

Análisis termodinámico del proceso real de extracción de aceite de palma africana

Thermodynamic analysis to a real palm oil extraction process

Wilmer A. Jaimes M.¹, Stefany Rocha², Jeniffer N. Vesga² y Viatcheslav Kafarov³

¹Ing. Químico (Estudiante de Maestría). Universidad Industrial de Santander.
Centro de Investigación para el Desarrollo en Industria y Energía.
E-mail: wilm3rjaim3s@gmail.com

²Ing. Químico. Auxiliar de Investigación. Universidad Industrial de Santander.
Centro de Investigación para el Desarrollo en Industria y Energía

³Ph.D. Ingeniería Química. Docente Investigador. Universidad Industrial de Santander.
Faculta de Físicoquímica. Escuela Ingeniería Química

Recibido 30/11/11, Aceptado 23/06/2012

RESUMEN

En este estudio se estimaron las irreversibilidades del proceso de extracción de aceite de palma africana llevado a cabo en la planta real ubicada en el municipio de San Alberto (Cesar). 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. Además, con los resultados encontrados es posible implementar futuras mejoras en dichas etapas con el fin de hacer más eficiente el proceso de extracción de aceite.

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.

Palabras claves: Gouy-Stodola, Exergía, Análisis Exergético.

ABSTRACT

In this work, the irreversibilities of african palm oil extraction process, that takes place in a real extraction plant on San Alberto (Cesar), 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; Besides, with the found results it is possible the implementation of future improvements at those stages in order to make more efficient the extraction process.

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 2006.5TM. 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.

Keywords: Gouy-Stodola, Exergy, Exergy Analysis.

LISTA DE ABREVIATURAS

PM	Peso molecular
TAG's	Triacilgliceroles
C	Cáprico
La	Láurico
M	Mirístico
P	Palmítico
S	Estearico
O	Oleico
L	Linoléico

NOMENCLATURA

<i>B</i>	Exergía [kJ/h]
<i>m</i>	Flujo másico [kg/h]
<i>Q</i>	Flujo de calor [kJ/h]
<i>W</i>	Potencia [kJ/h]
<i>S</i>	Entropía [kJ/h]
<i>H</i>	Entalpía [kJ/h]
<i>T</i>	Temperatura [K]
<i>V</i>	Volumen [m ³]
<i>P</i>	Presión [kPa]
ω	Factor acéntrico
<i>Z</i>	Factor de compresibilidad

ΔG_{F_0}	Energía libre de Gibbs estándar de formación [kJ/ kmol]
<i>N</i>	Número de átomos
<i>b</i>	La exergía química del elemento [kJ/kmol]
\bar{b}	La exergía química del compuesto [kJ/kmol]
<i>y</i>	La fracción molar de la sustancia
<i>R</i>	La constante de los gases
ϵ	Eficiencia exergética
<i>B_c</i>	Exergía asociada a la transmisión de energía en forma de calor [kJ/h]
<i>B_w</i>	Exergía asociada al trabajo [kJ/h]

Subíndices

<i>0</i>	Ambiente Estable de Referencia (AER ; $T_0 = 303.15$ K ; $P_0 = 101,325$ kPa)
<i>m</i>	Mezcla
<i>i</i>	Elemento <i>i</i>
<i>c</i>	Critico
<i>d</i>	Destruída
<i>gen</i>	Generada

Superíndices

<i>f</i>	Física
<i>c</i>	Cinética
<i>p</i>	Potencial
<i>q</i>	Química

1. 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 trabajo 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 una planta extractora real del municipio de San Alberto (Cesar), 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.

1.1 Proceso de Extracción de Aceite de Palma

A continuación se harán una breve descripción las principales etapas que se llevan a cabo para el proceso de extracción de aceite de palma:

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, esto como subproducto de una reacción química en la cual actúa como catalizador una enzima llamada lipasa [1].

Esterilización. Una vez los racimos llegan a la planta de beneficio, se descargan en una tolva. Ésta alimenta las vagonetas que luego se introducen en los autoclaves, en donde se le realiza un proceso de cocimiento a los racimos por medio del ingreso de vapor saturado en un ciclo de tres picos de presión, con el principal objetivo de inactivar la enzima responsable de la acidificación del aceite [6].

Desfrutamiento. Una vez esterilizados los racimos, pasan al desfrutador 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 barros longitudinales del mismo, acción que produce el desprendimiento de los frutos [1].

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 [1, 6].

Prensado: Los frutos digeridos son prensados dentro de una canasta perforada horizontal de forma cilíndrica, en

donde, por la acción mecánica de dos tornillos sin fin 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 [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:

1.1.6.1. Clarificación estática: en esta etapa se logra separar hasta el 90% del aceite contenido en el licor. Esto se logra por la decantación, en condiciones de temperatura que faciliten el desplazamiento de las partículas por la diferencia de densidades. El aceite se recoge por rebose y es bombeado hacia un proceso de secado [6].

1.1.6.2. Clarificación Dinámica: 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 aclarificado. El aceite y los lodos livianos, también conocido como recuperado de centrífuga, se recirculan hacia la clarificación estática junto con el licor de prensa; el agua y los lodos pesados (efluentes en esta etapa) salen por las boquillas o toberas y van hacia una etapa de tratamiento posterior [6].

1.1.7. 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 in Hg. El aceite de palma se bombea de esta etapa como producto final a su respectivo almacenamiento [6].

1.1.8. Palmistería. En esta etapa se realiza 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 tuvo en cuenta dentro del desarrollo del presente trabajo.

1.2 Exergía y 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 [7].

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) [8].

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

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 [7-9] (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 [10-12].

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

La exergía física de un sistema se obtiene mediante la siguiente ecuación 4 [6, 7, 9, 12-16].

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

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 termomecánico sino también químico [7].

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 [9 - 11, 17, 18].

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

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 [6,9,10,17,19].

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

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 [10, 16].

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) [8, 15, 20].

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

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) [7, 21].

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

Se define la eficiencia exergética () como la proporción entre el producto y el recurso de un sistema expresados en términos de la exergía (ecuación 9) [7, 9, 11, 12, 14].

$$(9)$$

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 trabajo.

2. METODOLOGÍA

La metodología implementada para la realización de este trabajo consistió en tres etapas que son explicadas a continuación. Cabe resaltar que esta metodología es aplica-

ble 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. Recopilación de Datos del Proceso

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

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 Racimo de Fruto Fresco (RFF) con una composición en peso de mesocarpio 50%, racimos vacíos 25%, nuez 14% y humedad 11% [6, 22, 23]. Cuyas composiciones se pueden ver más detalladas en la figura 1.

Condiciones de operación de la planta extractora. Se realizó una visita técnica a una de las plantas que opera en la región de 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 extractora
Table 1. Overview of the extraction plant

DESCRIPCIÓN	VALOR
Capacidad de procesamiento	30.000 kg/h
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: Personal de la planta

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 2. 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%.

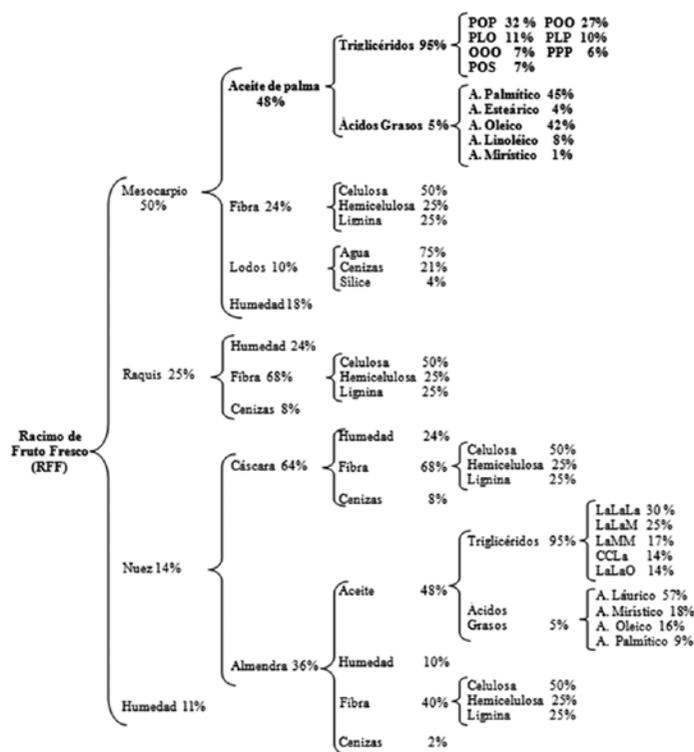
2.2. Simulación del Proceso

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 (Simulador Modular Secuencial por sus siglas en ingles) 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.

Para el ingreso de los componentes al simulador se usó la base de datos de Aspen Plus™ para introducir los compuestos que intervienen en el proceso, sin embargo, fue necesario crear algunos componentes hipotéticos porque no estaban disponibles en el programa, tales como (hemicelulosa, celulosa, lignina, cenizas y todos los triglicéridos tanto del aceite de palma como de palmiste).

Figura 1. Composición másica del racimo de fruto fresco
Figure 1. Mass composition of fresh fruit bunch



Fuente: Los autores

2.2.1. 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 Plus™. Para cada uno de los triglicéridos (TAG's) se introdujo su estructura molecular, posteriormente se calcularon sus propiedades termodinámicas a través del método de estimación de

Tabla 2. Propiedades termodinámicas calculadas por el método de Ambrose
Table 2. Thermodynamic properties calculated by Ambrose method

Propiedad TAG's	PPP	POP	POO	POL	PLP	OOO	PSP	LaLaM	LaLaLa	LaLaO	LaMM	CCLa
PM	807,3	833,3	859,3	857,3	831,3	885,4	861,4	667,0	639	721,1	695,1	582,8
Tc (K)	899	900	905	905	900	910	905	866	859	878	872	866
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(cm3/mol)	2920	3015	3105	3085	2995	3195	3125	2373	2263	2574	2484	2043
W	1,67	1,7	1,72	1,72	1,7	1,74	1,72	1,55	1,52	1,6	1,58	1,45
Zc	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,21	0,21	0,2	0,2	0,2

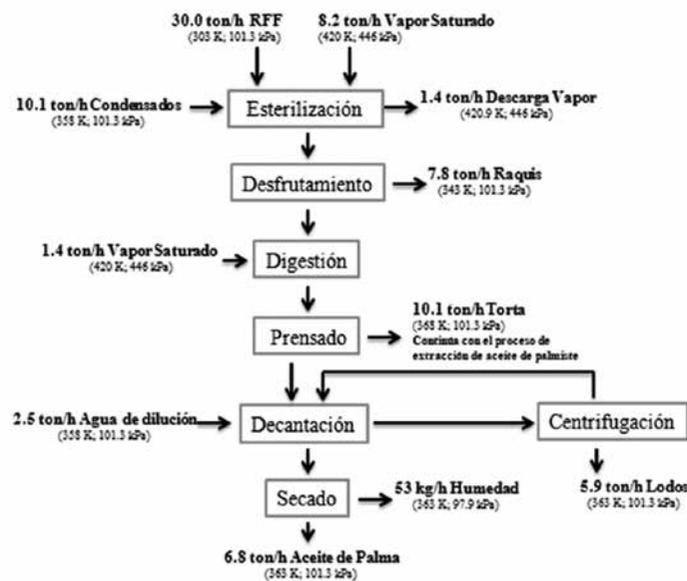
Tabla 3. Condiciones de operación para cada etapa del proceso.
Table 3. Operating conditions for each stage.

	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: [6, 22,23]

Ambrose, finalmente se ingresaron estos valores al simulador. Dichos parámetros se reportan en la tabla 2 [24].

Figura 2. Diagrama del proceso de extracción de aceite de palma
Figure 2. Scheme of palm oil extraction process



Fuente: Datos suministrados por la planta extractora.

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 [25].

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 3.

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 con sus respectivas condiciones de operación. Se identificó como producto principal el aceite de palma, como subproductos: las tusas y la torta, como desechos: los lodos pesados, 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 exérgica.

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

2.3.2. Evaluación exérgica. 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 [19, 26, 27]. Para los compuestos que no se encontró esta información, se empleó el método de contribución de grupos de Joback [24] para el cálculo de la energía libre de Gibbs de formación necesaria para aplicar la ecuación 5 descrita anteriormente. Para el cálculo de la exergía química de cada una de las corrientes se empleó la ecuación 6. Posterior a esto se halló la exergía específica total de cada flujo, para la cual se utilizó la ecuación 3. 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).

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) [7 - 9].

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

3. RESULTADOS

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. La tabla 4 presenta los valores de las exergías químicas para varios de los compuestos utilizados durante el proceso.

Tabla 4. Exergía química de algunos compuestos
Table 4. Chemical exergy of some compounds

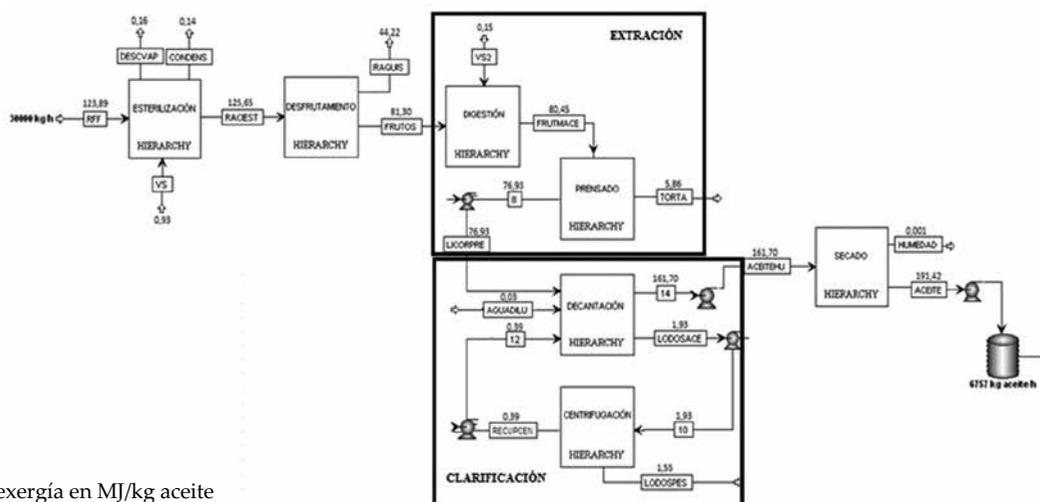
Compuesto	kJ/mol	Compuesto	kJ/mol
Agua (Líquida) ^a	0,9	Ácido Oleico ^e	11239,16
Vapor ^b	9,5	Sílice ^d	1,9
Vapor ^e	9,34	Sílice ^e	2,2
Ácido Palmítico ^b	10031,62	Tripalmitina ^e	31948,55
Ácido Palmítico ^c	10277,39	Trilaurina ^e	889,62
Ácido Palmítico ^e	10089,06	Celulosa ^e	2749,9

Fuente: ^a Exergy analysis of sugarcane bagasse gasification [19], ^b Handbook of Chemistry and Physics [27], ^c Standard chemical exergy of elements updated [28], ^d Prediction of standard chemical exergy by a three descriptors QSPR model [26], ^e Calculado por la ecuación 5.

3.2. Exergía Asociada a Flujos de Masa

Los resultados arrojados por el programa, tales como entalpías y entropías a condiciones de operación (tabla 5) 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 3. 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.

Figura 3. Simulación del proceso de extracción de aceite de palma en Aspen Plus
Figure 3. Simulation of palm oil extraction process in Aspen Plus



Nota: valores de exergía en MJ/kg aceite

Tabla 5. Propiedades reportadas por el simulador de las corrientes más importantes
Table 5. Properties of main currents reported by the simulator

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 3 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 que la exergía contenida en las corrientes de descarga de vapor y condensados no se aprovecha en la planta de beneficio, emitiéndose al ambiente.

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 3. 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 fue 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 6.

Tabla 6. Exergía destruida de las principales etapas
Table 6. Irreversibilities of the main stages

Etapas del proceso	Exergía destruida MJ/kg aceite	% de exergía destruida	Eficiencia Exergética (%)
Esterilización	31,57	21%	80
Desfrutamiento	18,13	12%	57
Digestión	33,40	23%	71
Prensado	57,52	39%	57
Clarificación	3,69	3%	97
Secado	2,68	2%	99
Total	146,99	100%	

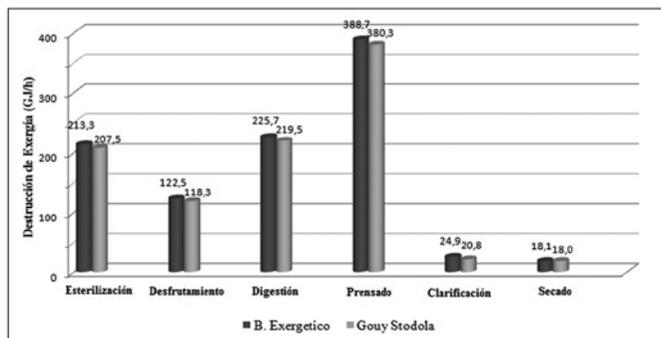
Fuente: Los Autores

3.4. Estimación de la Exergía Destruída 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 exergética, adicionalmente, se usó teorema de Gouy-Stodola, el cual relaciona la exergía destruida con la entropía generada en cada etapa del proceso. En la figura 4 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 exergético.

Figura 4. Comparación entre análisis exergético y teorema de Gouy-Stodola

Figure 4. Comparison between exergy analysis and Gouy-Stodola theorem



Discusión de los resultados

A continuación se hará una pequeña discusión sobre los resultados obtenidos durante el estudio realizado.

Como primera instancia, en la tabla 6 se evidencia que en la etapa de esterilización se pierde el 21% de la exergía total destruida durante el proceso, además se aprecia que esta etapa tiene una eficiencia exergética del 80%, esto podría indicar a groso modo que 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 las autoclaves se cierren herméticamente, evitar cualquier tipo de fuga y darle algún uso alternativo a las corrientes de descarga de vapor residual y condensados, para así minimizar las pérdidas de energía hacia los alrededores. La mejora de esta etapa 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.

El desfrutamiento es la etapa que 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. Adicionalmente, es posible estimar que la exergía destruida es debida no solo a la pérdida de producto sino también a las pérdidas por transferencia de calor hacia el exterior y al impacto de los racimos en el tambor rotatorio. Por otro lado la clarificación es la etapa que 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.

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 una planta extractora real y que opera en la región de San Alberto (Cesar). 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.

REFERENCIAS

- Bernal, F., El cultivo de la palma de aceite y su beneficio - Guía general para el nuevo palmicultor. Fedepalma y Cenipalma, Bogotá D.C., 2005.
- FEDEPALMA, (2012), Balance económico del sector palmero Colombiano en el tercer trimestre de 2010. [Internet]. Disponible en http://portal.fedepalma.org/document/2011/Bol_eco_3trim2010.pdf [Acceso 4 Julio de 2012]
- Rojas, I., (2005), Análisis de Exergía en dos puntos críticos en una industria productora de harina de pescado. Tesis de Maestría, Universidad de Puerto Rico, Puerto Rico, 2005.
- Ronsen, M. A. and Dincer, I., Exergy-cost-energy-mass analysis of thermal system and processes, Energy conversion and management, 44 (10), 1633-1652, 2003.
- Orellana A., Andrea, (2009), Análisis Exergético de bienes de equipo, Tesis de pregrado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona, España, 2009.
- Wambeck, Noel. (1999), Oil palm Process Synopsis. Vol.1: Oil palm mill systems and process. 2 ed. [CD-ROM] Malasia.
- Rodoreda, R., M. (2005), Análisis exergético de una central termoeléctrica de ciclo de vapor, Tesis pregrado, Universidad de las Américas Puebla, México, 2005.

- [8] Leo, T. J., Raso, M. A., Navarro, E., and Sánchez B. E., Comparative exergy analysis of direct alcohol fuel cells using fuel mixtures, *Journal of Power Sources*, 196 (3), 1178–1183, 2011.
- [9] Dincer, I., Cengel, Y. A., *Energy, Entropy and Exergy Concepts and Their Roles in Thermal Engineering.*, Entropy, 3 (3), 116-149, 2001.
- [10] Talens, L., Villalba, G., and Gabarrell, X., Exergy analysis applied to biodiesel production. *Resource Conservation & Recycling*, 51 (2), 397-407, 2007.
- [11] Szargut, J., Morris, D. R., and Steward, F. R., Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 10 (1), 87-88, 1989.
- [12] Modesto, M., and 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*, 29 (11-12), 2127–2136, 2009.
- [13] Wall, G., Exergy flows in industrial processes. *Energy*, 13 (2), 197-208, 1988.
- [14] Lozano, M. A., and Valero, A., (1986), *Determinación de la exergía para sustancias de interés industrial*. Tesis de pregrado, Universidad de Zaragoza, España, 1986.
- [15] Isam, H., Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan. *Applied Thermal Engineering*, 29 (2-3), 324–328, 2009.
- [16] Ayres, R., Masini, A., and Ayres, L., An application of exergy accounting to five basic metal industries, Fontainebleau, Francia, INSEAD, 2001.
- [17] Ojeda, K., Kafarov, V., Exergy analysis of enzymatic hydrolysis reactors for transformation of lignocellulosic biomass to bioethanol, *Chemical Engineering Journal*, 154 (1-3), 390-395, 2009.
- [18] Ayres, R. U., and Ayres, W., *Accounting for Resources 2: The Life Cycle of Materials*, Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK and Lyme, 1999.
- [19] Pellegrini, and L.F., Oliveira, S., Exergy analysis of sugarcane bagasse gasification, *Energy*, 32 (4), 314–327, 2007.
- [20] Bilgen, E., and Takahashi, H., Exergy analysis and experimental study of heat pump systems, *International Journal of Exergy*, 2 (4), 259–265, 2002.
- [21] Yumruta, R., Kunduz, M., and Kanoglu, M. Exergy analysis of vapor compression refrigeration systems, *International Journal of Exergy*, 2 (4), 266–272, 2002.
- [22] FEDEPALMA, *La Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite*. Página web: <http://www.fedepalma.org/>
- [23] CENIPALMA, *El centro de Investigación e Innovación Tecnológica en Palma de Aceite*. Página web: <http://www.cenipalma.org/>
- [24] Reid, R. C., Prausnitz, J. M., and Poling B. E., *The properties of gases and liquids*, McGraw-Hill, Nueva York, 1987.
- [25] Diaz, M., Ensinas, A., Nebra, S., Filho, R., Rossell, C., and Wolf, M. Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: Integration to conventional bioethanol production process, *Chemical Engineering Research and Design*, 87 (9), 1206–1216, 2009.
- [26] Gharagheizi, F., and Mehrpooya, M., Prediction of standard chemical exergy by a three descriptors QSPR model, *Energy Conversion and Management*, 48 (9), 2453–2460, 2007.
- [27] Weast, R. C., *Handbook of Chemistry and Physics*, Ed. 64th, Mc Graw Hill, New York, 1986.
- [28] Rivero, R., and Garfias, M., Standard chemical exergy of elements updated, *Energy*, 31 (15), 3310–3326, 2006.