

**EVALUACIÓN EXERGÉTICA DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE
PALMA AFRICANA**

STEFANY ROCHA ORTEGA

JENIFFER NATALIA VESGA PINTO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2011

**EVALUACIÓN EXERGÉTICA DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE
PALMA AFRICANA**

STEFANY ROCHA ORTEGA

(Cód.: 2061286)

JENIFFER NATALIA VESGA PINTO

(Cód.: 2060029)

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar por el título de
Ingeniera Química

Director

Dr.Sc. VIATCHESLAV KAFAROV

Co-Director

Ing. WILMER JAIMES

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2011

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Dr.Sc. Viatcheslav Kafarov, al Ingeniero Wilmer Jaimes, al Ingeniero Carlos Fernández Jefe de proceso de la planta extractora de Palmas del Cesar S.A., al Ingeniero Carlos Andrés Vargas, a la Ingeniera Paola Andrea Rocha y al Centro de Investigaciones para el Desarrollo Sostenible en Industria y Energía CIDES por toda la colaboración ofrecida durante la realización de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	18
1. MARCO TEÓRICO	21
1.1 PALMA DE ACEITE	21
1.2 EL ACEITE DE PALMA	22
1.3 PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA	23
1.3.1 Cosecha	23
1.3.2 Esterilización	23
1.3.3 Desfrutamiento	24
1.3.4 Digestión	24
1.3.5 Prensado	24
1.3.6 Clarificación	25
1.3.6.1 Clarificación estática	25
1.3.6.2 Clarificación Dinámica	25
1.3.7 Secado	26
1.3.8 Palmistería	26
1.4 CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE ANÁLISIS EXERGÉTICO	26
2. METODOLOGÍA	30
2.1 RECOPIACIÓN DE DATOS DEL PROCESO	30
2.2.1 Composición de la materia prima	30
2.2.2 Condiciones de operación de la planta extractora	30
2.2 SIMULACIÓN DEL PROCESO	31
2.2.1 Ingreso de los componentes al simulador	32
2.2.1.1 Componentes hipotéticos	32
2.2.2 Propiedades Termodinámicas	36
2.2.3 Puesta en marcha	36
2.3 BALANCE DE ENTROPÍA Y EXERGÍA	36
2.3.1 Balance de Entropía	37
2.3.2 Evaluación exérgica	37
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	39
3.1 EXERGÍA QUÍMICA	39
3.2 EXERGÍA ASOCIADA A FLUJOS DE MASA	41
3.3 EVALUACIÓN EXERGÉTICA POR ETAPAS	42
3.3.1 Esterilización	43
3.3.2 Desfrutamiento	43
3.3.3 Digestión	44
3.3.4 Prensado	44
3.3.5 Clarificación	45
3.3.6 Secado	45
3.4 ESTIMACIÓN DE LA EXERGÍA DESTRUIDA POR MEDIO DEL TEOREMA DE GOUY-STODOLA	46

4. CONCLUSIONES	47
5. ALTERNATIVAS DE MEJORA AL PROCESO	48
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Generalidades de la planta de beneficio	31
Tabla 2. Composición másica de cada corriente del proceso	35
Tabla 3. Resumen de propiedades termodinámicas calculadas por el método de Ambrose	32
Tabla 4. Condiciones de operación para cada etapa del proceso.	36
Tabla 5. Exergía química de algunas sustancias puras	39
Tabla 6. Propiedades reportadas por el simulador de las corrientes más importantes	41
Tabla 7. Exergía destruida por etapa.....	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Composición de un triglicérido	22
Figura 2. Composición másica del racimo de fruto fresco	33
Figura 3. Diagrama del proceso de extracción de aceite de palma	34
Figura 4. Diagrama de flujo por etapas del proceso de extracción de aceite de palma, realizado en Aspen Plus TM , con valores de exergía para cada corriente de materia en MJ/kg aceite	40
Figura 5. Eficiencia de las etapas del proceso.....	43
Figura 6. Comparación entre análisis exergético y teorema de Gouy-Stodola	46

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. COMPOSICIÓN DEL ACEITE DE PALMA.....	54
ANEXO B. ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE LOSTRIACILGLICEROLES	55

LISTA DE ABREVIATURAS

RFF Racimo de fruto fresco

SMS Sequential Modular Simulator (Simulador Modular Secuencial)

PM Peso molecular

TAG's Triacilgliceroles

C Cáprico

La Láurico

M Mirístico

P Palmítico

S Esteárico

O Oléico

L Linoléico

RACIEST Racimos Esterilizados

VS Vapor Saturado (entra a la esterilización)

DESCVAP Descarga de Vapor

VS2 Vapor Saturado 2 (entra a la digestión)

FRUTMACE Frutos Macerados

LICORPRE Licor de Prensa

AGUADILU Agua de Dilución

LODOSACE Lodos Aceitosos

RECUPCEN Recuperado de Centrifuga

LODOSACE Lodos Aceitosos

ACEITEHU Aceite Húmedo

NOMENCLATURA

B	Exergía [kJ/h]
B^f	Exergía Física [kJ/h]
B^c	Exergía Cinética [kJ/h]
B^p	Exergía Potencial [kJ/h]
B^q	Exergía Química [kJ/h]
m	Flujo másico [kg/h]
Q	Flujo de calor [kJ/h]
W	Potencia [kJ/h]
S	Entropía [kJ/h]
H	Entalpía [kJ/h]
T	Temperatura [K]
V	Volumen [m ³]
P	Presión [kPa]
T_c	Temperatura crítica [k]
P_c	Presión crítica [kPa]
V_c	Volumen crítico [cm ³ /mol]
ω	Factor acéntrico
Z_c	Factor de compresibilidad crítico
ΔG_{F_0}	Energía libre de Gibbs estándar de formación de la sustancia [kJ/kmol]
N_i	La fracción molar del elemento i en el compuesto
b_i	La exergía química del elemento i del compuesto [kJ/kmol]
\bar{b}_i	La exergía química del compuesto de la mezcla [kJ/kmol]
y_i	La fracción molar de la sustancia i en la mezcla
R	La constante ideal de los gases 8.314 Jmol ⁻¹ K ⁻¹
B_d	Exergía Destruída [kJ/h]
S_{gen}	Entropía generada [kJ h ⁻¹ K ⁻¹]
ϵ	Eficiencia exergética
B_C	Exergía asociada a la transmisión de energía en forma de calor [kJ/h]

B_w Exergía asociada al trabajo [kJ/h]

Subíndices

o Ambiente Estable de Referencia (AER ; $T_o = 303.15$ K ; $P_o = 101,325$ kPa)

p Producto

r Recurso

m Mezcla

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN EXERGÉTICA DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA AFRICANA*^{*}

AUTORES: STEFANY ROCHA ORTEGA – JENIFFER NATALIA VESGA PINTO **

PALABRAS CLAVES: ACEITE DE PALMA, ANÁLISIS EXERGÉTICO, SIMULACIÓN, EXTRACCIÓN.

DESCRIPCIÓN: En este estudio se estimaron las irreversibilidades del proceso de extracción de aceite de palma africana llevado a cabo en la planta extractora Palmas del Cesar S.A. Esto se hizo con el fin de identificar la localización y magnitud de los principales sumideros de exergía (relacionados con mayores pérdidas de energía útil) en el proceso mediante el uso de la primera y segunda ley de la termodinámica.

La metodología llevada a cabo se desarrolló en 3 pasos: primero, se realizó la simulación del proceso en el cual entran 30.000 kg/h de racimos de fruto fresco y son sometidos mediante efectos de presión y temperatura a las etapas de esterilización, desfrutamiento, digestión, prensado, clarificación y secado, para obtener un total de aceite extraído de 6.756 kg/h, con la ayuda del simulador Aspen Plus 2006.5TM. Posteriormente, se realizaron los balances de energía, entropía y exergía para estimar las irreversibilidades durante el proceso, las cuales fueron de 993,1 GJ/h. También se identificó que el prensado y la digestión son las etapas que presentan las mayores pérdidas exergéticas con un valor de 388,7 y 225,7 GJ/h respectivamente.

Se calcularon las eficiencias exergéticas para cada etapa del proceso, entre las cuales sobresalieron el secado con un 99% y la clarificación con un 97%. Finalmente, se compararon los valores obtenidos mediante el teorema de Gouy-Stodola con los resultados del balance exergético, encontrándose un alto grado de precisión entre ellos.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Dr.Sc. Viatcheslav Kafarov. Co-Director: Ing. Wilmer Jaimes.

ABSTRACT

TITLE: EXERGETIC EVALUATION OF AFRICAN PALM OIL MILLING PROCESS*.

AUTHORS: STEFANY ROCHA ORTEGA – JENIFFER NATALIA VESGA PINTO**

KEYWORDS: PALM OIL, EXERGY ANALISIS, SIMULATION, MILLING.

DESCRIPTION: In this research, the **irreversibilities** of african palm oil milling process, that takes place in Palmas del Cesar S.A.'s extraction plant, was estimated. This was done in order to identify the location and magnitude of the main sinks of exergy (related to the highest losses of useful energy) in the process by using the first and second law of thermodynamics.

The methodology undertaken was developed in 3 steps: First of all, 30.000 kg/h of fresh fruit bunches enter the process and they are submitted under pressure and temperature effects in the stages of sterilization, stripping or threshing, digestion, pressing, clarification and drying to obtain a total of 6.756 kg/h of extracted oil, it was simulated using Aspen Plus 2006.5™. After that, energy, entropy and exergy balances were done to estimate the irreversibilities through the process, equal to 993,1 GJ/h. Additionally, it was identified that pressing and digestion steps have the highest exergy losses with values of 388,7 and 225,7 GJ/h respectively.

Subsequently, exergy efficiency was calculated for each stage in the process, in which drying with 99% and clarification with 97%, were the most outstanding results. Finally, the values obtained by the Gouy-Stodola theorem were compared with the results of the exergy balance, finding a high degree of accuracy between them.

* Bachelor degree project

** Physical-chemical Engineering Faculty. Chemical Engineering Department. Director: Dr.Sc. Viatcheslav Kafarov. Co-Director: Ing. Wilmer Jaimes.

INTRODUCCIÓN

La agroindustria de la palma africana en Colombia ocupa el quinto lugar en producción en el contexto mundial y el primero en el continente americano. El producto principal que se deriva de la palma *elaeis guineensis Jacq*; es la producción de aceite a partir de la pulpa de los frutos y de las almendras. También se obtienen otros importantes subproductos derivados comestibles y no comestibles [1]. Las perspectivas del mercado de aceite de palma y sus derivados son promisorias puesto que el consumo de aceites y grasas vegetales, la producción de biocombustibles y la industria oleoquímica ha venido aumentando en Colombia y en el mundo en los últimos años. Cada vez se diversifica mas el uso y se abren mayores perspectivas para ampliar el mercado de las exportaciones, por ejemplo, la producción de palma en Colombia ha alcanzando récords en toda la historia, de acuerdo con cifras de Fedepalma, en efecto, la producción de dicha oleaginosa ascendió a 170.700 toneladas en enero y febrero de 2011, en comparación con los mismos meses de 2010, cuando la producción aumentó en 30.500 toneladas es decir en 22% [2]. La evidente demanda en aumento del aceite de palma africana es una consecuencia de la creación y expansión de plantas productoras de biodiesel con variadas tecnologías las cuales sirven como una alternativa para suplir la actual demanda energética a nivel nacional y mundial, obteniendo un producto de buena calidad, producido a partir de una fuente renovable y respetando las normas de preservación del medio ambiente.

En la actualidad, los estudios realizados en la industria de la palma de aceite, están enfocados principalmente en balances de masa y energía, los cuales

permiten identificar puntos del proceso en donde existan pérdidas de materia y/o un uso inadecuado de la energía, y de esta forma mejorar el proceso de producción.

Al hacer uso del balance energético a través de la primera ley de la termodinámica, se tiene una limitación importante, ya que al analizar un proceso real, es complejo cuantificar el grado de aprovechamiento de la energía suministrada al proceso, debido a que no se tienen en cuenta las irreversibilidades generadas en los equipos [3]. Consecuencia de esto, surge la necesidad de aplicar otro tipo de evaluación, en este caso el análisis exergético el cual al utilizar la primera y la segunda ley de la termodinámica, puede resolver las limitaciones anteriormente nombradas [4]. Además es considerada una herramienta de estudio y diagnóstico de sistemas, útil en el diseño de soluciones alternativas que busquen reducir la utilización innecesaria de recursos, y por ende los impactos potenciales generados por la misma, orientando así hacia la búsqueda del desarrollo sostenible [5]. Es importante tener en cuenta que este análisis se puede utilizar en cualquier proceso de la industria puesto que en ellos siempre existirán igualmente irreversibilidades en el sistema.

Este proyecto de investigación tiene como objetivo principal el uso de la evaluación exergética del proceso de extracción de aceite de palma africana. Con el propósito de obtener resultados aterrizados al contexto nacional, se utilizó como base el proceso llevado a cabo en la planta extractora Palmas del Cesar S.A., teniendo en cuenta condiciones tales como flujos másicos, temperaturas, presiones, entre otras, variables que son de vital importancia para el proceso en estudio. Posteriormente se planteó la simulación del proceso de extracción llevado a cabo allí mediante el uso del software comercial ASPEN PLUS™ 2006.5 (Aspen technologies Inc., USA) con el propósito de realizar el balance energético en cada etapa del proceso y estimar magnitudes termodinámicas tales como entalpía, entropía, etc., datos que son necesarios para la posterior evaluación exergética por parte de los autores.

Por último es necesario resaltar que el presente trabajo está enmarcado en un proyecto de investigación apoyado por Colciencias orientado a la producción de biodiesel a partir de fuentes como la palma africana e higuierilla.

1. MARCO TEÓRICO

Este capítulo comprende los conceptos teóricos básicos para el desarrollo del proyecto. En primera estancia, se presentan las generalidades de la palma africana (1.1) y las características a saber del aceite que se puede obtener a partir de su fruto (1.2). Posteriormente, se describe el proceso de extracción de este aceite (1.3). Finalizando con la presentación del marco conceptual para la realización de el balance exergético (1.4).

1.1 PALMA DE ACEITE

Dentro de las plantas oleaginosas, la de mayor rendimiento en toneladas métricas de aceite por hectárea en el mundo, es la **palma de aceite**, conocida también como palma africana. En comparación con otras especies oleaginosas, la palma de aceite tiene un rendimiento por hectárea varias veces superior, del orden de los 5.550 l/Ha*año [6-8]. La razón de ser del cultivo de esta especie es naturalmente la obtención del aceite de palma, que es un producto muy versátil y tiene una amplia gama de usos [6]. Tanto la producción de racimos como del aceite a nivel interno durante la formación, obedece a un proceso bioquímico relativamente complejo influenciado por muchos factores que conciernen a las palmas en sí mismas y al medio en que se desarrollan.

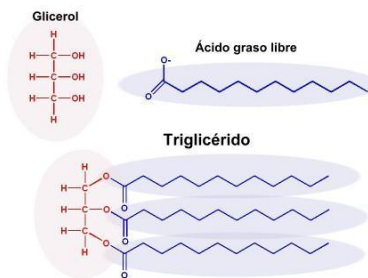
El porcentaje de aceite de palma extraíble, puede variar significativamente por las propiedades físicas y químicas de los suelos, en el manejo nutricional, el suministro y evacuación del agua, el control de las malezas, los cuidados sanitarios y las demás labores propias del mantenimiento del cultivo, que son determinantes para que las palmas expresen su potencial productivo [1, 9]. En otras palabras, el nivel de tecnología aplicado en cada plantación en buena medida condiciona la productividad y la calidad de la materia prima o del fruto.

1.2 EL ACEITE DE PALMA

El aceite de palma es en su mayoría una mezcla de triglicéridos, teniendo una composición másica de éstos del 95% y el restante obedece a otros compuestos entre los que sobresalen ácidos grasos libres.

Un triglicérido es una combinación de una molécula de glicerol y de tres ácidos grasos (Ver figura 1). El aceite extraído del mesocarpio contiene ácidos grasos saturados como el palmítico, mirístico, esteárico, láurico y araquídico; e insaturados como el palmitoléico, oléico y linoléico (ver anexo A). Éste aceite es una fuente natural de vitamina E, vitamina A, tocoferoles y tocotrienoles [1, 7-9].

Figura 1. Composición de un triglicérido



Fuente: [30].

El aceite de palma es una materia prima que se utiliza entre otras, en la industria de alimentos, en la fabricación de jabones y detergentes, grasas lubricantes y secadores metálicos, destinados a la producción de pintura, barnices y tintas, biodiesel entre otros.

El procesamiento de los frutos de la palma de aceite se lleva a cabo en las plantas de beneficio también llamadas plantas extractoras. En éstas se desarrolla el proceso de extracción del aceite crudo de palma (aceite rojo) y aceite de palmiste (aceite amarillo) como productos principales (no en todas las plantas se produce aceite de palmiste, este es un proceso independiente). El proceso tiene un conjunto de etapas que consisten básicamente en esterilizar los frutos,

desgranarlos, macerarlos, extraer el aceite de la pulpa, clarificarlo y recuperar las almendras del bagazo resultante [7].

1.3 PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA

A continuación se describen las principales etapas que se llevan a cabo para el proceso de extracción de aceite de palma:

1.3.1 Cosecha. Los racimos al cumplir su proceso de maduración, deben ser cosechados o cortados y llevados a la planta de beneficio rápidamente, con el fin de evitar que aumente el contenido de ácidos grasos libres (AGL) del aceite dentro de los frutos, como subproducto de una reacción química, en la cual, actúa como catalizador una enzima llamada lipasa. Esta reacción indeseada avanza rápidamente desde el momento que alcanza su proceso de maduración, además, puede suceder por largos tiempos de almacenamiento en planta, por el contacto con agua e impurezas y por los microorganismos presentes en las mismas [1].

1.3.2 Esterilización. Una vez los racimos llegan a la planta de beneficio, se descargan en una tolva. Ésta alimenta las vagonetas o carros que luego se introducen en los autoclaves o cilindros grandes cerrados, en donde se le realiza un proceso de cocimiento a los racimos por medio del ingreso de vapor saturado a 446,03 kPa en un ciclo (de tres picos de presión), en donde se cumplen los siguientes objetivos [9]:

- Preparar los frutos por cocción para la extracción del aceite.
- Inactivación la enzima lipasa para minimizar el proceso de acidificación.
- Coagular las proteínas e hidrolizar las gomas que impiden la separación del aceite.
- Facilitar el ablandamiento y el rompimiento de la unión entre el raquis y los frutos del racimo para el desfrutamiento.

Como producto del proceso de esterilización se obtiene el fruto cocido, efluentes y vapor residual.

1.3.3 Desfrutamiento. Una vez esterilizados los racimos, pasan al desfrutador o tambor rotatorio, en donde se separan los frutos del raquis o tusa. El desfrutador es un tambor a manera de jaula que gira sobre un eje central; los racimos a desfrutar pasan al interior del tambor y golpean repetitivamente los barrotes longitudinales del mismo, acción que produce el desprendimiento de los frutos [1]. Los frutos separados pasan a la siguiente etapa del proceso, mientras que los racimos vacíos –o tusas- salen por una banda, como un subproducto del proceso, para ser aplicados luego en el campo, como abono orgánico de alta eficiencia por su composición [9].

1.3.4 Digestión. Después de que los racimos han sido desfrutados, los frutos son recalentados y la pulpa es desprendida de las nueces por un proceso de maceración con ingreso de vapor, que en conjunto, producen que las paredes de las celdas que contienen el aceite en el fruto se rompan, de tal manera que pueda ser fácilmente expulsado o extraído fuera de las celdas rotas durante el proceso de extracción por prensado en la etapa siguiente. La digestión se efectúa en recipientes cilíndricos verticales (llamados digestores), provistos de un eje central con brazos de agitación a bajas revoluciones, frenos ubicados en las paredes y boquillas o flautas para el ingreso de vapor, para lograr sus objetivos [1, 9].

1.3.5 Prensado¹. Los frutos digeridos son prensados dentro de una canasta perforada horizontal de forma cilíndrica, en donde, por la acción mecánica de dos tornillos sinfín de paso regresivo y girando paralelamente en sentido contrario, a través de los huecos de la canasta, sale un licor o mezcla con alto contenido de aceite ó mejor conocido como licor de prensa y por la parte superior de los tornillos sale la masa sólida también conocida como torta de prensado, compuesta básicamente por fibras, nueces, y agua [9]. En este punto del proceso se dividen

¹ La presión máxima permisible en el prensado es de 13000 kPa y la temperatura máxima del aceite hidráulico debe ser de 363,15 K.

las corrientes, es decir, el licor de prensa sigue su línea hacia la clarificación de aceite de palma, y la torta se destina hacia la palmistería.

1.3.6 Clarificación. Posterior al prensado, al licor de prensa se le agrega agua para lograr una dilución, ésta misma facilita la separación y purificación del aceite en la etapa conocida como clarificación, este licor, contiene aceite, agua, lodos livianos (compuestos por pectinas y gomas) y lodos pesados (compuestos por tierra, arena y otras impurezas). Para lograr dicha separación, se aprovecha la característica de inmiscibilidad entre el agua y el aceite [1]. El proceso de clarificación se divide en dos partes:

1.3.6.1 Clarificación estática² (por decantación): en esta etapa se logra separar hasta el 90% del aceite contenido en el licor. Esto se logra por la decantación sin movimiento, en condiciones de temperatura que faciliten el desplazamiento de las partículas por la diferencia de densidades, en donde el aceite (partículas livianas) se suspenden y las partículas más pesadas o lodos caen por la diferencia de densidades, se van decantando y se bombean hacia la etapa de clarificación dinámica. El aceite se recoge por rebose y es bombeado hacia un proceso de secado. Esto se logra en unos recipientes cilíndricos verticales y otros rectangulares provistos de serpentines de vapor y colectores a diferentes niveles para lograr los objetivos de separación [9].

1.3.6.2 Clarificación Dinámica (por centrifugación): en esta etapa se requiere para la separación un movimiento producido por una fuerza centrífuga en el caso particular, haciendo uso para esto de una centrífuga deslodadora operando a altas velocidades. Durante esta etapa se logra una recuperación de alrededor del 10% de aceite contenido en el lodo exclarificado. El agua y los lodos pesados (efluentes) salen por las boquillas o toberas y el aceite y los lodos livianos, también conocido como recuperado de centrífuga, se concentran en el centro y

² Para obtener una separación estática ideal se debe mantener una temperatura del medio entre 363,15 K y 368,15 K.

son descargados por un tubo recolector llamado “recuperador” los cuales se recirculan hacia la clarificación estática junto con el licor de prensa. La fracción líquida residual o efluentes, se van hacia una etapa de tratamiento posterior [9].

1.3.7 Secado. El aceite sale de la etapa anterior con un porcentaje de humedad e impurezas residuales que deben ser reducidas o eliminadas en lo posible; para lograr esto es sometido a una última etapa de secado en la cual se debe reducir la humedad del aceite (como mínimo entre 0,1 y 0.2%); para esto se utiliza un secador al vacío que opera entre 343,15 y 353,15 K. Allí se evapora la humedad del aceite mediante un vacío de alrededor de 27,5 inHg (el agua se evapora a unos 328,15 K a ese vacío). El aceite de palma se bombea de esta etapa como producto final a su respectivo almacenamiento [9].

1.3.8 Palmistería. Esta etapa se realiza para realizar la recuperación y acondicionamiento de la almendra o palmiste, contenido en la torta después del prensado, esta etapa se realiza en una planta de procesamiento de almendra ubicada posterior al proceso de obtención del aceite de palma y no se tendrá en cuenta dentro del desarrollo del presente proyecto. En este proceso se realizan etapas de separación neumática, secado, clasificación y trituración para lograr la ruptura de las nueces, y así poder realizar recuperación de la almendra de la que se derivan el aceite y la torta de palmiste [9, 1].

1.4 CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE ANÁLISIS EXERGÉTICO

Cuando dos sistemas en diferentes estados entran en contacto, existe una oportunidad de generar trabajo al pasar desde sus respectivos estados iniciales a un estado de equilibrio mutuo. Si el proceso ocurre de manera reversible, entonces el trabajo generado tiene el valor máximo. Cuando hay irreversibilidades presentes durante el proceso, entonces parte del potencial de generar trabajo que existía originalmente es disipado. Cuando uno de los sistemas es el ambiente y el otro es el sistema de interés, entonces, se conoce como **exergía** al trabajo

máximo que en teoría pudiera obtenerse al pasar el sistema de su estado inicial al estado de equilibrio con el ambiente al entrar ambos en contacto. Una vez especificado el Ambiente Estable de Referencia (AER), la exergía puede considerarse una propiedad del sistema de interés [11].

El balance exergético en estado estacionario de manera general se puede escribir como la exergía que entra al sistema igualándola a la suma de las exergías que salen, se destruyen y se pierden del sistema respectivamente (ecuación 1) [21].

$$B_{\text{Entra}} = B_{\text{Sale}} + B_{\text{Pierde}} + B_{\text{Destruye}} \quad (1)$$

En ausencia de efectos nucleares, magnéticos, eléctricos y de tensión superficial, la exergía total de un sistema puede dividirse en cuatro componentes: exergía física, cinética, potencial y química [11, 13, 25] (Ecuación 2).

$$B = B^f + B^p + B^c + B^q \quad (2)$$

En el presente trabajo no se tuvo en cuenta las energías ni las exergías cinética y potencial respectivamente ya que se consideran despreciables, de manera que la exergía específica total de un flujo de materia se define por medio de dos componentes: la exergía química y física como se puede ver en la ecuación 3 [16, 18, 24].

$$B = B^f + B^q \quad (3)$$

La exergía física de un sistema se obtiene mediante la siguiente ecuación 4 [11,14, 20-25].

$$B^f = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (4)$$

La exergía química del sistema es el potencial de generar trabajo que posee éste respecto al ambiente al pasar del estado “ambiental” a un estado no sólo de equilibrio termo-mecánico sino también químico [11].

La exergía estándar de cualquier compuesto puede ser encontrada en la literatura, sin embargo, cuando este dato no está disponible, es posible calcularlo por medio de la aproximación expresada en la ecuación 5 [16-19, 25].

$$b^q = \Delta G_{F_0} + \sum N_i b_i \quad (5)$$

La exergía química de una mezcla es definida como la suma de la exergías químicas de las sustancias que la componen, más la contribución exergética debido a la mezcla de las sustancias en condiciones ideales; como se puede observar en la ecuación 6, usada por Pellegrini L., y otros autores en sus trabajos [15-17, 21, 25].

$$b_{mezcla}^q = \sum y_i \bar{b}_i + RT_0 \sum y_i \ln(y_i) \quad (6)$$

Es importante resaltar que para las fuentes de energía se definen los coeficientes de conversión de exergía. En el caso de los combustibles (carbón, petróleo, gas natural), el contenido exergético es estimado multiplicando el poder calorífico neto por un coeficiente apropiado. Este coeficiente puede ser usado para estimar la exergía química de cualquier combustible a partir de su poder calorífico o entalpía. El coeficiente exergético de la electricidad es considerado igual a 1; por lo tanto, 1 KJ de energía eléctrica corresponde a 1 KJ de flujo exergético [16, 23].

La exergía asociada a la transferencia de energía en forma de calor depende de la temperatura a la que se produce en relación con la temperatura del AER (ecuación 7) [13, 22, 26].

$$B_{calor} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q \quad (7)$$

La destrucción de la exergía se debe a la presencia de irreversibilidades durante el proceso y también está relacionada con la generación de entropía por la siguiente ecuación conocida como teorema de *Gouy-Stodola* (ecuación 8) [11, 27].

$$B_d = T_0 S_{gen} \quad (8)$$

Se define la **eficiencia exergética** (ε) como la proporción entre el producto y el recurso de un sistema expresados en términos de la exergía (ecuación 9) [11, 18, 20, 24, 25].

$$\varepsilon = \frac{B_p}{B_r} \quad (9)$$

El producto B_p se refiere al resultado deseado producido por el sistema y el recurso B_r se refiere precisamente a los recursos utilizados para generar el producto.

En las siguientes secciones se evidenciará la aplicación de los conceptos teóricos presentados anteriormente y se identificará la importancia de los mismos en el desarrollo del proyecto.

2. METODOLOGÍA

La metodología general empleada para el cumplimiento de los objetivos propuestos en el presente proyecto, se desarrolló en tres etapas que son explicadas a continuación. Cabe resaltar que esta metodología es aplicable a cualquier planta de beneficio ya que el proceso de extracción de aceite de palma africana está altamente estandarizado y es muy similar para las diferentes plantas extractoras en Colombia, difiriendo principalmente en la capacidad de procesamiento y disponibilidad de fruto.

2.1 RECOPIACIÓN DE DATOS DEL PROCESO

Con el fin de realizar la simulación del proceso, se tuvieron en cuenta los siguientes pasos previos a ésta:

2.2.1 Composición de la materia prima. En primera instancia se definieron los componentes que conforman la materia prima. Con base en la literatura se caracterizó el RFF con una composición en peso de mesocarpio 50%, racimos vacíos 25%, nuez 14% y humedad 11% [7-9]. Cuyas composiciones se pueden ver más detalladas en la figura 2.

2.2.2 Condiciones de operación de la planta extractora. Se visitó la planta extractora Palmas del Cesar S.A, ubicada en el corregimiento de Minas, cerca a San Alberto, Cesar, con el fin de recopilar la mayor cantidad de información posible. Entre los datos brindados por la empresa, sobresalen los siguientes (Tabla 1.):

Tabla 1. Generalidades de la planta de beneficio

DESCRIPCIÓN	VALOR
Capacidad de procesamiento	30.000 kg/h
Turno de producción	16 h/día.
Sistema de recuperación de calor y vapor	NO
Sistema de co-generación	NO
Producción promedio mensual de aceite de palma	2.100.000 kg*
Cantidad de vapor saturado requerida	12.000 kg/h
Energía eléctrica que consume / ton RFF procesado	23 kW**

*Cantidad sujeta a disponibilidad de materia prima.

**Incluyendo el proceso de palmistería.

Fuente: Palmas del Cesar S.A.

Durante la visita, se hizo el reconocimiento del proceso, junto con las etapas llevadas a cabo allí y sus respectivas condiciones de operación: flujos másicos, temperaturas y presiones que se encuentran resumidas en la figura 3. Se puede apreciar que se cumple el principio de la conservación de la masa.

El porcentaje de aceite de palma promedio en un racimo de fruto fresco es del 24%. Sin embargo, en esta planta de beneficio se logra extraer el 22,5%, debido a que existen pérdidas de aceite aproximadas del 1,73% por tonelada procesada durante algunas etapas del proceso de extracción; perdiéndose 0,01% en la esterilización, 0,9% en el desfrutamiento, 0,37% en la torta que sale del prensado (compuesta por fibra y nuez) y 0,45% de aceite que se va impregnado en los lodos. Para un mayor detalle sobre las composiciones en cada corriente del proceso, ver la tabla 2.

2.2 SIMULACIÓN DEL PROCESO

Se integraron los datos obtenidos durante la visita a la extractora con las herramientas ofrecidas por el simulador ASPEN PLUS™. Para este proyecto, se

trabajó en modo SMS ya que resuelve los balances de masa y energía equipo a equipo, dividiendo el sistema en módulos que corresponden a las diferentes operaciones básicas. Además, trabaja en estado estacionario, estimando las características del proceso, parámetros físicos, requerimientos de energía y parámetros de los equipos para un caso especial de diseño.

2.2.1 Ingreso de los componentes al simulador. Se utilizó la base de datos de Aspen PlusTM para introducir los compuestos que intervienen en el proceso, sin embargo, fue necesario crear algunos componentes hipotéticos para aquellos que no estaban disponibles, tales como (hemicelulosa, celulosa, lignina, cenizas y todos los triglicéridos tanto del aceite de palma como de palmiste).

2.2.1.1 Componentes hipotéticos. Para crear cada componente fue necesario introducir tanto su estructura molecular, como ciertas propiedades de las sustancias. Cuantos más datos se introduzcan, más datos generará Aspen PlusTM. Para cada uno de los TAG's se introdujo su estructura molecular, posteriormente se calcularon sus propiedades termodinámicas a través del método de estimación de Ambrose que se encuentra descrito en el Anexo B.

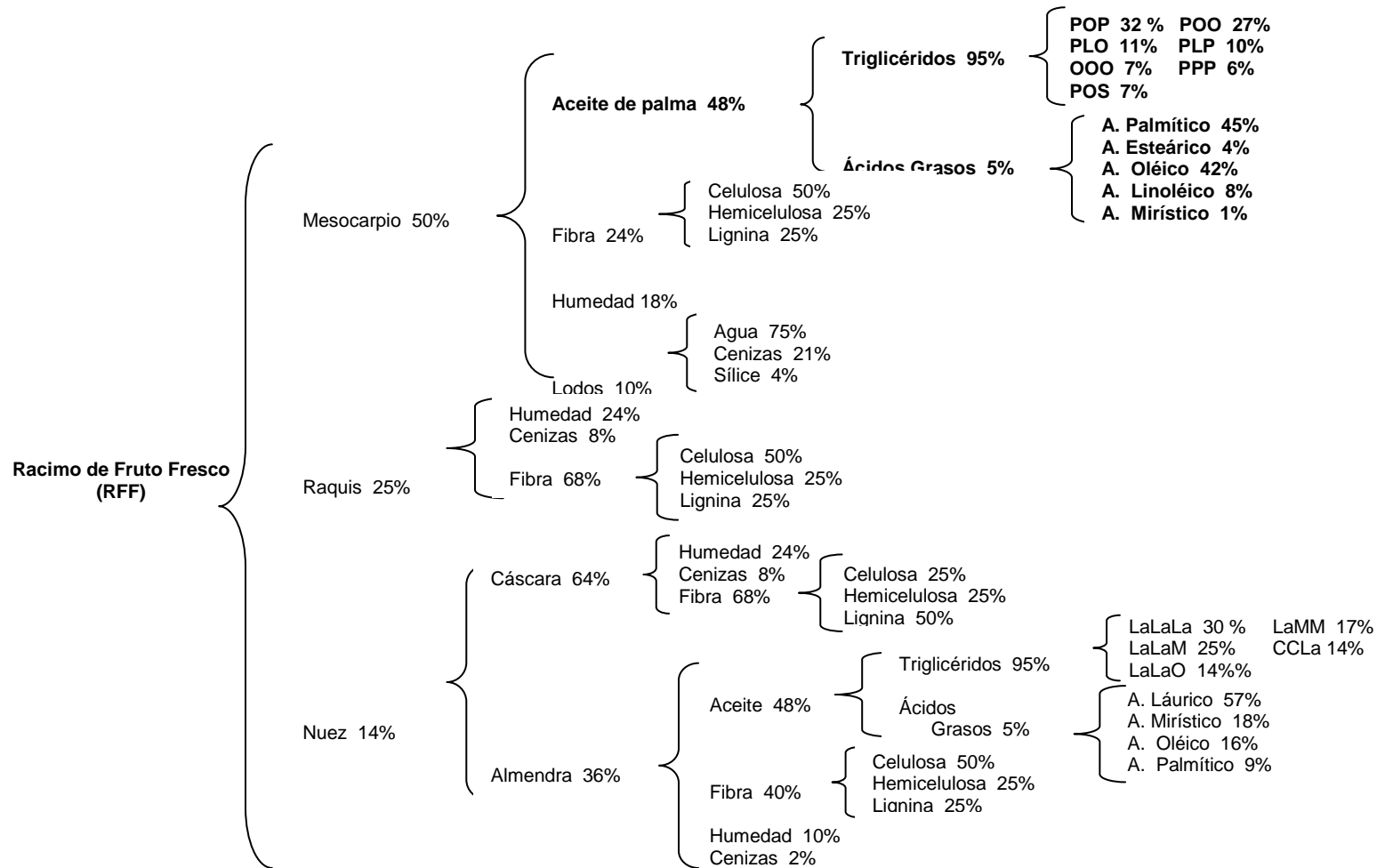
Tabla 2. Resumen de propiedades termodinámicas calculadas por el método de Ambrose

Prop./TAG's	PPP	POP	POO	POL	PLP	OOO	PSP	LaLaM	LaLaLa	LaLaO	LaMM	CCLa
PM	807,32	833,36	859,39	857,38	831,34	885,43	861,41	667,05	639,00	721,14	695,11	582,89
Tc (K)	899,00	900,63	905,66	905,47	900,46	910,43	905,74	866,31	859,75	878,44	872,60	866,61
Pc (bar)	5,09	4,94	4,81	4,84	4,98	4,68	4,77	6,24	6,54	5,77	5,97	7,23
Vc (cm ³ /mol)	2920,00	3015,00	3105,20	3085,20	2995,00	3195,40	3125,20	2373,80	2263,60	2574,20	2484,00	2043,20
w	1,67	1,70	1,72	1,72	1,70	1,74	1,72	1,55	1,52	1,60	1,58	1,45
Zc	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,21	0,20	0,20	0,20

Fuente: Los Autores.

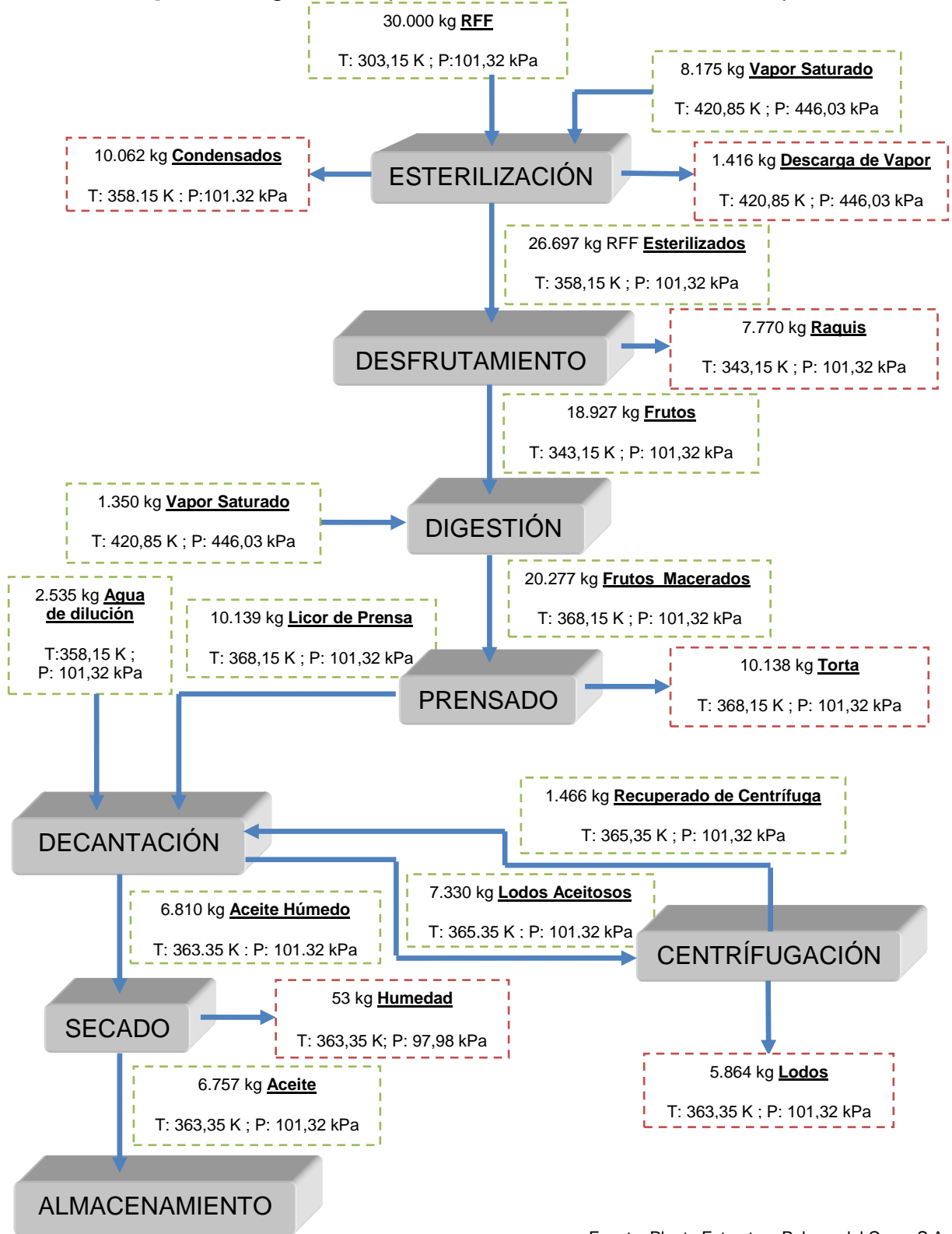
Finalmente se ingresaron estos valores al simulador. Dichos parámetros se reportan en la tabla 3 [12].

Figura 2. Composición másica del racimo de fruto fresco



Fuente: Los autores

Figura 3. Diagrama del proceso de extracción de aceite de palma



Fuente: Planta Extractora Palmas del Cesar S.A.

Tabla 3. Composición másica de cada corriente del proceso

Compuesto	CORRIENTES																
	RFF	Vapor saturado	Descarga de vapor	Condensados	Racimos esterilizados	Frutos	Raquis	Frutos macerados	Torta	Licor de prensa	Agua de dilución	Lodos aceitosos	Recup. centrifuga	Lodos pesados	Aceite húmedo	Aceite	Humedad
Agua	30,100	100	100	99,9702	21,463	20,764	23,166	26,039	23,732	28,346	100	91,218	91,218	91,218	0,881	0,100	100
Cenizas	3,533	----	----	----	3,970	2,430	7,722	2,269	1,361	3,176	----	5,491	5,491	5,491	----	----	----
Silice	0,193	----	----	----	0,217	0,306	----	0,286	0,000	0,572	----	0,989	0,989	0,989	----	----	----
Celulosa	17,835	----	----	----	20,042	14,796	32,819	13,811	27,624	----	----	----	----	----	----	----	----
Hemicelulosa	9,985	----	----	----	11,220	9,090	16,409	8,485	16,971	----	----	----	----	----	----	----	----
Lignina	12,120	----	----	----	13,620	12,474	16,409	11,644	23,289	----	----	----	----	----	----	----	----
Palmitico	0,549	----	----	0,0007	0,617	0,837	0,078	0,782	0,036	1,528	----	0,052	0,052	0,052	2,230	2,248	----
Esteárico	0,053	----	----	0,0001	0,060	0,081	0,008	0,076	0,002	0,149	----	0,005	0,005	0,005	0,218	0,220	----
Oléico	0,515	----	----	0,0006	0,579	0,786	0,073	0,734	0,042	1,426	----	0,048	0,048	0,048	2,081	2,098	----
Linoléico	0,092	----	----	0,0001	0,103	0,140	0,013	0,131	0,004	0,258	----	0,009	0,009	0,009	0,377	0,380	----
Mirístico	0,019	----	----	0,0000	0,022	0,030	0,002	0,028	0,022	0,034	----	0,001	0,001	0,001	0,050	0,050	----
Láurico	0,023	----	----	----	0,026	0,036	----	0,034	0,067	----	----	----	----	----	----	----	----
PPP	1,416	----	----	0,0017	1,590	2,160	0,203	2,016	0,065	3,967	----	0,135	0,135	0,135	5,791	5,837	----
POP	7,217	----	----	0,0089	8,107	11,010	1,035	10,277	0,329	20,224	----	0,686	0,686	0,686	29,520	29,753	----
POO	6,218	----	----	0,0077	6,985	9,486	0,892	8,854	0,283	17,424	----	0,591	0,591	0,591	25,433	25,634	----
POL	2,608	----	----	0,0032	2,930	3,979	0,374	3,714	0,119	7,309	----	0,248	0,248	0,248	10,669	10,753	----
PLP	2,397	----	----	0,0029	2,692	3,656	0,344	3,413	0,109	6,716	----	0,228	0,228	0,228	9,802	9,880	----
OOO	1,598	----	----	0,0020	1,795	2,437	0,229	2,275	0,073	4,477	----	0,152	0,152	0,152	6,535	6,586	----
PSO	1,568	----	----	0,0019	1,761	2,392	0,225	2,232	0,071	4,393	----	0,149	0,149	0,149	6,413	6,463	----
LaLaM	0,491	----	----	----	0,552	0,779	----	0,727	1,454	----	----	----	----	----	----	----	----
LaLaLa	0,585	----	----	----	0,658	0,928	----	0,866	1,732	0,000	----	----	----	----	----	----	----
LaLaO	0,272	----	----	----	0,306	0,432	----	0,403	0,806	0,000	----	----	----	----	----	----	----
LaMM	0,333	----	----	----	0,374	0,527	----	0,492	0,984	0,000	----	----	----	----	----	----	----
CCLa	0,278	----	----	----	0,313	0,441	----	0,412	0,824	0,000	----	----	----	----	----	----	----

Fuente: Palmas del Cesar S.A.

2.2.2 Propiedades Termodinámicas. El modelo utilizado para el cálculo de los coeficientes de actividad en la fase líquida fue el NRTL (Non-Random Two Liquid) y para la fase vapor se empleó el modelo de la ecuación de SRK (Soave-Redlich-Wrong) debido a la naturaleza de los compuestos que intervienen en el proceso simulado [28].

2.2.3 Puesta en marcha. Habiendo especificado todas las corrientes y sus condiciones de operación, se procedió a simular cada una de las etapas del proceso, teniendo en cuenta para cada una las condiciones mostradas en la tabla 4.

Tabla 4. Condiciones de operación para cada etapa del proceso.

	Esterilización	Desfrutamiento	Digestión	Prensado	Decantación	Centrifugación	Secado
Presión	275,79 kPa	101,3 kPa	101,3 kPa	111,3 kPa	101,3 kPa	101,3 kPa	-27,5 inH
Temperatura	443,15 K	343,15 K	368,15 K	368,15 K	365,35 K	358,15 K	363,15 K

Fuente: [7-9]

Finalizada la simulación, se utilizaron los datos del balance energético arrojados por el software en el siguiente paso que se explica a continuación:

2.3 BALANCE DE ENTROPÍA Y EXERGÍA

Se definió el sistema identificando los flujos de entrada y salida de cada etapa del proceso (teniendo en cuenta el principio de conservación de la masa) con sus respectivas condiciones de operación.

Se identificó como producto principal el aceite de palma, como subproductos: las tusas y la torta (resultado del prensado), como desechos: los lodos pesados (con un alto contenido de carga orgánica, los cuales van a un posterior tratamiento de efluentes para recuperación de aceite contenido en ellos), la descarga de vapor y los condensados. Cada etapa del proceso se analizó de forma independiente.

2.3.1 Balance de Entropía. Se aplicó la segunda ley de la termodinámica (SLT), (ecuación 10), para calcular la entropía generada por etapa, seguido de esto se halló la exergía destruida en cada una de ellas, utilizando el teorema de Gouy-Stodola (ecuación 8), con el fin de comparar los resultados con los valores obtenidos de la evaluación exergética.

$$S_{gen} = \sum (\dot{m}_i * s_i)_s - \sum (\dot{m}_i * s_i)_e - \sum \frac{Q_i}{T_i} \quad (10)$$

2.3.2 Evaluación exergética. Se calculó la exergía física para cada corriente del proceso teniendo en cuenta sus condiciones de operación y en el AER (ecuación 4). Se tomó como temperatura y presión de referencia 298.15 K y 101,325 kPa, respectivamente.

Las exergías químicas específicas de algunas de las sustancias puras que intervienen en el proceso se encontraron reportadas en la literatura [15, 34, 35]. Para los compuestos que no se encontró esta información, se empleó el método de contribución de grupos de Joback [12] para el cálculo de la energía libre de Gibbs de formación necesaria para aplicar la ecuación 5 descrita anteriormente [16,19, 25]. Para el cálculo de la exergía química de cada una de las corrientes se empleó la ecuación 6 [15-17, 21,25]. Posterior a esto se halló la exergía específica total de cada flujo, para la cual se utilizó la ecuación 3. Es decir, se sumaron los valores de exergía química y física para cada una de las entradas y salidas de las etapas del proceso.

Se tuvo en cuenta la transferencia de exergía asociada al trabajo, la cual es igual al trabajo mecánico suministrado por etapa y se calculó la exergía asociada a la transferencia de energía en forma de calor (ecuación 7) [13, 22, 26].

Se encontró la eficiencia exergética para cada etapa del proceso por medio de la ecuación 9. Teniendo en cuenta la salida deseada que contiene el producto principal de cada etapa y que continúa el flujo del proceso (ver figura 3).

Finalmente, se calculó la exergía destruida en cada unidad de proceso por medio del balance exergético general en estado estacionario (ecuación 1) y asumiendo la exergía perdida y destruida como un todo (ecuación 11) [11, 13,25].

$$B_{Destruída} = \sum B_e - \sum B_s + B_{calor} + B_W \quad (11)$$

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La evaluación exergética provee una alternativa de mejoramiento al proceso de extracción de aceite de palma, la cual puede ser utilizada como una herramienta para identificar pérdidas de materia y energía, detectar áreas que necesiten mejoras tecnológicas mediante el cálculo de eficiencias exergéticas, entre otros. En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los pasos nombrados en el capítulo anterior, junto con sus respectivos análisis.

3.1 EXERGÍA QUÍMICA

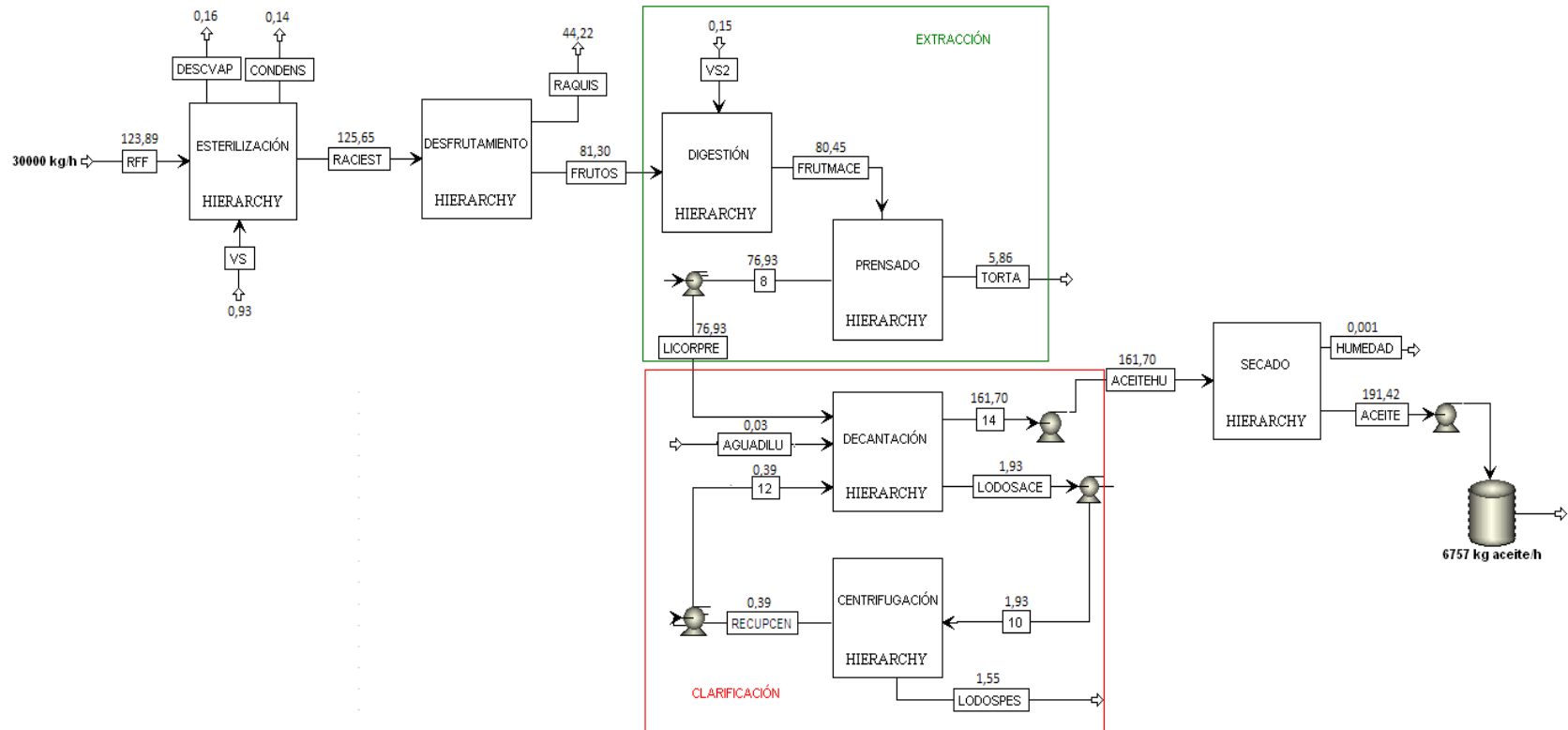
Se validó el uso de la ecuación 5 comparando las exergías químicas encontradas en la literatura para compuestos como el ácido palmítico, el vapor de agua, entre otros, con el resultado arrojado al emplear dicha ecuación. La tabla 5 presenta los valores de las exergías químicas para varios de los compuestos utilizados durante el proceso.

Tabla 5. Exergía química de algunas sustancias puras

Compuesto	kJ/mol
Agua(Líquida) ^a	0,9
Vapor ^b	9,5
Vapor ^e	9,34
Ácido Palmítico ^b	10031,62
Ácido Palmítico ^c	10277,39
Ácido Palmítico ^e	10089,06
Ácido Oleico ^e	11239,16
Sílice ^d	1,9
Sílice ^e	2,2
Tripalmitina ^e	31948,55
Trilaurina ^e	889,62
Celulosa ^e	2749,9

Fuente: ^a Exergy analysis of sugarcane bagasse gasification [15], ^b Handbook of Chemistry and Physics [35], ^c Standard chemical exergy of elements updated [33], ^d Prediction of standard chemical exergy by a three descriptors QSPR model [34], ^e Calculado por la ecuación 5.

Figura 4. Diagrama de flujo por etapas del proceso de extracción de aceite de palma, realizado en Aspen Plus™, con valores de exergía para cada corriente de materia en MJ/kg aceite



Fuente: Los Autores

3.2 EXERGÍA ASOCIADA A FLUJOS DE MASA

Los resultados arrojados por el programa, tales como entalpías y entropías a condiciones de operación (tabla 6) sirvieron como base para calcular las exergías asociadas a flujos de materia para cada etapa del proceso y se encuentran reportadas junto con el esquema de la simulación en la figura 4. En esta figura se puede ver claramente que la exergía no se conserva como ocurre en el caso de la energía, y contrario como ocurre con la entropía que se genera; ésta se pierde y/o se destruye.

Tabla 6. Propiedades reportadas por el simulador de las corrientes más importantes

CORRIENTES	PRESIÓN (kPa)	TEMPERATURA (K)	ENTALPÍA ESPECÍFICA (kJ/kmol)	ENTROPÍA ESPECÍFICA (kJ/kmol*K)
RFF	101,35	303,2	-262.759,5	-133,19
VAPOR SATURADO	420,85	420,8	-23.769,2	-44,98
RAQUIS	101,35	343,2	-234.943,4	-116,69
TORTA DE PRENSA	101,35	368,2	-270.294,9	-142,08
ACEITE DE PALMA	101,35	365,4	-65.122,39	83,27

Fuente: Aspen Plus™.

De igual forma, en la figura 4 se observa que la exergía incorporada a una sustancia durante el proceso es también una medida de la calidad del material. En este caso, se mejora la calidad del RFF (123,89 MJ/kg aceite) para producir aceite de Palma (191,42 MJ/kg aceite).

También es posible apreciar en la figura 4, que la exergía contenida en las corrientes de descarga de vapor y condensados no se aprovecha en la planta de beneficio, emitiéndose al ambiente.

En la planta extractora Palmas del Cesar S.A. no es posible recircular los condensados al proceso (exergía asociada a la masa) puesto que presentan un grado de contaminación (aceite, compuestos orgánicos, etc.) que los hace muy abrasivos para los equipos del proceso. Ésta cantidad exergética se podría

aprovechar con el implemento de una red de intercambiadores de calor, donde podrían usarse para calentar corrientes frías en el proceso, como en el caso del agua de dilución que se le añade al licor de prensa para facilitar la clarificación.

Los lodos pesados resultantes de la clarificación tienen un contenido exergético de 1,55 MJ/kg de aceite, el cual es aprovechado en un proceso posterior de tratamiento de efluentes para la recuperación de aceite residual. Éste se ejecuta con el propósito de disminuir la carga orgánica que es emitida al ambiente y cumplir con la normatividad ambiental aplicable para esta industria.

De los subproductos del proceso el que presenta el mayor valor exergético son los raquis o tusas, el cual es de 44,22 MJ/kg de aceite, como se puede ver en la figura 4. Siendo aproximadamente la mitad de la exergía de la corriente de frutos que continúa en el proceso. Aunque estos son tratados (proceso posterior) y utilizados como acondicionador de suelos, es posible estudiar la posibilidad de utilizar ese trabajo útil para la producción de bioetanol, teniendo en cuenta que están constituidos de material lignocelulósico (celulosa, hemicelulosa y lignina); es decir, se evidencia su potencial uso para producir azúcares simples.

3.3 EVALUACIÓN EXERGÉTICA POR ETAPAS

A través del análisis exergético es posible determinar las irreversibilidades o la exergía perdida para cada una de las etapas del proceso y estimar el porcentaje de cada una sobre la exergía total destruida, como se puede apreciar en la tabla 7.

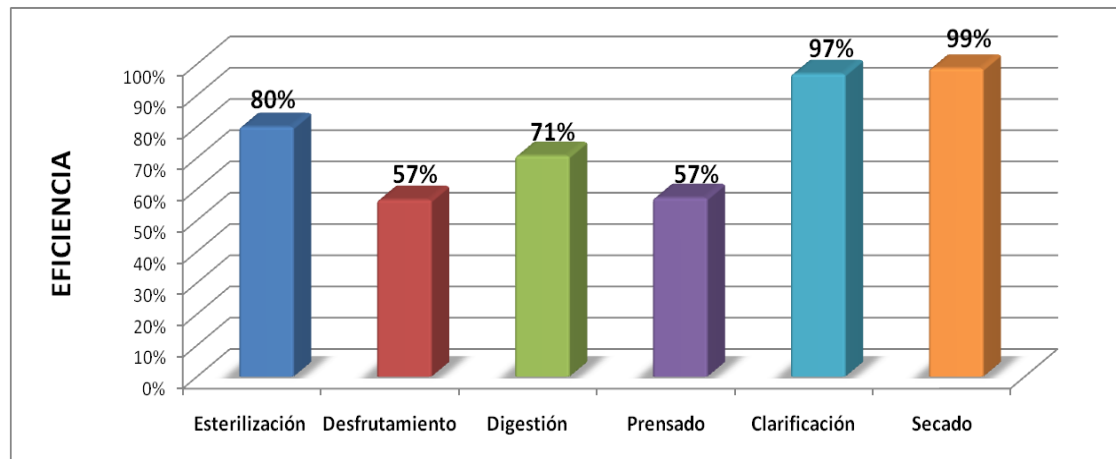
Tabla 7. Exergía destruida por etapa

Etapa del proceso	Exergía destruida MJ/kg aceite	% de exergía destruida
Esterilización	31,57	21%
Desfrutamiento	18,13	12%
Digestión	33,40	23%
Prensado	57,52	39%
Clarificación	3,69	3%
Secado	2,68	2%
Total	146,99	100%

Fuente: Los Autores

La figura 5 muestra como la eficiencia exergética varía significativamente en cada una de las etapas, presentándose visiblemente que la clarificación y el secado son las etapas que aprovechan en mayor proporción la exergía disponible.

Figura 5. Eficiencia de las etapas del proceso



Fuente: Los autores

3.3.1 Esterilización. En la tabla 7 se evidencia que se pierde el 21% de la exergía total destruida durante el proceso, por el contrario, la figura 5 muestra que esta etapa tiene una eficiencia exergética del 80%, esto indica que a groso modo se cumplen de manera aceptable los objetivos de la esterilización, a pesar de que exista un desperdicio de energía útil considerable. De manera que es importante tener en cuenta que los autoclaves se cierren herméticamente, evitar cualquier tipo de fuga y darle algún uso alternativo a las corrientes de descarga de vapor residual y condensados (como ya se explicó anteriormente) para así minimizar las pérdidas de energía hacia los alrededores. La mejora de esta situación podría aportar una reducción del consumo de vapor, ya que esta etapa demanda aproximadamente el 50% del total que requiere la planta aproximadamente 400 kg vapor/ton de fruto.

3.3.2 Desfrutamiento. Como se aprecia en la figura 5. Esta etapa presenta la más baja eficiencia exergética junto con el prensado, a causa del contenido de aceite

que puede estar impregnado en el raquis y/o en los frutos que no se logran separar, es por esto que el desfrutamiento presenta la mayor pérdida de aceite en el proceso (0,09%). Adicionalmente, es posible estimar que la exergía destruida (18,13 MJ/kg aceite) es debida no solo a pérdidas de producto sino también a las pérdidas por transferencia de calor hacia el exterior y al impacto de los racimos en el tambor rotatorio.

3.3.3 Digestión. La Digestión presenta el 23% de exergía total destruida. Esto se debe a que el digestor no está aislado de manera adecuada y se presentan considerables pérdidas por medio de la transferencia de calor hacia los alrededores o radiación y por la acumulación de aceite (producto deseado) dentro del equipo. Como se muestra en la figura 5, ésta etapa tiene una eficiencia del 71%, para mejorar esta cifra, es indispensable tener un control de las variables más importantes las cuales son la altura de llenado de los frutos y la temperatura. El digestor debe estar totalmente lleno, de lo contrario, ocurre un mal prensado ya que la presión que ejerce el fruto al entrar a la prensa es menor y eso hace que éste sea deficiente. En cuanto a la temperatura de operación se debe mantener en 368,15K. Una falla en alguna de estas dos ocasiona mayores pérdidas de aceite y menor recuperación del licor para la clarificación.

3.3.4 Prensado. La etapa del prensado se considera según los resultados reportados en la tabla 7 y figura 5 como la etapa en la que se presenta el mayor porcentaje de exergía destruida y la eficiencia exergética mas baja. Es posible atribuir esto al contenido de aceite en la torta (pérdidas) y a las impurezas que contiene el licor de prensa. Otra posible causa es un desgaste de las piezas principales de las prensas (tornillo y canasta) que pueda ocasionar una sobrecarga al motor (deba trabajar a un mayor amperaje) ocasionando pérdidas de exergía asociadas al trabajo.

El diseño adecuado de la sección de extracción de aceite; es decir, de la digestión y prensado, es muy importante debido a que prácticas poco satisfactorias como el excesivo macerado de los frutos, podría ocasionar drenaje del aceite crudo antes

del prensado, lo cual trae consigo no solamente problemas en la clarificación y mayores pérdidas de aceite, sino también la absorción de hierro por parte del aceite de palma. Para la producción de aceite de alta calidad, se debería usar acero inoxidable en partes móviles de los equipos donde haya desgaste como en el digestor y la prensa. Otro caso no deseado, contrario al anterior es cuando el mesocarpio no se ablanda lo suficiente y hace más difícil el prensado ya que sería necesario aplicar una mayor presión, lo cual traería como consecuencia tanto pérdidas de aceite crudo de palma que no se alcance a extraer, como disminución de la cantidad de la materia prima del proceso de palmistería debido a que al aplicarse una mayor fuerza en el prensado, el rompimiento de las nueces aumentaría, ocasionando un cambio en la calidad del aceite de palma contenido en el licor debido al prensado de almendras.

3.3.5 Clarificación. La clarificación (decantación y centrifugación) presenta una eficiencia exergética del 97%. Este valor es debido a que se logra purificar correctamente el licor de prensa de los compuestos no deseados y así recuperar la mayor cantidad de aceite posible. Las irreversibilidades son tan solo el 3% del total de exergía destruida en el proceso. Evidenciándose que la clarificación junto con el secado sobresalen como las dos etapas más eficientes del proceso.

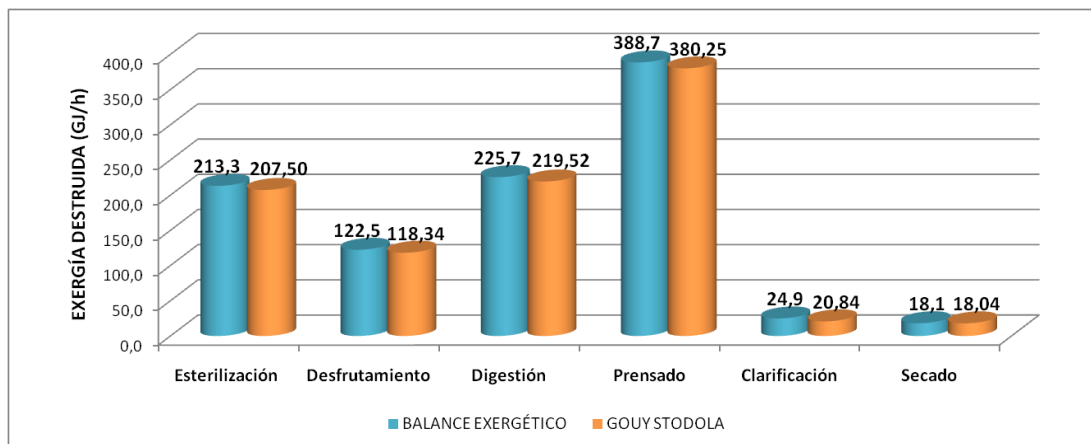
Es necesario evitar el daño por oxidación, cambio de color y/o degradación del aceite, que es causado por la exposición al ambiente y tiempos prolongados a temperaturas altas. Cabe resaltar que la oxidación es la causa más importante de una baja calidad del aceite.

3.3.6 Secado. Inequívocamente es la etapa más eficiente (99%) y la que menos exergía destruida (2,68 MJ/kg) reporta. Esto atribuido a que el aceite resultante cumple con el porcentaje de humedad requerido por los compradores.

3.4 ESTIMACIÓN DE LA EXERGÍA DESTRUIDA POR MEDIO DEL TEOREMA DE GOUY-STODOLA

A lo largo de este capítulo, se presentaron los resultados obtenidos para el proceso de extracción de aceite de palma a través de la evaluación exérgica, adicionalmente, se usó teorema de Gouy-Stodola, el cual relaciona la exérgia destruida con la entropía generada en cada etapa del proceso. En la figura 6. Se pueden observar los valores para cada uno de los métodos de estimación empleados los cuales son muy similares, de esta forma es posible validar el correcto uso de la herramienta de análisis exérgico.

Figura 6. Comparación entre análisis exérgico y teorema de Gouy-Stodola



Fuente: Los Autores.

4. CONCLUSIONES

En este estudio se realizó la evaluación exergética del proceso de extracción de aceite de palma africana (*Elaeis guineensis Jacq*) llevado a cabo en la planta extractora de Palmas del Cesar S.A. Se estimaron las irreversibilidades del proceso en 993,1 GJ/h teniendo como base 6.756 kg/h de aceite extraído a partir de 30.000 kg/h de racimo de fruto fresco.

A partir del análisis exergético se identificó la localización y magnitud de los principales sumideros de exergía (relacionados con mayores pérdidas de energía útil) siendo el prensado y la digestión las etapas que presentan las mayores pérdidas exergéticas de 388,7 y 225,7 GJ/h respectivamente.

Mediante la metodología aplicada, se evaluó la eficiencia exergética para cada una de las etapas del proceso siendo el secado y la clarificación las que sobresalen con un 99 y 97% respectivamente.

Se compararon los valores obtenidos mediante el teorema de Gouy-Stodola con los resultados del balance exergético, encontrándose un alto grado de convergencia entre ellos.

5. ALTERNATIVAS DE MEJORA AL PROCESO

Una alternativa para un mayor aprovechamiento de la energía y aumento de las eficiencias del proceso, es el estudio y posterior implementación de un sistema global de energía, compuesto por las interacciones entre la red de intercambio de calor y el sistema de servicios industriales. Cuyos parámetros dependen de las características de la planta. Al realizar esto es posible obtener beneficios tanto económicos como ambientales.

Se hace evidente la implementación de un sistema de cogeneración donde los recursos existentes de energía, mantengan un balance entre el calor y la electricidad que son requeridos para el proceso de extracción de aceite de palma. Es decir, la energía eléctrica que requiere el proceso puede ser provista fácilmente mediante una turbina de vapor ubicada entre la caldera y el distribuidor de vapor a baja presión hacia el proceso, y de este modo producir vapor y energía eléctrica.

Se recomienda el implemento de sistemas de aislamiento ajustados a los requerimientos de cada equipo para evitar pérdidas por medio de la transferencia de calor hacia los alrededores. También se debe evitar cualquier tipo de fuga y acumulación (indeseada) de masa (vapor, agua en fase líquida, frutos, aceite, etc.) en los equipos. Anexo a esto es necesario reutilizar las descargas de vapor calentando corrientes frías como el agua de dilución, y así utilizar al máximo la mayor cantidad de energía útil disponible.

Algunas plantas extractoras le realizan un tratamiento de limpieza a la corriente de condensados que sale del esterilizador y la utilizan como agua de dilución para la etapa de clarificación, sin embargo, este proceso debe ser rápido para evitar que se acidifique el aceite; de manera que éste podría ser un uso que se le puede dar a esta corriente.

En la digestión se deben mantener siempre llenos los digestores para evitar pérdidas de vapor por bajo nivel de fruto en el mismo. Es posible hacer esto con

un sistema de control que cierre el ingreso de vapor hacia el equipo cuando el nivel del digestor sea bajo.

Para el caso de la prensa es necesario implementar un sistema de control que suspenda el funcionamiento de ésta, cuando el nivel de frutos macerados provenientes del digestor sea bajo o nulo, para evitar que trabaje en vacío y con altos consumos de energía eléctrica. Se debe tener en cuenta que los motores de prensa son muy grandes y tienen alto consumo energético. También se sugiere que si las piezas se encuentran gastadas se cambien por tornillos y canastas de prensado nuevas para una mayor extracción de aceite.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BERNAL, Fernando. El cultivo de la palma de aceite y su beneficio. Guía general para el nuevo palmicultor. Fedepalma y Cenipalma. Bogotá, D.C. Colombia. Junio de 2005.
- [2] BALANCE ECONÓMICO TERCER TRIMESTRE DE 2010: Realizado por La Federación Nacional de Cultivadores de Palma de aceite. [En Línea]. Disponible en http://fedepalma.org/document72011/Bol_eco_3trim2010.pdf
- [3] ROJAS, Iván, Análisis de Exergía en dos puntos críticos en una industria productora de harina de pescado. Trabajo de Grado Maestro en Ingeniería Mecánica. Puerto Rico: Universidad de Puerto Rico, Ciencias Térmicas 2005.
- [4] RONSEN, M.A.; DINCER, I., Exergy-cost-energy-mass analysis of thermal system and processes. Energy conversion and management. Vol 44. Pág 1633-1652. 2003.
- [5] ORELLANA ABREU, Andrea, Análisis Exergético de bienes de equipo. Trabajo de Grado Ingeniera Industrial. España: Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona. Julio de 2009.
- [6] RAYGADA, Ruperto. Manual técnico para el cultivo de la palma aceitera. Comisión Nacional para el Desarrollo y Vida sin Drogas – DEVIDA. Proyecto de Desarrollo Alternativo Tocache-Uchiza-PRODATU. Lima, Perú. 2005.
- [7] FEDEPALMA, La Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. Página web: <http://www.fedepalma.org/>
- [8] CENIPALMA, El centro de Investigación e Innovación Tecnológica en Palma de Aceite. Página web: <http://www.cenipalma.org/>
- [9] WAMBECK, Noel. Oil palm Process Synopsis. Vol.1: Oil palm mill systems and process. 2 ed. [CD-ROM] Malasia. Junio de 1999.

- [10] CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA. Universidad autónoma de México. Biblioteca [en Línea]. [Fecha de consulta: Noviembre 26 2010]. Disponible en: <http://biblioteca.usach.cl/>
- [11] RODOREDA Rosell, Marai. Análisis exergético de una central termoeléctrica de ciclo de vapor. Trabajo de grado Licenciatura en Física. México: Universidad de las Américas Puebla. Escuela de Ciencias. 2005.
- [12] REID Robert C.; PRAUSNITZ John M.; POLING Bruce E. The properties of gases and liquids. Cuarta edición. Nueva York: McGraw-Hill 1987.
- [13] DINCER Ibrahim; ROSEN Marc A. Exergy: Energy, environment, and sustainable development. Primera Edición. Reino Unido: Elsevier Ltd, 2007.
- [14] WALL G. Exergy flows in industrial processes. Energy 1988. Vol. 13, Núm. 2. Pág: 197-208.
- [15] PELLEGRINI LF, OLIVEIRA S. Exergy analysis of sugarcane bagasse gasification. Energy 2007. Vol. 32. Pág. 314–327.
- [16] TALENS Laura. ; VILLALBA Gara; GABARRELL Xavier, Exergy analysis applied to biodiesel production. Resource Conservation & Recycling 2007. Vol. 51. Pág. 397-407.
- [17] OJEDA K., KAFAROV V. Exergy analysis of enzymatic hydrolysis reactors for transformation of lignocellulosic biomass to bioethanol. Chemical Engineering Journal 2009. Vol. 154. Pág 390-395.
- [18] SZARGUT J.; MORRIS D.R.; STEWARD F.R., Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes. International Journal of Heat and Fluid Flow 1989. Vol. 10. Pág. 87-88.
- [19] AYRES R.U., AYRES W., Accounting for Resources 2: The Life Cycle of Materials, Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK and Lyme, MA, 1999.

- [20] LOZANO M. A.; VALERO A., Determinación de la exergía para sustancias de interés industrial. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Zaragoza, España: Universidad de Zaragoza. Departamento de Termodinámica y Fisicoquímica, Marzo de 1986.
- [21] LEO Teresa J.; RASO Miguel A.; NAVARRO Emilio; Sánchez de la Blanca Emilia, Comparative exergy analysis of direct alcohol fuel cells using fuel mixtures. *Journal of Power Sources* 2011, Vol. 196, pág. 1178–1183.
- [22] ISAM H.; Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan. *Applied Thermal Engineering* 2009, Vol. 29. Pág. 324–328.
- [23] AYRES R.; Masini A.; Ayres L. An application of exergy accounting to five basic metal industries. Fontainebleau, Francia: INSEAD; 2001.
- [24] MODESTO M., NEBRA S.A., Exergoeconomic analysis of the power generation system using blast furnace and coke oven gas in a Brazilian steel mill. *Applied Thermal Engineering* 2009, Vol. 29. Pág: 2127–2136.
- [25] DINCER Ibrahim; CENGEL Yunus A. Energy, Entropy and Exergy Concepts and Their Roles in Thermal Engineering. *Entropy* 2001, Vol. 3. Pág:116-149.
- [26] BILGEN E.; TAKAHASHI H. Exergy analysis and experimental study of heat pump systems. *International Journal of Exergy* 2002. Vol. 2. Pág: 259–265.
- [27] YUMRUTA R.; KUNDUZ M.; KANOGLU M. Exergy analysis of vapor compression refrigeration systems. *International Journal of Exergy* 2002. Vol. 2. Pág: 266–272.
- [28] DIAZ M.; ENSINAS A.; Nebra S.; Filho R.; Rossell C.; Wolf M. Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: Integration to conventional bioethanol production process. *Chemical Engineering Research and Design* 2009. Vol. 87. Pág: 1206–1216.

- [29] C.W. Chen, C.L. Chong, H.M. Ghazali, O.M. Lai, Interpretation of triacylglycerol profiles of palm oil, palm kernel oil and their binary blends. Department of Bioprocess Technology, Faculty of Biotechnology and Biomolecular Sciences, University Putra Malaysia, Septiembre 2005.
- [30] YU et al. Solubilities of Fatty Acids, Fatty Acid Esters, Triglycerides, and Fats and Oils in Supercritical Carbon Dioxide. The Journal of Supercritical Fluids., Vol. 7, No. 1, 1994. p. 54.
- [31] SANS Solí, J., CAMPS Hernán, Pérez S. Hidrogenació d'oli en condicions supercrítiques: estudi cinètic i disseny de la planta industrial. Proyecto Final de Carrera, ETSEIB, UPC, Abril 2004.
- [32] WOOLEY, R.J. and PUTSCHE, V., Development of an ASPEN PLUS Physical Property Database for Biofuels Components. Department of Energy Operated by Midwest Research Institute For the U.S. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, Abril de 2006. Disponible en <http://www.p2pays.org/ref/22/21210.pdf>
- [33] RIVERO R. , Garfias M. Standard chemical exergy of elements updated. Energy 31 Volumen 31, 2006. Pág. 3310–3326.
- [34] GHARAGHEIZI F., MEHRPOOYA M. Prediction of standard chemical exergy by a three descriptors QSPR model. Energy Conversion and Management. Volumen 48, 2007. Pág. 2453–2460.
- [35] WEAST R. C. Handbook of Chemistry and Physics. Ed. 64th, New York, Mc Graw Hill. 1986.

ANEXO A. COMPOSICIÓN DEL ACEITE DE PALMA

En la tabla se puede ver la composición típica de los aceites de palma y palmiste respectivamente.

ACEITE DE PALMA				ACEITE DE PALMISTE			
COMPONENTES		NC:GI	(%)	COMPONENTES		NC:GI	(%)
Triglicéridos 95%	POP	C50:1	29,9	Triglicéridos 98%	LaLaLa	C36:0	23,8
	POO	C:52:2	25,6		LaLaM	C38:0	20,97
	PLO	C52:3	0,0992		LaLaO	C42:1	5,82
	PLP	C50:2	0,09		LaMM	C40:0	8,9
	OOO	C54:3	0,0553		CCLa	C32:0	6,13
	PPP	C48:0	0,0474		CLaLa	C34:0	8,96
	POS	C52:1	0,054		LaLaP	C40:0	0,84
	SOO	C54:2	0,0298		LaMO	C44:1	4,98
	SSO	C54:1	0,0036		LaPM	C42:0	4,59
	PPS	C50:0	0,0103		LaOO	C48:2	3,8
	MMP	C44:0	0,0202		LaOP	C46:1	4,57
	OOL	C54:4	0,0059		LaPP	C44:0	2,4
	PLL	C52:4	0,0221		MOO	C50:2	1,95
	MMM	C42:0	0,0072		MOP	C48:1	2,29
Ácidos grasos libres 5%	Láurico	C12:0	<0,4	Ácidos Grasos Libres 2%	Láurico	C12:0	48,7
	Mirístico	C14:0	0,5 - 0,2		Mirístico	C14:0	16,4
	Palmítico	C16:0	41,0-47,0		Oléico	C18:1	1,8
	Palmitoléico	C16:1	<0,6		Palmítico	C16:0	7,5
	Esteárico	C18:0	3,5-6,0		Linoléico	C18:1	14,8
	Oleico	C18:1	36,4-44,0		Cáprico	C10	3,7
	Linoleico	C18:2	6,5-12,0		Caprílico	C8	4,2
	Linolénico	C18:3	<0,5		Linolénico	C18:2	2,6
Araquídico	C20:0	<1,0	Capróico	C6	0,3		

Abreviaturas: NC: Número de carbonos, GI: Grado de Instauración, C: Cáprico; La: Láurico; M: Mirístico; P: Palmítico; S: Esteárico; O: Oléico; L: Linoléico.

Fuente: [7], [29].

ANEXO B. ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE LOSTRIACILGLICEROLES

En este anexo se calculan las propiedades termodinámicas de los componentes principales del aceite de palma y palmiste, necesarias para llevar a cabo correctamente la simulación en ASPEN PLUS™.

Con el método de Joback, se presentan errores muy grandes en el cálculo de presiones críticas para las moléculas más grandes, de manera que se utilizó el método de Ambrose ya que es uno de los métodos que arroja un menor error. [12, 30, 31].

Lo primero que se necesita es el **punto de ebullición normal** (1atm) de cada compuesto, en el caso de los triglicéridos existen muy pocas referencias para consultarlos. Yu et al [30, 31]. Muestran algunos, de manera que se validaron estos datos junto con los calculados por el método aquí expuesto. La expresión propuesta por Ambrose para el cálculo de la temperatura de ebullición normal, se muestra en la ecuación E.1. La siguiente propiedad a calcular fue la **temperatura crítica** (ecuación E.2), posteriormente la **presión crítica** con ayuda de la ecuación E.3, el **volumen crítico** con la ecuación E.4, **el factor acéntrico** (ecuación E.5) y finalmente el **factor de compresibilidad crítico** mediante la ecuación E.6. [12, 31].

$$T_b = 198 + \sum \Delta_b \quad (E.1)$$

$$T_c = T_b * [1 + (1,242 + \sum \Delta_T)]^{-1} \quad (E.2)$$

$$P_c = M * (0,339 + \sum \Delta_P)^{-2} \quad (E.3)$$

$$V_c = 40 + \sum \Delta_V \quad (E.4)$$

$$w = \frac{3}{7} * \frac{\frac{T_b}{T_c}}{1 - \frac{T_b}{T_c}} * \log P_c - 1 \quad (E.5)$$

$$Z_c = \frac{P_c \cdot V_c}{R \cdot T_c} \quad (\text{E.6})$$

Donde T_b y T_c están en K, P_c en bar; M en g/mol, V_c en cm^3/mol y $\Delta_b, \Delta_T, \Delta_P, \Delta_V$ son las contribuciones de cada grupo de la molécula y se encuentran tabulados en la tabla E.1.

Tabla E.1 Contribución de grupos de Ambrose para constantes críticas

	Valores de Δ para		
	T_c	P_c	V_c
Átomos de C en grupos alquilo	0,138	0,226	55,1
Correcciones:			
>CH- (c/u)	-0,043	-0,01	-8
>C< (c/u)	-0,12	-0,03	-17
Doble enlace (no aromático)	-0,05	-0,07	-20
Triple enlace	-0,2	-0,17	-40
Grupos Funcionales:			
-O-	0,138	0,16	20
>CO	0,22	0,282	60
-CHO	0,22	0,22	55
-COOH	0,578	0,45	80
-CO-O-OC-	1,156	0,9	160
-CO-O-	0,33	0,47	80
-NO ₂ -	0,37	0,42	78
-NH ₂	0,208	0,095	30
-NH-	0,208	0,135	30
>N-	0,088	0,17	30
-CN	0,423	0,36	80
-S-	0,105	0,27	55
-SH	0,09	0,277	55
-Cl	0,055	0,318	45
-F	0,055	0,223	14

Fuente: Adaptado de [12,31].