límites de algunas propiedades que determinan la calidad de biodiésel. Algunos parámetros

¹⁸⁴ ROJAS GONZALEZ, Op. Cit., p. 20

¹⁸⁵ *Ibíd.*, p. 205.

¹⁸⁶ *Ibíd.*, p. 206.

¹⁸⁷ KNOTHE, Op. Cit., p.169

de calidad del biodiésel, se presentan en la normatividad que puede ser consultada en el anexo A.

2.6.4.1 Densidad. La densidad del biodiesel es la relación masa/volumen, determinada mediante un picnómetro; el procedimiento está descrito en la norma ASTM D4052, la cual establece como rango de densidad 0,860 – 0,900 g/cm³ a 15 °C

La densidad da idea del contenido en energía del combustible. Mayores densidades indican mayor energía térmica y una economía de combustible mejor, pero de igual manera la mayor densidad del biodiesel puede causar problemas en los actuales sistemas de inyección de los motores y, a bajas temperaturas, plantea problemas de solidificación y congelación¹⁸⁸

2.6.4.2 Índice de cetano. El número de cetano (nc) es un indicador de la calidad de ignición de un combustible al momento de inyectarlo en la cámara de combustión de un motor diésel, es decir, está relacionado con el tiempo de retardo de la ignición que experimenta un combustible al momento de la inyección, de tal manera, a mayor número de cetano, mejor calidad de ignición y menos tiempo de retardo de la misma, y viceversa.

La norma de biodiésel ASTM D6751 establece un nc mínimo de 47, mayor en comparación con el nc mínimo para diésel en Estados Unidos, cuyo valor es de 40. El método para determinar el nc en ASTM D6751 utiliza un motor de cetano de un cilindro; un método alternativo, ASTM D6890, utiliza una cámara de combustión de volumen constante y consumen menos combustible¹⁸⁹. Ambos métodos son muy costosos, sin embargo, el índice de cetano se puede determinar mediante correlaciones empíricas a partir de propiedades de fácil medición como la densidad y la curva de destilación.¹⁹⁰

¹⁸⁸ KNOTHE, Gerhard. Calidad del combustible Biodiesel y la norma ASTM. Revista Palmas [En línea] 2010, 31 (especial). 162-171 [Consultado 03 de marzo del 2020]. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/download/1563/1563/>

¹⁸⁹ *Ibid.*, p.167.

¹⁹⁰ ALFONSO ALVAREZ, Op. Cit., p.28

2.6.4.3 Viscosidad. El rango de viscosidad del biodiésel, especificado en la norma ASTM D6751 es de 1,9-4,5 cSt (modificado en el año 2017)¹⁹¹ es determinado por medio del viscosímetro de Ostwald. Aunque es parámetro es suficientemente amplio para permitir el uso de la mayoría de las materias primas para producción de biodiésel, este debe poseer una viscosidad mínima para evitar pérdidas de potencia debidas a las fugas en la bomba de inyección y en el inyector. Además, le da características de lubricidad al sistema de combustible. Por otra parte también se limita la viscosidad máxima por consideraciones de diseño y tamaño de los motores, y en las características del sistema de inyección¹⁹²

2.6.4.4 Contenido de agua. Aunque la materia prima para producir biodiésel debe tener el menor contenido de agua posible; durante el almacenamiento, el biodiésel puede entrar en contacto con agua (humedad en el aire, residuos de agua en el tanque, etcétera) y esta, además de ser corrosiva para partes del motor, puede conducir a la formación de ácidos grasos a partir de ésteres y/o ruptura hidrolítica de enlaces dobles en ésteres insaturados y formar jabones por saponificación¹⁹³.

El contenido de agua presente en el biodiésel está especificado en la norma ASTM D6751, calculado de manera gravimétricamente según la norma ICONTEC 254, debe ser máximo 500 ppm (como % volumen o mg/kg), ya que el agua no disuelta produce corrosión sobre la parte metálica del motor y favorece el crecimiento de microorganismos, hongos y bacterias, formando lodos y obstruyendo filtros, además a convertir el azufre presente en el combustible en ácido sulfúrico, que corroe la superficie del motor¹⁹⁴.

2.6.4.5 Número ácido. El número ácido o índice de acidez, cuyo valor máximo debe ser de 0,5 mg de KOH/g, según la norma ASTM D6751 y se determina mediante diferentes métodos de titulación, según la norma ASTM D664, se refiere a la cantidad de base expresada en miligramos de hidróxido de potasio por gramo de muestra, requerida para neutralizar la muestra.¹⁹⁵ Es una medida de la cantidad de ácidos grasos libres presentes en el biodiesel. La presencia de ácidos grasos en el biocombustible puede causar corrosión e incrementa la probabilidad de presencia de agua.

Un biodiesel con un número ácido alto incrementa la velocidad de descomposición del biodiesel y atribuye a la formación de los depósitos en el sistema de alimentación del combustible, produciendo mayor la corrosión en el motor.

¹⁹¹ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE Y MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución No. 40619. Artículo 1°. Bogotá D.C. El instituto. 2017. Hoja No.3

¹⁹² KNOTHE. Op. Cit., p.167.

¹⁹³ *Ibid.*, p.169.

¹⁹⁴ VIVAS CASTAÑO, Op. Cit., p.62

¹⁹⁵ ALFONSO ÁLVAREZ. Op., Cit. p. 35.

2.6.4.6 Punto de inflamación. El punto de inflamación o punto de ignición, cuyo valor mínimo permitido, especificado en la norma ASTM D6751, es de 120 °C y se determina por el método del vaso abierto Cleveland según ASTM D93, es la temperatura mínima a la cual los vapores del combustible se hacen inflamable.¹⁹⁶

Este parámetro generalmente se determina por temas legales de seguridad, sin embargo, también es útil para conocer si existe una cantidad excesiva de alcohol no reaccionado presente en el biodiésel¹⁹⁷. Aunque la norma ASTM D6751 tiene una especificación separada para la cantidad de alcohol, conocida como “Cantidad de metanol o etanol”¹⁹⁸ y debe ser menor a 0,20% en masa y se determina medio cromatográfico, según la norma ISO 14110, implica que si el punto de inflamación se va a usar para control de alcohol, el punto de inflamación debe ser por lo menos de 120°C

2.6.4.7 Poder calorífico. El poder calorífico es la cantidad de energía por unidad de masa que puede desprender al producirse una reacción química de oxidación, este expresa la energía máxima que puede liberar la unión química entre un combustible y el comburente. Su valor, según la norma ASTM D6751 es alrededor de 39500 kJ/kg, y se determina según la norma ASTM D240, con la ayuda de la bomba calorimétrica, la cual determina el poder calorífico de un combustible cuando se quema a volumen constante¹⁹⁹.

2.6.4.8 Punto de nube. El punto de nube, de enturbiamiento o turbidez, cuyos límites, según la norma ASTM D6751, varían dependiendo de la ubicación geográfica y la época del año y es determinado mediante un método de prueba conocido como punto de obstrucción de filtro frío²⁰⁰, según la norma EN 14214, es la temperatura a la cual empiezan a precipitarse ciertos compuestos en el combustible, como las parafinas o materias saponificables.

Este parámetro se debe tener en cuenta si el combustible es usado en climas fríos, ya que genera impacto en su fluidez y calidad. El valor del punto de nube del biodiesel es más alto comparado con el del diésel común.²⁰¹

¹⁹⁶ KNOTHE. Op. Cit., p.15.

¹⁹⁷ LEIVA BAUTISTA, Op. Cit., p.99.

¹⁹⁸ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE Y MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución No. 90963. Artículo 4°. Bogotá D.C. El instituto. 2014. Hoja No.4

¹⁹⁹ VIVAS CASTAÑO. Op. Cit. p.76.

²⁰⁰ KNOTHE, Op. Cit., p.168.

²⁰¹ BINET. Op., Cit. p.82.

2.6.4.9 Índice de yodo. El índice de yodo, cuyo valor según la norma ASTM D6751 debe ser máximo de 120 g yodo/100g y se determina analíticamente por valoración REDOX, según norma ASTM 14111²⁰². Este parámetro está relacionado con la oxidación del biodiésel, ya que cuantifica el nivel de insaturación de los ésteres, de tal manera que valores altos de yodo indican presencia importante de hidrocarburos con doble enlace, favoreciendo el proceso de polimerización y de hidrólisis²⁰³

2.6.4.10 Cantidad de glicéridos. La cantidad de glicéridos es el contenido de monoglicéridos, diglicéridos y triglicéridos presentes en el diésel, cuyos valores según la norma ASTM D6751 no deben ser mayores al 0,2% masa, 0,8% masa y 0,8% masa, respectivamente y se calculan por cromatografía²⁰⁴. Este parámetro es uno de los más importantes, ya que trazas de glicéridos presentes en el biodiésel son muestra de conversión incompleta del aceite o grasa durante la reacción de transesterificación y pueden causar depósitos en la cámara de combustión. Además, los monoacilglicerol de ácidos grasos saturados al tener altos puntos de fusión (>70°C), puede causar problemas cuando se almacena el biodiésel a bajas temperaturas²⁰⁵

2.6.4.11 Glicerina libre. El glicerol, abordado como glicerina libre en la norma ASTM D675, es el nivel de glicerina presente en el combustible, cuyo valor según la misma norma debe ser del 0.02% p/p y se determina por cromatografía, según la norma ASTM D 6584. Las pequeñas cantidades de glicerol están asociadas a la formación de lípidos y compuestos intermedios que pueden permanecer en el producto final de biodiésel inclusive después de la purificación.²⁰⁶ Niveles altos de glicerina libre pueden ocasionar problemas en el motor y combustión incompleta, ya que la viscosidad del biodiésel aumenta por la presencia de glicerol haciendo deficiente su decantación y lavado²⁰⁷

2.6.4.12 Glicerina total. La glicerina total, cuyo valor debe ser máximo 0,25% masa, según la norma ASTM D675, y al igual que la glicerina libre, debe ser calculada por cromatografía, es la glicerina libre más la glicerina de cualquier aceite o grasa sin reaccionar total o parcialmente, es decir la glicerina que se encuentra en forma de monoglicéridos y diglicéridos que son los productos parciales de la reacción de conversión de los triglicéridos a metil ésteres.²⁰⁸

²⁰² Ibíd., p.80.

²⁰³ KNOTHE. Op., Cit. p.165

²⁰⁴ BINET. Op., Cit. p.70.

²⁰⁵ KNOTHE. Op., Cit. p.165.

²⁰⁶ Ibíd., p.162.

²⁰⁷ BINET. Op. Cit., p.82.

²⁰⁸ VIVAS CASTAÑO, Op. Cit., p.78.

El rendimiento de la reacción de transesterificación se calcula con base al contenido total de glicerol o glicerina presente en el biodiésel, ya que bajos niveles de glicerina total indican que una alta conversión del aceite o grasa, en mono alquilésteres.

2.6.4.13 Contenido de varios elementos. La norma ASTM D675, además de especificar el límite de elementos como el sodio y potasio, que pueden permanecer en el biodiésel después de la reacción de transesterificación al usar hidróxido de sodio o de potasio como catalizadores, también presenta limitaciones para el contenido de elementos como el calcio, magnesio, fósforo y azufre, presentes en el biodiésel y que en algunos casos, su presencia puede ser asociada a catalizadores alternativos, el contacto con materiales extraños como huesos y carne en el caso de las grasas animales puede ser la causa²⁰⁹. El fósforo también se puede atribuir a los fosfolípidos, mientras que el azufre puede provenir de los glucosinolatos que se encuentran en algunas materias primas como canola o colza.

Los límites establecidos por la norma ASTM D675 son bajos, ya que la presencia estos elementos en el biodiesel puede tener efectos perjudiciales en la combustión de este, además de volver tóxicos los catalizadores. Estos parámetros pueden determinarse mediante espectrometría de relajación dieléctrica, método usado para caracterizar mezclas y detectar contaminantes en tiempo real²¹⁰

Los mismos autores, presentados anteriormente en la **tabla 20**, quienes obtuvieron biodiésel a partir de grasa de pollo mediante transesterificación básica, determinaron alguno de los parámetros de calidad del biodiésel producido, los resultados son recopilados y presentados en la **tabla 23**.

²⁰⁹ KNOTHE. Op. Cit., p.169.

²¹⁰ BINET. Op. Cit., p.84.

Tabla 22. Caracterización de biodiésel a partir de grasa de pollo

| Autor (año de publicación) | Densidad a 15°C (g/mL) | Densidad a 18°C (g/mL) | Densidad a 30°C (g/mL) | Viscosidad a 40°C (cSt) | Punto de inflamación o combustión (°C) | Punto de nube (°C) | Punto de fluidez (°C) | Índice de yodo (g de I ₂ /100 g de biodiésel) | Índice de cetano (cetanos) | Índice de acidez (mgKOH/g) | Poder calorífico (kJ/kg) |
|---|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|--|--------------------|-----------------------|--|----------------------------|----------------------------|--------------------------|
| MARTINEZ, Gilma. PONCE, Roberto y REYES, Laura. (2007) | - | - | 0,874 | 5,15 | - | - | - | - | 28,57 | 0,431 | 43805,98 |
| ALPTEKIN, Ertan y CANAKCI, Mustafa. (2010) | 0,883 | - | - | 4,94 | 171,8 | - | 2 | - | - | - | 40173 |
| GALEANO, Cristhian y GUAPACHA, Esteban (2011) | 0,8758 | - | - | 4,53 | 178 | - | - | 91,2 | - | - | 52355,88 |
| MONTENEGRO, Manuel; SIERRA, Fabio y GUERRERO, Carlos (2012) | - | 0,8589 | - | 4,71 | 164 | 7 | - | - | 53,93 | - | - |
| TEJADA TOVAR, Candelaria et al. (2012) | - | - | - | 4,26 | 355 | - | - | - | - | - | - |
| LIN, Chia-Wei y TSAI, Shuo-Wen. (2015) | 0,8796 | - | - | 4,469 | 170 | - | - | - | - | 0,144 | - |
| NUHU, S.K. y KOVO, A.S (2015) | 0,877 | - | - | 4,4 | 155 | 8 | - | 94,66 | 50,6 | 1,112 | - |
| ABRAHAM, John, et al. (2015) | - | - | - | 5,83 | 172,16 | 5,3 | 1,8 | - | 72,5 | - | 38710 |
| MERA, José, et al. (2018) | 0,8928 | - | - | 7,5 | 169 | - | - | - | - | - | 39456,1 |

- Dato no determinado o reportado

Fuente: elaboración propia

Las propiedades presentadas para biodiésel a partir de grasa de pollo, cumplen con los parámetros según la normatividad presentada anteriormente, las densidades reportadas están entre 0,860 – 0,900 g/cm³, a excepción de la densidad reportada por Montenegro, Sierra y Guerrero²¹¹, la viscosidad esta entre 1,9 – 90 cSt, a excepción de la viscosidad reportada por Tejada y Villabona²¹².

Sin embargo, Hernández obtuvo biodiésel a partir de grasa de pollo con mejores propiedades mediante transesterificación básica, usando aditivos como etileno vinil acetcomio (EVA) y estireno butadieno estireno (SBS) mejoró algunas propiedades del biodiésel, aumentó el contenido de ácido oleico (C18:1) y disminuyó la viscosidad de este biocombustible a aproximadamente 2%²¹³.

2.7 EXPERIMENTACIÓN PARA OBTENER ACEITE A PARTIR DE RESIDUOS GRASOS DE POLLO

Para conocer el potencial de los residuos grasos de pollo en la producción de biodiésel, se extrajo el aceite de residuos grasos de pollo mediante dos métodos diferentes: horno y estufa; posteriormente ambos aceites fueron analizados para conocer su composición, dada por su perfil de ácidos grasos, mediante una cromatografía de gases.

Los residuos grasos de pollo, presentados en la **ilustración 1**, se obtuvieron en la plaza de mercado del barrio 20 de Julio, estos iban adheridos a hueso y mezclados con sangre, por tal motivo se separaron manualmente y en seguida se lavaron con agua a la temperatura ambiente de la ciudad de Bogotá (20°C).

²¹¹ MONTENEGRO, SIERRA y GUERRERO. Op. Cit., p. 65

²¹² TEJADA TOVAR, Op. Cit., p. 18

²¹³ HERNÁNDEZ, M.C. et. al. Chicken fat and biodiesel viscosity modification with additives for the formulation of biolubricants. Fuel. 2017, 198. 42-48 [Consultado 20, mayo,2020] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.12.039>

Ilustración 1. Residuos grasos de pollo



Fuente: elaboración propia

La extracción del aceite de la grasa sólida de pollo se llevó a cabo de dos maneras diferentes, mediante horno a 75°C (**ilustración 2**) y estufa (**ilustración 3**), ambos por un tiempo de 1 hora.

Ilustración 2. Extracción en horno



Fuente: elaboración propia

Ilustración 3. Extracción en estufa (A), Aceite de pollo extraído (B)



Fuente: elaboración propia

Ambos aceites de pollo, es decir el aceite obtenido por horno y el aceite obtenido por estufa, fueron analizados en SIGRA (empresa líder en producción y comercialización de grasa y aceites vegetales para la industria de alimentos) mediante cromatografía de gases. En la **tabla 23** se presenta el perfil de ácidos grasos para ambas muestras de aceite de pollo y, se compara con el perfil reportado en dos investigaciones más, para la misma materia prima. Los resultados de las cromatografías pueden ser consultados en el anexo B.

Tabla 23. Perfil de ácidos grasos de aceite de pollo

| Tipo de ácido graso | Nombre del ácido graso | Fórmula molecular | Contenido de ácidos grasos en porcentaje por peso (% / p) | | | | | |
|---------------------|------------------------|-------------------|---|---|--|----------------------------------|------------------|-----------------|
| | | | SEFFATI, Kambiz, et. al (2019) | GALEANO, Cristhian y GUAPACHA, Esteban (2011) | LIN, Chia-Wei y TSAI, Shuo-Wen. (2015) | RÍOS, Luis Alberto, et al (2015) | SIGRA S.A Estufa | SIGRA S.A Horno |
| Saturados | Láurico | C12: 0 | 0,03 | - | 0,03 | - | 0,22 | 0,45 |
| | Mirístico | C14: 0 | 0,18 | 0,67 | 0,96 | 1,3 | 0,87 | 0,93 |
| | Pentadecílico | C15: 0 | 0,08 | 0,12 | 0,1 | - | 0,32 | 0,29 |
| | Palmítico | C16: 0 | 25,58 | 21,21 | 24,57 | 23,2 | 23,67 | 25,83 |
| | Margárico | C17: 0 | 0,11 | - | 0,15 | 0,3 | 0,28 | 0,24 |
| | Esteárico | C18: 0 | 11,86 | 6,13 | 5,8 | 6,4 | 6,36 | 6,68 |
| | Araquídico | C20: 0 | 0,4 | - | 0,07 | - | 0,13 | 0,16 |
| Total | | | 38,24 | 28,13 | 31,68 | 31,2 | 31,85 | 34,58 |
| Insaturados | Miristoleico | C14: 1 | 0,61 | - | - | 0,2 | - | - |
| | Palmitoleico | C16: 1 | 0,09 | 4,34 | 0,18 | 6,5 | 4,24 | 3,57 |
| | Margaroleico | C17: 1 | 0,19 | - | 4,83 | - | 0,31 | 0,27 |
| | Oleico | C18: 1 | 36,52 | 38,1 | 39,81 | 41,6 | 37,39 | 37,14 |
| | Eicosenoico | C20:1 | - | - | 0,1 | - | 0,26 | 0,27 |
| Total | | | 37,41 | 42,44 | 44,92 | 48,3 | 42,2 | 41,25 |
| Poliinsaturados | Linoleico | C18: 2 | 6,21 | 27,54 | 20,52 | 18,9 | 21,87 | 20,67 |
| | Licolénico | C18: 3 | 0,12 | 1,77 | 2,1 | 1,3 | 1,54 | 1,48 |
| Total | | | 6,33 | 29,31 | 22,62 | 20,2 | 23,41 | 22,15 |

- Dato no determinado

Fuente: elaboración propia

Tanto en el perfil de ácidos grasos de las muestras analizadas, como el presentado por otros autores, se observan resultados similares. En la grasa de pollo está presente una mayor cantidad de ácidos grasos insaturados (entre 40-55% aproximadamente) y una cantidad, no menor, de ácidos saturados (entre 30-40% aproximadamente), lo cual le otorga al aceite pollo no estar líquido ni completamente sólido a temperatura ambiente

Los ácidos predominantes en esta grasa son el oleico (C18:1), seguido del palmítico (C16:0) y linoleico (C18:2), también presentes de manera significativa en el aceite de palma. En la **tabla 24** se compara el perfil de ácidos grasos del aceite de pollo (obtenido en horno) con otros aceites/grasas, la manteca de cerdo, el sebo bovino y con los aceites más usados como materia prima a nivel mundial en la producción de biodiésel, el aceite de soya y palma.

Tabla 24. Perfil de ácidos grasos de diferentes aceites/grasas

| Tipo de ácido graso | Nombre del ácido graso | Fórmula molecular | Contenido de ácidos grasos en porcentaje por peso (% / p) | | | | |
|---------------------|------------------------|-------------------|---|---------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| | | | Grasa de pollo* | Sebo de res** | Manteca de cerdo** | Aceite de palma*** | Aceite de soya*** |
| Saturados | Láurico | C12: 0 | 0,45 | 0,1 | 0,1 | <0,5 | - |
| | Mirístico | C14: 0 | 0,93 | 2,7 - 4,8 | 1,4 - 1,7 | 0,5-2,0 | - |
| | Pentadecílico | C15: 0 | 0,29 | - | - | - | - |
| | Palmítico | C16: 0 | 25,83 | 20,9 - 28,9 | 23,1 - 28,3 | 39,3-47,5 | 9,5 |
| | Margárico | C17: 0 | 0,24 | 1 | 0,5 | - | - |
| | Estearico | C18: 0 | 6,68 | 7,0 - 26,5 | 11,7 - 24,0 | 3,5 -6,0 | 4 |
| | Araquídico | C20: 0 | 0,16 | 0,9 | 0,2 - 0,3 | < 1,0 | 1,1 |
| Insaturados | Miristoleico | C14: 1 | - | 8,0 - 2,5 | 0 - 0,1 | - | - |
| | Palmitoleico | C16: 1 | 3,57 | 2,3 - 9,1 | 1,8 - 3,3 | <0,6 | 0,2 |
| | Margaroleico | C17: 1 | 0,27 | - | - | - | - |
| | Oleico | C18: 1 | 37,14 | 30,4 - 48,0 | 29,7 - 45,3 | 36-44 | 22 |
| | Eicosenoico | C20:1 | 0,27 | 0,3 - 1,7 | 0,8 - 1,3 | - | - |
| Poliinsaturados | Linoleico | C18: 2 | 20,67 | 0,6 - 1,8 | 8,1 - 12,6 | 9-12 | 54 |
| | a-licolénico | C18: 3- | 1,48 | 0,3 - 0,7 | 0,7 - 1,2 | - | - |

*SIGRA S.A Horno ** SEFFATI, Kambiz, et. al *RÍOS, Luis Alberto, et al

*** HERVÉ, Jérôme **** SANTOS, Eloinice

- Dato no determinado

Fuente: elaboración propia

Al comparar las composiciones de los ácidos grasos presentes en los demás aceites con la grasa de pollo, se observa que a diferencia de las grasas animales, los aceites vegetales no tienen presente los ácidos C17:0 y C20:1, así sea en pequeñas cantidades.

Al igual que el aceite de soya, el aceite de pollo, a diferencia de las demás grasas animales, tiene un alto porcentaje de ácido linoleico (>20%). Según Moreira los aceites con alta concentración de ácido linoleico (C18:1) son los más adecuados para satisfacer las dos propiedades más relevantes en la calidad del biodiésel: estabilidad oxidativa y propiedades de baja temperatura²¹⁴.

Como se evidenció en la **tabla 24**, la búsqueda del perfil ideal de ácidos grasos de los aceites empleados en la producción de biodiésel, aún está en desarrollo y esto se evidencia en la diferencia de cantidad de ácidos grasos saturados e insaturados presente en los aceites más usados para obtener biodiésel, como el aceite de palma y el aceite de soya, ya que este último presenta una menor

²¹⁴SANTOS, Eloinice. Op Cit., p.56

cantidad de ácidos grasos saturados, al compararlo con el aceite de palma, cuyo porcentaje puede llegar al 50%.

Aunque la extracción del aceite de pollo se llevó a cabo con el propósito de validar su potencial como materia prima en la producción de biodiésel con base al perfil de ácidos grasos libres del aceite obtenido, también se determinó el rendimiento de extracción por ambos métodos (por horno y por estufa), teniendo en cuenta la cantidad de residuos grasos de pollo y el aceite extraído de estos residuos.

El rendimiento de extracción se determinó empleando la **ecuación 1**, tomando como densidad el valor reportado por Galeano y Guapacha (0,9342 g/mL)²¹⁵, ya que estos autores reportan un perfil de ácidos grasos similar al perfil del aceite obtenido en la experimentación, como se evidenció en la **tabla 23**.

Ecuación 1. Rendimiento de la extracción

$$\%Extracción = \frac{\textit{masa del aceite extraido}}{\textit{masa del residuo sólido inicial}} * 100$$

Fuente: GALEANO, Cristhian y GUAPACHA, Esteban. Aprovechamiento y caracterización de los residuos grasos del pollo para la producción de un biocombustible (biodiesel). [En línea]. Trabajo de grado para optar el título de Químico Industrial. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira Risaralda. 2011. Consultado [15 de junio del 2020]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/0fb1/64d8c7a0f659c63d8a53884b4beaf80a00e7.pdf>

Los resultados de la cantidad de aceite extraído por ambos métodos se presentan en la **tabla 25**. Los cálculos pueden ser consultados en el anexo C.

²¹⁵ GALEANO y GUAPACHA. Op Cit., p. 72.

Tabla 25. Rendimiento de la extracción del aceite de los residuos grasos de pollo

| Método de extracción | Residuos grasos de pollo (g) | Aceite extraído (mL) | Rendimiento (%) |
|-----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| Por horno | 1500 | 1000 | 62% |
| Por estufa | 850 | 550 | 60% |

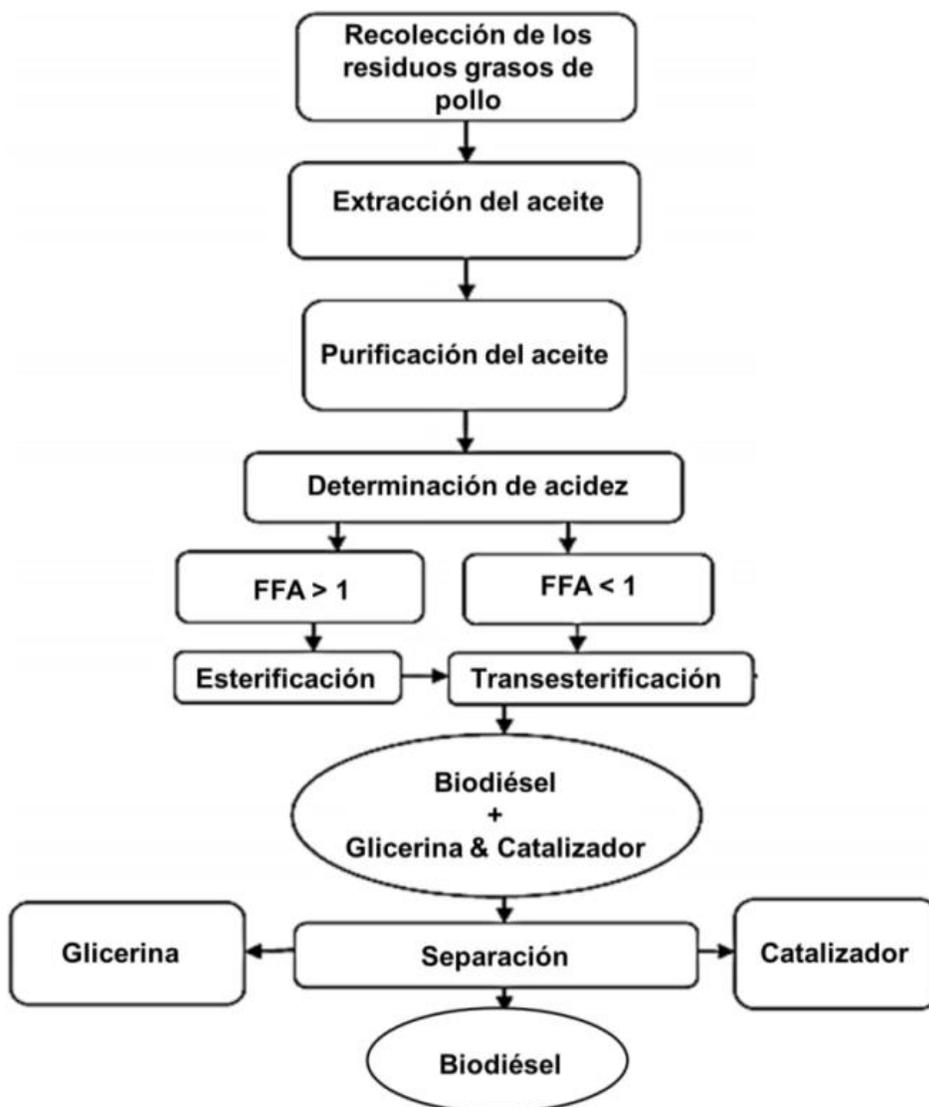
Fuente: elaboración propia

La variación del rendimiento no es significativo del método de extracción, por tal motivo se sugiere elegir entre los dos métodos de extracción por su eficiencia en tiempo y costos. Aunque la extracción sólo se llevó a cabo una vez, se recomienda realizarla mínimo por tres veces, para disminuir el error en la experimentación.

Hasta aquí, a lo largo del trabajo, se presentó un recopilado de las variables y los resultados presentados por diferentes autores que han producido biodiésel a partir de grasa de pollo. Sin duda alguna esta materia prima, además de ser un residuo, cuya producción está aumentando anualmente, presenta características semejantes y sobretodo competitivas con los aceites más usados en la producción biodiésel, como son el aceite de palma y el aceite de soya.

Además gracias a la gran cantidad de material teórico y experimentos reportados, se puede abordar un proyecto experimental debido a la gran y buena cantidad de información sobre biodiésel partiendo de residuos grasos de pollo. Con base a lo recopilado a lo largo de este capítulo, en el **diagrama 6** se ilustra el paso a paso para producir biodiésel a partir de residuos grasos de pollo.

Diagrama 6. Diagrama para la obtención de biodiésel partiendo de residuos grasos de pollo



Fuente: elaboración propia

En este no se incluye las variables de control ni condiciones de operación, ya que estas, al igual que en el método específico de extracción del aceite, varían o no están presentes en los trabajos reportados por los autores mencionados a lo largo de este capítulo, que obtuvieron biodiésel a partir de la misma materia prima (grasa de pollo).

3. PROPUESTA DE PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A ESCALA PILOTO

Con base a la revisión bibliográfica y la información recopilada en el capítulo anterior, se propone escalar a nivel piloto el proceso de producción de biodiésel partiendo de residuos grasos de pollo y así determinar los equipos necesarios para desarrollarlo. El proceso propuesto se presentará en un diagrama de bloques, seguido de las condiciones de operación por proceso unitario y la selección de los equipos necesarios, junto a las especificaciones técnicas de los mismos, para finalmente, plasmar el proceso a escala piloto, en un diagrama PFD.

El proceso de obtención de biodiésel se llevará a cabo por lotes, al ser el más empleado en las plantas de producción de biodiesel de menor capacidad²¹⁶

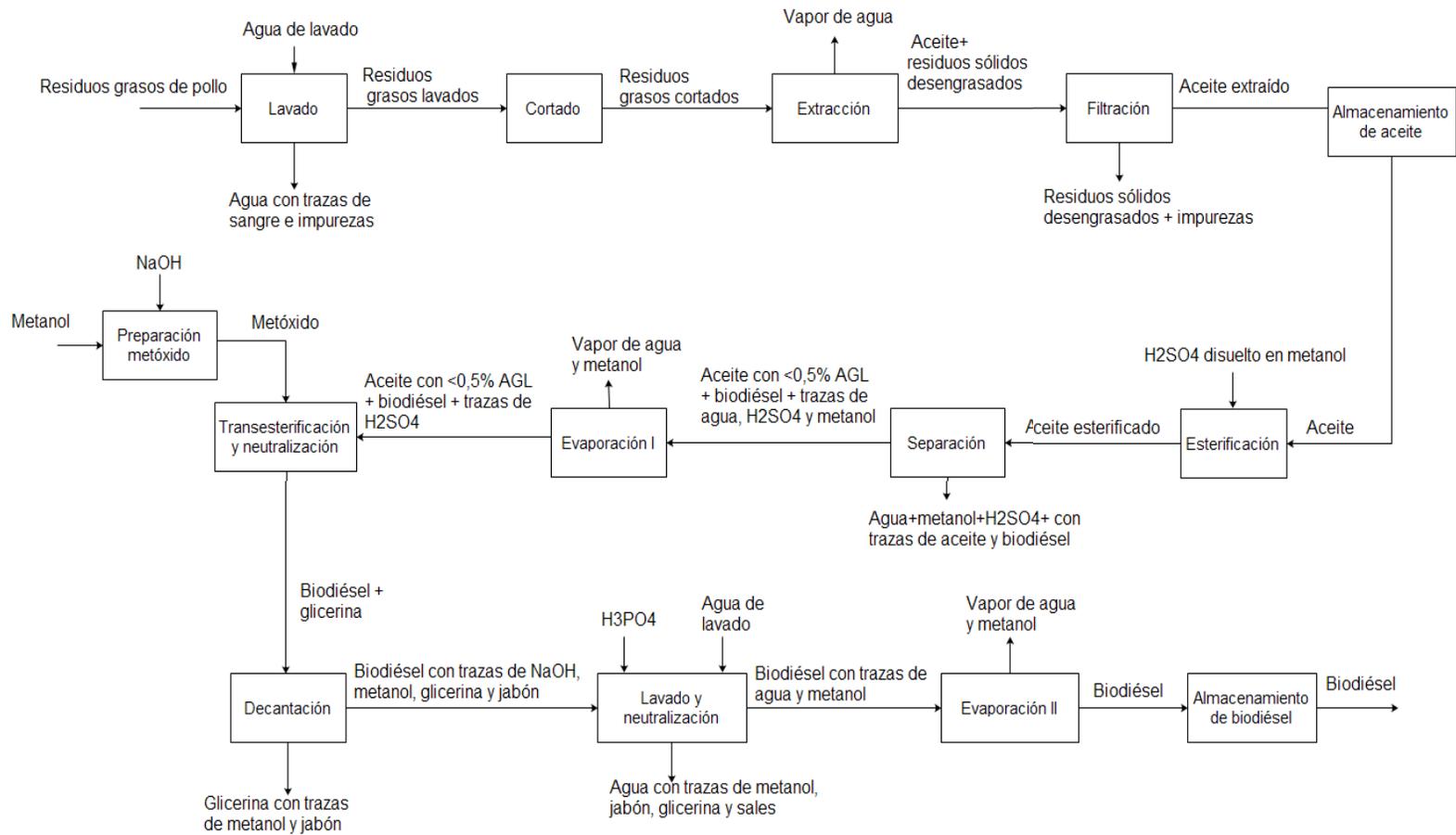
3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

En el **diagrama 7** se presenta el esquema propuesto para la producción de biodiésel a partir de estos residuos grasos de pollo, seguido de su respectiva descripción. Para esto el proceso se dividirá en tres etapas:

- Etapa I. Extracción del aceite
- Etapa II. Obtención del biodiésel
- Etapa III. Purificación del biodiésel

²¹⁶ RAMIREZ, Carlos. Ingeniería básica de una planta piloto de producción de 13 kg/h de biodiesel a partir de microalgas y mediante transesterificación con bioetanol supercrítico. Trabajo de grado ingeniería química y ambiental. Universidad de Sevilla. Sevilla. 2011. Consultado [13 de julio del 2020]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/20268/fichero/PFC.pdf>

Diagrama 7. Diagrama bloques del proceso de producción de biodiésel partiendo de residuos grasos de pollo



Fuente: elaboración propia

Ya identificadas las tres etapas en el diagrama presentado anteriormente, a continuación se describe detalladamente el proceso.

3.1.1 Etapa I. Extracción del aceite. El proceso comienza con la limpieza de los residuos grasos de pollo, que tras llegar a la planta ya separados manualmente de huesos y otras partes del ave, son lavados con agua a temperatura ambiente (20 °C) para evitar su degradación y eliminar trazas de sangre, suciedad e impurezas presentes.

Posteriormente, el tamaño de los residuos se deberá reducir mediante cortado a un tamaño máximo a 50mm²¹⁷, para aumentar el área de contacto y así lograr una mejor extracción del aceite presente en la grasa sólida, mediante calentamiento por fusión en seco, llevado a cabo en la etapa de extracción. Ya obtenido el aceite, este es separado de los residuos grasos sólidos desengrasados y de algunas impurezas, mediante filtración, para luego ser llevado al tanque de almacenamiento de aceite.

Considerando la importancia de reserva del aceite extraído, se tuvo en cuenta su almacenamiento, evitando detener la producción por una falla en el suministro de la materia prima (residuos grasos de pollo) y no contar con suficiente inventario, de esta manera, se podría llevar a cabo, sin problema, dos lotes de extracción de aceite al día mientras se realiza la etapa posterior (esterificación).

3.1.2 Etapa II. Obtención del biodiésel. Como se mencionó en el capítulo 2, el aceite de pollo al tener un alto contenido de ácidos grasos libres (AGL) debe recibir un pre tratamiento antes de entrar a la transesterificación, para evitar reacciones secundarias y bajos rendimientos en el proceso, es decir su contenido de ácidos grasos libres debe reducirse al menos al 1%, mediante esterificación ácida, según la ENTREVISTA con el Ingeniero Químico Luis Miguel Ramírez^(*) y lo mencionado por autores Alptekin y Canakci²¹⁸.

Primero, el aceite es esterificado con ácido sulfúrico (H₂SO₄) y metanol, produciéndose dos fases, una rica en agua, metanol y H₂SO₄ (con trazas de biodiésel y aceite que no reaccionó) y, otra rica en el aceite que no reaccionó y metilésteres (biodiésel), también con trazas de H₂SO₄, metanol y agua. Estas

(*) RAMÍREZ, Luis Miguel, Investigador en Bio D S.A, Bogotá, Colombia. Observación inédita, 08 de agosto del 2020

²¹⁷ AINA. Mejores técnicas para la industria de aprovechamiento de subproductos de origen animal. [En línea]. [Consultado 14, agosto, 2020]. Disponible en: <http://www.prtr-es.es/data/images/La%20industria%20de%20subproductos%20de%20origen%20animal-9EF41AF258214363.pdf>

²¹⁸ ALPTEKIN, Op. Cit., p1.

corrientes se pueden separar eliminando el agua como mezcla de agua y metanol mediante evaporización, decantación o centrifugación²¹⁹

Para mejorar el rendimiento del proceso y evitar reacciones secundarias en la transesterificación, el contenido de agua presente en el aceite ya esterificado se elimina mediante evaporación, logrando reducir su humedad un 0,1 - 0,3%²²⁰.

Antes de comenzar la reacción de transesterificación, las trazas de H₂SO₄ deben neutralizarse, esto se lleva a cabo en el mismo proceso de transesterificación mediante una primera adición de metóxido (NaOH disuelto en metanol), preparado en el tanque de metóxido, esto con el fin de facilitar el contacto entre los componentes y mejorar la solubilidad de los mismos antes de iniciar la reacción²²¹. Los neutralizantes se emplean para remover el catalizador básico o ácido presente en una sustancia, de esta manera para los catalizadores básicos, se utilizan ácidos, y visa-versa²²².

Posteriormente, para llevar a cabo la transesterificación, en el mismo reactor se debe añadir por segunda vez la cantidad requerida de metóxido. Terminada la reacción, se producen dos fases, una rica en glicerina y otra rica en biodiésel²²³, ambas con trazas de catalizador (NaOH) y metanol.

²¹⁹ HERVÉ, Jérôme. Diseño conceptual de una planta de biodiesel. Título para optar a Ingeniero Civil Mecánico. Universidad de Chile. Santiago de Chile. 2007. Consultado [20 de agosto del 2020]. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/104538/Diseno-conceptual-de-una-planta-de-biodiesel.pdf?sequence=3>

²²⁰ BULLA, Edwin. Diseño del proceso de producción del biodiesel a partir de aceites de fritura. Trabajo de grado para optar a Magister en Ingeniería – Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2014. Consultado [30 de abril del 2020]. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/45935/1/02300238.2014.pdf>

²²¹ ARBELAEZ, María y RIVERA, Marcela. Diseño conceptual de un proceso para la obtención de biodiesel a partir de algunos aceites vegetales colombianos. Título para optar a ingenieras de procesos. Universidad EAFIT. Medellín. 2007. Consultado [18 de Agosto del 2020]. Disponible en: <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/365>

²²² HERVÉ. Op. Cit., p.30

²²³ BASTO, Pilar. Simulación y evaluación económica de proceso de producción de biodiesel a partir del aceite de palma, empleando reactores de película líquida-líquida operados en contracorriente y co-corriente. [En línea]. Título de Magister en Ingeniería – Ingeniería Química. Universidad Nacional de Colombia. 2016. Consultado [20 de agosto del 2020]. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/55612/7/53108542.2016.pdf>

3.1.3 Etapa III. Purificación del biodiésel. Una vez la reacción de transesterificación se ha completado, las dos fases producidas se separan mediante decantación. Este proceso de separación se basa en la baja solubilidad de las dos fases de glicerina y biodiésel producidas, aunque su densidad (1.050kg/m^3 y 880kg/m^3 , respectivamente), puede variar debido a la presencia de trazas de metanol, agua y catalizador, esta diferencia de densidades es suficiente para separar las dos fases por simple gravedad.²²⁴

La corriente rica en glicerina se lavará con agua y ácido fosfórico (H_3PO_4) para neutralizar el catalizador básico (NaOH) y remover las trazas de metanol, jabón y glicerina presentes en el biodiésel²²⁵. Aunque el jabón y metanol remanente en este biocombustible debería ser removido antes del lavado para evitar la presencia de metanol en el agua residual, algunos procesos remueven este alcohol con agua por razones económicas²²⁶.

Antes de almacenar el biodiésel, libre de jabón y glicerina, debe pasar por un proceso de evaporación para eliminar las trazas de agua y metanol presentes en este biocombustible.

Si bien, para mejorar la economía del proceso de producción de biodiésel y ahorrar en costos de insumos, es recomendable remover el exceso de metanol mediante recirculación²²⁷ y purificar la glicerina para su venta, aunque su valor como co-producto no es tan fácil de evaluar²²⁸, en el proceso propuesto no se incluyeron estas etapas, sólo se focalizó en la producción de biodiésel para identificar la viabilidad técnica del proceso y determinar su rendimiento.

3.2 CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL PROCESO

Como se observó en el capítulo 2, la producción de biodiésel a partir de grasa de pollo y, mediante transesterificación básica, ha sido poco estudiada, en comparación con otras materias primas como el aceite de palma y el aceite de soya, los aceites más empleados a nivel industrial para obtener biodiésel²²⁹.

Aunque todos los referentes mencionados y recopilados en el capítulo anterior que obtuvieron este biocombustible a partir de grasa de pollo, sólo llevaron a cabo el proceso a escala laboratorio, para desarrollar la propuesta del proceso para producir biodiésel partiendo de residuos grasos de pollo a escala piloto, se tendrán en cuenta autores como Hervé, Bulla, Arbeláez y Rivera y, Bastos, que produjeron

²²⁴ HERVÉ. Op Cit. p.41

²²⁵ BULLA. Op. Cit., p. 72

²²⁶ *Ibid.*, p. 42

²²⁷ *Ibid.*, p. 55

²²⁸ HERVÉ. Op. Cit., p. 45

²²⁹ OCDE/FAO (2019), Op. Cit., p.223

biodiésel mediante transesterificación básica, a escala piloto, pero empleando otras materias primas diferentes a la grasa de pollo.

Para llevar a cabo la selección de equipos a escala piloto con base al proceso propuesto presentado en el **diagrama 7**, al comienzo del capítulo, primero se deben establecer las condiciones de operación por proceso unitario y, posteriormente mediante un balance de materia determinar la capacidad de los equipos necesarios. Para esto, en la **tabla 26** se presenta sólo los autores que obtuvieron biodiésel a partir de grasa de pollo, mediante transesterificación básica (mencionados en el capítulo 2) y se resalta si estos autores llevaron a cabo las mismas operaciones unitarias propuestas y si reportaron o no, las condiciones de operación y resultados cuantitativos por proceso unitario, siendo el proyecto de Martínez, Ponce y Reyes, que lleva por título “Diseño de proceso químico a escala de laboratorio para la producción de biodiésel a partir de grasa de pollo”²³⁰, el que presenta la mayor cantidad de los datos mencionados.

²³⁰ MARTINEZ, Gilma. PONCE, Roberto y REYES, Laura. Diseño del proceso químico a escala de laboratorio para la producción de biodiesel a partir de grasa de pollo. [En línea]. Trabajo de grado para optar a Ingeniero Químico. Universidad de Salvador. El Salvador. 2007. Consultado [19 de agosto del 2020]. Disponible en: http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/2042/1/Dise%C3%B1o_del_proceso_qu%C3%ADmico_a_escalade_laboratorio_para_la_producci%C3%B3n_de_Biodiesel_a_partir_de_grasa_de_pollo.pdf

Tabla 26. Operaciones unitarias para obtener biodiésel a partir de grasa de pollo mediante transesterificación básica

| Proceso unitario | | Autor (año de publicación) | | MARTINEZ, Gilma. PONCE, Roberto y REYES, Laura. (2007) | ALPTEKIN, Ertan y CANAKCI, Mustafa. (2010) | GALEANO, Cristhian y GUAPACHA, Esteban (2011) | MONTENEGRO, Manuel; SIERRA, Fabio y GUERRERO, Carlos (2012) | TEJADA TOVAR, Candelaria et al. (2012) | ABRAHAM, John, et al. (2015) | NUHU, S.K. y KOVO, A.S (2015) | LIN, Chia-Wei y TSAI, Shuo-Wen. (2015) | MERA, José, et al. (2018) |
|--------------------------------------|-----|----------------------------|---|--|--|---|---|--|------------------------------|-------------------------------|--|---------------------------|
| | | C.O | R | | | | | | | | | |
| Lavado | C.O | | | | | | | | | | | |
| | R | | | | | | | | | | | |
| Cortado | C.O | | | | | | | | | | | |
| | R | | | | | | | | | | | |
| Extracción | C.O | | | + | | | | | + | | + | + |
| | R | | | | | | | + | | | | |
| Filtración | C.O | | | | | | | | | | | |
| | R | | | | | | | | | | | |
| Esterificación | C.O | + | + | | | | | | + | + | | |
| | R | | | | | | | | | | | |
| Procesos previos a la esterificación | C.O | + | | | | | | | | | | |
| | R | | | | | | | | | | | |
| Transesterificación | C.O | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| | R | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Separación | C.O | + | | + | + | + | + | | | | + | + |
| | R | + | | | | | | | + | | | |
| Lavado | C.O | | | + | + | + | + | | | + | + | + |
| | R | + | | | | | | | | | | |
| Evaporación | C.O | | | | | + | + | | | + | | + |
| | R | | | | | | | | | | | |
| Total (+) | | 7 | 3 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 6 | |

C.O: Condiciones de operación R: Resultados cualitativos o cuantitativos. Celdas resaltadas: Proceso unitario llevado a cabo por los autores. Celdas vacías: Proceso unitario no llevado a cabo por los autores. + Reportes cualitativos presentado por los autores

Fuente: elaboración propia

Debido a que Martínez, Ponce y Reyes no presentan todas las condiciones de operación ni los resultados cuantitativos por procesos unitarios, en algunos equipos se adaptarán algunas condiciones de operación reportadas por los autores mencionados en la tabla anterior, además estas condiciones se validarán con las presentadas por autores como Hervé, Bulla, Arbeláez, Rivera y Bastos, que produjeron biodiésel mediante transesterificación básica, a escala piloto, pero empleando otras materias primas diferentes a la grasa de pollo y AINIA (Instituto tecnológico agropecuario) quién estableció las mejores técnicas para aprovechar los subproductos de origen animal. En la **tabla 27**, **tabla 28** y **tabla 29** se presentan las condiciones de operación del proceso propuesto por etapas a escala piloto.

Tabla 27. Condiciones de operación en la etapa I. Extracción del aceite

| Proceso unitario | Condiciones de operación | Referente |
|--------------------------|-------------------------------------|--|
| Lavado | No reportadas | - |
| Cortado | No reportadas | - |
| Extracción | Tiempo: 1,5 h Temperatura: 75 °C | TEJADA TOVAR, Candelaria et al. (2012) |
| Filtración | No reportadas | - |
| Almacenamiento de aceite | Temperatura: 50 °C | MERA, José, et al. (2018) |

Fuente: elaboración propia

Aunque en el proceso de lavado y cortado, no se reporta información respecto a las condiciones de operación, se supone como temperatura de agua de lavado, la temperatura ambiente promedio de la ciudad de Bogotá (20°C) y un tiempo de lavado de 5 minutos.

De igual manera, para la reducción del tamaño de los residuos grasos de pollo, se recomienda emplear un método de corte hasta un tamaño máximo de 50 mm para

favorecer el área de contacto durante la extracción, según lo sugerido por AINIA²³¹.

Si bien, las condiciones de operación para la extracción, reportadas por Tejada, es a nivel laboratorio, al escalar el proceso a nivel piloto, se mantuvo estas mismas condiciones ya que si se modifica la temperatura y tiempo, los rendimientos de la extracción cambiarían, así como la calidad del aceite extraído²³². Sin embargo, se recomienda tener presente dichas condiciones en la práctica, al escalar el proceso.

La filtración se sugiere realizarla al vacío, considerando la alta viscosidad del aceite y empleando un tamiz de un tamaño de poro menor a 1 milímetro para eliminar la mayor parte de impurezas presentes en el aceite.

²³¹ AINA. Op. Cit., p.28.

²³² RICCI, Op. Cit., p.1.

Tabla 28. Condiciones de operación en la etapa II. Obtención del biodiésel

| Proceso | Condiciones de operación | Referente |
|--------------------------------------|---|--|
| Esterificación | Velocidad de agitación: 748,6 rpm Temperatura de reacción : 45 °C Tiempo de reacción: 1,5 h Tiempo de agitación:1 h Presión: 1atm | MARTINEZ, Gilma. PONCE, Roberto y REYES, Laura. (2007) |
| Separación | Tiempo: 8 h | MARTINEZ, Gilma. PONCE, Roberto y REYES, Laura. (2007) |
| Evaporación I | Temperatura: 105 °C Tiempo: 15 min | MERA, José, et al. (2018) |
| Preparación de metóxido | Tiempo de mezclado: 1,5 h Temperatura: 55 °C | MARTINEZ, Gilma. PONCE, Roberto y REYES, Laura. (2007)) |
| Transesterificación y neutralización | Velocidad de agitación: 644,4 rpm Temperatura de reacción: 55 °C Tiempo de reacción: 1,5 h Presión: 1atm | MARTINEZ, Gilma. PONCE, Roberto y REYES, Laura. (2007) |

Fuente: elaboración propia

Aunque el tiempo de separación, reportado por Martínez, Ponce y Reyes, de las dos fases producidas durante la esterificación, es un tiempo amplio debido al tipo de separación empleado por estos autores (decantación). En esta propuesta dicho tiempo de separación se reducirá mediante evaporación, al ser uno de los procesos de separación utilizados para esta mezcla, según lo mencionados por Hervé²³³. Para estimar el tiempo de separación se tendrá en cuenta la cantidad de agua, metanol y aceite producido, con base al diagrama ternario de los tres componentes, presentado al final de este capítulo.

²³³ HERVÉ. Op. Cit., p. 38

En cuanto a los demás condiciones de operación sobretodo en la esterificación y la transesterificación, aunque Martínez, Ponce y Reyes establecieron la velocidad de agitación, el tiempo y temperatura de reacción a nivel laboratorio, si éstas condiciones se modifican al escalar el proceso, variaría el rendimiento en cada reacción. Sin embargo, se recomienda tener presente y validar dichas condiciones en la práctica, al escalar el proceso, sobretodo la velocidad de agitación, ya que en esta se debe tener presente el tipo de agitador. Autores como Villaseñor Neira, quién produjo biodiésel a partir de grasa animal a escala piloto, sugiere emplear agitadores de paletas a 700rpm²³⁴, pero a nivel industrial este tipo de paletas giran a una velocidad entre 20 y 150 rpm²³⁵.

Tabla 29. Condiciones de operación en la etapa II. Purificación del biodiésel

| Proceso | Condiciones de operación | Referente |
|-----------------------------|--|---|
| Decantación | Tiempo :1h | MARTINEZ, Gilma. PONCE, Roberto y REYES, Laura. (2007) |
| Lavado y neutralización | Temperatura del agua de lavado: 35°C Tiempo de lavado: No reportado | MARTINEZ, Gilma. PONCE, Roberto y REYES, Laura. (2007) |
| Evaporación II | Temperatura: 105 °C Tiempo: 15min | MERA, José, et al. (2018) |
| Almacenamiento de biodiésel | Temperatura : 45°C | MARTINEZ, Gilma. PONCE, Roberto y REYES, Laura. (2007) |

Fuente: elaboración propia

²³⁴GUTIÉRREZ MENDOZA, Mary Triny y PÉREZ MONTANO, Néstor Antonio. Diseño de una planta piloto de producción de biodiesel. [en línea]. Proyecto para optar al título de Ingeniero Mecánico. Universidad nacional de ingeniería. Managua: 2011 [Consultado 01, octubre, 2020] Disponible en: [.http://ribuni.uni.edu.ni/id/eprint/1030/contents](http://ribuni.uni.edu.ni/id/eprint/1030/contents)

²³⁵VILLASEÑOR NEIRA, Hugo Cristián. Diseño conceptual de planta piloto para producción de biodiesel a partir de grasas animales. [en línea]. Proyecto para optar al título de Ingeniero Civil Químico. Pontificia universidad católica de Valparaíso. Valparaíso: 2010. [Consultado 01, octubre, 2020] Disponible en: http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-3500/UCG3912_01.pdf

Martínez presenta un tiempo de decantación bajo (1 hora), respecto a lo reportado por otros autores, como Montenegro²³⁶ y Ayala²³⁷, cuyo tiempo de decantación, es de 12 y 8 horas, respectivamente. Para validar el tiempo de separación determinado por Martínez, se tendrá en cuenta la cantidad de biodiésel, glicerina y metanol producido, con base al diagrama ternario de los tres componentes, presentado al final del capítulo.

Aunque el tiempo de lavado del biodiésel no está reportado, este depende del tipo de lavado empleado²³⁸.

3.3 BALANCE DE MASA DEL PROCESO PROPUESTO

Para determinar la cantidad de materia prima a procesar en la planta piloto de producción de biodiésel, junto a los equipos y las cantidades de reactivos necesarios, se tuvo en cuenta el estudio llevado a cabo por Pallares en la planta de beneficio de Mac Pollo (mencionado en el capítulo 1) y el aumento constante del consumo de pollo en Colombia. Por tales motivos, en la planta piloto de producción de biodiésel se procesará 400 kg/día de residuos grasos de pollo. Debido a los pocos datos numéricos por proceso unitario, reportados por Martínez y los demás autores mencionados en la tabla, se harán algunas suposiciones y/o consideraciones para desarrollar el balance de materia.

3.3.1 Balance global del proceso. El balance global del proceso se presenta en el **diagrama 8**, donde se evidencian las corrientes de entrada y salida del proceso propuesto.

Diagrama 8. Balance global del proceso



Fuente: elaboración propia

²³⁶ MONTENEGRO, SIERRA y GUERRERO. Op. Cit., p. 68

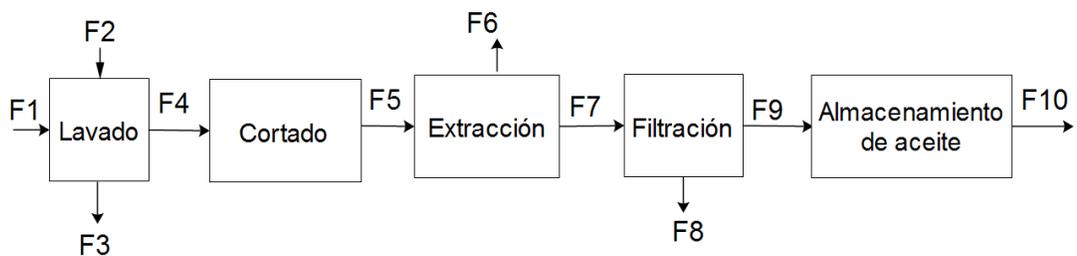
²³⁷ MERA, José, et al. Caracterización fisicoquímica de biodiésel derivado de grasa de pollo como alternativa de producción limpia en la sabana de Túquerres – Nariño. SENA. 2018. Nariño. Consultado [20 de mayo del 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/332742341_Caracterizacion_fisicoquimica_de_biodiesel_derivado_de_grasa_de_pollo_como_alternativa_de_produccion_limpia_en_la_Sabana_de_Tuqueres-Narino

²³⁸ HERVÉ. Op. cit., p.43

De igual manera se presenta el balance por proceso y operación unitaria, de las etapas mencionadas al inicio del capítulo. Todos los flujos másicos se dan en kg/día.

3.3.2 Balance de masa de etapa I. En esta primera etapa, además de acondicionar la materia prima mediante su lavado y corte, se lleva cabo la extracción del aceite de los residuos grasos de pollo. En el **diagrama 9** se muestran los procesos presentes en la etapa I, seguido de las corrientes implícitas, descritas en la **tabla 30**.

Diagrama 9. Diagrama de bloques etapa I



Fuente: elaboración propia

Tabla 30. Identificación de corrientes en etapa I

| Corriente | Nombre de la corriente |
|-----------|--|
| F1 | Residuos grasos de pollo |
| F2 | Agua de lavado |
| F3 | Agua con trazas de sangra e impurezas |
| F4 | Residuos grasos lavados |
| F5 | Residuos grasos cortados |
| F6 | Vapor de agua |
| F7 | Aceite + residuos sólidos desengrasados |
| F8 | Residuos sólidos desengrasados + impurezas |
| F9 | Aceite extraído |
| F10 | Aceite |

Fuente: elaboración propia

El proceso comienza con el lavado de los residuos grasos de pollo. Seffati presentó una relación de agua de lavado y grasa sólida de 5:3 p/p²³⁹

Aunque Martínez, Ponce y Reyes presentaron el rendimiento de la extracción (69,24%)²⁴⁰, no reportaron todas las condiciones de operación, por tal motivo se tomó como base el rendimiento de extracción reportado por Tejada (70,5%)²⁴¹, ya que éste presentó las condiciones de operación para el mismo tipo de extracción (fusión en seco).

3.3.2.1 Suposiciones y/o consideraciones de la etapa I. El balance de masa de la etapa I se lleva a cabo bajo las siguientes suposiciones y/o consideraciones:

- En la corriente F4 no se tiene en cuenta las pérdidas de las trazas de sangre o impurezas presentes en la grasa sólida.
- En el proceso de cortado no se considera las pérdidas de aceite en la composición de grasa sólida.
- En la extracción sólo se considera la pérdida de humedad de la grasa sólida. Se tomó como base el porcentaje de humedad reportado por Galeano, cuyo valor es del 14,29% p/p de la grasa sólida²⁴². Además en este mismo proceso, se considera una remoción de agua del 100%

El balance de masa de la etapa I se presenta en la **ecuación 2**, seguido del **diagrama 10** donde se ilustran las cantidades de cada corriente. Los cálculos correspondientes pueden ser consultados en el anexo E.

Ecuación 2. Balance de masa de la etapa I

$$F1 + F2 = F3 + F6 + F8 + F10$$

Fuente: elaboración propia

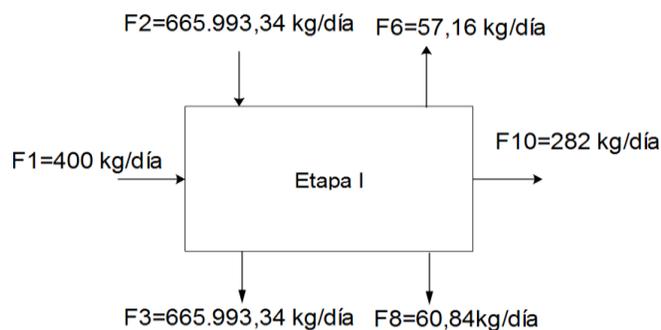
²³⁹ SEFFATI, Kambiz, et. al. Enhanced biodiesel production from chicken fat using CaO/CuFe2O4 nanocatalyst and its combination with diesel to improve fuel properties. Fuel. 2019, 235. 1238-1244 [Consultado 20, mayo, 2020] <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.118>

²⁴⁰ MARTINEZ, PONCE y REYES. Op. Cit., p. 42

²⁴¹ TEJADA TOVAR, Candelaria, et al. Obtención de biodiesel a partir de diferentes tipos de grasa residual de origen animal. [en línea]. Proyecto académico sin fines de lucro. Universidad de Caldas. Manizales: 2013 [Consultado 03 de marzo del 2020]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3217/321728584002.pdf>

²⁴² GALEANO y GUAPACHA, Op. Cit., p.52

Diagrama 10. Diagrama de balance de masa de la etapa I



Fuente: elaboración propia

La cantidad de aceite extraído se calculó con base a la **ecuación 1**, de rendimiento de la extracción de aceite, presentada en el capítulo 2.

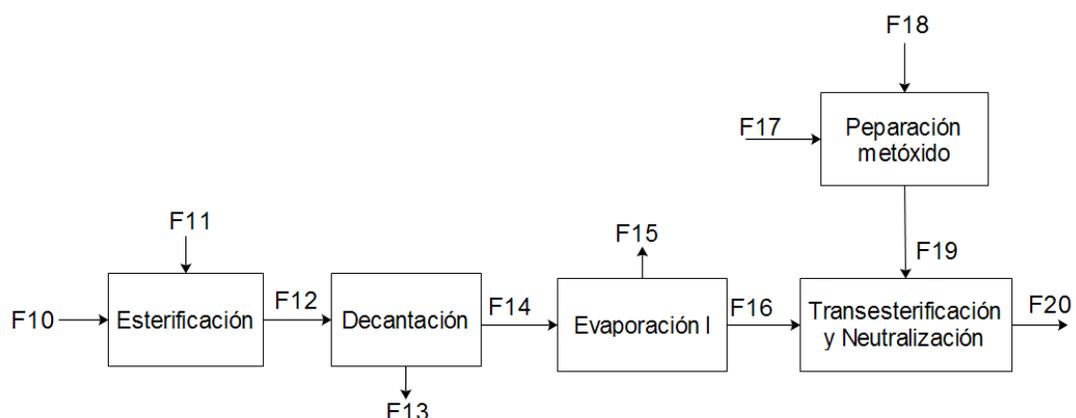
En la primera etapa se obtuvo 282 kg/día de aceite de pollo y 60,84 kg/día de residuos sólidos desengrasados e impurezas. Aunque estos residuos ya desengrasados no se van tratar, autores como Galeano y Guapacha²⁴³ y Abraham²⁴⁴, sugieren usar estos residuos en la producción de harina de comida de animal, debido a su alto contenido de proteína.

3.3.3 Balance de masa de etapa II. Esta etapa es la más importante del proceso, ya que ocurre la transformación del aceite de pollo a biodiésel, bajo condiciones específicas de operación en la reacción de esterificación y transesterificación. En el **diagrama 11** se muestra los procesos presentes en la etapa II, seguido de las corrientes implícitas, descritas en la **tabla 31**.

²⁴³ GALEANO y GUAPACHA, Op. Cit., p. 54

²⁴⁴ ABRAHAM, Op. Cit., p.1190

Diagrama 11. Diagrama de bloques etapa II.



Fuente: elaboración propia

Tabla 31. Identificación de corrientes en etapa II

| Corriente | Nombre de la corriente |
|------------|--|
| F10 | Aceite |
| F11 | H ₂ SO ₄ disuelto en metanol |
| F12 | Aceite esterificado |
| F13 | Agua+ metanol + H ₂ SO ₄ con trazas de aceite y biodiésel |
| F14 | Aceite con <0,5 % AGL + biodiésel con trazas de agua, H ₂ SO ₄ y metanol |
| F15 | Vapor de agua y metanol |
| F16 | Aceite con <0,5 % AGL + biodiésel |
| F17 | Metanol al 96% |
| F18 | NaOH 0,1N |
| F19 | Metóxido |
| F20 | Biodiésel + glicerina |

Fuente: elaboración propia

Aunque Martínez, Ponce y Reyes añaden al aceite primero el metanol y después de cinco minutos el ácido sulfúrico (H₂SO₄), en el proceso propuesto esta mezcla se añade en una sola corriente (F11), descrita como ácido sulfúrico disuelto en metanol, con el objetivo de facilitar el contacto entre los componentes y mejorar la solubilidad de los mismos, antes de iniciar la reacción de esterificación.

Con base a los datos reportados por Martínez, Ponce y Reyes, se determinaron las concentraciones de los reactivos empleados en la esterificación y transesterificación. Los respectivos cálculos pueden ser consultados en el anexo D.

En la esterificación estos autores emplearon una concentración de H₂SO₄ al 96% y metanol, respecto al aceite, del 0,75% v/v y 8% v/v, respectivamente. En cuanto a la cantidad de H₂SO₄ disuelto en metanol, la concentración empleada fue de 9,38% v/v²⁴⁵.

Según lo recopilado por autores como Pisarello, las concentración más empleada de ácido sulfúrico respecto al metanol, en la reacción de esterificación, siempre son menores al 1%v/v²⁴⁶

En la transesterificación Martínez, Ponce y Reyes reportan un rendimiento de la reacción del 98,34%²⁴⁷, además, estos autores reportan una concentración de metanol y NaOH, respecto al aceite, de 12%v/v y 0,69 % p/p, respectivamente. En cuanto a la relación molar alcohol:aceite empleada en la misma reacción, fue de 3:1²⁴⁸.

3.3.3.1 Suposiciones y/o consideraciones de la etapa II El balance de masa de la etapa II se lleva a cabo bajo las siguientes suposiciones y/o consideraciones:

- En la esterificación se asume que todo el H₂SO₄ se convierte y disuelve en el metanol, además .se asume una conversión del 95% del reactivo limite (AGL).
- No se considera las pérdidas de aceite en la esterificación ni en la posterior separación.
- En la preparación del metóxido se asume que todo el NaOH se convierte y disuelve en el metanol.

El balance de masa de la etapa II se presenta en la **ecuación 3**, seguido del **diagrama 12**, donde se ilustran las cantidades de cada corriente. Los cálculos correspondientes pueden ser consultados en el anexo E.

Ecuación 3.Balance de masa de la etapa II

$$F_{10} + F_{11} + F_{18} + F_{17} = F_{13} + F_{15} + F_{20}$$

Fuente: elaboración propia

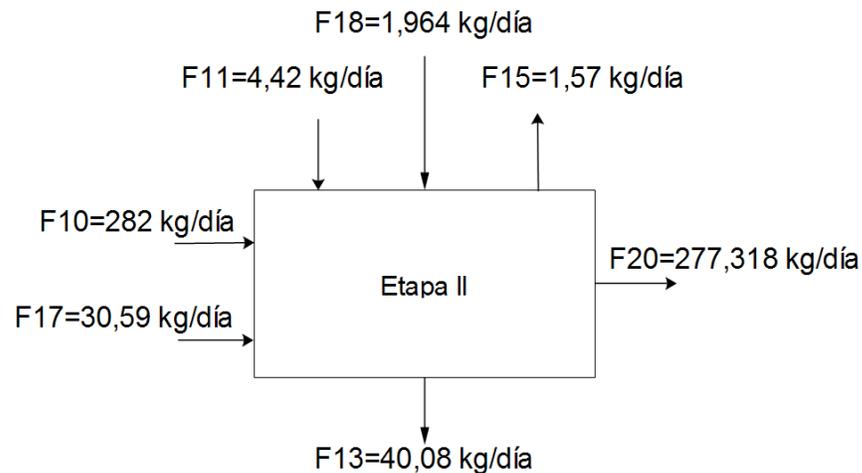
²⁴⁵ MARTINEZ, PONCE y REYES. Op. Cit., p. 64

²⁴⁶ PISARELLO, Op. Cit., p116.

²⁴⁷ MARTINEZ, PONCE y REYES. Op. Cit., p. 169

²⁴⁸ *Ibid.*, p. 65

Diagrama 12. Diagrama de balance de masa de la etapa II



Fuente: elaboración propia

La cantidad de biodiésel producido se calculó con base a la ecuación de rendimiento de la reacción de transesterificación, presentada en la **ecuación 4**.

Ecuación 4. Rendimiento de la transesterificación

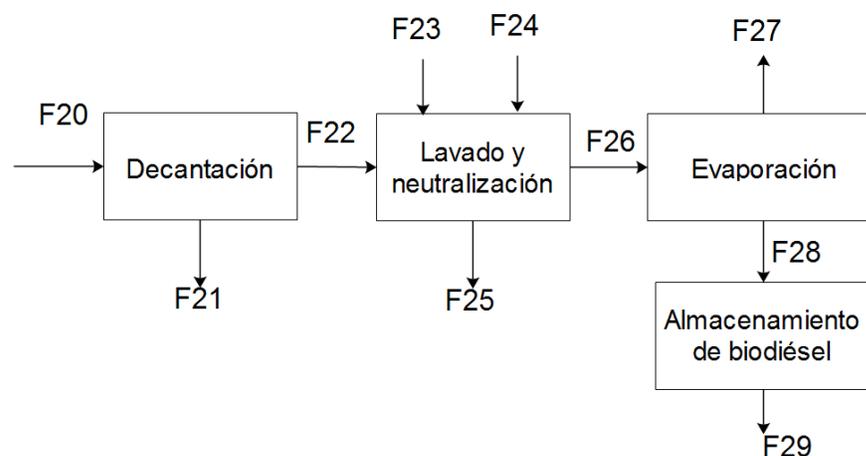
$$\%Rendimiento = \frac{\text{masa del biodiésel producido}}{\text{masa del aceite procesado}} * 100$$

Fuente: MARTINEZ, Gilma. PONCE, Roberto y REYES, Laura. Diseño del proceso químico a escala de laboratorio para la producción de biodiesel a partir de grasa de pollo. [En línea]. Trabajo de grado para optar a Ingeniero Químico. Universidad de Salvador. El Salvador. 2007. Consultado [19 de agosto del 2020]. Disponible en:
http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/2042/1/Dise%C3%B1o_del_proceso_qu%C3%ADmico_a_escalade_laboratorio_para_la_producci%C3%B3n_de_Biodiesel_a_partir_de_grasa_de_pollo.pdf

En la segunda etapa se obtuvo 277,318 kg de una mezcla de biodiésel y glicerina, con trazas de metanol, jabón y catalizador (NaOH).

3.3.4 Balance de masa de etapa III. En esta etapa las trazas de jabón, glicerina, agua, metanol y catalizador presente en el biodiésel es eliminado en su mayoría en el lavado, y posteriormente en la evaporación. En el **diagrama 13** se muestra los procesos presentes en la etapa III, seguido de las corrientes implícitas, descritas en la **tabla 32**.

Diagrama 13.Diagrama de bloques etapa III.



Fuente: elaboración propia

Tabla 32. Identificación de corrientes en etapa III

| Corriente | Nombre de la corriente |
|-----------|--|
| F20 | Biodiésel +glicerina |
| F21 | Biodiésel con trazas de metanol, glicerina y jabón |
| F22 | Glicerina con trazas de metanol y jabón |
| F23 | H ₃ PO ₄ al 10% |
| F24 | Agua de lavado |
| F25 | Agua de lavado con trazas de metanol, jabón, glicerina y sales |
| F26 | Biodiésel con trazas de agua y metanol |
| F27 | Vapor de agua y metanol |
| F28 | Biodiésel |
| F29 | Biodiésel |

Fuente: elaboración propia

Martínez, Ponce y Reyes reportaron una relación aproximada de agua de lavado y biodiésel producido 1:1 v/v y una concentración de ácido fosfórico respecto al aceite alimentado del 1%v/v²⁴⁹. Los respectivos cálculos pueden ser consultados en el anexo D.

²⁴⁹ MARTINEZ, PONCE y REYES. Op. Cit., p. 63

El ácido fosfórico es uno de los ácidos más empleados en el lavado del biodiésel, ya que puede ser luego puede ser recuperado y secado para ser utilizado como fertilizante²⁵⁰

Según la ENTREVISTA con el Ingeniero Químico Luis Miguel Ramírez^(*) y lo mencionado por autores como Hervé²⁵¹, en la actualidad, a nivel industrial, se usa metilato de sodio al 30% (NaOCH₃) como remplazo del metóxido en la reacción de transesterificación, ya que el metilato de sodio además de venderse listo para usar, eliminando la etapa de preparación del metóxido en el proceso de producción del biodiésel²⁵², al ser una solución catalítica libre de agua, permite alcanzar altos rendimientos, obtener un biodiésel de mejor calidad y una glicerina de mayor pureza²⁵³. Sin embargo, de los autores que obtuvieron biodiésel a partir de grasa de pollo, ninguno ha empleado este reactivo, y por ende sólo se sugiere tenerse en cuenta para futuras investigaciones.

3.3.4.1 Suposiciones y/o consideraciones de la etapa III. El balance de masa de la etapa III se lleva a cabo bajo las siguientes suposiciones y/o consideraciones:

- Se considera una concentración del 30% en peso de metanol en la fase de glicerina, al ser lo concentración más común²⁵⁴
- En la producción de biodiésel se produce como subproducto principal aproximadamente el 10% de glicerina del peso total del biodiésel obtenido²⁵⁵
- Se considera un reparto del metanol que no reaccionó, 50-50% en peso, en la fase de glicerina y biodiésel²⁵⁶.
- Se asume una concentración del 2% en peso, en la mezcla de biodiésel-glicerina producida, antes de la etapa de decantación, ya que las cantidades típicas de metanol en el biodiésel para las etapas previas al

²⁵⁰ RAMIREZ. Op. Cit., p.30 y 31

(*) RAMÍREZ, Luis Miguel, Investigador en Bio D S.A, Bogotá, Colombia. Observación inédita, 08 de agosto del 2020.

²⁵¹ CESPEDES, Alvaro y FERNANDA, María. Escalamiento de una planta para la producción de biodiesel a partir de aceite crudo de palma. Trabajo de grado para optar a ingeniero químico. Universidad de Costa Rica. Costa Rica. 2016. Consultado [20 de Agosto del 2020]. Disponible en: <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jsui/bitstream/123456789/10057/1/39708.pdf>

²⁵² ibíd. p. 34

²⁵³ EVONIK. Nuestros mercados: Biodiesel. [En línea]. Consultado [20 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://central-south-america.evonik.com/es/products/nuestros-mercados/biodiesel-129709.html>

²⁵⁴ PISARELLO, Op. Cit., p.52

²⁵⁵ MARTINEZ, PONCE y REYES. Op. Cit., p. 169

²⁵⁶ PISARELLO, Op. Cit., p.54

lavado (decantación y evaporación) está en el rango de concentraciones de 1 a 4%p²⁵⁷.

- No se considera las pérdidas de biodiésel en la de decantación

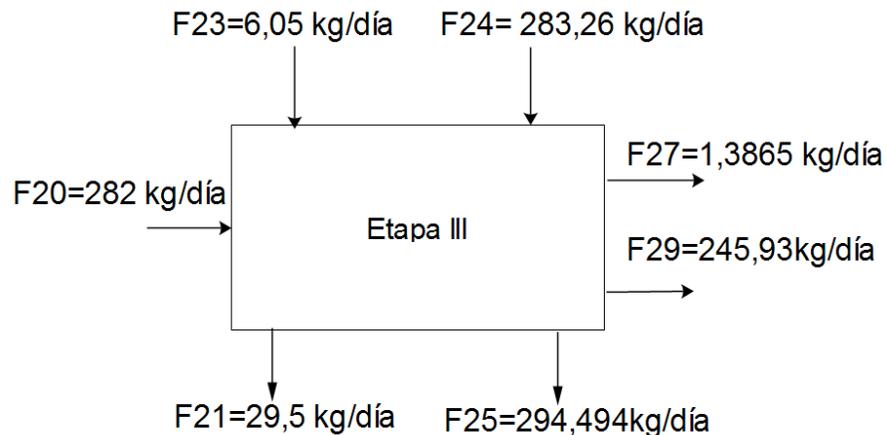
El balance de masa de la etapa III se presenta en la **ecuación 5**, seguido del **diagrama 14** donde se ilustran las cantidades de cada corriente. Los cálculos correspondientes pueden ser consultados en el anexo E.

Ecuación 5. Balance de masa de la etapa III

$$F20 + F23 + F24 = F21 + F25 + F27 + F29$$

Fuente: elaboración propia

Diagrama 14. Diagrama de balance de masa de la etapa III



Fuente: elaboración propia

En la última etapa se obtuvo 245,93 kg de biodiésel libre de glicerina, jabón, catalizador, metanol y agua, según las suposiciones presentadas anteriormente.

3.3.5 Rendimiento. Logrando disminuir el grado de incertidumbre del proceso propuesto se tomó como base lo reportado por varios autores, haciendo énfasis en lo presentado por Martínez, Ponce y Reyes, tomando como referencia el rendimiento de extracción reportado por Tejada y, bajo ciertos supuestos y consideraciones en cada etapa, a continuación se presenta el rendimiento del proceso de obtención de biodiésel respecto al aceite extraído y respecto a los residuos grasos de pollo.

²⁵⁷ Ibid. pg. 52

$$\text{Rendimiento respecto a la materia prima} = \frac{254,93 \text{ kg biodiésel}}{400 \text{ kg grasa sólida}} * 100 = 61,482\%$$

$$\text{Rendimiento respecto al aceite extraído} = \frac{254,93 \text{ kg biodiésel}}{282 \text{ kg aceite extraído}} * 100 = 87,209\%$$

Aunque Martínez, Ponce y Reyes no presentan estos rendimientos, estos se calcularon con base a los resultados reportados por estos autores. Los cálculos pueden ser consultados en el anexo F.

El rendimiento del biodiésel respecto a la materia prima y respecto al aceite extraído fue del 76,24% y 98,25%, respectivamente. Si bien, los rendimientos de con base a los resultados reportados por Martínez, Ponce y Reyes, fueron mayores, en estos no se tuvo en cuenta las consideraciones ni las suposiciones presentadas en las tres etapas anteriormente, además la cantidad de biodiésel obtenido que reportan estos autores, es respecto a la reacción de transesterificación, es decir, no eliminaron la glicerina, jabón, metanol ni agua, catalizador presente en el biocombustible.

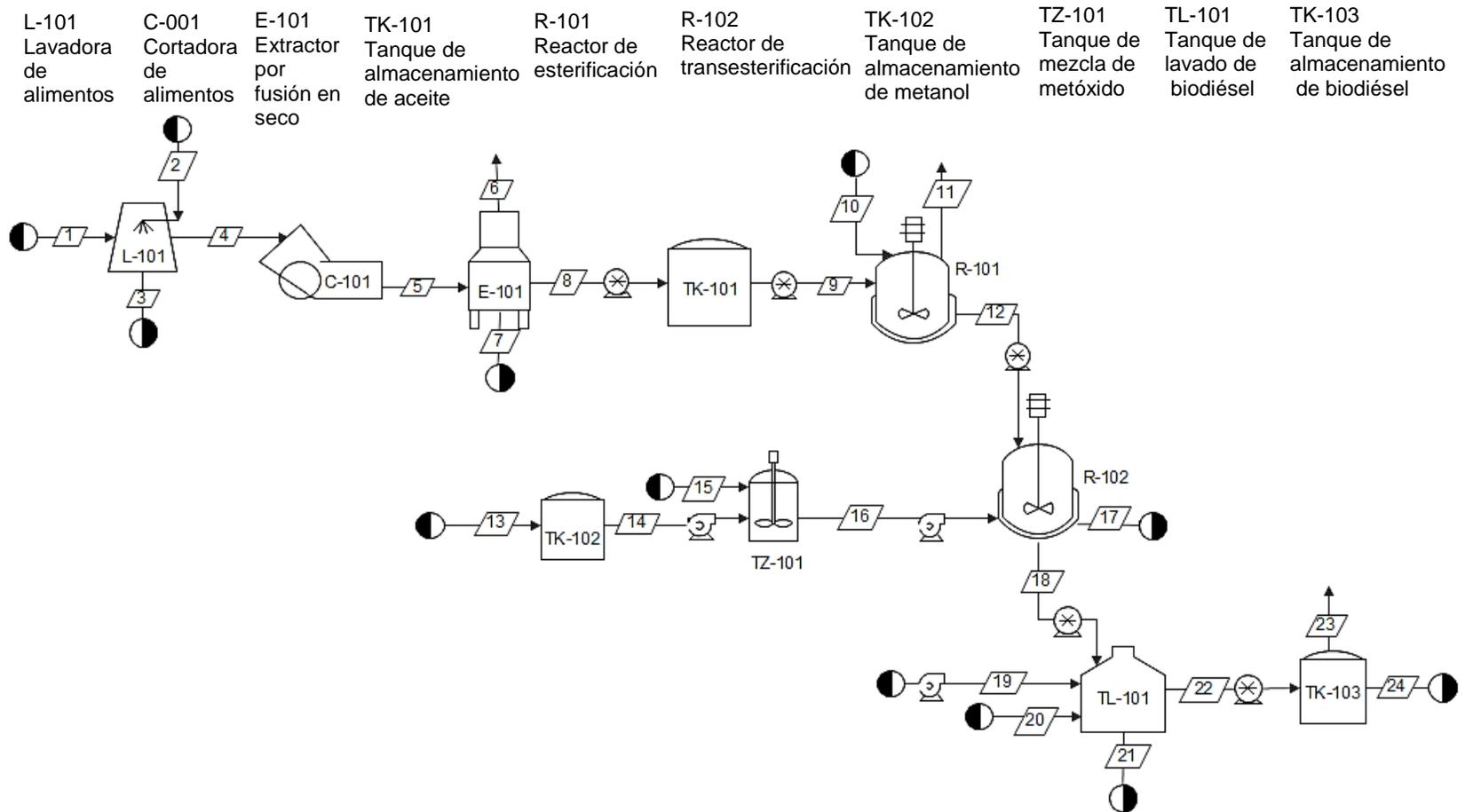
3.4 DIAGRAMA PFD

Un diagrama PFD (Diagrama de Flujo de Proceso) es la representación esquemática de un proceso industrial, sus condiciones de operación y su control básico, estos diagramas proporcionan una información clara, concisa y ordenada de todos los pasos y operaciones presentes²⁵⁸.

A partir del diagrama de bloques del proceso propuesto anteriormente en el **diagrama 7**, mostrado al comienzo del capítulo y de los balances de masa presentados anteriormente, se genera un diagrama PFD del proceso de producción de biodiésel a partir de residuos grasos de pollo, en el cual se integran algunas operaciones unitarias por equipo. Por ejemplo, en el equipo de extracción, se incluye la filtración, en el reactor de esterificación, se incluye la separación y evaporización del agua y metanol (evaporación I), en el reactor de transesterificación se incluye la neutralización del H₂SO₄ y la decantación, en el equipo de lavado se incluye la neutralización del catalizador básico (NaOH) y en el tanque de almacenamiento de biodiésel, se incluye la evaporación (evaporación II) de este biocombustible. El diagrama PFD del proceso propuesto se presenta en el **diagrama 15**, seguido de la descripción de las corrientes y su debida información, mostrado en la **tabla 33**.

²⁵⁸ NIROSA. Diagramas de flujo de proceso (PFD) y P&ID. [Sitio WEB]. Madrid. Niroso, Engineering in progress [20, agosto, 2020]. Disponible en: <https://nirosa.es/servicio/diagramas-de-flujo-de-proceso-pfd/>

Diagrama 15. Diagrama PFD de producción de biodiésel a partir de residuos grasos de pollo



Fuente: elaboración propia

En la **tabla 33** se presentan las corrientes del diagrama PFD, junto a la temperatura, presión, estado físico y su flujo másico, para tener idea de cuánto se procesará al día, por equipo.

Tabla 33. Identificación de corrientes del diagrama PFD

| Corriente | Nombre de la corriente | Temperatura (°C) | Presión (Kpa) | Estado físico | Flujo másico (kg/día) |
|-----------|---|------------------|---------------|---------------|-----------------------|
| 1 | Residuos grasos de pollo | 20 | 101,325 | Sólido | 400 |
| 2 | Agua de lavado | 20 | 101,325 | Líquido | 665.993,34 |
| 3 | Agua con trazas de sangre e impurezas | 20 | 101,325 | Líquido | 665.993,34 |
| 4 | Residuos grasos de pollo lavados | 20 | 101,325 | Sólido | 400 |
| 5 | Residuos grasos de pollo cortados | 20 | 101,325 | Sólido | 400 |
| 6 | Vapor de agua | 100 | 101,325 | Gas | 57,16 |
| 7 | Residuos sólidos desengrasados | 75 | 101,325 | Sólido | 60,84 |
| 8 | Aceite extraído | 50 | 101,325 | Líquido | 282 |
| 9 | Aceite | 50 | 101,325 | Líquido | 282 |
| 10 | H ₂ SO ₄ disuelto en metanol | 20 | 101,325 | Líquido | 4,42 |
| 11 | Vapor de agua y metanol | 100 | 101,325 | Gas | 1,57 |
| 12 | Aceite y trazas de biodiésel | 50 | 101,325 | Líquido | 282 |
| 13 | Metanol al 99% | 20 | 101,325 | Líquido | 30,59 |
| 14 | Metanol al 99% | 20 | 101,325 | Líquido | 30,59 |
| 15 | NaOH 0,1 N | 20 | 101,325 | Sólido | 1,964 |
| 16 | Metóxido | 55 | 101,325 | Líquido | 30,59 |
| 17 | Glicerina con trazas de metanol y jabón | 20 | 101,325 | Líquido | 29,5 |
| 18 | Biodiésel con trazas de glicerina, NaOH, jabón y metanol | 20 | 101,325 | Líquido | 277,318 |
| 19 | Agua de lavado | 35 | 101,325 | Líquido | 283,26 |
| 20 | H ₃ PO ₄ al 10% | 20 | 101,325 | Líquido | 6,05 |
| 21 | Agua con trazas de glicerina, metanol, jabón y sales formadas | 35 | 101,325 | Líquido | 294,494 |
| 22 | Biodiésel con trazas de agua y metanol | 35 | 101,325 | Líquido | 247,318 |
| 23 | Vapor de agua y metanol | 100 | 101,325 | Líquido | 1,3865 |
| 24 | Biodiésel | 20 | 101,325 | Líquido | 245,931 |

Fuente: elaboración propia

Los subproductos generados en el proceso, como los residuos de pollo desengrasados, el agua de lavado y la glicerina, se recomiendan venderlos y/o tratarlos, según sea el caso. Los residuos desengrasados se venderán para convertirlos en harina de comida de animal, la glicerina se venderá para ser tratada y recuperar las trazas de metanol presentes en esta y, las aguas de lavado se llevarán a una PTAR.

Debido a la poca cantidad de H_2SO_4 y metanol necesarios en el proceso de esterificación, no se contará con un tanque de mezclado para preparar la disolución, esto se añadirá manualmente.

Como se mencionó al principio del capítulo, la separación de las dos fases producidas durante la esterificación, es decir una fase rica en agua y la otra fase rica en el aceite que no reaccionó, se realizará mediante evaporación en el mismo reactor de esterificación.

En algunos procesos la mezcla de biodiésel y glicerina producida en el reactor de transesterificación se deja reposar en el mismo equipo para separarlos mediante gravedad por diferencia de densidades, por el contrario, en otros procesos esta mezcla se bombea hacia un decantador o es llevada a una centrifuga.²⁵⁹ En el proceso propuesto en este trabajo la separación de la glicerina y el biodiésel producido se llevará a cabo el mismo reactor, para minimizar costos.

3.5 SELECCIÓN DE EQUIPOS

Con base al diagrama PFD presentado anteriormente para la producción de biodiésel a partir de residuos grasos de pollo a escala piloto, según el proceso propuesto al inicio del capítulo, se definen los equipos necesarios, junto a sus especificaciones técnicas. Para esto se tuvo en cuenta la cantidad de residuos grasos de pollo procesados, aceite extraído, agua de lavado, reactivos necesarios y biodiésel producido, diariamente.

En todos los equipos se consideró un sobredimensionamiento del 20%. En la **tabla 34** se presenta la cantidad diaria que recibirá el equipo de lavado, cortado y extracción, para determinar la capacidad de cada equipo y así seleccionar el adecuado.

²⁵⁹ HERVÉ. Op. Cit. p.30

Tabla 34. Capacidad másica de equipos necesarios a escala piloto

| Equipo | Cantidad (kg) | Sobredimensionamiento | Capacidad (kg) |
|----------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------|
| Equipo de Lavado | 400 | 20% | 480 |
| Equipo de cortado | 400 | 20% | 480 |
| Equipo de extracción | 400 | 20% | 480 |

Fuente: elaboración propia

En la **tabla 35** se presenta la cantidad diaria que recibirá el tanque de aceite, metanol, biodiésel, mezclado de metóxido y de lavado del biodiésel, para determinar la capacidad de cada equipo y así seleccionar el adecuado.

Tabla 35. Capacidad volumétrica de equipos necesarios a escala piloto

| Equipo | Cantidad (L) | Sobredimensionamiento | Capacidad (L) |
|-------------------------------|---------------------|------------------------------|----------------------|
| Tanque aceite | 321,92 | 20% | 386,304 |
| Tanque metanol | 64,38 | 20% | 77,256 |
| Tanque mezcla de metóxido | 38,63 | 20% | 46,356 |
| Tanque biodiésel | 283,544 | 20% | 340,2528 |
| Tanque de lavado de biodiésel | 570,328 | 20% | 684,3936 |

Fuente: elaboración propia

La capacidad de los reactores para llevar a cabo la esterificación y transesterificación se presentan más adelante, mediante el cálculo del volumen para un reactor batch.

3.5.1 Lavadora de alimentos. Los residuos grasos de pollo que llegan a la planta, primero deben ser lavados para retirar las trazas de sangre e impurezas presentes que pueden perjudicar la calidad del producto final, para esto se seleccionó una lavadora general de alimentos. Este equipo no es automático, requiere de un operador para iniciar el ciclo y controlar el tiempo de lavado, además contiene un sistema de volcamiento para retirar los alimentos ya lavados, sin manipularlos y, un sistema de colador que permite retirar el agua de lavado. El equipo se presenta en la **ilustración 4**.

Ilustración 4. Lavadora de residuos grasos



Fuente: DISTRIBUIDORA IMARCA C.A Consultado [10 de agosto del 2020]. Disponible en: <http://imarca.com.ve/Lavadora-general-de-Alimentos.php>

Considerando el tiempo de lavado por carga y la capacidad del equipo, para lavar los 400kg de residuos grasos de pollo procesado diariamente, se llevará a cabo 10 cargas, cada una de 40kg por un tiempo aproximadamente de una hora.

La lavadora de alimentos cuenta con las siguientes especificaciones técnicas, brindadas por el distribuidor:

- Capacidad de lavado: 20 - 40 kg por carga
- Duración de cada carga: 3 - 5 min
- Material: acero inoxidable
- Peso: 160 kg

- Dimensiones (cm): 175 de largo, 110 de ancho y 110 de alto.
- Potencia de la bomba de aire: 1,5 kW
- Potencia de la bomba de ciclo: 1,5 kW
- Potencia de la correa: 0,18 kW

3.5.2 Cortadora de alimentos. Posterior al lavado, el tamaño de los residuos grasos se reduce a un tamaño mínimo de 50 mm para aumentar el área de contacto en la extracción por fusión en seco y así mejorar el rendimiento en ese proceso. Para tal fin se utiliza una cortadora genera de carnes. El equipo se presenta en la **ilustración 5**.

Ilustración 5. Cortadora de residuos grasos de pollo



Fuente: DISTRIBUIDORA IMARCA C.A. Consultado [10 de agosto del 2020]. Disponible en: <http://imarca.com.ve/Cortadora-automatizada-de-Carnes.php>

La cortadora de alimentos cuenta con las siguientes especificaciones técnicas, brindadas por el fabricante:

- Capacidad de producción: 500 kg/h
- Tamaño de corte: 30 – 100 mm (no ajustable, depende de las veces que se pase por las cuchillas de corte)

- Material: acero inoxidable
- Peso: 80 kg
- Dimensiones (cm): 63 de largo, 50 de ancho y 80 de alto
- Potencia del motor: 0,7457 kW

3.5.3 Extractor de aceite. Para llevar a cabo la extracción del aceite de la grasa sólida de pollo se seleccionó un equipo de fundición de grasa animal, este realiza la extracción al vacío, deshidrata la grasa y posteriormente separa los residuos sólidos remanentes en el aceite por filtración, obteniendo un aceite libre de impurezas sólidas y humedad, ya que el extractor de aceite tiene adaptado un tamiz de acero inoxidable con un tamaño de poro de 0,5mm. El extractor se presenta en la **ilustración 6**.

Ilustración 6. Extractor de aceite de pollo



Fuente: HENAN HANSON MACHINERY CO, LTD. Empresa de Trading. Consultado [12 de agosto del 2020]. Disponible en: <http://www.henanhanson.com/category/product/>

El extractor de aceite al vacío cuenta con las siguientes especificaciones técnicas, brindadas por el distribuidor:

- Capacidad: 1 tonelada
- Material: Acero al carbón
- Presión: >56,894 PSI
- Dimensiones: 120cm por 180cm y espesor de la placa de 8mm
- Área de calentamiento: 3,5 m²
- Tiene una temperatura ajustable entre 70-120°C
- Potencia: 1,5 kW
- Tamaño de poro: 0,5mm

3.5.4 Tanque de almacenamiento de aceite. Considerando la importancia de reserva del aceite extraído, se tiene en cuenta su almacenamiento. Para esto se seleccionó un tanque de acero al carbón con calentamiento por serpentín para evitar la solidificación del aceite y con un cuello de ganso ubicado en la parte superior para dejar los salir gases producidos dentro del tanque, ya que almacena un aceite crudo. El tanque de almacenamiento se presenta en la **ilustración 7**.

Ilustración 7. Tanque de almacenamiento de aceite



Fuente: C&O INGENIERÍA. Fabricantes de maquinaria para la industria química, alimentaria y farmacéutica. Consultado [20 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://www.olx.com.co/item/marmitas-industriales-iid-1102899292>

El tanque de almacenamiento de aceite cuenta con las siguientes especificaciones técnicas, brindadas por el fabricante:

- Capacidad: 400 L
- Material: acero al carbono
- Potencia: 2 kW

3.5.5 Reactor batch con evaporador. El proceso llevado a cabo en este reactor, es decir la esterificación, cuyo objetivo es reducir el contenido de ácidos grasos libres presentes en el aceite de pollo, se llevará a cabo en un reactor tipo batch enchaquetado y con agitación. Este reactor tiene un sistema de evaporación, para eliminar las trazas de metanol y agua producida, además cuenta dos salidas para ir removiendo de manera continua el agua generada durante la reacción, para que esta no se detenga. Además, tiene un fondo elíptico para lograr una correcta agitación y movimiento de la mezcla.

El volumen del reactor (VR) se calculó con base a la **ecuación 6** determinada por Martínez, Ponce y Reyes a partir de la cinética de la reacción de esterificación presentada por los mismos autores²⁶⁰.

Ecuación 6. Volumen del reactor batch

$$VR = \frac{\text{Volumen grasa de pollo a procesar} \left(\frac{L}{\text{día}} \right)}{\text{Conversión}} * \frac{\text{Tiempo de residencia} \left(\frac{\text{min}}{\text{batch}} \right)}{\text{Tiempo operación del reactor} \left(\frac{\text{min}}{\text{día}} \right)}$$

Fuente: MARTINEZ, Gilma. PONCE, Roberto y REYES, Laura. Diseño del proceso químico a escala de laboratorio para la producción de biodiesel a partir de grasa de pollo. [en línea]. Trabajo de grado para optar a Ingeniero Químico. Universidad de Salvador. El Salvador. 2007. Consultado [19 de agosto del 2020]. Disponible en: http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/2042/1/Dise%C3%B1o_del_proceso_qu%C3%ADmico_a_escalade_laboratorio_para_la_producci%C3%B3nde_Biodiesel_a_partir_de_grasa_de_pollo.pdf

El tiempo de residencia (τ) se calcula con base a la **ecuación 7**, también reportada por Martínez, Ponce y Reyes, este tiempo se determina teniendo en cuenta los diferentes tiempos involucrados en la operación de un reactor discontinuo (batch).

²⁶⁰ MARTINEZ, PONCE y REYES. Op. Cit., p. 84

Ecuación 7. Tiempo de residencia

$$tT = tll + tv + tc + ti + tR$$

Fuente: MARTINEZ, Gilma. PONCE, Roberto y REYES, Laura. Diseño del proceso químico a escala de laboratorio para la producción de biodiesel a partir de grasa de pollo. [En línea]. Trabajo de grado para optar a Ingeniero Químico. Universidad de Salvador. El Salvador. 2007. Consultado [19 de agosto del 2020]. Disponible en:

http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/2042/1/Dise%C3%B1o_del_proceso_qu%C3%ADmico_a_escalade_laboratorio_para_la_producci%C3%B3n_de_Biodiesel_a_partir_de_grasa_de_pollo.pdf

Los tiempos necesarios para calcular el tiempo de residencia del reactor bach de esterificación, se presentan en la **tabla 36**. El tiempo de llenado y el tiempo de vació, se determinó teniendo en cuenta lo presentado por Martínez, Ponce y Reyes, quienes reportan 10 segundos en cada operación para procesar 1,5 L de grasa por lote. De esta manera, con base a lo propuesto en este trabajo, al procesa 321,92 L de aceite de pollo por lote, ambos tiempos son de 34,34 min. El tiempo mínimo de ignición y el tiempo de reacción fue el mismo reportado por Martínez, Ponce y Reyes. El tiempo de limpieza y secado del reactor, se asumió de 15 minutos.

Tabla 36. Tiempo de residencia del reactor de esterificación

| Tiempos involucrados en la operación de un reactor discontinuo | Simbología | Tiempo (min/lote) |
|--|-----------------|-------------------|
| Tiempo de llenado | t _{ll} | 34,34 |
| Tiempo de vacío | t _v | 34,34 |
| Tiempo de limpieza y secado del reactor entre lotes | t _c | 15 |
| Tiempo mínimo de ignición | t _i | 15 |
| Tiempo de reacción | t _R | 90 |
| Tiempo de residencia | t _T | 188,68 |

Fuente: elaboración propia, con base en: MARTINEZ, Gilma. PONCE, Roberto y REYES, Laura. Diseño del proceso químico a escala de laboratorio para la producción de biodiesel a partir de grasa de pollo. [en línea]. Trabajo de grado para optar a Ingeniero Químico. Universidad de Salvador. El Salvador. 2007. Consultado [19 de agosto del 2020]. Disponible en: http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/2042/1/Dise%C3%B1o_del_proceso_qu%C3%ADmico_a_escalade_laboratorio_para_la_producci%C3%B3nde_Biodiesel_a_partir_de_grasa_de_pollo.pdf

Para el cálculo del volumen del reactor seleccionado se tomó la conversión reportada por Martínez a 50 °C, cuyo valor es del 93%²⁶¹.

$$V_R = \frac{321,92 \frac{L}{día}}{0,93} * \frac{188,68 \frac{min}{lote}}{90 \frac{min}{día}} = 725,68 L/lote$$

En este caso también se considera un sobredimensionamiento del 20%, considerando la presencia de agitación en este reactor.

$$V_R \text{ con sobredimensionamiento del } 20\% = 725,68 L + (725,68 L * 0,2) = 870,82 L$$

Debido a la exposición con ácido sulfúrico el material de reactor es acero inoxidable SS 316, ya que este tipo de acero tiene una mayor resistencia a la corrosión. El reactor batch con evaporador se presenta en la **ilustración 8**.

²⁶¹ ibíd. p. 85

Ilustración 8. Reactor batch con evaporador



Fuente: GUANGZHOU HUIHENG MECHANICAL AND ELECTRICAL EQUIPMENT CO., LTD.. Empresa de Trading. [20 de agosto del 2020]. Disponible en: https://hmmee.m.en.alibaba.com/index.html?wx_navbar_transparent=true&tracelog=sns_minisite

El reactor batch con evaporador cuenta con las siguientes especificaciones técnicas, brindadas por el fabricante:

- Capacidad: 880 L
- Agitación: 750 rpm
- Temperatura de operación: 50°C
- Potencia de calentamiento: 24 kW
- Potencia del reactor: 5,5 kW
- Material: acero inoxidable SS 316

3.5.6 Reactor batch. El equipo principal en la producción de biodiésel es el reactor de transesterificación, para esto se seleccionó un reactor tipo batch, el cual consta de un sistema de calentamiento y agitación, además tiene un fondo elíptico para lograr una correcta agitación y movimiento de la mezcla.

El volumen de este reactor (VR_t) también se calculó con base a la **ecuación 6** y **ecuación 7** determinadas a partir de la cinética de la reacción de transesterificación presentada por Martínez, Ponce y Reyes²⁶². Para el cálculo del volumen del reactor se tomó la conversión reportada por el mismo autor, cuyo valor es del 77%. El valor del tiempo de residencia en este reactor es el mismo del reactor de esterificación, al ser los mismos tiempos involucrados en la operación de un reactor discontinuo.

$$VR_t = \frac{321.92 \frac{L}{día}}{0.77} * \frac{188,68 \frac{min}{lote}}{90 \frac{min}{día}} = 876,47 L/lote$$

En este caso también se considera un sobredimensionamiento del 20%, considerando la producción de espuma por las reacciones secundarias o no deseadas mencionadas en el capítulo 2, como la saponificación.

$$VR \text{ con sobredimensionamiento del } 20\% = 876,47 L + (876,47 L * 0,2) = 1051,7 L/lote$$

El reactor batch con se presenta en la **ilustración 9**.

²⁶² MARTINEZ, Op. Cid., p.36.

Ilustración 9. Reactor batch



Fuente: GUANGZHOU HUIHENG MECHANICAL AND ELECTRICAL EQUIPMENT CO., LTD. Empresa de Trading. [20 de agosto del 2020]. Disponible en: https://hhmee.m.en.alibaba.com/index.html?wx_navbar_transparent=true&tracelog=sns_minisite

El reactor batch de fondo cónico cuenta con las siguientes especificaciones técnicas, brindadas por el fabricante:

- Capacidad: 1060 L
- Agitación: 650 rpm
- Material: acero inoxidable SS 304
- Potencia del reactor: 5,51 kW

3.5.7 Tanque de almacenamiento de metanol. Debido a la alta cantidad de metanol empleado en el proceso, en comparación con los otros reactivos, este se almacenará en un tanque cerrado de acero al carbón, conectado a tierra para evitar fugas o explosiones, ya que el metanol es una sustancia altamente

inflamable y por tal motivo debe ubicarse en un área especial y específicamente demarcada²⁶³. El tanque de almacenamiento se presenta en la **ilustración 10**.

Ilustración 10. Tanque de almacenamiento de metanol.



Fuente: C&O INGENIERÍA. Fabricantes de maquinaria para la industria química, alimentaria y farmacéutica. Consultado [20 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://www.olx.com.co/item/marmitas-industriales-iid-1102899292>

El tanque de almacenamiento de metanol cuenta con las siguientes especificaciones técnicas, brindadas por el fabricante:

- Capacidad: 80 L
- Material: acero inoxidable

²⁶³ METHANOL INSTITUTE. Manual de manipulación segura del metanol. [En línea]. Enero del 2013. Consultado [25 de agosto del 2020]. Disponible en: http://www.methanol.org/wp-content/uploads/2016/06/Methanol-Safe-Handling-Manual-Final_Spanish.pdf

3.5.8 Tanque de mezcla. En este tanque se prepara el metóxido mediante la mezcla de metanol y NaOH, para luego ser llevado al reactor de transesterificación. Esta mezcla necesita de un buen sistema de agitación para lograr una buena homogenización y una disolución completa del hidróxido de sodio en el alcohol. Además, el tanque es cerrado y aislado térmicamente, ya que la reacción producida en este tanque es una reacción exotérmica²⁶⁴.

Debido a la alta inflamabilidad de este reactivo, debe ser ubicado en un área sin acceso a desagües o alcantarillas²⁶⁵ El tanque de mezcla para preparar el metóxido se presenta en la **ilustración 11**.

Ilustración 11. Tanque de mezcla



Fuente: C&O INGENIERÍA. Fabricantes de maquinaria para la industria química, alimentaria y farmacéutica. Consultado [20 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://www.inoxmim.com/blog-c/fabricantes-de-maquinaria-industrial>

²⁶⁴ CESPEDES, Alfaro y FERNANDA, María. Escalamiento de una planta para la producción de biodiesel a partir de aceite crudo de palma. Trabajo de grado para optar a ingeniero químico. Universidad de Costa Rica. Costa Rica. 2016. Consultado [20 de Agosto del 2020]. Disponible en: <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/xmlui/handle/123456789/10057>

²⁶⁵ MINISTERIO DE TRABAJO Y ECONOMIA SOCIAL. Metilato de sodio. 2018. España. Consultado [25 de agosto del 2020]. Disponible en: https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=es&p_card_id=0771&p_version=2

El tanque de mezcla del metóxido cuenta con las siguientes especificaciones técnicas, brindadas por el fabricante:

- Capacidad: 50 L
- Velocidad de agitación: 200 rpm
- Material: acero inoxidable
- Dimensiones: 500 cm x 500 cm
- Diámetro: 400 cm
- Potencia: 0,75 kW

3.5.9 Tanque de lavado de biodiésel. El objetivo principal del lavado es la remoción de impurezas como jabones, NaOH, metanol y glicerina que quedan presentes en el biodiésel después de la decantación. Estas se eliminan mediante lavado con el agua. El tanque seleccionado es cilíndrico y de acero inoxidable. El tanque de lavado mezcla para preparar el metóxido se presenta en la **ilustración 12.**

Ilustración 12 .Tanque de lavado de biodiésel



Fuente: C&O INGENIERÍA. Fabricantes de maquinaria para la industria química, alimentaria y farmacéutica. Consultado [20 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://www.olx.com.co/item/marmittas-industriales-iid-1102899292>

Para retirar la mayor cantidad de glicerina y sales presentes en el biodiésel, se emplearán dos lavados, cada uno de un tiempo estimado de 45 minutos. El tanque de lavado de biodiésel cuenta con las siguientes especificaciones técnicas, brindadas por el fabricante:

- Capacidad: 700 L
- Materia: acero inoxidable

3.5.10 Tanque de almacenamiento del biodiésel. El biodiesel se debe almacenar en un tanque limpio, seco y oscuro, el tanque seleccionado es cerrado y fabricado en acero al carbón. El biodiesel no debe ser almacenado por periodos más largos a seis meses, ya que puede sufrir oxidación rápidamente a menos que se adicione algún aditivo para evitarlo.. Además cuenta con un sistema de calentamiento para evaporar las trazas de metanol y agua que quedaron tras el lavado. El tanque de almacenamiento de biodiésel se presenta en la **ilustración 13.**

Ilustración 13. Tanque de almacenamiento de biodiésel



Fuente: C&O INGENIERÍA. Fabricantes de maquinaria para la industria química, alimentaria y farmacéutica. Consultado [20 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://www.olx.com.co/item/marmitas-industriales-iid-1102899292>

El tanque de almacenamiento del biodiésel cuenta con las siguientes especificaciones técnicas, brindadas por el fabricante:

- Capacidad: 350 L
- Material: Acero inoxidable
- Potencia: 10 kW

3.5.11 Bombas. Con el fin de transportar las sustancias en estado líquido presentes en el proceso propuesto a escala piloto, se seleccionaron dos tipos de bomba: bomba de desplazamiento positivo y bomba centrífuga.

Para llevar a cabo una correcta selección del tipo de bomba se debe tener en cuenta factores como: las condiciones de operación, características del fluido, rango de capacidad, condiciones de aspiración, presión de descarga y prácticas operatorias. Además para determinar estos factores, también se debe tener presente información con respecto a la longitud y altura máxima de bombeo, el NPSH, el rango de cabeza o presión diferencial requerida, el diámetro de la tubería y la potencia de la bomba. Sin embargo, como no se cuenta con esta cantidad de datos para una adecuada selección del tipo bomba correspondiente, sólo se considerará las características del fluido y el rango de capacidad, recopilados en la **tabla 37** y, la práctica operatoria, es decir, si la planta opera de manera continua o discontinua²⁶⁶. La planta operará de manera discontinua, (por lotes) y estará en funcionamiento 12 horas al día.

²⁶⁶MANRIQUE, Alba, TORRES, Francisco y FAJARDO, Margie. Diseño e instalación de un tanque aforador y manómetros para la estación de bombas del laboratorio de hidráulica de la Universidad Cooperativa de Colombia Sede Villavicencio. [En línea]. Trabajo de grado para optar a título de Ingeniero Civil. Universidad Cooperativa de Colombia. Villavicencio. 2019. Consultado [01 de octubre del 2020]. Disponible en: <https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/12364/1/2019-Dise%c3%b1o-Manometros-Bombas..pdf>

Tabla 37. Información de sustancias para selección de bombas

| Corriente | Nombre de la corriente | Flujo másico (kg/día) | Densidad (kg/L) | Flujo másico (LPM) | Flujo másico (GPM) |
|-----------|--|-----------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| 8 - 9 | Aceite | 282 | 0,876 | 26,83 | 7,08 |
| 22 | Biodiésel con trazas de agua y metanol | 245,931 | 0,884 | 23,28 | 6,14 |
| 13 - 14 | Metanol al 99% | 30,59 | 0,798 | 3,19 | 0,84 |
| 19 | Agua de lavado | 283,26 | 0,999 | 23,61 | 6,23 |

Fuente: elaboración propia

De esta manera con base al flujo másico en GPM o LPM, se seleccionará la bomba para el transporte de las sustancias en estado líquido y, se dará a conocer las especificaciones técnicas de las mismas.

3.5.11.1 Bomba de desplazamiento positivo. Este tipo de bomba se utiliza en las plantas de biodiesel solamente para los flujos con aceite o biodiésel para evitar la emulsión²⁶⁷. En el proceso propuesto se empleará este tipo de bomba para transportar el aceite o biodiésel, según sea el caso, al tanque de almacenamiento de aceite, al reactor de esterificación, al reactor de transesterificación, al tanque de lavado y al tanque de biodiésel.

Para el rango de capacidad de la bomba de desplazamiento positivo, se tuvo en cuenta la cantidad de flujo a procesar de aceite y biodiésel, es decir, 7,08 y 6,14 GPM, respectivamente. La bomba de desplazamiento positivo se presenta en la **ilustración 14**

²⁶⁷ HERVÉ, Op. Cit., p.85

Ilustración 14. Bomba de desplazamiento positivo



Fuente: SEAFLO. Consultado [23 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://www.amazon.es/Seaflo-Sistema-bomba-agua-minuto/dp/B01N64VJIQ?SubscriptionId=AKIAIWKAGNVX4GSIWZSA&tag=bombasagua01-21&linkCode=xm2&camp=2025&creative=165953&creativeASIN=B01N64VJI>

La bomba de desplazamiento positivo cuenta con las siguientes especificaciones técnicas, brindadas por el fabricante:

- Tipo de control: Presostato
- Temperatura máxima recomendada: 60 °C
- Capacidad de elevación: 2,5 metros
- Presión de reinicio: 20 PSI \pm 3 PSI
- Presión de cierre: 60 PSI \pm 3 PSI
- Potencia: 0,7457 kW
- Rango de capacidad: 7,5 GPM
- Dimensiones (cm): 292 x 16,2 x 14,2
- Peso: 3,02 kg

De esta manera, considerando la densidad del aceite y biodiésel y, el flujo de cada corriente, presentado en la **tabla 37**, junto al rango de capacidad de la bomba (7,5 GPM), dado en las especificaciones técnicas de la misma, se estima un tiempo de bombeo de la bomba de aceite y biodiésel de 15,5 min y 13,4 min, respectivamente.

3.5.11.2 Bomba centrífuga. Este tipo de bomba es una de las más empleadas a nivel industrial al tener un menor costo comparada con otros tipos de bomba²⁶⁸ Se empleará para transportar todo los flujos que no contengan aceite ni biodiésel, es decir, el metanol, metóxido y agua de lavado, ya que el aceite y biodiésel al ser sustancias viscosas pueden producir emulsión si se transporta con este tipo de bomba²⁶⁹.

Para el rango de capacidad de la bomba centrífuga, se tuvo en cuenta la cantidad de flujo a procesar de metanol y agua de lavado, es decir, 3,19 y 23,61 LPM, respectivamente La bomba centrífuga se presenta en la **ilustración 16**.

Ilustración 15. Bomba centrífuga



Fuente: PEDROLLO SPA.
Consultado [22 de agosto del 2020]. Disponible en:
https://www.amazon.es/Electrobomba-Pedrolo-Centrifugado-Multigigante-100-C/dp/B07D4PF54Q/ref=sr_1_4?__mk_es_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&dchild=1&keywords=bomba+centrifuga+de+1+hp&qid=1598368881&s=sports&sr=1-4

²⁶⁸ ibíd. p. 85

²⁶⁹ ibíd. p. 85

La bomba centrífuga cuenta con las siguientes especificaciones técnicas, brindadas por el fabricante:

- Rango de capacidad: 25 LPM
- Altura máxima: 50 cm
- Potencia: 0,75 kW
- Temperatura del líquido: 10 a 40 °C

De esta manera, considerando la densidad del metanol y agua y, el flujo de cada corriente, presentado en la **tabla 37**, junto al rango de capacidad de la bomba (25 LPM), dado en las especificaciones técnicas de la misma, se estima un tiempo de bombeo de la bomba de metanol y agua de menos de 1 minuto y 3 minutos, respectivamente.

Para transportar el agua y metanol, se empleará una bomba centrífuga axial, ya que esta direcciona el flujo de forma paralela al eje de rotación y se caracteriza por su capacidad de elevar grandes caudales a poca altura²⁷⁰, adecuado en el caso del agua.

3.6 DIAGRAMA TERNARIO MEZCLA AGUA-METANOL-ÁCIDO OLÉICO

Para validar el tiempo de evaporación de mezcla de las fases producidas en el reactor de esterificación, cuya composición por componente se presenta en la **tabla 38**, se obtuvo el diagrama ternario de la mezcla, agua y ácido oleico (el ácido graso predominante en el aceite de pollo) a temperatura ambiente (20°C) y presión de 1atm, presentado en la **figura 7**. Este diagrama se realizó en el simulador Aspen Plus V10 empleando el modelo UNIFAC.

²⁷⁰ COMOFUNCIONA, R José Luis. ¿Cómo funciona una bomba centrífuga?. [Sitio web]. Consultado [28 de septiembre del 2020]. Disponible en: <https://como-funciona.co/una-bomba-centrifuga/>

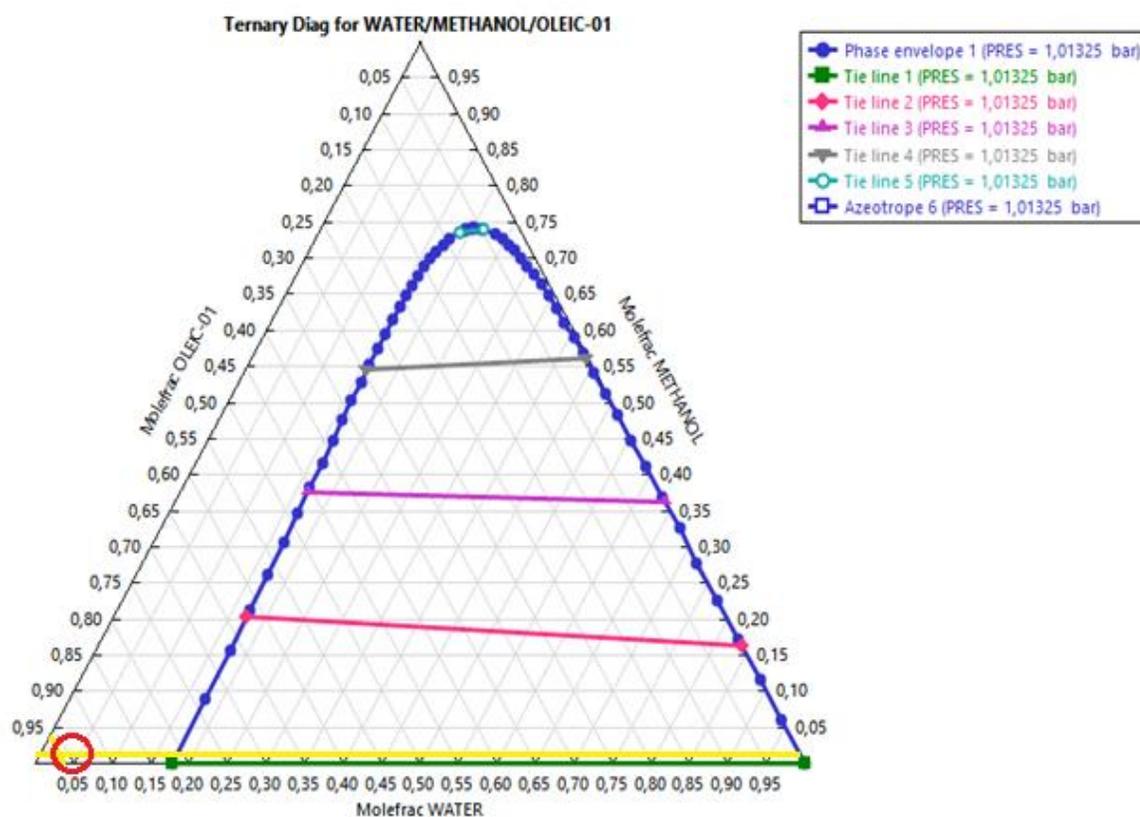
Tabla 38. Composición de la mezcla metanol, agua y aceite producido en la reacción de esterificación

| Componente | Cantidad producida (kg) | Composición |
|------------|-------------------------|-------------|
| Metanol | 4,13 | 0,0142 |
| Agua | 3,74 | 0,0129 |
| Aceite | 282 | 0,972 |
| Total | 289,87 | 1 |

Fuente: elaboración propia

El punto de mezcla de las fases producidas en la esterificación (círculo rojo) se ubica en el diagrama ternario, como se evidencia en la **figura 7**

Figura 7. Diagrama ternario mezcla agua, metanol y ácido oleico a 20°C y 1 atm



Fuente: elaboración propia

Debido a la poca cantidad de agua y metanol producido frente a la cantidad de aceite obtenido y, al encontrarse el punto de mezcla fuera del domo de fases, se

válida que no es necesario emplear la decantación como método de separación de las fases producidas en la esterificación. Dicha separación se llevará a cabo mediante evaporación, asumiendo un tiempo de 45 minutos.

3.7 DIAGRAMA TERNARIO MEZCLA GLICERINA-METANOL-METILÉSTER

Para validar el tiempo de decantación de la mezcla producida en el reactor de transesterificación, cuya composición por componente se presenta en la **tabla 39**, se obtuvo el diagrama ternario de la mezcla glicerina, metanol y metiléster (biodiésel) una temperatura ambiente (20°C) y presión de 1atm, presentado en la **figura 8**. Este diagrama se realizó en el simulador Aspen Plus V10 empleando el modelo UNIFAC.

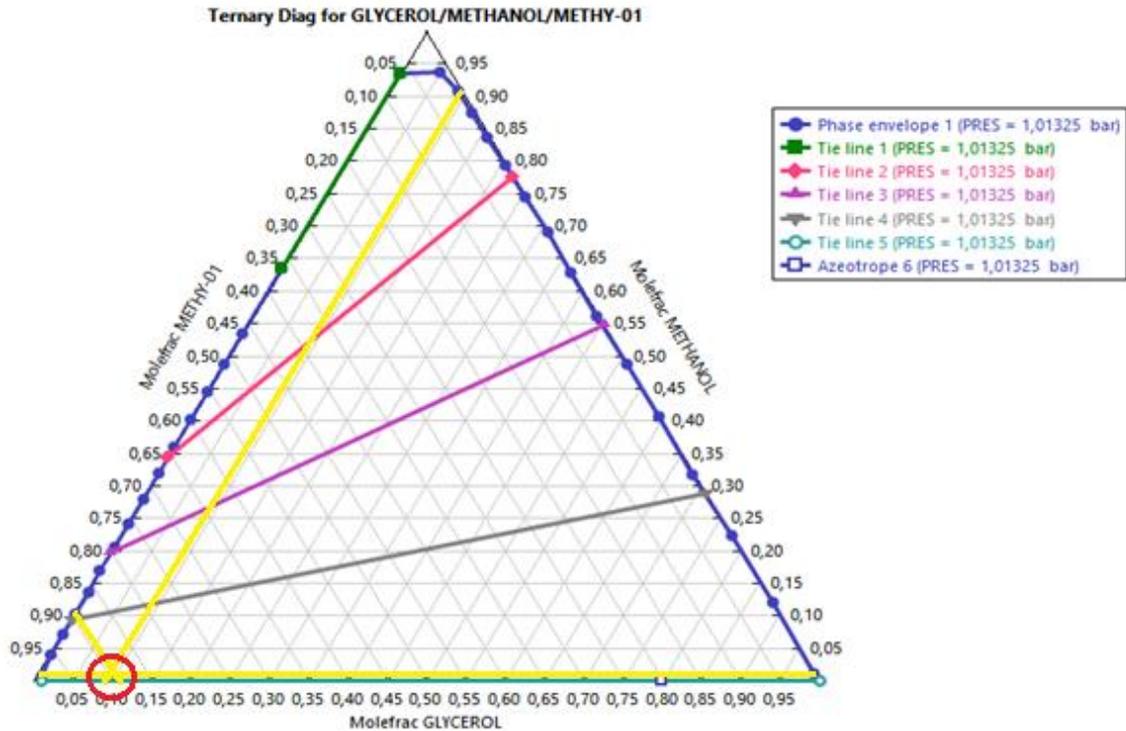
Tabla 39. Composición de la metiléster, glicerina y metanol producido en la reacción de transesterificación

| Sustancia | Cantidad producida (kg) | Composición |
|-----------|-------------------------|-------------|
| Biodiésel | 277,318 | 0,894 |
| Glicerina | 27,26 | 0,094 |
| Metanol | 5,54 | 0,019 |
| Total | 310,12 | 1 |

Fuente: elaboración propia

El punto de mezcla de las fases producidas en la transesterificación (círculo rojo) se ubica en el diagrama ternario, como se evidencia en la **figura 8**.

Figura 8. Diagrama ternario mezcla glicerina, metanol y metiléster (biodiésel)



Fuente: elaboración propia

Aunque el punto de mezcla se encuentra dentro del domo de fases, debido a la poca cantidad de glicerina y metanol producido frente al biodiésel obtenido, el tiempo de decantación se asumirá de una hora y media, dejando un tiempo de seguridad de 30 minutos más según el tiempo de decantación reportado por Martínez, Ponce y Reyes (1 hora).

Además, tanto en la esterificación como en la transesterificación, la agitación se debe disminuir a medida que la reacción avance para lograr disminuir el tiempo de separación de las fases producidas²⁷¹.

²⁷¹ HERVÉ, Op. Cit., p.85

4. COSTOS DE PRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los costos de producción del proceso propuesto en el capítulo anterior, para obtener biodiésel partiendo de residuos grasos de pollo a escala piloto, la planta estará en funcionamiento 12 horas al día, 6 días a la semana, los 12 meses del año.

Según la FAO, los costos de producción u operación son “los gastos necesarios para mantener un proyecto, línea de procesamiento o equipo en funcionamiento”²⁷². Para determinar estos costos se tendrán en cuenta los costos fijos, aquellos independientes a la producción, como el costo de inversión²⁷³ y, los costos variables, aquellos proporcionales a la producción, como la materia prima, la mano de obra, los servicios, y el mantenimiento de equipos²⁷⁴. Los costos de producción fueron estimados teniendo en cuenta el primer año de operación.

4.1 COSTOS FIJOS

Dentro de los costos fijos sólo se tendrá en cuenta los costos de inversión de los equipos nacionales e importados.

4.1.1 Equipos nacionales e importados. En la **tabla 40** y a **tabla 41** se presentan los costos de los equipos nacionales y los equipos importados, respectivamente, necesarios en la producción de biodiésel, según la selección de equipos llevado a cabo en el capítulo anterior. La cotización de los equipos se realizó directamente en la página del fabricante o distribuidores y vía correo electrónico, algunas cotizaciones pueden ser consultadas en el anexo G

²⁷² ZUGARRAMURDI, Aurora y PARIN, María. Ingeniería Económica Aplicada a la Industria Pesquera. En: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. 1998. Consultado [15 de agosto del 2020]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/v8490s/v8490s00.htm#Contentos>

²⁷³ Ibid. p. 13

²⁷⁴ RAFFINO, María Estela. Costos de producción. En: Concepto de. 29 de agosto del 2020. Argentina. Consultado [2 de septiembre del 2020]. Disponible en: <https://concepto.de/costos-de-produccion/>

Tabla 40. Costos de equipos nacionales

| Equipos | Cantidad | Costo unitario (\$) | Costo total (\$) |
|----------------------------------|-----------------|----------------------------|-------------------------|
| Tanque de aceite | 1 | 4'530.000 | 4'530.000 |
| Tanque de metanol | 1 | 2'700.000 | 2'700.000 |
| Tanque de lavado | 1 | 7'120.000 | 7'120.000 |
| Tanque de biodiesel | 1 | 4'000.000 | 4'000.000 |
| Bomba de desplazamiento positivo | 5 | 4'000.000 | 20'000.000 |
| Bomba centrífuga | 3 | 900.000 | 2'700.000 |
| Total | | | 41'050.000 |

Fuente: elaboración propia

Para los equipos importados se tiene en cuenta el costo comercial de importación con base al CIF (coste seguro y flete al puerto de destino convenido), que equivale al 36,6% de los gastos totales en que incurre el importador. El CIF considerando los costos internos no arancelarios (17,2%), el transporte internacional (4,6%) y los derechos aduaneros (14,8%)²⁷⁵.

²⁷⁵DINERO. Los costos y el tiempo que tarda importar y exportar una mercancía en Colombia. [En línea]. 22 de septiembre del 2017. Colombia. Consultado [22 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://www.dinero.com/economia/articulo/costos-y-tiempo-que-tarda--importar-y-exportar-una-mercancia-en-colombia/250158>

Tabla 41. Costo de equipos importado

| Equipo | Costo unitario (USD) | Costo unitario (\$) | CIF (%) | Costo total (\$) |
|--|-----------------------------|----------------------------|----------------|-------------------------|
| Lavadora de alimentos | 8.280 | 31'689.796 | 36,6 | 43'288.000 |
| Cortadora de alimentos | 4.500 | 17'222.715 | 36,6 | 23'526.000 |
| Extractor de aceite | 3.000 | 11'481.810 | 36,6 | 15'684.000 |
| Reactor batch con sistema de evaporación | 10.500 | 40'186.335 | 36,6 | 54'895.000 |
| Tanque de mezcla de metóxido | 2.750 | 10'524.993 | 36,6 | 14'377.000 |
| Reactor batch de fondo cónico | 14.700 | 56'260.869 | 36,6 | 76'852.000 |
| Total | | | | 228'623.000 |

*Precio del dólar en Colombia - agosto 22 del 2020: \$3.827

Fuente: elaboración propia

De esta manera, el costo total de los equipos necesarios en la planta de producción del proceso opuesto para la obtención de biodiésel a partir de residuos grasos es de \$269'673.000.

4.2 COSTOS VARIABLES

En los costos variables o directos se tendrá en cuenta aquellos proporcionales a la producción, como la materia prima, el pago de obra a la mano indirecta y los servicios requeridos, no se tendrá en cuenta el mantenimiento de los equipos.

4.2.1 Materia prima. En la **tabla 42** se presentan los costos de las materias primas necesarias para la producción de biodiésel por un año.

Tabla 42. Costo de materia prima

| Materia prima | Precio (\$/kg) | Cantidad (kg/día) | Proveedor | Costo mes (\$) | Costo año (\$) |
|----------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Grasa de pollo | 1.800 | 400 | Don Pollo S.A | 17'280.000 | 207'360.000 |
| Metanol al 96% | 4.292 | 51 | USAQUIM S.A.S | 5'251.000 | 63'016.000 |
| NaOH 0,1N | 5.500 | 2 | Químicos compota S.A | 259.300 | 3'111.000 |
| H2SO4 al 97 % | 87.036 | 4,5 | Instrumentalia | 9'233.000 | 110'793.000 |
| H3PO4 al 10% | 67.887 | 6,1 | Instrumentalia | 9'857.000 | 118'287.000 |
| Total | | | | 41'881.000 | 502'567.000 |

Fuente: elaboración propia

El precio de los residuos grasos pollo se cotizó en las plantas de beneficio de Pollo Olímpico S.A, Pollos Savicol S.A y Pollo Fiesta S.A, ubicadas en la ciudad de Bogotá. Pollos Savicol S.A y Pollo Fiesta S.A no venden estos residuos. También se cotizó en la planta de beneficio de Don Pollo S.A.S, cuyo precio de estos residuos son de \$1200 kg, sin embargo este precio no se consideró ya que la planta está ubicada en la ciudad de Armenia.

4.2.2 Mano de obra directa. Para llevar a cabo la producción de biodiésel a escala planta piloto se requiere de un ingeniero químico y dos operarios. Para determinar la mano de obra directa se tuvo en cuenta el tiempo de trabajo por año, con un turno de 8 horas diarias y 24 días. Habrá un turno rotativo sólo para los operarios.

Además se consideraron las prestaciones sociales, teniendo en cuenta las cesantías (8,33%), intereses sobre cesantías (12%), la prima de servicios (8,5%) y vacaciones (4,17%).²⁷⁶ Junto a los aportes de salud (8,5%), aportes de pensión (12%) y riesgos laborales (5%)²⁷⁷. El costo de la mano de obra se presenta en la **tabla 43.**

²⁷⁶ GERIENICE.COM. Aplicaciones de nómina, [En línea]. Colombia. Consultado [20 de agosto del 2020]. Disponible en: https://www.gerencie.com/apropiaciones-de-nomina.html#Prima_de_servicios

²⁷⁷ *Ibíd.* p. 1.

Tabla 43. Costo de mano de obra

| Cargo | Cantidad | Sueldo neto (\$) | Aporte (\$) | Auxilio de transporte (\$) | Prestaciones sociales (\$) | Total mes (\$) | Total año (\$) |
|-------------------|----------|--------------------------|-------------|----------------------------|----------------------------|------------------|-------------------|
| Ingeniero químico | 1 | 2.225.000 ²⁷⁸ | 567.375 | - | 730.468 | 3'522.000 | 42'274.000 |
| Operario | 2 | 902.797 ²⁷⁹ | 230.213 | 102.854 | 296.388 | 3'065.000 | 36'774.000 |
| Total | | | | | | 6'587.000 | 79'048.000 |

Fuente: elaboración propia

El costo de mano de obra de un ingeniero químico y dos operarios al mes y al año, es del \$6'587.000 y \$79'048.000, respectivamente.

4.2.3 Servicios. En la **tabla 44** se presentan los costos de los servicios como electricidad, agua y alcantarillado, que requiere la planta de producción de biodiésel instalada en la ciudad de Bogotá. Para determinar el costo de energía eléctrica al año, se tuvo en cuenta el consumo energético anual de los equipos instalados, esto se presenta en la **tabla 45** Los costos de servicios se estimaron para el año 2020 y pueden ser consultados en el anexo H, I y J

²⁷⁸ COMPUTRABAJO. Salario de Ingeniero Químico en Colombia. [En línea]. Colombia. Consultado [20 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://www.computrabajo.com.co/salarios/ingeniero-quimico>

²⁷⁹ INDEED. Salarios de Operario/a de producción en Colombia. [En línea]. Consultado [22 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://co.indeed.com/salaries/operario-produccion%C3%B3n-Salaries>

Tabla 44.Consumo energético por equipos de servicios

| Equipo | Consumo energético (kW/h) | Tiempo de producción (h) | Consumo energético por día (kW) |
|--|---------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| Equipo de lavado | 3,18 | 0,83 | 2,65 |
| Cortador | 0,75 | 0,8 | 0,59 |
| Extractor | 2 | 2 | 4 |
| Tanque de aceite | 2 | 0,25 | 0,5 |
| Reactor de esterificación | 5,5 | 1,5 | 8,25 |
| Sistema de evaporación del reactor de esterificación | 24 | 0,25 | 6 |
| Tanque de mezcla de metóxido | 0,75 | 1 | 0,75 |
| Reactor transesterificación | 5,5 | 1,5 | 8,25 |
| Tanque de biodiésel | 10 | 0,25 | 2,5 |
| Total por día | | | 33,49 |
| Total por mes | | | 803,92 |

Fuente: elaboración propia

Con base al consumo energético de los equipos instalados en la planta de producción de biodiésel, se determina el costo mensual y anual de energía eléctrica

Tabla 45.Costo de servicios

| Servicios | Requerimiento mensual | Unidad de medida | Costo unitario (\$) | Costo mes (\$) | Costo año (\$) |
|-------------------|-----------------------|------------------|---------------------|------------------|-------------------|
| Acueducto | 22,80 | m ³ | 17.373 | 396.203 | 4'755.000 |
| Alcantarillado | 15,99 | m ³ | 8.268 | 132.298 | 1'588.000 |
| Energía eléctrica | 803,92 | kW/h | 599 | 482.127 | 5'785.000 |
| Total | | | | 1'010.629 | 12'128.000 |

Fuente: elaboración propia

El costo de servicios al mes y al año es \$1'010.629 y \$12'127.000, respectivamente. En la **tabla 46** se presenta la recopilación de los costos fijos y costos variables para procesar 57,6 toneladas de residuos grasos de pollo y producir 344.029,25 galones de biodiésel, al año.

Tabla 46. Costo total de producción de biodiésel al año

| Costos fijos y costos variables | | Porcentaje por costo total de producción (%) |
|--|--------------------|---|
| Equipos (\$) | 269'672.000 | 31,23 |
| Servicios (\$) | 12'128.000 | 1,40 |
| Materia prima (\$) | 502'567.000 | 58,21 |
| Mano de obra (\$) | 79'048.000 | 9,16 |
| Total | 863'415.000 | 100 |

Fuente: elaboración propia

El costo total de producción anual de biodiésel partiendo de residuos grasos de pollo es de \$863'415.000, siendo el costo de la materia prima el que representa el mayor porcentaje respecto al costo total de producción, seguido de los equipos.

Uno de los retos de la industria de los biocombustibles es la búsqueda de materias primas alternativas con bajo precio de adquisición que logre disminuir los costos de producción del biodiésel²⁸⁰, si bien estos pueden variar por la disponibilidad de materia prima, según la ENTREVISTA con Luis Miguel Ramírez, investigador en Bio D S.A , Bogotá, 7 de agosto de 2020, y autores como Lombana²⁸¹, afirman que el costo de la materia prima representa entre el 60 y el 80% del costo total de producción del biodiésel. Según lo presentado en la **tabla 46**, el costo de los residuos grasos de pollo (materia prima) representa aproximadamente el 58% del costo total de producción determinado.

Como se observa en la **tabla 47**, el costo de producción del aceite de pollo representa el %53,96 del costo total de producción de biodiésel a partir de residuos grasos de pollo.

²⁸⁰ LOMBANA, Jahir. Et al. Generalidades de los biocombustibles. En: Análisis del sector biodiesel en Colombia y su cadena de suministro. 2015. Editorial Universidad del Norte. Barranquilla-Colombia. Pg, 1-9. Consultado [20 de agosto del 2020).

²⁸¹ *Ibíd.*, p. 23

Tabla 47. Costo total de producción de 81,216 toneladas aceite de pollo

| Costos fijos y costos variables | |
|---|--------------------|
| Equipos (\$) | 91'028.000 |
| Servicios (\$) | 5'381.000 |
| Grasa de pollo (\$) | 207'360.000 |
| Mano de obra (\$) | 60'661.000 |
| Costo total de producción de aceite de pollo (\$) | 364'431.000 |
| Costo de producción del aceite respecto al costo total de producción del biodiésel (%) | 42,21 |

Fuente: elaboración propia

Para esto se tuvo en cuenta los costos fijos y variables del proceso como el precio de la grasa de pollo, los equipos necesarios (lavadora, cortadora, extractor y tanque de almacenamiento de aceite), servicios y mano de obra necesaria, sólo se consideró un operario y un ingeniero químico.

4.3 ANÁLISIS DEL COSTO DE PRODUCCIÓN

Para realizar el análisis de costo de producción de biodiésel con base al proceso propuesto y la selección de equipos, llevado a cabo en el capítulo anterior, se tendrá en cuenta el precio actual del biodiésel, la producción de aceite de palma, en Colombia y el precio del aceite de pollo importado.

Para estimar la relación de precio de venta y costo de producción anual (\$863'415.000), si se espera recuperar lo invertido en un periodo de un año, en el cual se obtendrá 344.030 galones de biodiésel, el precio de venta de este biocombustible a partir de residuos grasos de pollo será de \$9.500 por galón, de esta manera al ser comparado con el precio actual de biodiésel en Colombia, cuyo valor es de \$11.550 por galón²⁸², resulta más económico.

Siendo el aceite de palma, el aceite más empleado como materia prima en la producción de biodiésel en Colombia²⁸³, su costo de producción se establecerá

²⁸² FEDEBIOCOMBUSTIBLES. Precios del biodiesel. [Sitio web]. Bogotá. Consultado [15 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://www.fedebiocombustibles.com/estadistica-precios-titulo-Biodiesel.htm>

²⁸³ EL COLOMBIANO. ROJAS, Juan Fernando. Bioenergía, el reto de nuevos combustibles. [En línea]. 21 de Julio del 2011. Bogotá. [Consultado: 4 de Julio de 2020]. (2012) Disponible en: <https://fedebiocombustibles.com/nota-web-id-806.htm>

como punto de comparación para analizar el costo de producción del aceite de pollo.

Según Fedepalma, el costo de producción de una tonelada de aceite crudo de palma en el año 2018 fue de \$1'339.625, en el cual se tuvo en cuenta los costos de plantación, gestión de cultivos y los costos fijos y variables del procesamiento del racimo de fruto fresco para la extracción del aceite. Por el contrario, el costo de producción de una tonelada de aceite de pollo, según el proceso propuesto en el capítulo dos, fue de \$4'487.179. Los cálculos correspondientes pueden ser consultados en el anexo K.

De esta manera y considerando que la producción de aceite de pollo es 70,14% más costosa que la producción de aceite de palma, desde otra perspectiva, se tiene en cuenta el precio de venta del aceite de pollo, cuyo valor importado es de \$457/kg²⁸⁴ y, al compararlo con el valor del aceite de palma, cuyo valor es de \$2.261/kg, resulta 79.8% más económico el aceite de pollo que el aceite de palma.

Con base a lo mencionado, si para producir una tonelada de aceite de pollo el costo de producción es de \$4'487.179 y el valor importado de una tonelada de aceite de pollo es de \$457.000, resultaría un 89,8% más rentable comprarlo que producirlo.

Así, si el costo de producción anual de biodiésel, con base al proceso propuesto en el capítulo anterior, es de \$863'415.000, procesando 400 kg de residuos grasos de pollo al día y, se evidencia que el 42,21% del costo de la producción del biodiésel corresponden al costo de la producción del aceite de pollo, los costos anuales de producción se puede reducir aproximadamente a un 30%, si se produce la misma cantidad de biodiésel a partir de aceite de pollo importado y no, a partir de residuos grasos de pollo, es decir, considerando sólo la etapa de obtención y purificación del biodiésel. Los cálculos correspondientes pueden ser consultados en el anexo K

²⁸⁴ ALIBABA.COM. Aceite de grasa de pollo puro barato. [En línea]. Consultado [25 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://m.spanish.alibaba.com/amp/p-detail/62007675984.html>

5. CONCLUSIONES

- Tanto la producción como el consumo de pollo en Colombia, ha aumentado considerablemente en los últimos años, en el año 2018 el consumo per cápita de carne de pollo fue de 32,07 kg/año. Con este aumento en el consumo de esta proteína, la cantidad de residuos grasos generados en las plantas de beneficio de aves asciende cada vez más, el valor de producción mensual de estos residuos puede alcanzar las 6,13 toneladas
- Aunque no hay un proceso estandarizado para la producción de biodiésel a partir de residuos grasos de pollo, se puede concluir que tras extraer el aceite de pollo por fusión en seco a una temperatura entre 70 y 100 °C, este, al tener un alto contenido de AGL (>5%) primero deber ser tratado con H₂SO₄, mediante esterificación, hasta lograr reducir dicho valor al menos del 1% y así, poder realizar la transesterificación a 60°C por 1 ó 2 horas, con una relación molar alcohol:aceite de 6:1 y, empleando 1% p/p de NaOH como catalizador y metanol, como alcohol.
- Para producir diariamente 315 litros de biodiésel y obtener 321,92 litros de aceite de pollo, a escala piloto, a partir de 400 kilogramos de residuos grasos se requieren de una lavadora de alimentos, una cortadora (también de alimentos), un extractor de aceite (al vacío), dos reactores tipo batch y un tanque de lavado del biodiésel, junto a los tanque de almacenamiento del aceite, metanol y biodiésel, para así lograr un rendimiento del proceso de obtención de biodiésel respecto a la materia prima y respecto al aceite extraído, del 61,48% y 87,2%, respectivamente.
- El costo de producción para obtener 344.030 galones al año de biodiésel, procesando 400 kilogramos de residuos grasos de pollo al día, es de \$863'415.000, del cual 58,21% corresponde al costo de la materia prima y 42,20% al costo de producción para obtener sólo el aceite de pollo. De esta manera, resulta más rentable producir biodiésel a partir de aceite de pollo que de residuos grasos de pollo.

6. RECOMENDACIONES

- Se sugiere realizar un estudio detallado de la cantidad de residuos grasos de pollo producido en las plantas de beneficio y en las distribuidoras de menor tamaño como las plazas de mercado y los puntos de venta de carne de pollo.
- Se recomienda validar los costos de producción de biodiésel a partir de residuos grasos de pollo mediante un desarrollo experimental con base a las condiciones de operación recopiladas en este trabajo.
- Se sugiere determinar el rendimiento de la obtención de biodiésel a partir de residuos grasos de pollo empleando catalizadores más económicos como el ácido clorhídrico (HCl), tanto en la esterificación del aceite, como en el lavado del biodiésel y, empleando metilato de sodio en la transesterificación, al ser el reactivo más usado industrialmente en la producción de este biocombustible.

BIBLIOGRAFÍA

ABRAHAM, John, et al. Biodiesel Production from Broiler Chicken Waste. World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering. 2015, 19. 1190-1193 [Consultado 20 mayo, 2020]. ISNI:0000000091950263. Disponible en: <https://publications.waset.org/10002965/biodiesel-production-from-broiler-chicken-waste>

AGUILERA DÍAZ, María. Documentos de trabajo sobre economía regional. {En línea}. Diciembre de 2014 {21 Abril de 2020}. Disponible en: (https://www.banrep.gov.co/docum/Lectura_finanzas/pdf/dtser_214.pdf)

AINA. Mejores técnicas para la industria de aprovechamiento de subproductos de origen animal. [En línea]. [Consultado 14, agosto, 2020]. Disponible en: <http://www.prtr-es.es/data/images/La%20industria%20de%20subproductos%20de%20origen%20animal->

ALBITRES, Luis. [En línea] Extracción por solvente y caracterización del aceite de la semilla de té (Camellia Sinensis). Universidad Nacional Agraria de la selva. Disponible en: <http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/176/FIA-09.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ALFONSO ALVAREZ, Juan Antonio. Obtención de biodiesel a partir de aceites usados en casa habitación de la comunidad. Chihuahua, 2013, 78p. Trabajo de grado (Maestría en ciencias en energías renovables con especialidad en biomasa). Centro de investigación en materiales avanzados. [Consultado 30 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/349/1/Tesis%20Juan%20Antonio%20Alfonso%20Alvarez.pdf>

ALFONSO, Katherin. Producción nacional de biodiésel podría atender la demanda del biocombustible. {En línea}. 26 Septiembre de 2017. Consultado [22 de Abril del 2020]. Disponible en: (<https://www.larepublica.co/economia/produccion-nacional-de-biodiesel-podria-atender-la-demanda-del-biocombustible-2552357>)

ALPTEKIN, Ertan y CANAKCI, Mustafa. Optimization of pretreatment reaction for methyl ester production from chicken fat. En: ScienceDirect [en línea]. 2010, 90 (8). 2630-2638 [Consultado 20, mayo, 2020] Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236111001815>

ALPTEKIN, Ertan, CANAKCI, Mustafa y SANLI, Huseyin. Biodiesel production from vegetable oil and waste animal fats in a pilot plant. Waste Management. 2014, 34. 2146-2154. [Consultado 20, mayo,2020] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.07.019>

ANTHONY J, K y AUFMAN R, J. Oleoquímicos tendencias mundiales. Revista Palmas. [En línea]. 1991. Vol. 12. No 3. Pg. 61. [Consultado 18 de abril 2020]. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/294/294>

ARBELAEZ, MARIA y RIVERA, MARCELA. Diseño conceptual de un proceso para la obtención de biodiesel a partir de algunos aceites vegetales colombianos. Título para optar a ingenieras de procesos. Universidad EAFIT. Medellín. 2007. Consultado [18 de Agosto del 2020]. Disponible en: <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/365>

ARIAS, DIANA y HERRERA, HEIDY. Evaluación de un proceso de transformación de grasas de pollo en materia prima óptima para la incorporación en procesos industriales. [En línea]. Trabajo de grado para optar por el título de especialista en transformación de residuos agroindustriales. Universidad de Pamplona. Colombia.:2008. [Consultado 20 de julio de 2020]. Disponible en: http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_101/recursos/01general/27112014/proyectodianaheydi.pdf

ARISTIMUNHA, Patricia. Uso de biosurfactantes: La decisión inteligente en el actual escenario de cambios en la cadena de soja/biodiesel. En: AviNews. [En línea]. Brasil. Consultado [02 de marzo del 2020]. Disponible en: <https://avicultura.info/biosurfactantes-lysoforte-kemin/>

AVELLANEDA VARGAS, Fredy A.. Producción y caracterización de Biodiesel de palma y aceite reciclado mediante un proceso Batch y un proceso continuo con reactor helicoidal [en línea]. Tesis doctoral. Tarragona: Universitat Rovira I Virgili. Facultad de ingenierías. Departamento de ingeniería química, 2010. 87 p. [Consultado el 8 de Julio de 2020]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/2d95/be0fd7b37feb254a2dbc88613682affafcd.pdf>

BANCO DE LA REPÚBLICA.. Documentos de trabajo sobre economía regional.. [en línea]. 2014, 14. 1-55 [Consultado 20, mayo,2020] ISSN 1692 -3715 Disponible en:https://www.banrep.gov.co/docum/Lectura_finanzas/pdf/dtser_214.pdf

BASTO, Del Pilar. Simulación y evaluación económica de proceso de producción de biodiesel a partir del aceite de palma, empleando reactores de película líquida-líquida operados en contracorriente y co-corriente. [En línea]. Título de Magister en Ingeniería – Ingeniería Química. Universidad Nacional de Colombia. 2016.

Consultado [20 de agosto del 2020]. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/55612/7/53108542.2016.pdf>

BHATTI, Haq, et. Al. Biodiesel production from waste tallow. Fuel. 2008, 87. 2961-2966 [Consultado 20, mayo,2020] Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236108001567>

BIG DUTCHMAN. Avicultura.com. [Sitio web]. [Consultado 21 Abril de 2020]. Disponible en: <https://avicultura.com/colombia-se-preve-superar-los-17-m-de-tn-de-pollo-en-2019/>

BUENDÍA TAMARIZ, Mali Nay; TREJO CALZADA, Ricardo y PEDROZA SANDOVAL, Aurelio. Characterization of Biodiesel Produced from Chicken Fat and Pennycress Oil using Different Concentrations of Basic Catalysts. En: ResearchGate [en línea]. Julio, 2015 [Consultado el 11 de julio de 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/281559864_Characterization_of_Biodiesel_Produced_from_Chicken_Fat_and_Pennycress_Oil_using_Different_Concentrations_of_Basic_Catalysts

BULLA, Edwin. Diseño del proceso de producción del biodiesel a partir de aceites de fritura. Trabajo de grado para optar a Magister en Ingeniería – Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2014. Consultado [30 de abril del 2020]. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/45935/1/02300238.2014.pdf>

CASTAÑO, Andrea. Estudio y obtención de biodiesel a partir de residuos grasos de origen bovino. [En línea]. Trabajo de grado para optar el título de Químico Industrial. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira Risaralda. 2010. Consultado [15 de junio del 2020]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/f37d/645cb7ca48e5da5e8a7184688956b8f7533e.pdf>

CERVERA, José. La invención del pollo. {En línea}. 9 Febrero de 2015. [Consultado el 21 Abril de 2020]. Disponible en: https://www.eldiario.es/cultura/invencion-pollo_0_339116719.html.

CESPEDES, Alfaro y FERNANDA, María. Escalamiento de una planta para la producción de biodiesel a partir de aceite crudo de palma. Trabajo de grado para optar a ingeniero químico. Universidad de Costa Rica. Costa Rica. 2016. Consultado [20 de Agosto del 2020]. Disponible en: <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/xmlui/handle/123456789/10057>

CHAKRABORTY, Rajat, GUPTA, Abhishek.K. y CHOWDHURY, Ratul. Conversion of slaughterhouse and poultry farm animal fats and wastes to biodiesel: Parametric sensitivity and fuel quality assessment. Renewable and Sustainable Energy

Reviews. 2014, 29. 120-134. [Consultado 20, mayo,2020] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.082>

COMOFUNCIONA, R José Luis. ¿Cómo funciona una bomba centrífuga?. [Sitio web]. Consultado [28 de septiembre del 2020]. Disponible en: <https://comofunciona.co/una-bomba-centrifuga/>

DANE. Censo nacional de población y vivienda. [En línea]. Colombia. 2018. [Consultado 20 de julio de 2020]. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/files/censo2018/infografias/info-CNPC-2018total-nal-colombia.pdf>

DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA [Sitio web]. Colombia. DANE. Boletín mensual insumos y factores asociados a la producción agropecuaria. [Consultado 20 de julio de 2020]. Disponible en: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Bol_Insumos_jun_2015.pdf

DICCIONARIO DE LA LENGUA ESPAÑOLA [sitio web]. Madrid, España. DEL. Significado palabra “Aceite”. [Consultado: 5 de Julio de 2020]. Disponible en: <https://dle.rae.es/aceite>

Dinero. [En línea]. Colombia: Enero, 2018. [Consultado: 4 de Julio de 2020]. Disponible en: <https://www.dinero.com/pais/articulo/consumo-de-pollo-y-huevos-esta-creciendo-en-colombia/263805>

DINERO. Los costos y el tiempo que tarda importar y exportar una mercancía en Colombia. [En línea]. 22 de septiembre del 2017. Colombia. Consultado [22 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://www.dinero.com/economia/articulo/costos-y-tiempo-que-tarda--importar-y-exportar-una-mercancia-en-colombia/250158>

ECOLOGISTAS EN ACCION. Los biocombustibles de palma y soja agravarán la deforestación mundial y la pérdida de biodiversidad. [En línea]. Agrocombustibles. 10 de marzo del 2020. Consultado [20 de mayo del 2020]. Disponible en: <https://www.ecologistasenaccion.org/138863/los-biocombustibles-de-palma-y-soja-agravan-la-deforestacion-mundial-y-la-perdida-de-biodiversidad/>

EK LEÓN, Luis Eduardo. Estudio de factibilidad de producción de biodiesel a partir de residuos grasos de la industria avícola. [En línea]. Tesis. Universidad Veracruzana, Orizaba, Veracruz: 2019. [Consultado 15 Julio de 2020]. Disponible en: <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/1944/49331/EkLeonLuis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

EL COLOMBIANO. ROJAS, Juan Fernando. Bioenergía, el reto de nuevos combustibles. [En línea]. 21 de Julio del 2011. Bogotá. [Consultado: 4 de Julio de 2020]. (2012) Sitio Web: <https://fedebiocombustibles.com/nota-web-id-806.htm>

EL QUINDIANO: Don pollo: pionera en tecnología, innovación y generación de empleo en la región. [En línea]. Colombia: 28 de Julio de 2018. [Consultado 26 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.elquindiano.com/noticia/4595/don-pollo-pionera-en-tecnologia-innovacion-y-generacion-de-empleo-en-la-region>

EL SITIO AVÍCOLA. AMEVEA Colombia: 45 años de historia y logros [Sitio web]. 14 de noviembre de 2013. Disponible en: <http://www.elsitioavicola.com/articles/2480/amevea-colombia-45-aos-de-historia-y-logros/>

EL SITIO AVÍCOLA. Harinas de subproductos avícolas. [Sitio web]. Colombia. 28 de diciembre de 2011. [Consultado 6 de abril de 2020]. Disponible en: <http://www.elsitioavicola.com/articles/2078/harina-de-subproductos-avacolas/>

EL TIEMPO. Fedebiocombustibles. Biodiesel de manuelita, tras la conquista del mercado europeo. [En línea]. Bogotá. Consultado [22 de abril del 2020]. Disponible en: <https://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-3276.htm>

ENCINAR, J.M, et. al. Study of biodiesel production from animal fats with high free fatty acid content. Bioresource Technology. 2011, 102. 10907-10914 [Consultado 20, mayo, 2020] doi: 10.1016/j. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/51713770_Study_of_biodiesel_production_from_animal_fats_with_high_free_fatty_acid_content

ESENCIA DE OLIVO. Calidades del Aceite de Oliva [sitio web]. España. [Consultado el 8 de Julio de 2020]. Disponible en: <http://www.esenciadeolivo.es/aceite-de-oliva/tipos-de-aceite-de-oliva/calidad-del-aceite-de-oliva/>

EVONIK. Nuestros mercados: Biodiesel. [En línea]. Consultado [20 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://central-south-america.evonik.com/es/products/nuestros-mercados/biodiesel-129709.html>

FAYYAZI, E., et. al. An ultrasound-assisted system for the optimization of biodiesel production from chicken fat oil using a genetic algorithm and response surface methodology. Ultrasonics Sonochemistry. 2015, 26. 312-320 [Consultado 20, mayo, 2020] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.03.007>

FEDEBIOCOMBUSTIBLES. Bioenergía, el reto de nuevos combustibles. [En línea]. Bogotá. [Consultado: 4 de Julio de 2020]. Disponible en: <https://fedebiocombustibles.com/nota-web-id-806.htm>

FEDEBIOCOMBUSTIBLES. Boletín No 30: Biocombustibles HOY. Bogotá [En línea]. [Consultado: 4 de Julio de 2020]. Disponible en: <https://fenavi.org/comunicados-de-prensa/el-sector-avicola-crecio-45-en-2018/>

FEDEBIOCOMBUSTIBLES. Contenidos: Biodiesel de manuelita, tras la conquista del mercado europeo. [En línea]. Bogotá. [Consultado: 4 de Julio de 2020]. Disponible en: <https://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-3276.htm>

FEDEBIOCOMBUSTIBLES Información estadística sector biocombustibles: Biodiésel de palma de aceite. [Sitio WEB] Bogotá D.C. 2019. El tiempo [4, marzo, 2020]. Disponible en: www.fedebiocombustibles.com/estadistica-mostrar_info-titulo-Biodiesel.htm

FEDEBIOCOMBUSTIBLES. Método de producción de biodiésel podría reducir los inconvenientes de los combustibles. [En línea]. Bogotá. [Consultado: 4 de Julio de 2020]. Disponible en: www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-986.htm

FEDEBIOCOMBUSTIBLES. Preguntas Frecuentes de los Biocombustibles. [Sitio WEB] Bogotá D.C. La entidad. [Consultado 02 de marzo del 2020]. Disponible en: <https://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-923.htm>

FEDERACIÓN NACIONAL DE AVICULTORES. INFORMACIÓN ESTADÍSTICA, ESTADÍSTICAS DEL SECTOR. {Sitio web}. {Consultado 21 Abril de 2020}. Disponible en: <https://fenavi.org/informacion-estadistica/#1538603557100-1385449a-253d>

FEDNA. Grasas elaboradas, técnicas o industriales. [En línea]. Consultado [20 de agosto del 2020]. Disponible en: http://www.fundacionfedna.org/ingredientes_para_piensos/grasas-elaboradas-t%C3%A9cnicas-o-industriales

FENAVI. Estadísticas del sector (producción. [En línea]. Consultado [2 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://fenavi.org/informacion-estadistica/#1552493998475-e6f6f123-90da>

FENAVI. Fenavi registra récord en producción de pollo y huevo en el 2018. [En línea]. Bogotá. [Consultado: 4 de Julio de 2020]. Disponible en: <https://fenavi.org/comunicados-de-prensa/el-sector-avicola-crecio-45-en-2018/>

FENAVI y MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. 2014. Bogotá. Consultado [14 de marzo del 2020]. Disponible en: https://fenavi.org/wp-content/uploads/2018/05/GUIA_AMBIENTAL_SUBSECTOR_AVICOLA.pdf

FENGHI. FENGHI: ¿Cómo funciona la cromatografía?. [En línea]. [Consultado: 4 de Julio de 2020]. Disponible en: <https://www.fenghi.es/pages/cromatografia#:~:text=%C2%BFC%C3%B3mo%20funciona%20la%20cromatograf%C3%ADa%3F,aceites%20esenciales%2C%20son%20muy%20complejas.&text=La%20base%20de%20esta%20separaci%C3%B3n,m%C3%B3vil%20y%20la%20fase%20estacionaria.>

FOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, United Nations. Manual de técnicas para laboratorio de nutrición de peces y crustáceos. [En línea]. México. [Consultado 02 de Marzo de 2020]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/AB489S/AB489S03.htm> Disponible en: <http://www.fao.org/3/AB489S/AB489S03.htm>

Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal. FEDNA: Tablas FEDNA composición Alimentos Valor Nutritivo: NORMAS Fedna para la formulación de piensos: [Control de calidad de materias primas]. [En línea]. España. [Consultado: 4 de Julio de 2020]. Disponible en: http://www.fundacionfedna.org/ingredientes_para_pienso/grasas-elaboradas-t%C3%A9cnicas-o-industriales

GALEANO, Cristhian y GUAPACHA, Esteban. Aprovechamiento y caracterización de los residuos grasos del pollo para la producción de un biocombustible (biodiesel). [En línea]. Trabajo de grado para optar el título de Químico Industrial. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira Risaralda. 2011. Consultado [15 de junio del 2020]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/0fb1/64d8c7a0f659c63d8a53884b4beaf80a00e7.pdf>

GESTION. En producción de biocombustible de brasil, la grasa es buena. 20 de enero del 2020. Consultado [15 de junio del 2020]. Disponible en: <https://gestion.pe/mundo/internacional/en-produccion-de-biocombustible-de-brasil-la-grasa-es-buena-noticia/>

GRASAS Y ACEITES VEGETALES. Saponificación [sitio web]. [Consultado: 15 de Julio de 2020]. Disponible en: <https://grasas-y-aceites-vegetales.webnode.com.co/aplicaciones/saponificacion/>

GÜRÜ, Metin, et. al. Biodiesel production from waste chicken fat based sources and evaluation with Mg based additive in a diesel engine. Renewable Energy. 2010, 35. 637-643 [Consultado 20, mayo,2020] Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148109003589>

GUTIÉRREZ MENDOZA, Mary Triny y PÉREZ MONTANO, Néstor Antonio. Diseño de una planta piloto de producción de biodiesel. [en línea]. Proyecto para optar al título de Ingeniero Mecánico. Universidad nacional de ingeniería. Managua: 2011 [Consultado 01, octubre, 2020] Disponible en: <http://ribuni.uni.edu.ni/id/eprint/1030/contents>

HERNÁNDEZ, M.C. et. al. Chicken fat and biodiesel viscosity modification with additives for the formulation of biolubricants. Fuel. 2017, 198. 42-48 [Consultado 20, mayo,2020] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.12.039>

HERRERA RESTREPO, Juan Alberto y VELEZ, Julián Andrés. . Caracterización y aprovechamiento del aceite residual de frituras para la obtención de un combustible (biodiesel). [en línea] Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira: 2008. [Consultado 02 de marzo del 2020]. Disponible en: <https://core.ac.uk/reader/71395470>

HERVÉ, Jérôme. Diseño conceptual de una planta de biodiesel. Título para optar a Ingeniero Civil Mecánico. Universidad de Chile. Santiago de Chile. 2007. Consultado [20 de agosto del 2020]. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/104538/Diseno-conceptual-de-una-planta-de-biodiesel.pdf?sequence=3>

INDEED. Salarios de Operario/a de producción en Colombia. [En línea]. Consultado [22 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://co.indeed.com/salaries/operario-producci%C3%B3n-Salaries>
Información acerca de Rendering. [En línea]. Mavitec. [Consultado 03 de Julio de 2020]. Disponible en: <https://mavitecrendering.com/es/rendering-process/informacion-acerca-de-rendering/>

INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO – ICA. Resolución 3650 del 13 de noviembre del 2014. Consultado [20 de marzo del 2020]. Disponible en: [https://www.ica.gov.co/getattachment/3c2f3642-85a5-4622-91b5-5a31597c2cb4/2014R3-\(1\).aspx](https://www.ica.gov.co/getattachment/3c2f3642-85a5-4622-91b5-5a31597c2cb4/2014R3-(1).aspx)

INSTITUTO NACIONAL DE VIGILANCIA DE MEDICAMENTOS Y ALIMENTOS INVIMA. Planta de beneficio de aves. [Sitio web]. 10 de Julio del 2020. [Consultado el 20 de julio del 2020]. Disponible en: <https://www.datos.gov.co/Salud-y-Protecci-n-Social/PLANTA-DE-BENEFICIO-DE-AVES/x76t-yxt8>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C. El instituto, 2018 ISBN 9789588585673, 153 p.

JBS S.A. JBS: Fazer o Bem Faz Bem. [En línea]. Brasil. [Consultado: 4 de Julio de 2020]. Disponible en: <https://jbs.com.br/sobre/jbs/>

KESSEL, Nelson. ASTM establece las normas para el biodiésel. [En línea] USA: 2009. [Consultado 02, marzo, 2020]. Disponible en: https://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPJF09/nelson_spjf09.html

KIRUBAKARAN, M. y ARUL MOZHI, V. A comprehensive review of low cost biodiesel production from waste chicken fat. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [En línea]. 2018, 82 (1). 390-401 [Consultado 20, mayo, 2020] Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211731287X?via%3Dihub>

KNOTHE, Gerhard. Calidad del combustible Biodiesel y la norma ASTM. Revista Palmas [En línea] 2010, 31 (especial). 162-171 [Consultado 03 de marzo del 2020]. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/download/1563/1563/>

KNOTHE, Gerhard; MATHEAUS, Andrew C. y RYAN III, Thomas W. Cetane numbers of branched and straight-chain fatty esters determined in an ignition quality tester. [En línea]. ScienceDirect. Diciembre de 2002, pg 972-975. [Consultado 5 de Julio de 2020]. Disponible en: <https://naldc.nal.usda.gov/download/2555/PDF>

LA FUNDACIÓN DEL AGUA. Aquae fundación. [Sitio web]. Madrid. [Consultado 1 de Julio de 2020]. Disponible en: <https://www.fundacionaquae.org/agua-y-alimentos/>

LA REPÚBLICA. La Unión Europea establece límites al uso del aceite de palma para producir biocombustibles. [Sitio WEB] Bogotá D.C. 2019. La República. [20, abril, 2020] Disponible en: www.larepublica.co/globoeconomia/la-ue-establece-limites-al-aceite-de-palma-en-biocombustibles-2839164

LEIVA BAUTISTA, Claudia. Control de calidad del biodiesel. {En línea}. 5 Febrero de 2012. {23 de Abril de 2020}. Disponible en: https://issuu.com/terera/docs/informe_investigaci_n_11

LEIVA BAUTISTA, Claudia. Subproductos generados en el proceso de producción de biodiesel a partir de aceite de tempate / [en línea]. Libro. Universidad Francisco Gavidia. San Salvador, El Salvador: 2012 [Consultado 03 de marzo del 2020]. Disponible en: http://icti.ufg.edu.sv/doc/SUBPRODUCTOS_DE_BIODISEL.pdf

LENOIR, Christian. Análisis de la producción de biodiesel. [En línea]. Consultado 22 Abril de 2020. Disponible en: <http://www.ingenieroambiental.com/biodiesel/biodiesel.htm>

LIN, Chia-Wei y TSAI, Shuo-Wen. Production of biodiesel from chicken wastes by various alcohol-catalyst combinations. Department of Food Science a Journal of Energy in Southern Africa. [En línea]. 2015. 26 (1) [20 de junio del 2020]. Disponible en: http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1021-447X2015000100005

LOCTITE TEROSON. Pros y contras del biodiesel respecto al diésel y la gasolina. [Sitio WEB] España. Ruta 401. [Consultado 02, marzo, 2020]. Disponible en: <https://blog.reparacion-vehiculos.es/pros-y-contras-del-biodiesel>

LOMBANA, Jahir. Et al. Generalidades de los biocombustibles. En: Análisis del sector biodiesel en Colombia y su cadena de suministro. 2015. Editorial Universidad del Norte. Barranquilla-Colombia. Pg, 1-9. Consultado [20 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/libro/579409.pdf>

MANUEL, Jose. Polleria somolinos: Las partes del pollo [En línea]. Madrid. 07 de noviembre del 2019. [Consultado 22 de julio de 2020]. Disponible en: <https://polleriasomolinos.com/partes-del-pollo/#:~:text=Partes%20de%20Pollo%3A%20Pechuga&text=Es%20la%20parte%20del%20pollo,de%20todas%20las%20partes%20pollo.>

MANRIQUE, Alba, TORRES, Francisco y FAJARDO, Margie. Diseño e instalación de un tanque aforador y manómetros para la estación de bombas del laboratorio de hidráulica de la Universidad Cooperativa de Colombia Sede Villavicencio. [En línea]. Trabajo de grado para optar a título de Ingeniero Civil. Universidad Cooperativa de Colombia. Villavicencio. 2019. Consultado [01 de octubre del 2020]. Disponible en: <https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/12364/1/2019-Dise%C3%B1o-Manometros-Bombas..pdf>

MARTINEZ, Gilma. PONCE, Roberto y REYES, Laura. Diseño del proceso químico a escala de laboratorio para la producción de biodiesel a partir de grasa de pollo. [En línea]. Trabajo de grado para optar a Ingeniero Químico. Universidad de Salvador. El Salvador. 2007. Consultado [19 de agosto del 2020]. Disponible en: http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/2042/1/Dise%C3%B1o_del_proceso_qu%C3%ADmico_a_escalade_laboratorio_para_la_producci%C3%B3nde_Biodiesel_a_partir_de_grasa_de_pollo.pdf

MARWAHAA, Akshey., et al.. Waste materials as potential catalysts for biodiesel production: Current state and future scope. [En línea]. 2018, 181 (1). 175-186. [Consultado 4, junio, 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382018311251>

MEDINA VILLADIEGO, Mauricio; OSPINO ROA, Yesid y TEJADA BENITEZ, Lesly. Esterificación y transesterificación de aceites residuales para obtener biodiesel. En: Revista Luna Azul [en línea]. Manizales: Universidad de Caldas, enero-junio, 2015, p. 25-34. [Consultado el 11 de julio de 2020]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3217/321733015003.pdf>

MEDIO AMBIENTE AUGM. UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES. La Plata, Argentina: 2012 [Consultado 03 de marzo del 2020]. Disponible en: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/26938/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y

MERA, José, et al. Caracterización fisicoquímica de biodiésel derivado de grasa de pollo como alternativa de producción limpia en la sabana de Túquerres – Nariño. SENA. 2018. Nariño. Consultado [20 de mayo del 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/332742341_Caracterizacion_fisicoquimica_de_biodiesel_derivado_de_grasa_de_pollo_como_alternativa_de_produccion_limpia_en_la_Sabana_de_Tuquerres-Narino

METHANOL INSTITUTE. Manual de manipulación segura del metanol. [En línea]. Enero del 2013. Consultado [25 de agosto del 2020]. Disponible en: http://www.methanol.org/wp-content/uploads/2016/06/Methanol-Safe-Handling-Manual-Final_Spanish.pdf

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE Y MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución No. 90963. Artículo 4°. Bogotá D.C. El instituto. 2014. Hoja No.4

MINISTERIO DE TRABAJO Y ECONOMIA SOCIAL. Metilato de sodio. 2018. España. Consultado [25 de agosto del 2020]. Disponible en: https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=es&p_card_id=0771&p_version=2

MOLLEJO, Verónica. Alimento: Desmontando mitos: ¿de verdad la piel del pollo produce cáncer? [En línea]. 17 de febrero del 2020. [Consultado 20 de julio de 2020]. Disponible en: https://www.alimento.elconfidencial.com/bienestar/2018-09-03/piel-pollo-cancer-mitos_1606508/

MONTENEGRO, Manuel; SIERRA, Fabio y GUERRERO, Carlos. Producción y caracterización de biodiesel a partir de aceite de pollo. En: Informador técnico. Colombia. Edición 76. Diciembre 2012. Pg. 62 – 71. Consultado [23 de mayo del 2020]. Disponible en: http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/29/34

NIROSA. Diagramas de flujo de proceso (PFD) y P&ID. [Sitio WEB]. Madrid. Nirosa, Engineering in progress [20, agosto, 2020]. Disponible en: <https://nirosa.es/servicio/diagramas-de-flujo-de-proceso-pfd/>

NUHU, S.K. y KOVO, A.S. Production and Characterization of Biodiesel from Chicken Fat. Scholarly Journal of Agricultural Science. 2015, 5(1). 22-29 [Consultado 20, mayo, 2020] ISSN 2276-7118 Disponible en: <http://www.scholarly-journals.com/sjas/archive/2015/January/pdf/Nuhu%20and%20Kovo.pdf>

OCDE/FAO (2019), “OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas”, Estadísticas de la OCDE sobre agricultura (base de datos). Consultado [30 de mayo del 2020]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/ca4076es/CA4076ES.pdf>

OCDE/FAO. “Biocombustibles”, en OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2017-2026, OECD Publishing, París. Consultado [16 de abril del 2020]. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2017-13-es

RADHA, et al. Biochemical and kinetic evaluation of lipase and biosurfactant assisted ex novo synthesis of microbial oil for biodiesel production by *Yarrowia lipolytica* utilizing chicken tallow. Process Biochemistry. [En línea]. 2020, 95 (1) 17–29 Consultado [20 de junio del 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359511319317611>

PALLARES, LEIDY. Análisis del rendimiento de grasa en canal campesina. Trabajo de grado en zootecnia. Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña. Ocaña. 2015. Consultado [20 de junio del 2020]. Disponible en: <http://repositorio.ufpso.edu.co:8080/dspaceufpso/bitstream/123456789/850/1/27814.pdf>

PÉREZ VILLA, María Victoria y VILLEGAS CALLE, Rodolfo Alejandro. Procedimientos para el manejo de residuos orgánicos avícolas. Medellín, 2009, 71p. Trabajo de grado (pregrado en zootecnia). Universidad de Antioquia. Facultad de ciencias agrarias. Escuela de producción agropecuaria. [Consultado 10 abril del 2020]. Disponible en: [http://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/1411/1/PerezMaria_2009_Proc edimientosManejoResiduos.pdf](http://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/1411/1/PerezMaria_2009_Proc%20edimientosManejoResiduos.pdf)

PILOTO, Ramón, et al. Extracción de aceites de origen vegetal. Universidad tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría”. 2017. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/317007345 Extraccion de aceites de o rigen vegetal](https://www.researchgate.net/publication/317007345_Extraccion_de_aceites_de_origen_vegetal)

PISARELLO, Laura. Producción de biodiesel: equilibrio fisicoquímico y cinética de esterificación y transesterificación con diferentes catalizadores y alcoholes [en línea]. Tesis. Universidad nacional del litoral, Argentina. [Consultado el 10 de julio de 2020]. Disponible en: <http://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8080/bitstream/handle/11185/291/tesis.pdf>

POLLOS BUCANERO. Así producimos alimentos. [Sitio web]. Colombia; [Consultado 26 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.pollosbucanero.com/asi-producimos-alimentos>

PUNSUVON, V, et. al. The Optimization of Esterification Reaction for Biodiesel Production from Animal Fat. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2015, 37 (8). 846-853 [Consultado 20, mayo,2020] ISSN: 1556-7036 <https://doi.org/10.1080/15567036.2011.594853>

RAFFINO, María Estela. Costos de producción. En: Concepto.de. 29 de agosto del 2020. Argentina. Consultado [2 de septiembre del 2020]. Disponible en: <https://concepto.de/costos-de-produccion/>

RAMIREZ, Carlos. Ingeniería básica de una planta piloto de producción de 13 kg/h de biodiesel a partir de microalgas y mediante transesterificación con bioetanol supercrítico. Trabajo de grado ingeniería química y ambiental. Universidad de Sevilla. Sevilla. 2011. Consultado [13 de julio del 2020]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/20268/fichero/PFC.pdf>

RAMIREZ NIEVES, Tereza. Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de aceites y grasas residuales potenciales para la producción de biocombustibles.[En línea]. Trabajo académico de maestro en ciencia y tecnología en especialidad de ingeniería ambiental. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Electroquímica, S.C. México. 2018. Consultado [16 de mayo del 2020]. Disponible en:https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/369/1/Evaluaci%C3%B3n%20de%20las%20propiedades%20fisicoqu%C3%ADmicas%20de%20acites%20y%20grasas%20residuales%20potenciales%20para%20la%20producci%C3%B3n%20de%20biocombustibles_rees.pdf

RAMOS, María., et.al. Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties. En: ScienceDirect [En línea]. Enero, 2009, Volumen 100, p. 261-268. [Consultado: 15 de Julio de 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852408005464?via%3Dihub>

RICCI, Osvaldo Enrique. Obtención de grasa de origen animal. [En línea]. Engormix. (10 de Octubre de 2018). [Consultado 03 de Marzo de 2020]. Disponible en: <https://www.engormix.com/balanceados/articulos/obtencion-grasa-origen-animal-t42855.htm>

RINCÓN M, Sanda y MARTÍNEZ, Daniel. Análisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria. [en línea]. 2009, 30. (2) [Consultado el 10 de julio de 2020] Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1432>

RÍOS, Luis Alberto, et al. Producción de biodiésel. En; Biodiésel: Producción, calidad y caracterización. Medellín: Universidad de Antioquia, 2009. 16-44. [Consultado 16 de abril 2020]. Disponible en: <https://books.google.com.co/books?id=viaApKhNqRYC&printsec=frontcover&dq=biodiesel&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjWgIP80OvoAhXGI-AKHSpcC0kQ6AEIKDAA#v=onepage&q&f=false>

RIVERA, Dafne. [En línea] Caracterización de aceites esenciales por cromatografía de gases de especies del genero piper y evaluación de la actividad citotóxica. Universidad San Carlos de Guatemala. Mayo de 2008. Disponible en: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/06/06_2677.pdf

RODRÍGUEZ ARZAVE, J. A, et al. Índice de saponificación de cinco mantecas determinado mediante un micrométodo. [En línea]. P. 937-942. Nuevo León. [Consultado 6 Julio de 2020]. Disponible en: <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume1/1/10/161.pdf>

ROJAS GONZALEZ, Andres Felipe, GIRÓN GALLEGO, Erika y TORRES CASTAÑEDA, Harlen Gerardo. Variables de operación en el proceso de transesterificación de aceites vegetales: una revisión - catálisis química. Revista ingeniería e investigación [En línea]. 2009, 11 (3). 17-22 [Consultado 30 de marzo de 2020]. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/19223/1/15177-45993-1-PB.pdf>

ROMÁN, Lucio. [En línea] Extracción por solvente. Universidad Nacional de Asunción central Paraguay. Disponible en: https://www.academia.edu/16786379/Extraccion_por_solvente

SÁNCHEZ, FRANCISCO Y RODRIGUEZ, GERARDO. Esterificación. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 1995. Consultado [12 de Agosto del 2020]. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ingenv/article/view/20904/21811>

SANTOS, Eloiñice. Las materias primas utilizadas en la producción de biodiesel: la influencia del contenido y la concentración de los ácidos grasos. [En línea]. Trabajo de master y doctorado. Centro Universitario de Química de Gerais. Brasil. 2012. Consultado [10 de julio del 2020]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5038487.pdf>

SEFFATI, Kambiz, et. al. Enhanced biodiesel production from chicken fat using CaO/CuFe₂O₄ nanocatalyst and its combination with diesel to improve fuel properties. [en línea] 2019, 235. 1238-1244 [Consultado 20, mayo, 2020] <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.118>

SHI, Wenying, et. al. Biodiesel production from waste chicken fat with low free fatty acids by an integrated catalytic process of composite membrane and sodium methoxide. *Bioresource Technology*. 2013, 139. 316-322 [Consultado 20, mayo,2020] <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.04.040>

SITANDPLAS. Ingredientes principales en la alimentación de nuestros perros. [En línea]. 14 de octubre del 2018. Consultado [30 de julio del 2020]. Disponible en: <https://www.sitandplas.com/ingredientes-principales-en-la-alimentacion-de-nuestros-perros/>

SORICHETTIA, Patricio Aníbal y ROMANO, Silvia Daniela. Uso de agua en la purificación de biodiesel: optimización mediante el control de propiedades eléctricas de efluentes. [En línea]. Acta 7mo congreso de

SUPER USER. Laboratorio de Química. [En línea]. Universidad de Costa Rica: CINA. Costa Rica. [Consultado 02 de Marzo de 2020]. Disponible en: <http://www.cina.ucr.ac.cr/index.php/2015-10-28-20-54-43/laboratorio-de-quimica>

TAMARIZ, M.N.B., et. al. Characterization of Biodiesel Produced from Chicken Fat and Pennycress Oil using Different Concentrations of Basic Catalysts. *Journal of Agriculture and Environmental Sciences*. 2015, 4 (1). 127-133 [Consultado 20, mayo,2020] ISSN: 2334-2404 Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/281559864_Characterization_of_Biodiesel_Produced_from_Chicken_Fat_and_Pennycress_Oil_using_Different_Concentrations_of_Basic_Catalysts

TEJADA TOVAR, Candelaria, et al. Obtención de biodiesel a partir de diferentes tipos de grasa residual de origen animal. [en línea]. Proyecto académico sin fines de lucro. Universidad de Caldas. Manizales: 2013 [Consultado 03 de marzo del 2020]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3217/321728584002.pdf>

TOLDRÁ-REIG, FIDEL Y MORA, LETICIA. Trends in biodiesel production from animal waste. Instituto de tecnología Química; Instituto de Agroquímica y Tecnología de alimentos. Valencia. 2020. Consultado. 15 de abril del 2020]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/10/3644>

TOROSSI BAUDINO, Favio Daniel. Reacciones en contexto: la transesterificación en la biodiésel a partir de aceite de fritura usado. *Revista ANALES de la Real Sociedad Española de Química* [En línea] 2006, 102 (3). 43-49 [Consultado 03, marzo, 2020]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2082917>

TORRES RIVERO, Ligia A., et al. Efecto de la temperatura y del tiempo de reacción sobre la esterificación y la transesterificación de aceites comestibles usados. En: *Revista de ciencias naturales y agropecuarias* [en línea]. Cancún:

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO/INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CANCÚN, Diciembre, 2017, Vol. 4, No. 13, p. 19-35. [Consultado el 10 de julio de 2020]. Disponible en: <http://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Ciencias Naturales y Agropecuarias/vol4num13/Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias V4 N13 3.pdf>

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES FACULTAD DE ADMINISTRACIÓN. [En línea]. Colombia. ¿Qué es una planta de beneficios? 17 de marzo del 2016. [Consultado 20 de julio de 2020]. Disponible: <https://agronegocios.uniandes.edu.co/2016/03/17/que-es-una-planta-de-beneficios/>

VILLASEÑOR NEIRA, Hugo Cristián. Diseño conceptual de planta piloto para producción de biodiesel a partir de grasas animales. [en línea]. Proyecto para optar al título de Ingeniero Civil Químico. Pontificia universidad católica de Valparaíso. Valparaíso: 2010. [Consultado 01, octubre, 2020] Disponible en: http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-3500/UCG3912_01.pdf

VIVAS CASTAÑO, Andrea Maritza. Estudio y obtención de biodiesel a partir de residuos grasos de origen bovino. [En línea] Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira: [Consultado 02, marzo, 2020]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/f37d/645cb7ca48e5da5e8a7184688956b8f7533e.pdf>

WEINTRAUB, Pam. Chicken of tomorrow. {En línea}. 5 Noviembre de 2014 {Consultado el 21 Abril de 2020}. Disponible en: <https://aeon.co/essays/how-the-backyard-bird-became-a-wonder-of-science-and-commerce>.

ZAPATA, Carlos. MARTINEZ, Iván. ARENAS, Erika. HENAO, Carlos. [En línea] Producción de biodiesel a partir de aceite de palma: 1. Diseño y simulación de dos procesos continuos. Universidad pontificia Bolivariana. 10 de noviembre de 2006. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v74n151/a08v74n151.pdf>

ZUGARRAMURDI, Aurora y LUPIN, Héctor M. Ingeniería Económica Aplicada a la Industria Pesquera. FAO Documento Técnico de Pesca. 1998, 351. [Consultado 20, mayo 2020] ISBN 92-5-303738-5 Disponible en: <http://www.fao.org/3/v8490s/v8490s00.htm>

ANEXOS

ANEXO A.
PARÁMETROS DE CALIDAD DE BIOCOMBUSTIBLE BIODIÉSEL

| PARÁMETRO | UNIDADES | ESPECIFICACIÓN | MÉTODOS DE ENSAYO |
|--|--------------------|----------------|--------------------------------------|
| Densidad a 15 °C | Kg/m ³ | 860 – 900 | ASTM D 4052 ISO 3675 |
| Número de Cetano | Cetanos | 47 mínimo | ASTM D 613 ISO 5165 |
| Viscosidad (cinemática a 40 °C) | mm ² /s | 1,9 – 6,0 | ASTM D 445 ISO 3104 |
| Contenido de agua | mg/kg | 500 máximo | ASTM E 203 ISO 12937 |
| Contaminación Total | mg/kg | 24 máximo | EN 12662 |
| Punto de inflamación | °C | 120 mínimo | ASTM D 93 ; ISO 2719 |
| Corrosión lámina de cobre | Unidad | 1 | ASTM D 130 ISO 2160 |
| Estabilidad a la oxidación ⁽³⁾ | Horas | 6 mínimo | EN 14112 |
| Estabilidad Térmica | % de reflectancia | 70 % mínimo | ASTM D 6468 |
| Cenizas sulfatadas | % en masa | 0,02 máximo | ASTM D 874 ISO 3987 |
| Contenido de fósforo | % en masa | 0,001 máximo | ASTM D 4951 ISO 14107 |
| Destilación (PFE) | °C | max 360 | ASTM D 86 ISO 3405 |
| Número ácido | mg de KOH/g | 0,5 máximo | ASTM D 664 EN 1404 |
| Temperatura de Obturación del filtro frío (CFPP) | °C | Reportar (4) | ASTM D6371 EN 116 |
| Punto de nube/enturbiamiento | °C | Reportar (4) | ASTM D 2500 ISO 3015 |
| Punto de fluidez | °C | Reportar (4) | ASTM D 97 |
| Carbón residual | % en masa | 0,3 máximo | ASTM D 4530 (ISO 10370 (5)) |
| Contenido de sodio y potasio | mg/kg | 5 máximo | ASTM D 5863 EN 14108 |
| Contenido de calcio y magnesio | mg/kg | 5 máximo | ASTM D 5863 EN 14108 EN 14109 |
| Contenido de Monoglicéridos | % en masa | 0.8 máximo | ASTM D 6584 ISO 14105 |
| Contenido de Diglicéridos | % en masa | 0.2 máximo | ASTM D 6584 ISO 14105 |
| Contenido de Triglicéridos | % en masa | 0.2 máximo | ASTM D 6584 ISO 14105 |
| Glicerina libre y total | % en masa | 0,02/0,25 | ASTM D 6584 ; ISO 14105 ISO 14106 |
| Contenido de metanol o etanol | % en masa | 0,2 máximo | ISO 14110 |
| Contenido de éster | % en masa | 96,5 mínimo | EN 14103 |
| Contenido de alquilester de ácido linoléico | % en masa | 12 máximo | EN 14103 |
| Índice de yodo | g de yodo/100 g | 120 máximo | EN 14111 |

ANEXO B.

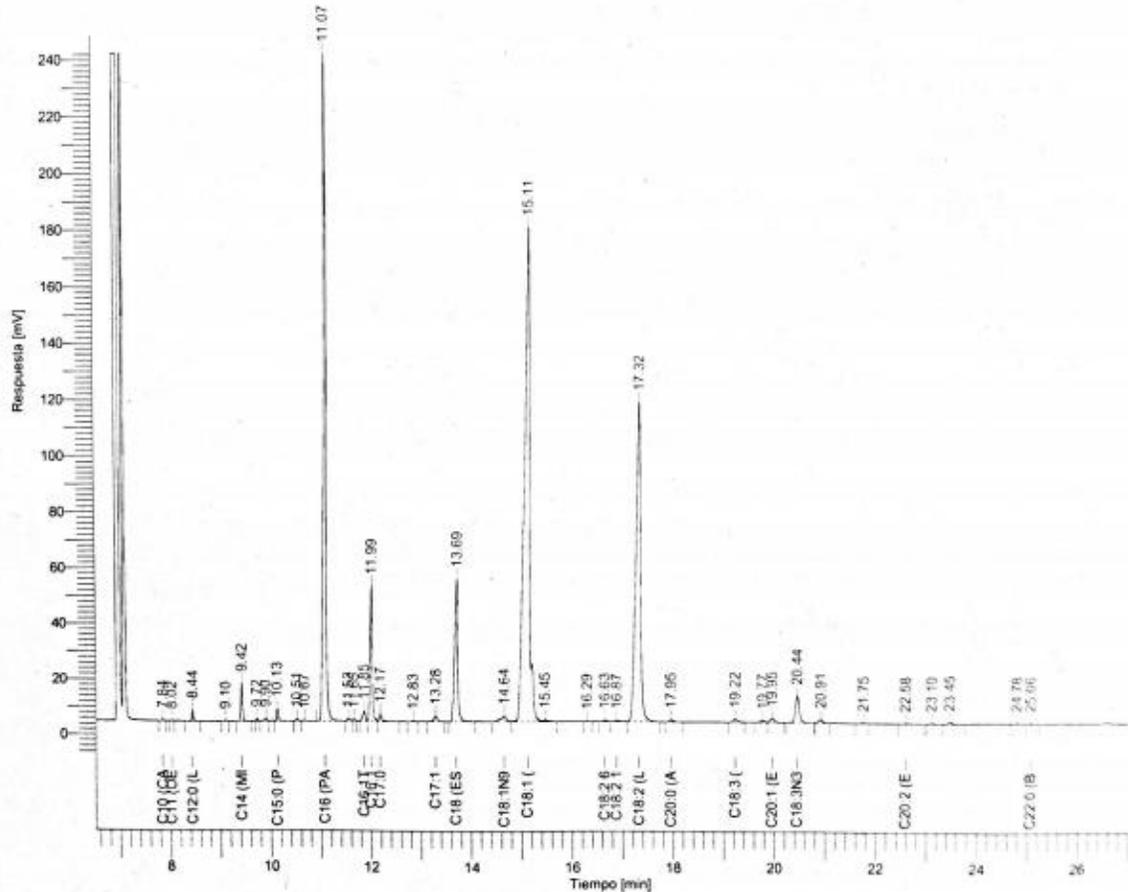
RESULTADOS CROMATOGRAFÍA ACEITE DE POLLO

– Aceite extraído en estufa

Software Version : 6.3.4.0700
Sample Name : GRASA 1
Instrument Name : CLARUS690
Rack/Vial : 0/35
Sample Amount : 1.000000
Cycle : 35

Date : 6/17/2020 8:46:54 AM
Data Acquisition Time : 6/12/2020 10:56:40 AM
Channel : A
Operator : manager
Dilution Factor : 1.000000

Result File : E:\CLARUS690\RESULTADOS\INVESTIGACION\2020\2020_06_12_GRASA
1_001_035_met1-20200617-084446.rst
Sequence File : E:\CLARUS690\SECUENCIAS\A2020 M06 D11.seq



PERFIL DE ACIDOS GRASOS

C.I. SIGRA S.A.
Gestión de Calidad

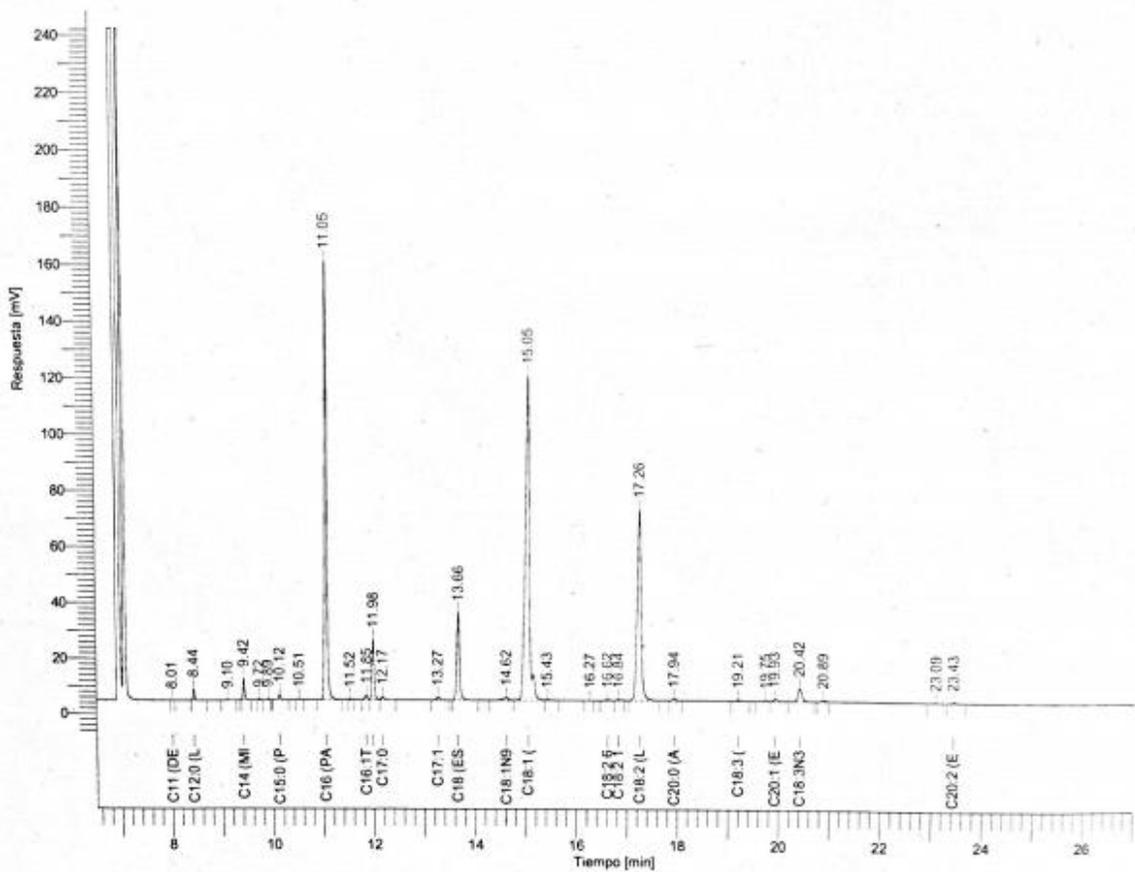
6/17/2020 8:46:54 AM Result: E:\CLARUS690\RESULTADOS\INVESTIGACION\2020\2020_06_12_GRASA 1_001_035_met1-20200617-084446.rst

| Pico # | Tiempo [min] | Area [$\mu\text{V}\cdot\text{s}$] | Component Name | Norm. Area [%] |
|--------|--------------|-------------------------------------|--------------------------|----------------|
| 1 | 7.84 | 569.81 | C10 (CAPRICO) | 0.02 |
| 3 | 8.44 | 7251.07 | C12:0 (LAURICO) | 0.22 |
| 4 | 9.10 | 853.69 | | 0.03 |
| 5 | 9.42 | 28962.55 | C14 (MIRISTICO) | 0.87 |
| 6 | 9.72 | 1982.63 | | 0.06 |
| 7 | 9.90 | 2470.46 | | 0.07 |
| 8 | 10.13 | 10606.34 | C15:0 (PENTADECANOATO) | 0.32 |
| 9 | 10.51 | 1958.69 | | 0.06 |
| 10 | 10.67 | 835.10 | | 0.03 |
| 11 | 11.07 | 784827.45 | C16 (PALMITICO) | 23.67 |
| 12 | 11.53 | 2313.09 | | 0.07 |
| 13 | 11.65 | 1202.92 | | 0.04 |
| 14 | 11.85 | 13322.67 | C16:1T | 0.40 |
| 15 | 11.99 | 140728.95 | C16:1 | 4.24 |
| 16 | 12.17 | 9339.70 | C17:0 | 0.28 |
| 17 | 12.83 | 875.19 | | 0.03 |
| 18 | 13.28 | 10134.97 | C17:1 | 0.31 |
| 19 | 13.69 | 210793.48 | C18 (ESTEARICO) | 6.36 |
| 20 | 14.64 | 16892.44 | C18:1N9T (ELAIDICO) | 0.51 |
| 21 | 15.11 | 1239731.75 | C18:1 (OLEICO) | 37.39 |
| 22 | 15.45 | 6469.29 | | 0.20 |
| 23 | 16.29 | 832.52 | | 0.03 |
| 24 | 16.63 | 2898.19 | C18:2 6T (LINOELAIDICO) | 0.09 |
| 25 | 16.87 | 3312.10 | C18:2 11T (LINOELAIDICO) | 0.10 |
| 26 | 17.32 | 725189.48 | C18:2 (LINOLEICO) | 21.87 |
| 27 | 17.95 | 4227.04 | C20:0 (ARAQUIDICO) | 0.13 |
| 28 | 19.22 | 6507.93 | C18:3 (G-LINOLEICO) | 0.20 |
| 29 | 19.77 | 3582.68 | | 0.11 |
| 30 | 19.95 | 8768.95 | C20:1 (EICOCIANATO) | 0.26 |
| 31 | 20.44 | 50919.42 | C18:3N3 (LINOLENICO) | 1.54 |
| 32 | 20.91 | 6604.27 | | 0.20 |
| 33 | 21.75 | 977.03 | | 0.03 |
| 34 | 22.58 | 2179.72 | C20:2 (EICOSADIONATO) | 0.07 |
| 35 | 23.10 | 1698.30 | | 0.05 |
| 36 | 23.45 | 4434.40 | | 0.13 |
| 37 | 24.78 | 904.26 | | 0.03 |
| 38 | 25.06 | 929.70 | C22:0 (BEHENICO) | 0.03 |
| | | | | |
| | | 3316088.23 | | 100.00 |

– Aceite extraído en horno

Software Version : 6.3.4.0700
Sample Name : GRASA 2
Instrument Name : CLARUS690
Rack/Vial : 0/36
Sample Amount : 1.000000
Cycle : 36
Date : 6/17/2020 8:50:07 AM
Data Acquisition Time : 6/12/2020 11:38:05 AM
Channel : A
Operator : manager
Dilution Factor : 1.000000

Result File : E:\CLARUS690\RESULTADOS\INVESTIGACION\2020\2020_06_12_GRASA 2_001_036-met1.rst
Sequence File : E:\CLARUS690\SECUENCIAS\A2020 M06 D11.seq



PERFIL DE ACIDOS GRASOS

C.I. SIGRA S.A.
Gestión de Calidad

6/17/2020 8:50:07 AM Result: E:\CLARUS690\RESUL
TADOS\INVESTIGACION\2020\2020_06_12_GRASA 2_001_036-met1.rst

| Pico # | Tiempo [min] | Area [$\mu\text{V}\cdot\text{s}$] | Component Name | Norm Area [%] |
|--------|--------------|-------------------------------------|--------------------------|---------------|
| 2 | 8.44 | 7844.96 | C12:0 (LAURICO) | 0.45 |
| 3 | 9.10 | 672.24 | | 0.04 |
| 4 | 9.42 | 16344.51 | C14 (MIRISTICO) | 0.93 |
| 5 | 9.72 | 966.40 | | 0.06 |
| 6 | 9.89 | 1332.32 | | 0.08 |
| 7 | 10.12 | 5142.00 | C15:0 (PENTADECANOATO) | 0.29 |
| 8 | 10.51 | 797.43 | | 0.05 |
| 9 | 11.05 | 453915.24 | C16 (PALMITICO) | 25.83 |
| 10 | 11.52 | 933.77 | | 0.05 |
| 11 | 11.85 | 6052.58 | C16:1T | 0.34 |
| 12 | 11.98 | 62696.94 | C16:1 | 3.57 |
| 13 | 12.17 | 4234.65 | C17:0 | 0.24 |
| 14 | 13.27 | 4739.44 | C17:1 | 0.27 |
| 15 | 13.66 | 117396.51 | C18 (ESTEARICO) | 6.68 |
| 16 | 14.62 | 7864.84 | C18:1N9T (ELAIDICO) | 0.45 |
| 17 | 15.05 | 652585.05 | C18:1 (OLEICO) | 37.14 |
| 18 | 15.43 | 1876.91 | | 0.11 |
| 19 | 16.27 | 314.35 | | 0.02 |
| 20 | 16.62 | 2094.26 | C18:2 6T (LINOELAIDICO) | 0.12 |
| 21 | 16.84 | 1825.58 | C18:2 11T (LINOELAIDICO) | 0.10 |
| 22 | 17.26 | 363177.31 | C18:2 (LINOLEICO) | 20.67 |
| 23 | 17.94 | 2795.04 | C20:0 (ARAQUIDICO) | 0.16 |
| 24 | 19.21 | 3165.04 | C18:3 (G-LINOLEICO) | 0.18 |
| 25 | 19.75 | 1808.44 | | 0.10 |
| 26 | 19.93 | 4742.43 | C20:1 (EICOCIANATO) | 0.27 |
| 27 | 20.42 | 25923.48 | C18:3N3 (LINOLENICO) | 1.48 |
| 28 | 20.89 | 2865.52 | | 0.16 |
| 29 | 23.09 | 867.62 | | 0.05 |
| 30 | 23.43 | 2091.72 | C20:2 (EICOSADIONATO) | 0.12 |
| | | 1757066.59 | | 100.00 |

ELABORADO POR: _____

ANEXO C. CÁLCULO DE RENDIMIENTO EN EXPERIMENTACIÓN

En este anexo se presenta el rendimiento de la experimentación descrita al final del capítulo 2, en donde se extrajo el aceite de residuos grasos de pollo por horno y por estufa.

$$\begin{aligned} \% \text{Rendimiento de extracción por horno} &= \frac{1000\text{mL} * 0,9342 \frac{\text{g}}{\text{mL}}}{1500} * 100 \\ &= 62\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{Rendimiento de extracción por estufa} &= \frac{550\text{mL} * 0,9342 \frac{\text{g}}{\text{mL}}}{850} * 100 \\ &= 60\% \end{aligned}$$

ANEXO D. CANTIDAD DE REACTIVO EMPLEADO

En este anexo se presenta las proporciones de los reactivos empleados en la reacción de esterificación y transesterificación, con base a los datos reportados y las cantidades empleadas por Martínez, además se determina la relación molar metanol:aceite en la reacción de transesterificación para rectificar si esta coincide con lo reportado por otros autores para la misma materia prima (grasa de pollo). El valor de densidad del aceite se tomó con base a lo reportado por Martínez, cuyo valor es 0,876 kg/L,

- Esterificación

Martínez empleó 7,5 mL de H₂SO₄ y 80 mL de metanol por 1L de aceite. La densidad del ácido sulfúrico se toma como 1,83g/mL.

$$\text{Concentración de H}_2\text{SO}_4 \text{ (v/v)} = \frac{0,0075 \text{ L H}_2\text{SO}_4}{1\text{L aceite}} * 100 = 0,75\% \text{ v/v}$$

$$\begin{aligned} \text{Concentración de H}_2\text{SO}_4 \text{ (%p/p)} = \\ \frac{0,0075 \text{ L H}_2\text{SO}_4}{1\text{L aceite}} * \frac{1,83 \text{ kg H}_2\text{SO}_4}{1\text{L H}_2\text{SO}_4} * \frac{1\text{L aceite}}{0,876 \text{ kg aceite}} * 100 = 1,56\% \text{ p/p} \end{aligned}$$

$$\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ disuelto en metanol(v/v)} = \frac{0,0075 \text{ L H}_2\text{SO}_4}{0,08\text{L metanol}} * 100 = 9,38\% \text{ v/v}$$

- Transesterificación

Martínez empleó 6,1g NaOH y 0,12L de metanol por 1L de aceite. La densidad del metanol se toma como 0,798g/MI

$$\text{Concentración de NaOH (p/p)} = \frac{6,1\text{g NaOH}}{1\text{L aceite}} * \frac{1\text{L aceite}}{0,876 \text{ kg aceite}} * 100 = 0,69\% \text{ p/p}$$

Para determinar la relación molar metanol: aceite, se toma como base el peso molecular del aceite de pollo reportado por Lin²⁸⁵ y Radha²⁸⁶, cuyo valor es 1131,86g/mol y 946g/mol, respectivamente.

²⁸⁵ LIN, Chia-Wei y TSAI, Shuo-Wen. Production of biodiesel from chicken wastes by various alcohol-catalyst combinations. Department of Food Science a Journal of Energy in Southern Africa. [En línea]. 2015. 26 (1) [20 de junio del 2020]. Disponible en: http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1021-447X2015000100005

Mol de metanol=

$$1 \text{ mol aceite} * \left(\frac{80 \text{ mL metanol}}{876 \text{ g aceite}} \right) \left(\frac{1 \text{ mol metanol}}{32,04 \text{ g metanol}} \right) \left(\frac{0,792 \text{ g metanol}}{1 \text{ mL metanol}} \right) \left(\frac{1131,86 \text{ g ó } 946 \text{ g aceite}}{1 \text{ mol aceite}} \right)$$

Según el peso del aceite reportado por Li y Radha, se puede concluir que la relación molar metanol:aceite, en ambos casos es aproximadamente 3:1, con exactitud, 3,83:1 y 3,2:1, respectivamente.

– Lavado y neutralización

Martínez empleó 10 mL de H_3PO_4 para 1L de aceite procesado y 1,180L de agua para lavar el biodiésel producido, cuyo valor se determinó empleando la **ecuación 4** presentada en el capítulo 3 y con base al rendimiento de la reacción de transesterificación (98,34%), reportado por el mismo autor. La densidad del H_3PO_4 de toma como 1,88 kg/L y la densidad del biodiésel producido como 0,874 kg/L, valor reportado por el mismo autor.

$$\text{Concentración de } H_3PO_4(v/v) = \frac{0,01L H_3PO_4}{1L \text{ aceite}} * 100 = 1\% v/v$$

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de biodiésel obtenido por Martinez} &= \\ 0,9834 * 1,2 L \text{ aceite} * 0,8804 \frac{kg \text{ aceite}}{L \text{ aceite}} * \left(\frac{1 L \text{ biodiésel}}{0,874 kg \text{ biodiésel}} \right) & \\ = 1,1876 L \text{ biodiésel} & \end{aligned}$$

$$\frac{\text{Agua de lavado}}{\text{biodiésel}} = \frac{1,180 L \text{ agua}}{1,1876 L \text{ biodiésel}} \approx 1:1 \frac{v}{v}$$

²⁸⁶ RADHA, et al. Biochemical and kinetic evaluation of lipase and biosurfactant assisted ex novo synthesis of microbial oil for biodiesel production by *Yarrowia lipolytica* utilizing chicken tallow. Process Biochemistry. [En línea]. 2020, 95 (1) 17–29 Consultado [20 de junio del 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359511319317611>

ANEXO E. BALANCES DE MASA

En este anexo se presenta el cálculo de los flujos de entrada y salida de los procesos unitarios presentados en el balance de masa por etapas en el capítulo 3.

- Lavado de la grasa sólida

Con base a la cantidad de agua empleada por Seffati²⁸⁷, quién empleó 5L de agua para lavar 3kg de grasa sólida de pollo, se determina la cantidad de agua de lavado para 400kg de la misma materia prima. La densidad del agua se tomó como 0,99 kg/L

$$\text{Cantidad de agua de lavado} = 400 \frac{\text{Kg aceite}}{\text{día}} \cdot \left(\frac{5\text{L agua}}{3\text{kg aceite}} \right) = 666,66\text{L} \frac{\text{agua}}{\text{día}}$$

$$F2 = 666,66 \frac{\text{L agua}}{\text{día}} * \frac{999,9\text{Kg agua}}{\text{L}} = 665.993,34 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

$$F2 = F3 = 665.993,34 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

- Cortado

$$F4 = F5 = 400 \frac{\text{kg aceite}}{\text{día}}$$

- Extracción

Con base al porcentaje de humedad presente en grasa sólida de pollo, reportado por Tejada, cuyo valor fue del 14,29%, se determina la cantidad de agua presente en 400kg de la misma materia prima.

$$F6 = 400 \frac{\text{kg aceite}}{\text{día}} * 0,1429 = 57,16 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

$$F7 = 400 \frac{\text{kg aceite}}{\text{día}} - 57,16 \frac{\text{kg}}{\text{día}} = 342,84 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

- Filtración

Con base al rendimiento de extracción del aceite presente en la grasa sólida de pollo, reportado por Tejada, cuyo valor fue del 14,29%, se determina la cantidad de aceite extraído presente en 400kg de la misma materia prima, empleando la

²⁸⁷ SEFFATI, Kambiz, et. al. Enhanced biodiesel production from chicken fat using CaO/CuFe2O4 nanocatalyst and its combination with diesel to improve fuel properties. [el línea] 2019, 235. 1238-1244 [Consultado 20, mayo,2020] <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.118>

ecuación 2 presentada en el capítulo 3. La densidad del aceite de pollo se tomó como 0,876kg/L, valor reportado por el mismo autor.

$$\text{Cantidad de aceite extraído} = \frac{0,705 * 400\text{kg/día}}{0,876 \frac{\text{Kg}}{\text{L}}} = 321,92 \frac{\text{L aceite}}{\text{día}}$$

$$F9 = 321,92 \frac{\text{L aceite}}{\text{día}} * 0,876 \frac{\text{kg aceite}}{\text{L aceite}} = 282 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

$$F8 = 342,84 \frac{\text{Kg}}{\text{día}} - 282 \frac{\text{kg}}{\text{día}} = 60,84 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

- **Almacenamiento de aceite**

$$F10 = F9 = 282 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

- **Esterificación**

Los flujos máxicos involucrados en la esterificación se determinaron con base a las suposiciones y/o consideraciones presentadas en el capítulo 3 y con base a los resultados reportados por Martínez, el cuál empleó 80 mL de metanol y 7,5 mL de H₂SO₄ por 1L de aceite.

$$\text{Cantidad de metanol} = 321,92 \frac{\text{L aceite}}{\text{día}} * \left(\frac{0,08\text{L metanol}}{1\text{L aceite}} \right) = 25,75 \frac{\text{L metanol}}{\text{día}}$$

$$\text{Cantidad de metanol} = 25,75 \frac{\text{L metanol}}{\text{día}} * \frac{0,792 \text{ kg metanol}}{\text{L metanol}} = 20,39 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

$$\text{Cantidad de H}_2\text{SO}_4 = 321,92 \frac{\text{L aceite}}{\text{día}} * \left(\frac{0,0075\text{L H}_2\text{SO}_4}{1\text{L aceite}} \right) = 2,41 \frac{\text{L H}_2\text{SO}_4}{\text{día}}$$

$$F11 = 2,41 \frac{\text{L H}_2\text{SO}_4}{\text{día}} * \left(\frac{1,83 \text{ kg H}_2\text{SO}_4}{1\text{L H}_2\text{SO}_4} \right) = 4,42 \frac{\text{kg H}_2\text{SO}_4}{\text{día}}$$

Para hallar F13, se tiene presente la reacción de esterificación, ilustrada en la **figura 2** y el perfil de ácidos grasos del aceite de pollo, reportado por SIGRA S.A, presentado en el capítulo 2. Los ácidos grasos predominantes en el aceite de pollo son el ácido palmítico (25,85% p/p), oleico (37,14% p/p) y linoleico (20,67% p/p), es decir, en 280 kg de aceite, estos representan el 72,84 kg, 104,735 kg y 58,29 kg de aceite, respectivamente.

$$\text{Cantidad de ácido palmítico} = 280\text{kg} * 0,2585 = 72,84 \text{ kg}$$

$$\text{Cantidad de ácido oleico} = 280\text{kg} * 0,3714 = 104,735 \text{ kg}$$

$$\text{Cantidad de ácido linoleico} = 280\text{kg} * 0,2067 = 58,29 \text{ kg}$$

$$\text{Cantidad total de triglicéridos} = 235,8648 \text{ kg}$$

Se asume 235,8648 kg de triglicéridos presentes en el aceite y el restante (46,1355 kg), como los otros ácidos o compuestos diferentes a los tres ácidos predominantes. Con base a la conversión de ácidos grasos libres (AGL) a triglicéridos, reportada por Martínez, cuyo valor es del 74,57%, se determina la cantidad de AGL presente en el aceite y la cantidad de agua y metanol producida tras llevarse a cabo la esterificación.

$$\text{Fracción de AGL presentes en el aceite} = 1 - 0,7457 = 0,2543$$

$$\text{Cantidad de AGL presentes en el aceite} = 235,8648 \text{ kg} * 0,2543 = 59,98 \text{ kg AGL}$$

$$\text{Porcentaje de AGL presentes en el aceite} = \frac{59,98 \text{ kg AGL}}{282 \text{ kg aceite}} * 100 = 21,27\%$$

$$\text{Moles de ácido palmítico} = 18,15 \text{ kg} \left(\frac{1 \text{ kmol}}{256,43 \text{ kg}} \right) = 0,0708 \text{ kmoles ácido palmítico}$$

$$\text{Moles de ácido oléico} = 26,634 \text{ kg} \left(\frac{1 \text{ kmol}}{282,47 \text{ kg}} \right) = 0,0948 \text{ kmoles ácido oléico}$$

$$\text{Moles de ácido linoleico} = 14,823\text{kg} \left(\frac{1 \text{ kmol}}{280,447 \text{ kg}} \right) = 0,053 \text{ kmoles ácido linoleico}$$

$$\text{Moles totales de AGL} = 0,2186 \text{ kmoles de AGL}$$

Si la relación molar AGL: metanol por estequiometría es 1:1, la cantidad necesaria de metanol para que reaccionen 0,2186 kmoles de AGL, es 7kg de metanol, sin embargo, Martínez reporta una alimentación de 4,42 kg de metanol en la etapa de esterificación.

$$\text{Cantidad mínima de metanol por estequiometría} =$$

$$0,2186 \text{ kmoles de AGL} * \frac{1 \text{ kmol metanol}}{1 \text{ kmol AGL}} * \frac{32,04 \text{ kg metanol}}{1 \text{ mol metanol}} = 7\text{kg metanol}$$

$$\text{Cantidad mínima de metanol por estequiometría} =$$

$$7\text{kg metanol} * \frac{1\text{L metanol}}{0,792 \text{ kg metanol}} = 8,838 \text{ L metanol}$$

$$\begin{aligned} & \text{Moles de metanol reportados} = \\ & 4,42 \text{ kg metanol} \left(\frac{1 \text{ kmol metanol}}{32,04 \text{ kg metanol}} \right) = 0,14 \text{ kmoles metanol} \end{aligned}$$

Ni Martínez ni los otros autores mencionados en el capítulo 2 reportan la conversión de los AGL para la reacción de esterificación. Se asume una conversión del reactivo límite (AGL) del 95%.

$$\text{Moles de AGL que reaccionaron} = 0,218 \text{ kmoles} * 0,95 = 0,207 \text{ kmoles de AGL}$$

$$\begin{aligned} & \text{Moles de metanol que reaccionaron} = \\ & 0,2186 \text{ kmoles} - 0,207 \text{ kmoles} = 0,011 \text{ kmoles metanol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Moles de metanol que no reaccionaron} = \\ & 0,14 \text{ kmoles} - 0,011 \text{ kmoles} = 0,129 \text{ kmoles metanol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Cantidad de metanol que no reaccionó} = \\ & 0,129 \text{ kmol metanol} * \frac{32,04 \text{ kg metanol}}{1 \text{ mol metanol}} = 4,13 \text{ kg metanol} \end{aligned}$$

Si la relación molar de agua:AGL también es 1:1, entonces se producirá la misma cantidad de moles de agua.

$$\begin{aligned} & \text{Moles de agua producidos} = \\ & 0,207 \text{ kmoles AGL} * \frac{1 \text{ mol agua}}{1 \text{ kmol AGL}} = 0,207 \text{ kmoles de agua} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de agua producida} &= 0,207 \text{ kmols de agua} * \frac{18 \text{ kg agua}}{1 \text{ kmol agua}} \\ &= 3,74 \text{ kg agua} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de agua y metanol producido} &= 3,74 \text{ kg agua} + 4,13 \text{ kg metanol} \\ &= 7,87 \text{ kg} \end{aligned}$$

Se asume que en la etapa de decantación la corriente F13 es el 80% de la cantidad de agua y metanol producido al día, más una carga de 33,79 kg/día de trazas de metanol, H₂SO₄ y agua que no se consideró. El 20% restante de la cantidad de agua y metanol producido al día, se evaporará por completo en la etapa de evaporación.

$$\begin{aligned} F13 &= \left(7,87 \frac{\text{kg}}{\text{día}} * 0,8 \right) + 33,79 \frac{\text{kg}}{\text{día}} = 40,08 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \\ F15 &= 7,87 \frac{\text{kg}}{\text{día}} * 0,2 = 1,57 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \end{aligned}$$

$$F_{10} = F_{16} = 282 \frac{\text{kg aceite}}{\text{día}}$$

- Preparación de metóxido

Con base a lo reportado por Martínez se determina las cantidades de catalizador y metanol necesarias para llevar a cabo la transesterificación. Este autor empleó 6,1g de NaOH y 0,12L de metanol por 1L de aceite. Se asume que todo el NaOH se disuelve en el metanol

$$\text{Cantidad de metanol} = 321,92 \frac{\text{L aceite}}{\text{día}} * \left(\frac{0,12\text{L metanol}}{1\text{L aceite}} \right) = 38,63 \frac{\text{L metanol}}{\text{día}}$$

$$F_{17} = 38,63 \frac{\text{L metanol}}{\text{día}} * 0,792 \frac{\text{kg metanol}}{\text{L metanol}} = 30,59 \frac{\text{kg metanol}}{\text{día}}$$

$$F_{18} = 321,92 \frac{\text{L aceite}}{\text{día}} * \left(\frac{6,1\text{g NaOH}}{1\text{L aceite}} \right) * \left(\frac{1\text{kg NaOH}}{1000\text{g NaOH}} \right) = 1,964 \frac{\text{kg NaOH}}{\text{día}}$$

$$F_{19} = 30,59 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

- Transesterificación

Los flujos másicos involucrados en la transesterificación se determinaron con base a las suposiciones y/o consideraciones presentadas en el capítulo 3, según los resultados reportados por Martínez. La cantidad de biodiésel producido después de la transesterificación se determina con base al rendimiento reportado por el mismo autor, cuyo valor es del 98,34%, empleando la **ecuación 4**, también presentada en el capítulo 3.

$$F_{20} = 0,9834 * 282 \frac{\text{kg aceite}}{\text{día}} = 277,318 \frac{\text{kg biodiésel}}{\text{día}}$$

- Decantación

Con base a las suposiciones y/o consideraciones para la etapa II, presentadas en el capítulo 3, se determina la cantidad de glicerina producida en el proceso de obtención del biodiésel a partir de grasa de pollo y las trazas de metanol, jabón y agua aproximadas eliminadas en el biocombustible final.

Se supone una concentración del 2% de metanol en el biodiésel obtenido después de la transesterificación, este queda retenido en un 50% en la corriente rica en glicerina y un 50% en corriente rica en biodiésel. En la producción de biodiésel se

produce como subproducto principal aproximadamente el 10% de glicerina del peso total del biodiésel obtenido

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de metanol en cada fase} &= \frac{277,318 \frac{\text{kg biodiésel}}{\text{día}} * 0,02}{2} \\ &= 2,7731 \frac{\text{kg metanol}}{\text{día}} \end{aligned}$$

$$\text{Cantidad ideal de glicerina} = 277,318 \frac{\text{kg biodiésel}}{\text{día}} * 0,1 = 27,2318 \frac{\text{kg glicerina}}{\text{día}}$$

$$\begin{aligned} \text{Carga ideal total de glicerina y metanol} &= \\ 27,2318 \frac{\text{kg glicerina}}{\text{día}} + 2,7731 \frac{\text{kg metanol}}{\text{día}} &= 30 \frac{\text{kg glicerina}}{\text{día}} \end{aligned}$$

Según lo reportado por Martínez, se obtuvo por decantación el 9,833% de glicerina del peso total del biodiésel producido, es decir se asume que un 0,1667% quedó remanente en el biodiésel producido. La densidad de la glicerina obtenida se toma como 1,26kg/L, valor reportado por el mismo autor.

$$F21 = 30 \frac{\text{kg glicerina}}{\text{día}} * \frac{9,833\%}{10\%} = 29,5 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

$$\text{Cantidad de glicerina} = 29,5 \frac{\text{kg}}{\text{día}} * \frac{1 \text{L glicerina}}{1,26 \text{kg glicerina}} = 23,4 \text{L glicerina}$$

$$F22 = 277,318 \frac{\text{kg biodiésel}}{\text{día}} - 29,5 \frac{\text{kg}}{\text{día}} = 247,818 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

- Lavado y neutralización

Con base a lo reportado por Martínez en el proceso de lavado del biodiésel, en el cual se emplea agua de lavado y ácido fosfórico (H_3PO_4) al 10%, se determina la cantidad de agua para lavar 247,818 kg de biodiésel y la cantidad de trazas de jabón, NaOH, glicerina y metanol retirados el agua de lavado.

Martínez emplea 10 mL de H_3PO_4 para 1L de aceite procesado y 1,180L de agua para lavar 1,1876L de biodiésel producido, es decir aproximadamente una relación 1:1 v/v. La densidad del H_3PO_4 se toma como 1,88kg/L

$$\text{Cantidad de } \text{H}_3\text{PO}_4 = 321,92 \frac{\text{L aceite}}{\text{día}} * \left(\frac{0,01 \text{L } \text{H}_3\text{PO}_4}{1 \text{L aceite}} \right) = 3,24 \frac{\text{L } \text{H}_3\text{PO}_4}{\text{día}}$$

$$F23 = 3,24 \frac{\text{L } \text{H}_3\text{PO}_4}{\text{día}} * \left(\frac{1,88 \text{kg } \text{H}_3\text{PO}_4}{1 \text{L } \text{H}_3\text{PO}_4} \right) = 6,05 \frac{\text{kg } \text{H}_3\text{PO}_4}{\text{día}}$$

$$\text{Cantidad de biodiésel producido} = 247,818 \frac{\text{kg}}{\text{día}} * \left(\frac{1\text{L biodiésel}}{0,874 \text{ kg biodiésel}} \right) = 283,544 \frac{\text{L biodiésel}}{\text{día}}$$

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de agua de lavado} &= 283,544 \frac{\text{L biodiésel}}{\text{día}} * \frac{1\text{L agua}}{1\text{L biodiésel}} \\ &= 283,544 \frac{\text{L agua}}{\text{día}} \end{aligned}$$

$$F24 = 283,544 \frac{\text{L agua}}{\text{día}} * 0,999 \frac{\text{kg agua}}{\text{L}} = 283,26 \frac{\text{kg agua}}{\text{día}}$$

En el lavado se asume la eliminación de toda la glicerina remanente en el biodiésel producido, así como la mitad de metanol presente en el mismo. Además se asumirá un flujo de 9,347 kg/día, en la cual se incluye las trazas de H₃PO₄, glicerina, jabón, NaOH y metanol no consideradas. No se considera las pérdidas de biodiésel en la decantación ni el lavado.

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de glicerina presente en F22} &= \\ 30 \frac{\text{kg glicerina}}{\text{día}} - 29,5 \frac{\text{kg glicerina}}{\text{día}} &= 0,5 \frac{\text{kg glicerina}}{\text{día}} \end{aligned}$$

$$F26 = \frac{\text{kg}}{\text{día}} = 247,818 - 0,5 \frac{\text{kg glicerina}}{\text{día}} = 247,318 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

$$\begin{aligned} F25 &= 283,26 \frac{\text{kg agua}}{\text{día}} + \left(\frac{2,7731 \frac{\text{kg metanol}}{\text{día}}}{2} \right) + 0,5 \frac{\text{kg glicerina}}{\text{día}} + 9,347 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \\ F25 &= 294,494 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \end{aligned}$$

- Evaporación

Se asume la eliminación completa de todas las trazas de metanol y agua presentes

$$F27 = \left(\frac{2,7731 \frac{\text{kg metanol}}{\text{día}}}{2} \right) = 1,3865 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

$$F29 = 247,318 \frac{\text{kg}}{\text{día}} - \left(\frac{2,7731 \frac{\text{kg metanol}}{\text{día}}}{2} \right) = 245,93 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

ANEXO F.
CÁLCULO DE RENDIMIENTO TEÓRICO

En este anexo, se calculan los rendimientos con base a los resultados reportados por Martínez, el cuál procesa 120 mL de aceite de pollo, obtiene 1,038 kg biodiésel y reporta un rendimiento de extracción del aceite de 69,24%.

$$\begin{aligned} & \text{Cantidad inicial de grasa sólida} = \\ & \frac{1,2 \text{ L aceite} * 0,8804 \frac{\text{kg aceite}}{\text{L aceite}}}{0,6924} = 1,361 \text{ kg de grasa de pollo} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Rendimiento respecto a la materia prima} = \\ & \frac{1,038 \text{ kg biodiésel}}{1,361 \text{ kg de grasa de pollo}} * 100 = 76,24\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Rendimiento respecto al aceite extraído} = \\ & \frac{1,038 \text{ kg biodiésel}}{1,2 \text{ L aceite} * 0,8804 \frac{\text{kg aceite}}{\text{L aceite}}} * 100 = 98,25\% \end{aligned}$$

ANEXO G.
COTIZACIÓN DE EQUIPOS



广州辉恒机电设备有限公司

Guangzhou Huiheng Mechanical and Electrical Equipment Co.,Ltd.

ADD: No. 227, Tao Yuan Dong Road, Tianhe District, Guangzhou, Guangdong, China.

TEL: +86-20-82178721 FAX: +86-20-82178722 P.C.: 510660

Email: Candice_hhmm@163.com Web: http://hhmee.en.alibaba.com/

Quotation-HH2020090-Re01 850L 1050L Jacket reactor

Date:2020/09/02

| | |
|-----------------------------|----------------------------|
| To: | From: Huiheng Co.,Ltd. |
| Name: Vanessa Torres Gemade | Name: Ms Wu |
| Tel: | Tel: +86-20-82178721 |
| Fax: | Fax:+86-20-82178722 |
| Mail: | Mail: Candice_hhmm@163.com |

Introduce:

1.Guangzhou Hui heng mechanical and electrical equipment co., LTD., produce the reaction vessel and a complete set of equipment.It is mainly used in adhesive, unsaturated resin, polyester, polyurethane, ink and other fine chemical industry.And we can provide customers with the process design, control circuit design, product manufacturing, equipment installation and debugging through-train service.

2.Our company can produce electrothermal type, jacketed type, half pipe outside type and inside dish tube type reaction kettle.It has high thermal efficiency, good sealing, advanced mixing form, less energy consumption, high output and low operation cost outstanding characteristics,and It was deeply praised by customers.

3.Our company developed the feeding control, response add control, human-machine interface of full automatic control technology,it improved product quality and stability, reduced the labor intensity of workers.

| Number | Project Name | Product specification | Quantity | Unit | Amount |
|--------|----------------------|---|----------|--------|--------|
| | | | (set) | USD | USD |
| 1 | 850 L Jacket Reactor | Volume: 850 l; with evaporator or condenser, with heating jacket, desing temperature is 55 ° C, the speed is 748.6 rpm. Design temperature: room temperature ; Design pressure: 0.6 Mpa Within the cylinder: DN600x600x4mm, is made of SS316; Jacket: DN1100x650x5mm, is made of Q235-B Motor: 5.5kw-4P explosion proof motor Reducer: BLB13-11-5.5kw cycloid reducer Lens: twoDN120 sight glasses Stirring shaft: Φ 65 solid stirring shaft Frame: DJ55A, materials for Q235 - B Impeller: two layers of mixing blades, the lower is inclined anchor type, the upper is inclined impeller mixing blade Seal: 204-65B mechanical seal Manhole: DN400 quick-opening manhole Polishing: on the inner surface polishing Others according to your requirements | 1 | 10,500 | 10,500 |

| | | | | | |
|---|-----------------------|---|---|--------|--------|
| 2 | 1050 L Jacket Reactor | <p>Volume: 1050 l; desing reactor temperature is 60 ° C, the speed is 644,4 rpm, with heating jacketand whit conical bottom and with two outlets ,It is to separate biodiesel and glycerin.Design temperature:room temperature ; Design pressure: 0.6 Mpa</p> <p>Within the cylinder: DN600x600x4mm, is made of SS316; Jacket: DN1100x650x5mm, is made of Q235-B</p> <p>Motor: 5.5kw-4P explosion proof motor</p> <p>Reducer: BLB13-11-5.5kw cycloid reducer</p> <p>Lens: twoDN120 sight glasses</p> <p>Stirring shaft: Φ 65 solid stirring shaft</p> <p>Frame: DJ55A, materials for Q235 - B</p> <p>Impeller: two layers of mixing blades, the lower is inclined anchor type, the upper is inclined impeller mixing blade Seal:204-65B mechanical seal</p> <p>Manhole: DN400 quick-opening manhole</p> <p>Polishing: on the inner surface polishing</p> <p>Others according to your requirements</p> | 1 | 14,700 | 14,700 |
|---|-----------------------|---|---|--------|--------|

Remark:

1.Terms of Payment: EXW

2, The equipment quotation based on:

Our company is specialized in manufacturing the reaction kettle equipment experience;

3, Design and operating conditions of equipment:

According to your company to provide the conditions and equipment technical characteristics, and according to the company's related experience;

4, Delivery Times: 30 days after deposit

5.Payment term: 100% of total amount should be paid by T/T in advance.

**ANEXO H.
TARIFAS ACUEDUCTO AÑO 2020**



**DIRECCION DE APOYO COMERCIAL
GERENCIA CORPORATIVA SERVICIO AL CLIENTE
TARIFAS CARGO FIJO Y CONSUMO**

**ESTRUCTURA TARIFARIA PARA LOS SUSCRIPTORES ATENDIDOS EN BOGOTÁ D. C. POR LA EMPRESA DE ACUEDUCTO
TARIFAS ACUEDUCTO AÑO 2020**

| CIFRAS EN \$/Carriónes | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------|
| R | CARGO FIJO \$/Suscritor/2 meses | dic-2019 | ene-2020 | feb-2020 | mar-2020 | abr-2020 | may-2020 | jun-2020 | jul-2020 | ago-2020 | sep-2020 | oct-2020 | nov-2020 | dic-2020 | |
| | Estrato 1 | 4.009,30 | 4.009,30 | 4.130,38 | 4.009,30 | 4.009,30 | 4.009,30 | 4.009,30 | 4.009,30 | 4.009,30 | 4.009,30 | 4.009,30 | 4.009,30 | 4.009,30 | |
| | Estrato 2 | 8.018,60 | 8.018,60 | 8.260,75 | 8.018,60 | 8.018,60 | 8.018,60 | 8.018,60 | 8.018,60 | 8.018,60 | 8.018,60 | 8.018,60 | 8.018,60 | 8.018,60 | 8.018,60 |
| | Estrato 3 | 11.359,68 | 11.359,68 | 11.702,73 | 11.359,68 | 11.359,68 | 11.359,68 | 11.359,68 | 11.359,68 | 11.359,68 | 11.359,68 | 11.359,68 | 11.359,68 | 11.359,68 | 11.359,68 |
| | Estrato 4 | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.767,92 | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.364,32 |
| | Estrato 5 | 29.936,08 | 29.936,08 | 30.840,14 | 29.936,08 | 29.936,08 | 29.936,08 | 29.936,08 | 29.936,08 | 29.936,08 | 29.936,08 | 29.936,08 | 29.936,08 | 29.936,08 | 29.936,08 |
| | Estrato 6 | 36.618,24 | 36.618,24 | 37.724,10 | 36.618,24 | 36.618,24 | 36.618,24 | 36.618,24 | 36.618,24 | 36.618,24 | 36.618,24 | 36.618,24 | 36.618,24 | 36.618,24 | 36.618,24 |
| E | CONSUMO BÁSICO \$/m³ | dic-2019 | ene-2020 | feb-2020 | mar-2020 | abr-2020 | may-2020 | jun-2020 | jul-2020 | ago-2020 | sep-2020 | oct-2020 | nov-2020 | dic-2020 | |
| | Estrato 1 | 783,01 | 783,01 | 806,55 | 783,01 | 783,01 | 783,01 | 783,01 | 783,01 | 783,01 | 783,01 | 783,01 | 783,01 | 783,01 | |
| | Estrato 2 | 1.566,02 | 1.566,02 | 1.613,11 | 1.566,02 | 1.566,02 | 1.566,02 | 1.566,02 | 1.566,02 | 1.566,02 | 1.566,02 | 1.566,02 | 1.566,02 | 1.566,02 | |
| | Estrato 3 | 2.218,53 | 2.218,53 | 2.285,23 | 2.218,53 | 2.218,53 | 2.218,53 | 2.218,53 | 2.218,53 | 2.218,53 | 2.218,53 | 2.218,53 | 2.218,53 | 2.218,53 | |
| | Estrato 4 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.688,51 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | |
| | Estrato 5 | 4.045,56 | 4.045,56 | 4.167,19 | 4.045,56 | 4.045,56 | 4.045,56 | 4.045,56 | 4.045,56 | 4.045,56 | 4.045,56 | 4.045,56 | 4.045,56 | 4.045,56 | |
| | Estrato 6 | 4.306,57 | 4.306,57 | 4.436,04 | 4.306,57 | 4.306,57 | 4.306,57 | 4.306,57 | 4.306,57 | 4.306,57 | 4.306,57 | 4.306,57 | 4.306,57 | 4.306,57 | |
| S | CONSUMO NO BÁSICO \$/m³ | dic-2019 | ene-2020 | feb-2020 | mar-2020 | abr-2020 | may-2020 | jun-2020 | jul-2020 | ago-2020 | sep-2020 | oct-2020 | nov-2020 | dic-2020 | |
| | Estrato 1 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.688,51 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | |
| | Estrato 2 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.688,51 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | |
| | Estrato 3 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.688,51 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | |
| | Estrato 4 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.688,51 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | |
| | Estrato 5 | 4.045,56 | 4.045,56 | 4.167,19 | 4.045,56 | 4.045,56 | 4.045,56 | 4.045,56 | 4.045,56 | 4.045,56 | 4.045,56 | 4.045,56 | 4.045,56 | 4.045,56 | |
| | Estrato 6 | 4.306,57 | 4.306,57 | 4.436,04 | 4.306,57 | 4.306,57 | 4.306,57 | 4.306,57 | 4.306,57 | 4.306,57 | 4.306,57 | 4.306,57 | 4.306,57 | 4.306,57 | |
| I | CARGO FIJO \$/Suscritor/2 meses | dic-2019 | ene-2020 | feb-2020 | mar-2020 | abr-2020 | may-2020 | jun-2020 | jul-2020 | ago-2020 | sep-2020 | oct-2020 | nov-2020 | dic-2020 | |
| | COMERCIAL | 20.046,48 | 20.046,48 | 20.651,88 | 20.046,48 | 20.046,48 | 20.046,48 | 20.046,48 | 20.046,48 | 20.046,48 | 20.046,48 | 20.046,48 | 20.046,48 | 20.046,48 | |
| | INDUSTRIAL | 17.373,62 | 17.373,62 | 17.898,30 | 17.373,62 | 17.373,62 | 17.373,62 | 17.373,62 | 17.373,62 | 17.373,62 | 17.373,62 | 17.373,62 | 17.373,62 | 17.373,62 | |
| | OFICIAL | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.767,92 | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.364,32 | |
| | ESPECIAL | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.767,92 | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.364,32 | 13.364,32 | |
| | CONSUMO \$/m³ | dic-2019 | ene-2020 | feb-2020 | mar-2020 | abr-2020 | may-2020 | jun-2020 | jul-2020 | ago-2020 | sep-2020 | oct-2020 | nov-2020 | dic-2020 | |
| | COMERCIAL | 3.915,06 | 3.915,06 | 4.032,77 | 3.915,06 | 3.915,06 | 3.915,06 | 3.915,06 | 3.915,06 | 3.915,06 | 3.915,06 | 3.915,06 | 3.915,06 | 3.915,06 | |
| INDUSTRIAL | 3.601,86 | 3.601,86 | 3.710,14 | 3.601,86 | 3.601,86 | 3.601,86 | 3.601,86 | 3.601,86 | 3.601,86 | 3.601,86 | 3.601,86 | 3.601,86 | 3.601,86 | | |
| OFICIAL | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.688,51 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | | |
| ESPECIAL | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.688,51 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | 2.610,04 | | |

Fecha: Dirección Apoyo Comercial / 2019/PRECIO_01_CLAU

ANEXO I.
TARIFAS ALCANTARILLADO AÑO 2020



ESTRUCTURA TARIFARIA PARA LOS SUSCRIPTORES ATENDIDOS EN BOGOTÁ D. C. POR LA EMPRESA DE ACUEDUCTO
TARIFAS ALCANTARILLADO AÑO 2020

| CIFRAS EN \$/Carriente | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------|
| R E S I D E N C I A L | CARGO FIJO \$/Suscriptor/2 meses | dic-2019 | ene-2020 | feb-2020 | mar-2020 | abr-2020 | may-2020 | jun-2020 | jul-2020 | ago-2020 | sep-2020 | oct-2020 | nov-2020 | dic-2020 | |
| | Estrato 1 | 1.893,58 | 1.893,58 | 1.950,77 | 1.893,58 | 1.893,58 | 1.893,58 | 1.893,58 | 1.893,58 | 1.893,58 | 1.893,58 | 1.893,58 | 1.893,58 | 1.893,58 | 1.893,58 |
| | Estrato 2 | 3.787,18 | 3.787,18 | 3.901,55 | 3.787,18 | 3.787,18 | 3.787,18 | 3.787,18 | 3.787,18 | 3.787,18 | 3.787,18 | 3.787,18 | 3.787,18 | 3.787,18 | 3.787,18 |
| | Estrato 3 | 5.365,16 | 5.365,16 | 5.527,19 | 5.365,16 | 5.365,16 | 5.365,16 | 5.365,16 | 5.365,16 | 5.365,16 | 5.365,16 | 5.365,16 | 5.365,16 | 5.365,16 | 5.365,16 |
| | Estrato 4 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.502,58 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.311,96 |
| | Estrato 5 | 15.716,78 | 15.716,78 | 16.191,42 | 15.716,78 | 15.716,78 | 15.716,78 | 15.716,78 | 15.716,78 | 15.716,78 | 15.716,78 | 15.716,78 | 15.716,78 | 15.716,78 | 15.716,78 |
| | Estrato 6 | 21.839,38 | 21.839,38 | 22.498,93 | 21.839,38 | 21.839,38 | 21.839,38 | 21.839,38 | 21.839,38 | 21.839,38 | 21.839,38 | 21.839,38 | 21.839,38 | 21.839,38 | 21.839,38 |
| | CONSUMO BÁSICO \$/m³ | dic-2019 | ene-2020 | feb-2020 | mar-2020 | abr-2020 | may-2020 | jun-2020 | jul-2020 | ago-2020 | sep-2020 | oct-2020 | nov-2020 | dic-2020 | |
| Estrato 1 | 818,79 | 818,79 | 842,72 | 818,79 | 818,79 | 818,79 | 818,79 | 818,79 | 818,79 | 818,79 | 818,79 | 818,79 | 818,79 | 818,79 | |
| Estrato 2 | 1.637,58 | 1.637,58 | 1.685,43 | 1.637,58 | 1.637,58 | 1.637,58 | 1.637,58 | 1.637,58 | 1.637,58 | 1.637,58 | 1.637,58 | 1.637,58 | 1.637,58 | 1.637,58 | |
| Estrato 3 | 2.319,91 | 2.319,91 | 2.387,69 | 2.319,91 | 2.319,91 | 2.319,91 | 2.319,91 | 2.319,91 | 2.319,91 | 2.319,91 | 2.319,91 | 2.319,91 | 2.319,91 | 2.319,91 | |
| Estrato 4 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.809,05 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | |
| Estrato 5 | 4.121,24 | 4.121,24 | 4.241,67 | 4.121,24 | 4.121,24 | 4.121,24 | 4.121,24 | 4.121,24 | 4.121,24 | 4.121,24 | 4.121,24 | 4.121,24 | 4.121,24 | 4.121,24 | |
| Estrato 6 | 4.394,17 | 4.394,17 | 4.522,57 | 4.394,17 | 4.394,17 | 4.394,17 | 4.394,17 | 4.394,17 | 4.394,17 | 4.394,17 | 4.394,17 | 4.394,17 | 4.394,17 | 4.394,17 | |
| | CONSUMO NO BÁSICO \$/m³ | dic-2019 | ene-2020 | feb-2020 | mar-2020 | abr-2020 | may-2020 | jun-2020 | jul-2020 | ago-2020 | sep-2020 | oct-2020 | nov-2020 | dic-2020 | |
| Estrato 1 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.809,05 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | |
| Estrato 2 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.809,05 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | |
| Estrato 3 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.809,05 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | |
| Estrato 4 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.809,05 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | |
| Estrato 5 | 4.121,24 | 4.121,24 | 4.241,67 | 4.121,24 | 4.121,24 | 4.121,24 | 4.121,24 | 4.121,24 | 4.121,24 | 4.121,24 | 4.121,24 | 4.121,24 | 4.121,24 | 4.121,24 | |
| Estrato 6 | 4.394,17 | 4.394,17 | 4.522,57 | 4.394,17 | 4.394,17 | 4.394,17 | 4.394,17 | 4.394,17 | 4.394,17 | 4.394,17 | 4.394,17 | 4.394,17 | 4.394,17 | 4.394,17 | |
| | CARGO FIJO \$/Suscriptor/2 meses | dic-2019 | ene-2020 | feb-2020 | mar-2020 | abr-2020 | may-2020 | jun-2020 | jul-2020 | ago-2020 | sep-2020 | oct-2020 | nov-2020 | dic-2020 | |
| COMERCIAL | 9.467,94 | 9.467,94 | 9.753,87 | 9.467,94 | 9.467,94 | 9.467,94 | 9.467,94 | 9.467,94 | 9.467,94 | 9.467,94 | 9.467,94 | 9.467,94 | 9.467,94 | 9.467,94 | |
| INDUSTRIAL | 8.268,66 | 8.268,66 | 8.518,38 | 8.268,66 | 8.268,66 | 8.268,66 | 8.268,66 | 8.268,66 | 8.268,66 | 8.268,66 | 8.268,66 | 8.268,66 | 8.268,66 | 8.268,66 | |
| OFICIAL | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.502,58 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.311,96 | |
| ESPECIAL | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.502,58 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.311,96 | 6.311,96 | |
| | CONSUMO \$/m³ | dic-2019 | ene-2020 | feb-2020 | mar-2020 | abr-2020 | may-2020 | jun-2020 | jul-2020 | ago-2020 | sep-2020 | oct-2020 | nov-2020 | dic-2020 | |
| COMERCIAL | 4.093,95 | 4.093,95 | 4.213,58 | 4.093,95 | 4.093,95 | 4.093,95 | 4.093,95 | 4.093,95 | 4.093,95 | 4.093,95 | 4.093,95 | 4.093,95 | 4.093,95 | 4.093,95 | |
| INDUSTRIAL | 3.902,90 | 3.902,90 | 4.016,94 | 3.902,90 | 3.902,90 | 3.902,90 | 3.902,90 | 3.902,90 | 3.902,90 | 3.902,90 | 3.902,90 | 3.902,90 | 3.902,90 | 3.902,90 | |
| OFICIAL | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.809,05 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | |
| ESPECIAL | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.809,05 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | 2.729,30 | |

Formato Dirección Apoyo Comercial / 2019/2020/PRECIO2_CLAU2

ANEXO J. CONSUMO ENERGÉTICO

TARIFAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA (\$/kWh) REGULADAS POR LA COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS (CREG) ENERO DE 2020

| SECTOR RESIDENCIAL NIVEL DE TENSIÓN 1 | | | | |
|---------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| ESTRATO (E) | RANGO DE CONSUMO (kWh-mes) | PROPIEDAD DE CODENSA (\$/kWh) | PROPIEDAD DEL CLIENTE (*) (\$/kWh) | PROPIEDAD COMPARTIDA (*) (\$/kWh) |
| E1 | 0-CS (+) | 218,1954 | 202,9981 | 210,5966 |
| | Más de CS | 535,3829 | 496,7804 | 516,0817 |
| E2 | 0-CS (+) | 272,7442 | 253,7478 | 263,2458 |
| | Más de CS | 535,3829 | 496,7804 | 516,0817 |
| E3 | 0-CS (+) | 455,0755 | 422,2633 | 438,6694 |
| | Más de CS | 535,3829 | 496,7804 | 516,0817 |
| E4 | Todo consumo | 535,3829 | 496,7804 | 516,0817 |
| E5 | Todo consumo | 642,4595 | 596,1365 | 619,2980 |
| E6 | Todo consumo | 642,4595 | 596,1365 | 619,2980 |

| ÁREAS COMUNES NIVEL DE TENSIÓN 1 | | |
|----------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| MODALIDAD (Todo consumo) | PROPIEDAD DE CODENSA (\$/kWh) | PROPIEDAD DEL CLIENTE (*) (\$/kWh) |
| E1 | 535,3829 | 496,7804 |
| E2 | 535,3829 | 496,7804 |
| E3 | 535,3829 | 496,7804 |
| E4 | 535,3829 | 496,7804 |
| E5 y E6, Industrial y Comercial | 642,4595 | 596,1365 |
| Exenta de contribución | 535,3829 | 496,7804 |

(+) CS: Consumo de Subsistencia

| SECTOR NO RESIDENCIAL | | | | | | | | |
|---|---------------|----------------|---|--|---|-----------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| OFICIAL E INDUSTRIAL SIN CONTRIBUCIÓN | SENCILLA | Monomía | NIVEL 1 PROPIEDAD DE CODENSA (\$/kWh) | NIVEL 1 PROPIEDAD DEL CLIENTE (*) (\$/kWh) | NIVEL 1 PROPIEDAD COMPARTIDA (*) (\$/kWh) | NIVEL 2 (11.4 y 13.2 kV) (\$/kWh) | NIVEL 3 (34.5 kV) (\$/kWh) | NIVEL 4 (115 kV) (\$/kWh) |
| | | | INDUSTRIAL Y COMERCIAL CON CONTRIBUCIÓN | OPCIONES HORARIAS (**) | Punta | 535,3829 | 496,7804 | 516,0817 |
| Fuera de Punta | 543,9360 | 505,3335 | | | 524,6348 | 434,2047 | 398,5626 | 342,8547 |
| | 532,1304 | 493,5279 | | | 512,8292 | 423,7799 | 382,3305 | 332,8331 |
| INDUSTRIAL SIN CONTRIBUCIÓN | SENCILLA | Monomía | 642,4595 | 596,1365 | 619,2980 | 511,8761 | 472,6216 | 409,5269 |
| | | Punta | 652,7232 | 606,4002 | 629,5618 | 521,0456 | 478,2751 | 411,4256 |
| | | Fuera de Punta | 638,5565 | 592,2335 | 615,3950 | 508,5359 | 458,7966 | 399,3997 |
| INDUSTRIAL Y COMERCIAL CON CONTRIBUCIÓN | DOBLE HORARIA | Nocturna | 541,3062 | 502,7037 | 522,0050 | 431,8317 | 399,2266 | |
| | | Diurna | 533,4539 | 494,8514 | 514,1527 | 424,9595 | 391,1104 | |
| | | Nocturna | 649,5674 | 603,2444 | 626,4060 | 518,1980 | 479,0719 | |
| INDUSTRIAL SIN CONTRIBUCIÓN | DOBLE HORARIA | Diurna | 640,1447 | 593,8217 | 616,9832 | 509,9514 | 469,3325 | |
| | | | | | | | | |

ANEXO K.

CÁLCULOS DE COSTOS PRODUCCIÓN

En este anexo se presentan los cálculos necesarios para realizar el análisis de costos de producción en un año para obtener biodiésel a partir de residuos grasos de pollo a escala piloto, con base al proceso propuesto en el capítulo 3.

$$\begin{aligned} \text{Producción de biodiésel} &= \frac{315,60 \text{ L}}{\text{día}} * \frac{24 \text{ días}}{\text{mes}} * \frac{12 \text{ meses}}{1 \text{ año}} \\ &= 90.892,80 \frac{\text{L biodiésel}}{\text{año}} \end{aligned}$$

$$\text{Producción de biodiésel} = 90.892,80 \frac{\text{L biodiésel}}{\text{año}} * \frac{3,785 \text{ Gal}}{1\text{L}} = 79,44 \frac{\text{Gal}}{\text{año}}$$

$$282 \frac{\text{kg aceite}}{\text{día}} * \frac{24 \text{ días}}{\text{mes}} * \frac{12 \text{ meses}}{1 \text{ año}} * \frac{1 \text{ tonelada}}{1 \text{ kg}} = 81,22 \frac{\text{ton}}{\text{año}}$$

$$\text{Costo de producción de 1 ton de aceite} = \frac{\$364.430.802}{81,216 \frac{\text{ton}}{\text{año}}} * 1 \frac{\text{ton}}{\text{año}} = \$4'487.179,90$$

$$\text{Costo de producción de 1 ton de aceite} = \frac{\$364.430.802}{81,216 \frac{\text{ton}}{\text{año}}} * 1 \frac{\text{ton}}{\text{año}} = \$4'487.179,90$$

$$\frac{\$2.261/\text{kg} - \$457/\text{kg}}{\$2.261/\text{kg}} * 100 = 70,14\%$$

$$\frac{\$4'487.179 - \$457.000}{\$4'487.179} * 100 = 89,8\%$$

$$\frac{\$4'487.179 - \$457.000}{\$4'487.179} * 100 = 89,8\%$$

Para calcular el costo de producción de biodiésel sólo partiendo de aceite de pollo importado, cuyo valor es de \$470/kg, se calculó de la siguiente manera: en este se incluyen solo los equipos para producir biodiésel (reactor de transesterificación y esterificación, tanque de almacenamiento de biodiésel, aceite y lavado, y bombas). Como se ilustra en la **tabla 48**

Tabla 48. Producción de biodiésel partiendo de aceite de pollo de \$470

| Costos fijos y costos variables | | Porcentaje por costo total de producción (%) |
|--|--------------------|---|
| Equipos (\$) | 187'174.000 | 29,39 |
| Servicios (\$) | 1'876.419 | 0,29 |
| Materia prima (\$) | 368'820.000 | 57,91 |
| Mano de obra (\$) | 79'048.000 | 12,41 |
| Total | 636'919.000 | 100,00 |

Fuente: elaboración propia

Costo de producción de biodiésel partiendo de aceite de pollo

$$= \frac{\$863.415.535 - \$636.919.000}{\$863.415.535} * 100 = 26,23\%$$