

# ESTUDIO DEL APROVECHAMIENTO DEL VAPOR GENERADO EN CALDERA EN LA PLANTA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA ORO ROJO BASADO EN ANÁLISIS EXERGÉTICO

MICHELLE JOHANNA BELTRÁN MEDINA

DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO | CARLOS ALIRIO DIAZ GONZÁLEZ  
CO-DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO | MARIO JONATÁN ACERO

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BUCARAMANGA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA INGENIERIA EN ENERGIA  
2017



# TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	●
2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	●
3	OBJETIVOS	●
4	METODOLOGIA	●
5	RESULTADOS Y ANALISIS	●
6	CONCLUSIONES	●
7	RECOMENDACIONES	●
8	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	●



# INTRODUCCION

En la actualidad el rendimiento de las plantas extractoras de aceite se miden por la calidad de sus derivados, el cual se obtiene por medio del procesamiento de la fruta de la palma de aceite, involucrando una serie de subprocesos los cuales demandan vapor, esta característica del proceso de producción hace de la caldera un elemento fundamental para el funcionamiento de la planta.

Los estudios realizados en la industria de la palma de aceite, están enfocados principalmente al balance de masa y energía, las cuales permiten identificar perdidas de materia en cada etapa de la extracción de aceite [1,6]. Sin embargo, no es suficiente, al hacer uso del balance energético a través de la primera ley de la termodinámica, se tiene una limitación, la cual impide cuantificar el aprovechamiento de energía suministrado al proceso debido a que no se tienen en cuenta las irreversibilidades generadas en cada etapa.



# PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA



La caldera implementada para la generación de vapor en la **Planta Extractora de Aceite de Palma Oro Rojo** presenta fluctuaciones en cuanto al flujo másico de vapor, esta situación obedece a la falta de control efectivo sobre las variables que intervienen en la operación de la caldera. Ante la complejidad de un sistema en el que la demanda de vapor a los procesos no es constante y fluctúa entre diferentes valores, generando en el proceso falta o exceso de este en ciertos momentos.

El identificar la ubicación y magnitud de los principales sumideros de exergía (relacionados con mayores pérdidas de energía útil) permitirá entregar el vapor en las cantidades y calidades necesarias para lograr un proceso de producción continuo y eficiente.

Por ello se estudiará y analizará el comportamiento de la Planta durante un período determinado de la operación, se determinarán las pérdidas de exergía que se presentan y finalmente se analizarán los resultados que se obtengan.



# OBJETIVOS

## OBJETIVOS GENERAL

Determinar la influencia de los parámetros de operación y del proceso mismo en el aprovechamiento energético del vapor generado en la caldera de la Planta Extractora de Aceite de Palma Oro Rojo.



# OBJETIVOS

## OBJETIVOS ESPECIFICOS

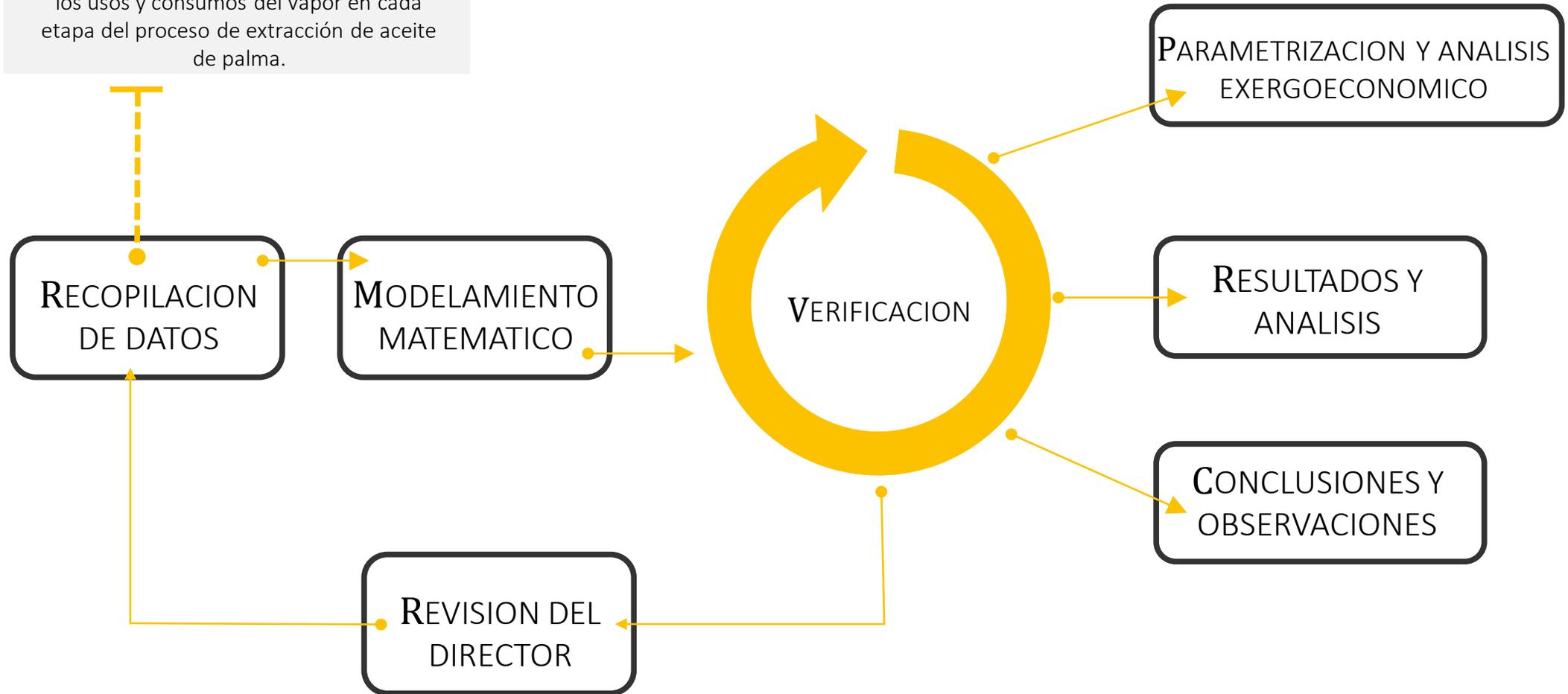
- 1 | Identificar los diferentes flujos de masa y energía en los procesos que involucran el aprovechamiento del vapor generado en la caldera
- 2 | Realizar balances energéticos y exergéticos de los procesos que involucren el aprovechamiento o uso del vapor
- 3 | Parametrizar los resultados obtenidos en los balances energéticos y exergético de acuerdo a variaciones en parámetros del proceso global.





## REVISION ENERGETICA

Se centra en entender el comportamiento energético de la planta, es decir, analizar los usos y consumos del vapor en cada etapa del proceso de extracción de aceite de palma.



# RECOPIACION DE DATOS

1 Composición química en base seca y energía física de la cascarrilla y fibra residual de fruto de aceite de palma.  
 2 Rendimiento de un racimo de fruto fresco de palma africana

Grupo de biomasa, subgrupo y variedad	Análisis próximo (wt %)				Análisis último (wt %)			Poder calorífico superior [kJ/kg]	Exergía química específica [kJ/kg]
	W	MV	GF	Ash	H	C	N		
Fibra – Cascarrilla de Palma	-	72.8	Fruto 55-65 % 18.9	8.3	Nuez 10-14 % 6.05	47.2	Mimendra 3,5-5 % Corteza 6-9 % 0	18911	19815
Racimo de Fruto Fresco (RFF)	40				Mesocarpio 45-55 % 1.4	36.8	Aceite 22,5-27,5 % 0.28		
Fibra	40						Agua 11-14 %		
Cascarrilla	12								
Racimo desgranado			35-45 %						

Fuente: Estimating Specific Chemical Exergy of Biomass from Basic Analysis Data + Industrial & Engineering Chemistry Research [16]

Tabla 2 Generación de biomasa residual en la Planta Extractora de Aceite de Palma Oro Rojo

Capacidad de la planta [Ton/h]	Promedio de generación de biomasa [%]	Biomasa Utilizada [%]	Biomasa Excedente [%]
30	18,5	15,03	3,47

Fuente: Planta Extractora de Aceite Oro Rojo [15]

Fibra 70 [%]  
Cascarrilla 30 [%]

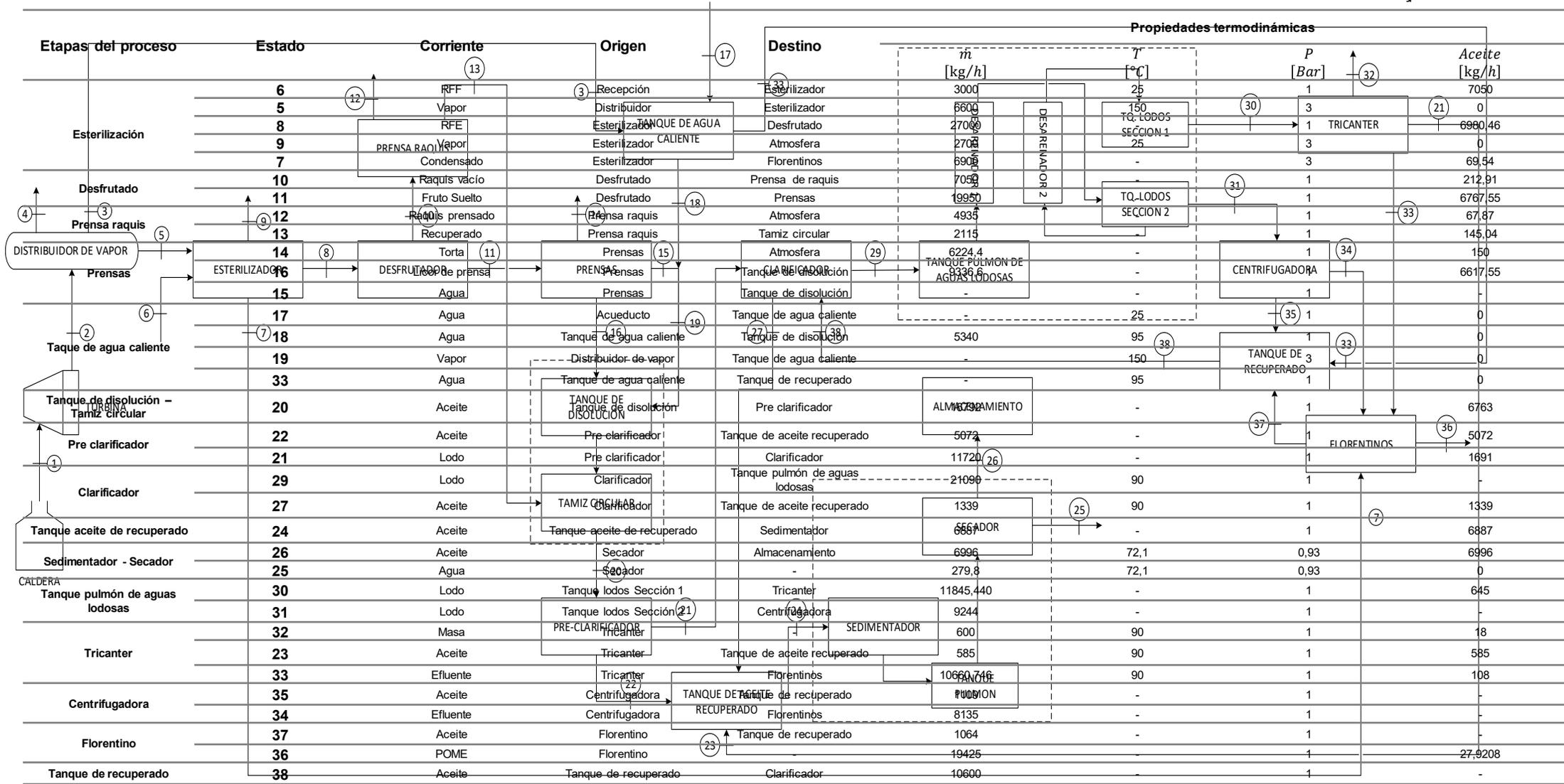


# RECOPILACION DE DATOS

## 2

## CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA PLANTA

Ilustración 5 Diagrama de bloques descriptivo de la Planta extractora de aceite de palma



# RECOPILOCACION DE DATOS

2

## CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA PLANTA

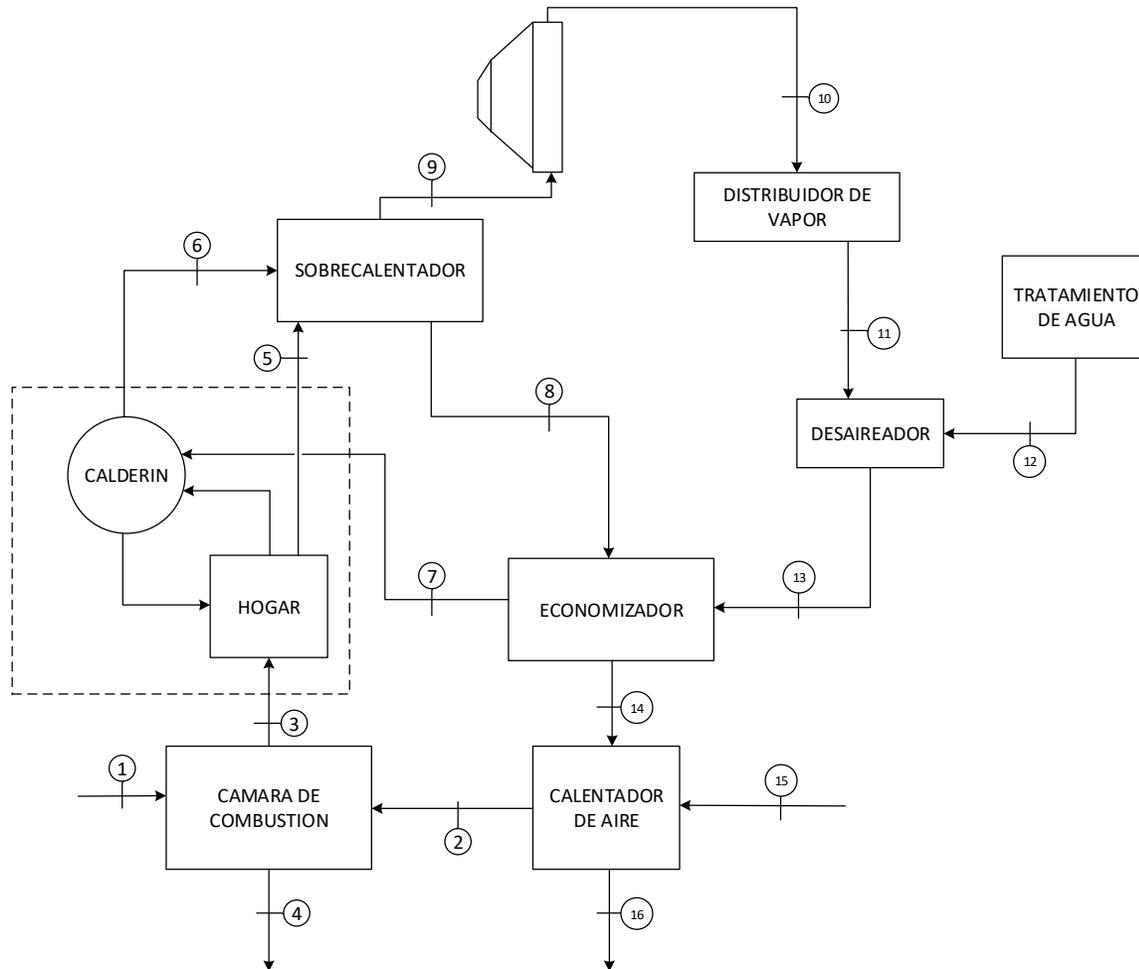


Ilustración 4 Esquema general del sistema de generación de vapor

Tabla 5 Datos suministrados para el sistema de generación de vapor

Corriente	Origen	Destino	$\dot{m}$ [ $\frac{kg}{h}$ ]	$T$ [ $^{\circ}C$ ]	$P$ [Bar]
Combustible	Ambiente	Camara de combustion	4590	25	1
Agua	Desaireador	Economizador	-	105	30
Agua	Economizador	Calderin	-	145	1
Vapor	Sobrecalentador	Turbina	-	300	30
Vapor	Turbina	Distribuidor de vapor	-	150	3

Fuente: Extractora de Aceite de Palma Oro Rojo [15]





### LINEA BASE

Se establece una línea de base energética de la planta que represente el comportamiento actual, donde las variables pertinentes relacionadas al uso significativo del vapor no se verán influenciadas por factores como cambios en la producción, en la materia prima, entre otros.



Ilustración 1 Metodología empleada para el desarrollo del proyecto

# MODELAMIENTO MATEMATICO



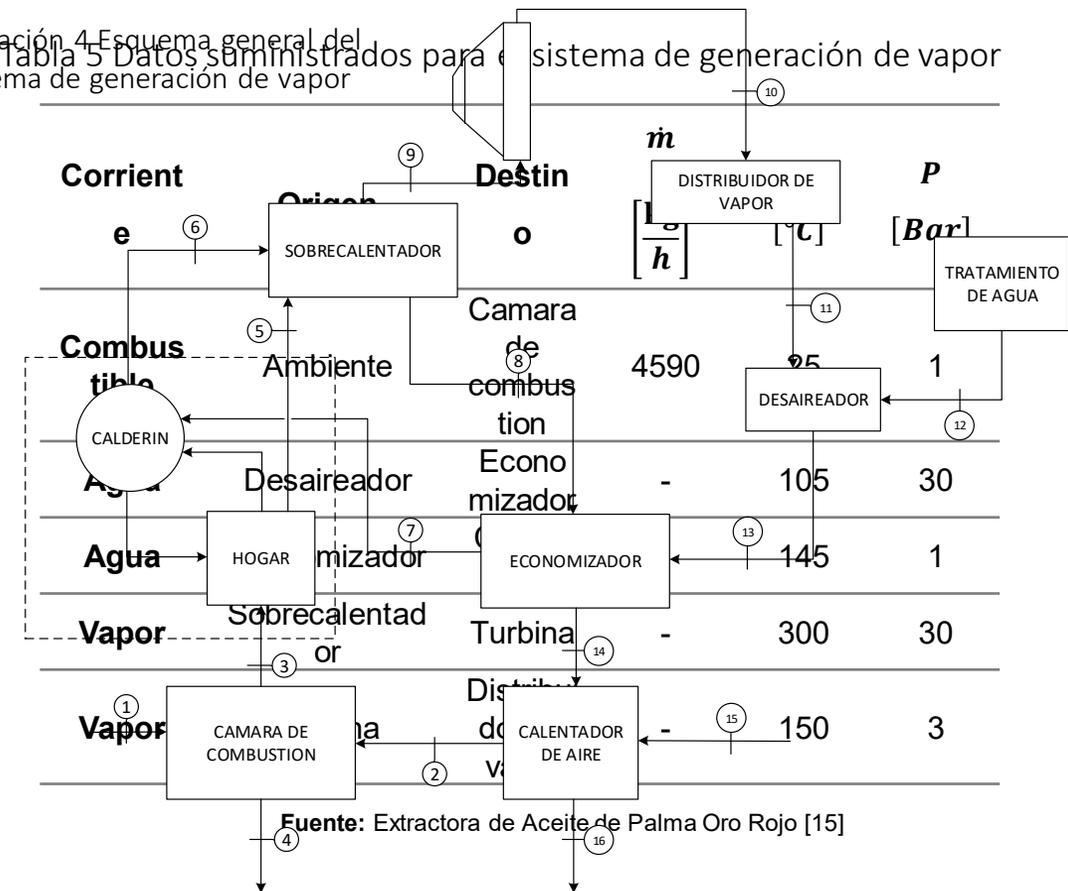
Cada componente se comporta como un sistema abierto y estacionario.

El estado ambiente de referencia que se maneja: temperatura de 25 [°C], presión de 1 [Bar] [15]

## 1 SUPOSICIONES SISTEMA DE GENERACION DE VAPOR

- Se promedia el porcentaje de humedad de la biomasa residual (fibra 40% y la cascarilla 12%) para estimar la humedad que se usara en la combustión (31,6%) [15]
- Se estimará la temperatura del aire caliente que entra a la cámara de combustión en 100 °C con un exceso de aire de 1,5 [21]
- Todos los reactivos están en estado de referencia estándar
- La capacidad calorífica específica de la ceniza de cascarilla y fibra como 0,956 [kJ/kg\*K]. [22]

Ilustración 4 Esquema general del sistema de generación de vapor  
Tabla 5 Datos suministrados para el sistema de generación de vapor



# MODELAMIENTO MATEMATICO

2

## COMPONENTES ESTIMADOS



Cada componente se comporta como un sistema abierto y estacionario.

El estado ambiente de referencia que se maneja: temperatura de 25 [°C], presión de 1 [Bar] [15]

## SUPOSICIONES

### SISTEMA DE EXTRACCION DE ACEITE DE PALMA

- Se determina que la mayoría de las corrientes están conformadas por tres componentes: Agua, Aceite y Solido [27]

Flujo másico que entra de RFF y la parte que es aceite, se determina un porcentaje de aceite en 23,5 [%]; observando la Tabla 3. se determina un porcentaje de sólidos en 18,5 [%] y mediante cálculo matemático se obtiene que el porcentaje de agua es del 58 [%].

Con esto se calcula una relación Agua-Sólido para aquellas corrientes de las cuales no se indique el porcentaje de alguno de estos tres componentes:

$$AS = \frac{\text{Solido}}{\text{Agua}} = \frac{5550}{17400} = 0,318$$

- La capacidad calorífica específica de los residuos sólidos (cascarilla y fibra) como 1,98 [kJ/kg\*K] [23].
- La capacidad calorífica específica del aceite se tomó como 1,955 [J/g °C] un promedio tomando del siguiente rango de datos 1,76-2,15 [J/g °C] [24].
- Las temperatura de todas las corrientes de efluentes de agua que salen de los procesos con dirección al tratamiento de agua, Florentinos, se encuentran en un intervalo de 53-80 [°C] [26, 27, 28, 29].

# METODOLOGIA

14426 [kg/h]

17311 [kg/h]

Se evaluara o valorara una situación determinada para obtener los costos reales del vapor y trabajo generado por la turbina, y así determinar el costo del calor que se pierde en cada etapa del sistema de extracción de aceite de palma

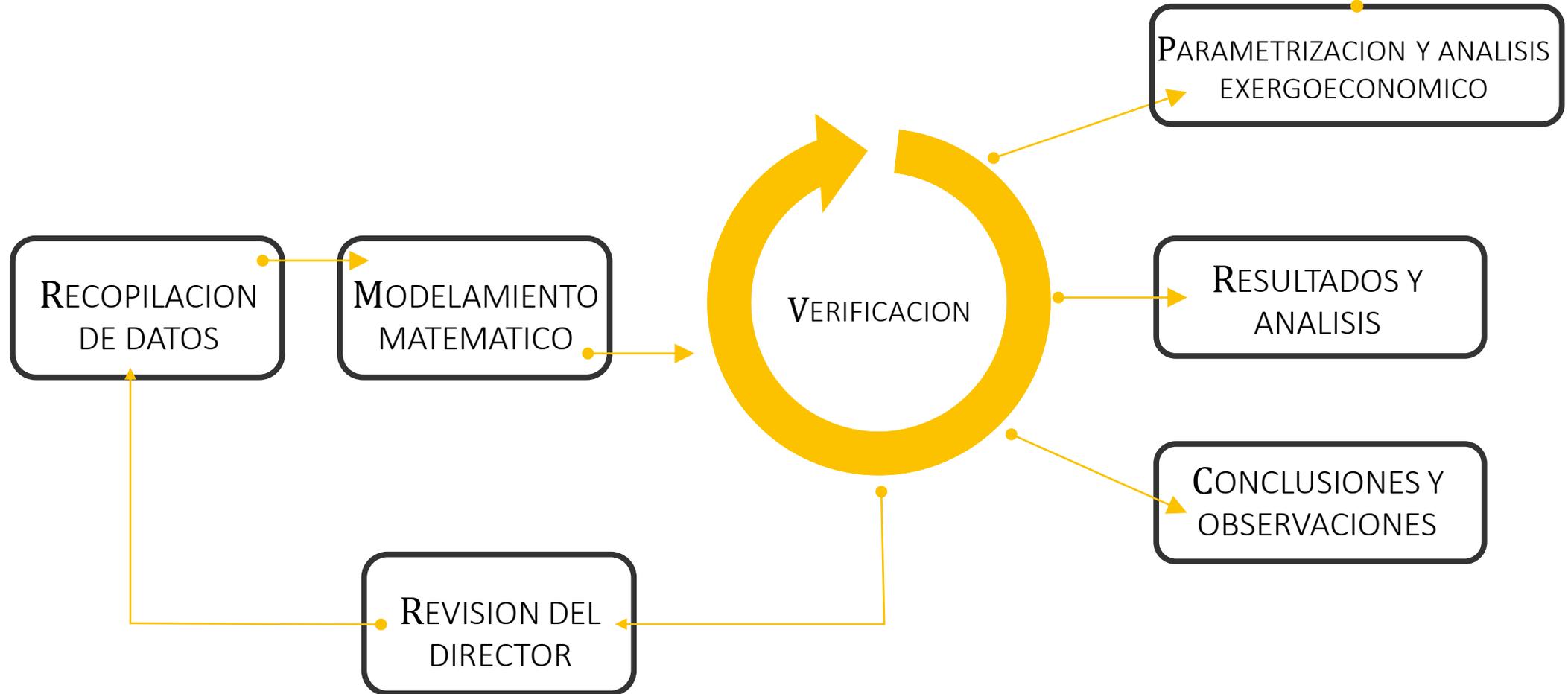
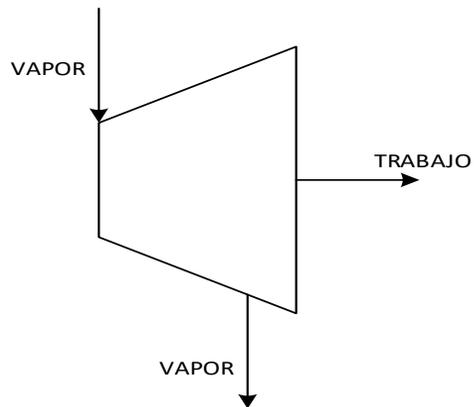


Ilustración 1 Metodología empleada para el desarrollo del proyecto

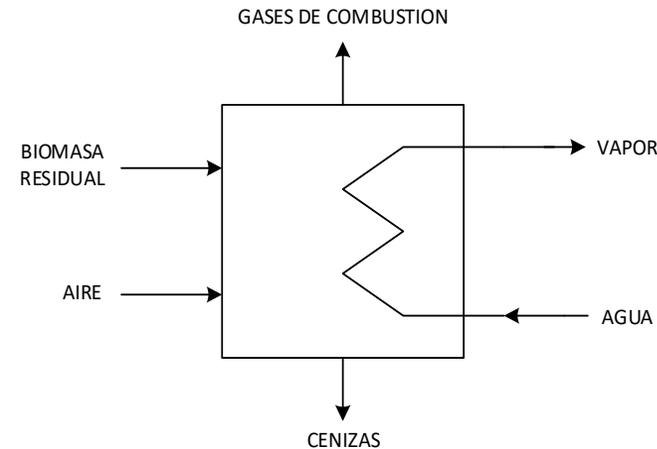
# ANÁLISIS EXERGETICO

ILUSTRACIÓN 22 ESTRUCTURA ECONÓMICA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE TRABAJO



$$\begin{aligned} & (C_{Vapor} * \dot{B}_{Vapor}) + \dot{Z}_{Turbina} \\ = & (C_{VaporBaja} * \dot{B}_{VaporBaja}) + (C_{Trabajo} * \dot{W}_{Turbina}) \end{aligned}$$

ILUSTRACIÓN 22 ESTRUCTURA ECONÓMICA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR



$$\begin{aligned} & (C_b * \dot{B}_{Biomasa}) + (C_{agua} * \dot{B}_{Agua}) + (C_{Aire} * \dot{B}_{Aire}) + \dot{Z}_{Caldera} \\ = & (C_{Vapor} * \dot{B}_{Vapor}) + (C_{Cenizas} * \dot{B}_{Cenizas}) + (C_{Gases} * \dot{B}_{Gases}) \end{aligned}$$

$$\dot{Z} = \frac{CE * f_{RC} * f_{OM}}{t}$$

$CE$  : Turbina 200000 [\$US] y Caldera 1'126.640 [\$US] [15]

$f_{OM}$ : 0,5 [32]

$t$ : 5840 [h/año] [15]

$$f_{RC} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

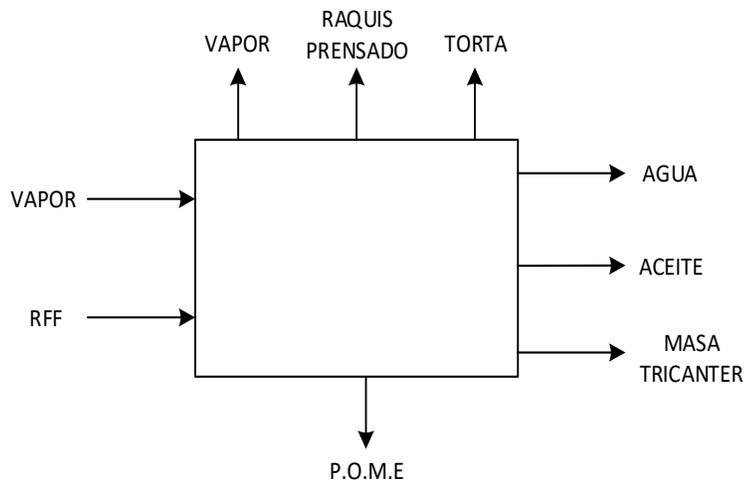
20 [años]

12 [%]



# ANÁLISIS EXERGETICO

ILUSTRACIÓN 22 ESTRUCTURA ECONÓMICA DEL SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA



$$\begin{aligned}
 & (C_{VaporBaja} * \dot{B}_{VaporBaja}) + (C_{RFF} * \dot{B}_{RFF}) + \dot{Z}_{Planta} = (C_{VSP} * \dot{B}_{VSP}) + (C_{Aceite} * \dot{B}_{Aceite}) + \\
 & (C_{RaquisPrensado} * \dot{B}_{RaquisPrensado}) + (C_{Torta} * \dot{B}_{Torta}) + (C_{ASP} * \dot{B}_{ASP}) \\
 & + (C_{MasaTricanter} * \dot{B}_{MasaTricanter}) + (C_{P.O.M.E} * \dot{B}_{P.O.M.E}) + \left( C_{Calor} * Q_{Proceso} * \left( \frac{T^{\circ}}{T_{PP}} \right) \right)
 \end{aligned}$$

## METODO DE IGUALACION

$$C_{POME} = C_{MasaTricanter} = C_{Torta} = C_{RaquisPrensado} = C_{Sub-Productos}$$

$$C_{VaporBaja} = C_{VaporSalidaProceso}$$

$$C_{AguaEntradaCaldera} = C_{AguaSalidaProceso}$$

$$\dot{Z} = \frac{CE * f_{RC} * f_{OM}}{t}$$

$$CE : 10'956.708 [\text{\$US}] [36]$$

$$f_{OM} : 0,5 [32]$$

$$t : 5840 [\text{h/año}] [15]$$

$$f_{RC} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

→ 20 [años]  
→ 12 [%]



# RESULTADOS Y ANALISIS

## PARAMETRIZACION 1

42%

$$\dot{m}_{Vapor\ T.A.C} = \dot{m}_{V.G.C} - \dot{m}_{Esterilizacion} - \dot{m}_{Desaireador}$$

ILUSTRACIÓN 25 Exergía destruida en cada etapa del proceso para un flujo de vapor de 14426 [kg/h]

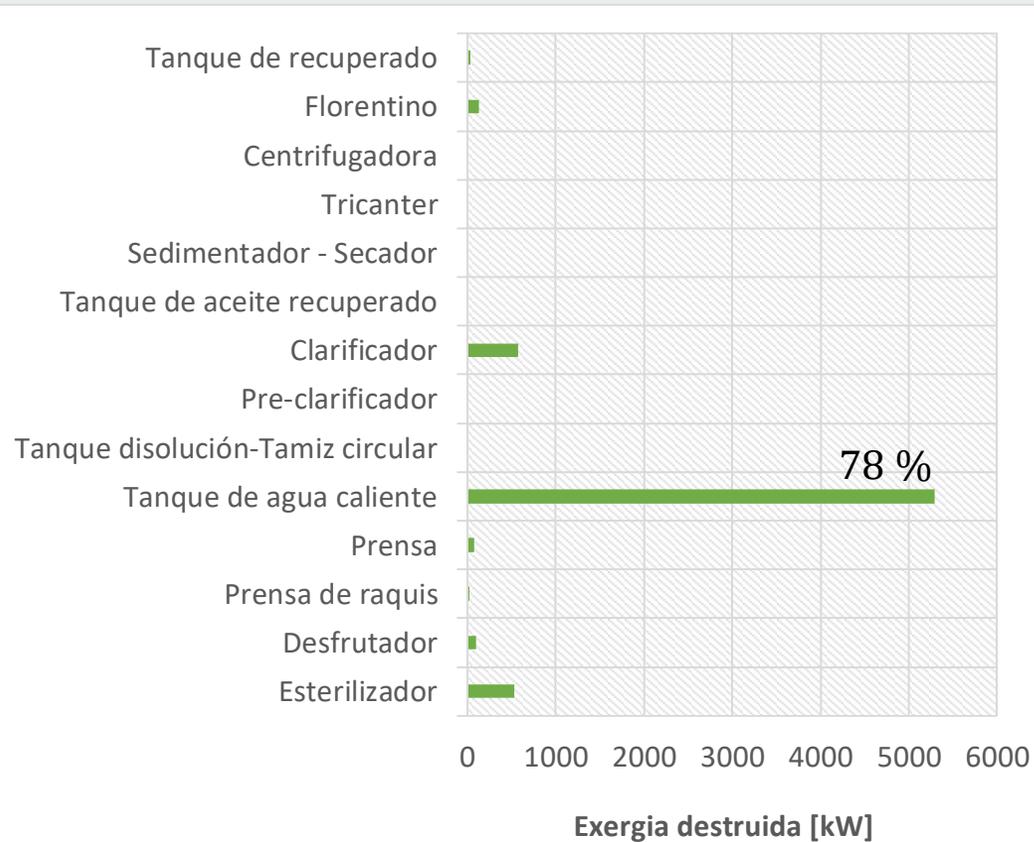
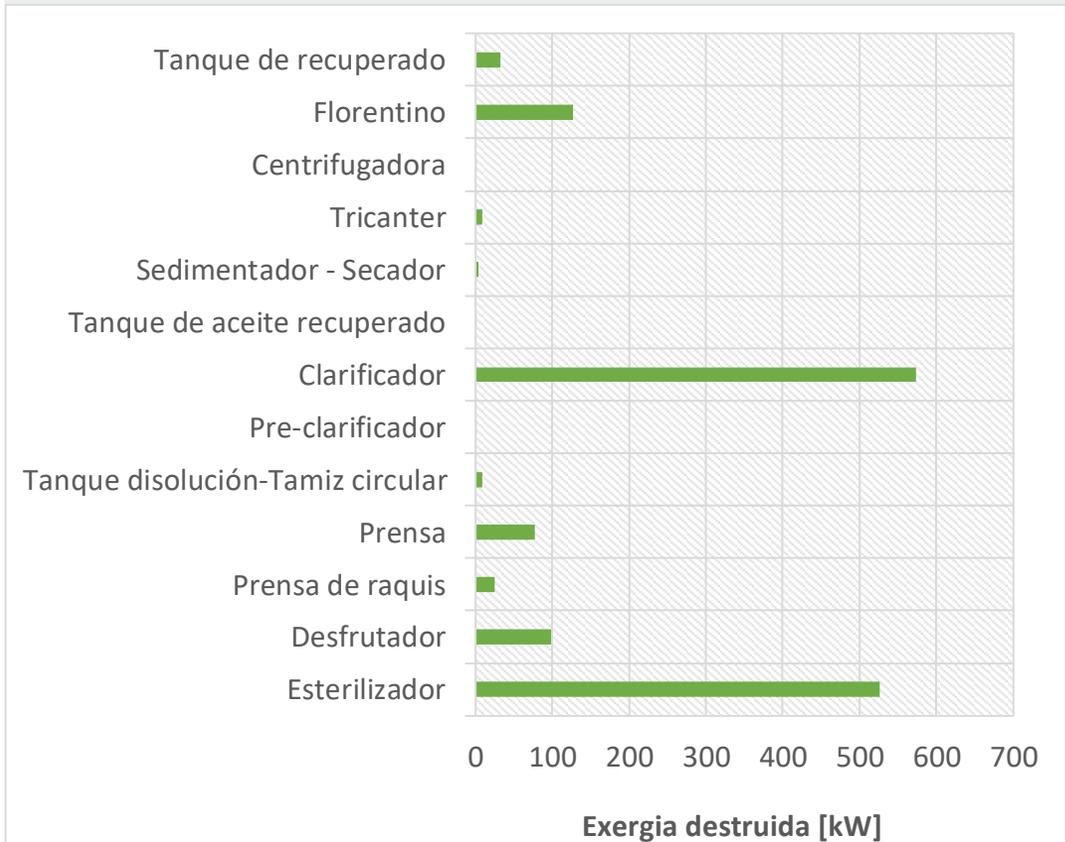


ILUSTRACIÓN 26 Exergía destruida en cada etapa del proceso despreciando tanque de agua caliente (flujo de vapor de 14426 [kg/h]).



# RESULTADOS Y ANALISIS

## PARAMETRIZACION 1

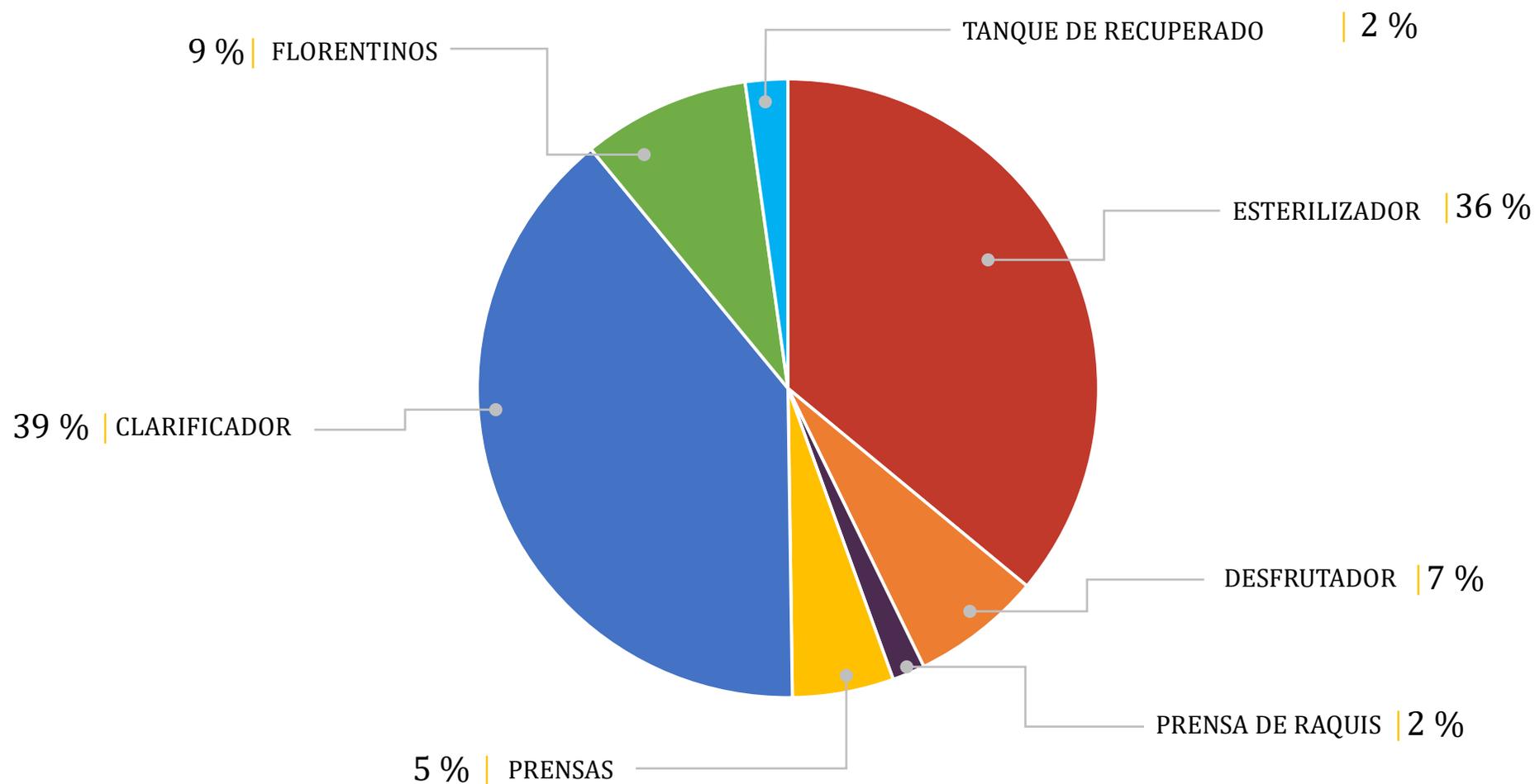


ILUSTRACIÓN 27 EXERGÍA DESTRUIDA EN LAS ETAPAS RELEVANTES DEL PROCESO (FLUJO DE VAPOR DE 14426 [KG/H]).



# RESULTADOS Y ANALISIS

## PARAMETRIZACION 2

ILUSTRACIÓN 28 Destruída en los elementos de que conforman el sistema de generación de vapor (14426 [kg/h] vs. 17311 [kg/h])

20 %

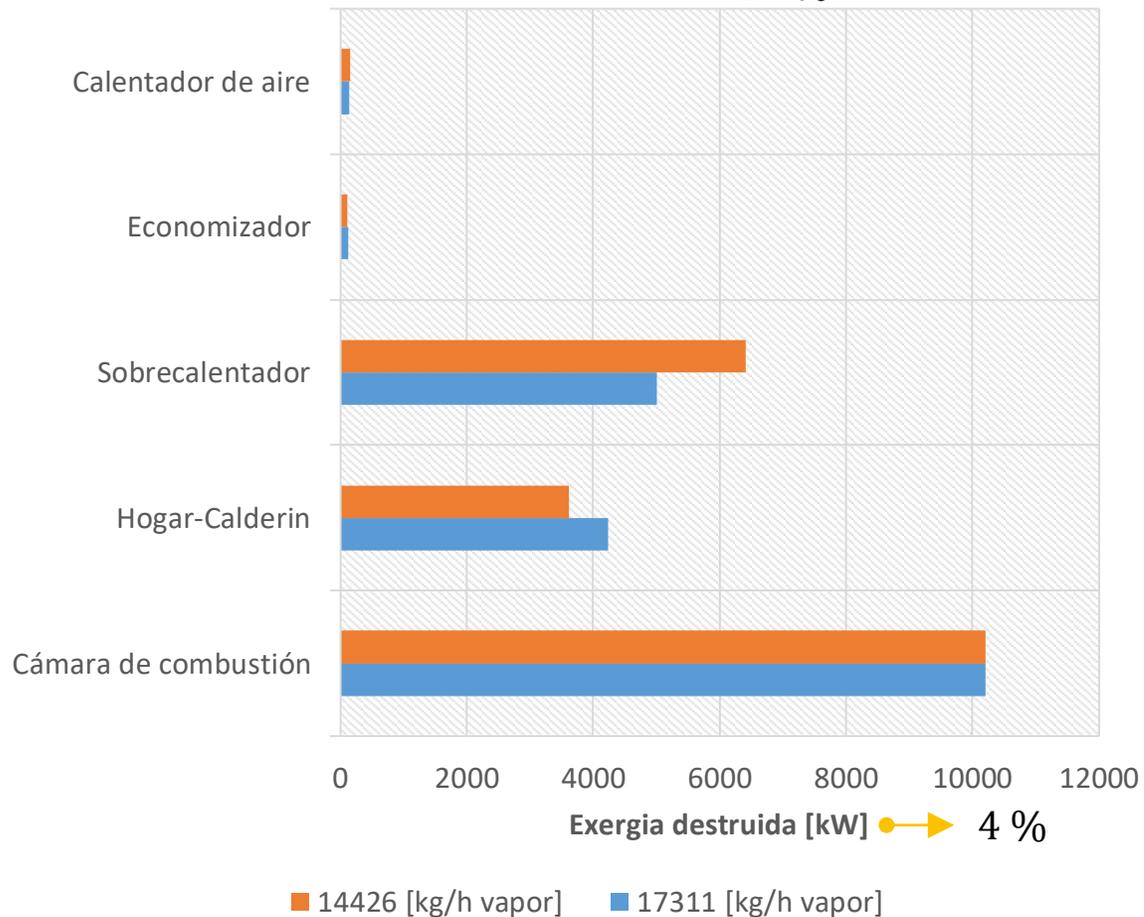


TABLA 8 flujo de calor de los elementos que conforman el sistema de generación de vapor y eficiencia de la caldera (flujo de vapor de 14426 [kg/(h)]).

No	Elemento	$\dot{Q}$ [kJ]	Eficiencia
1	Combustible	8,680 x10 <sup>7</sup>	44,95 [%]
2	Hogar-Calderin	3,161 x10 <sup>7</sup>	
3	Sobrecalentador	2,731 x10 <sup>6</sup>	
4	Economizador	2,454 x10 <sup>6</sup>	
5	Calentador aire	2.228 x10 <sup>6</sup>	
<b>TOTAL</b>		1,26 x10 <sup>8</sup>	

TABLA 8 flujo de calor de los elementos que conforman el sistema de generación de vapor y eficiencia de la caldera (flujo de vapor de 17311 [kg/(h)]).

No	Elemento	$\dot{Q}$ [kJ]	6 %	Eficiencia
1	Combustible	8,680 x10 <sup>7</sup>	6 %	53,43 [%]
2	Hogar-Calderin	3,793 x10 <sup>7</sup>		
3	Sobrecalentador	3,277 x10 <sup>6</sup>		
4	Economizador	2,944 x10 <sup>6</sup>		
5	Calentador de aire	2,228 x10 <sup>6</sup>		
<b>TOTAL</b>		1,33179 x10 <sup>8</sup>		

# RESULTADOS Y ANALISIS

## PARAMETRIZACION 2

ILUSTRACIÓN 25 Exergía destruida en cada etapa del proceso para un flujo de vapor de 14426 [kg/h]

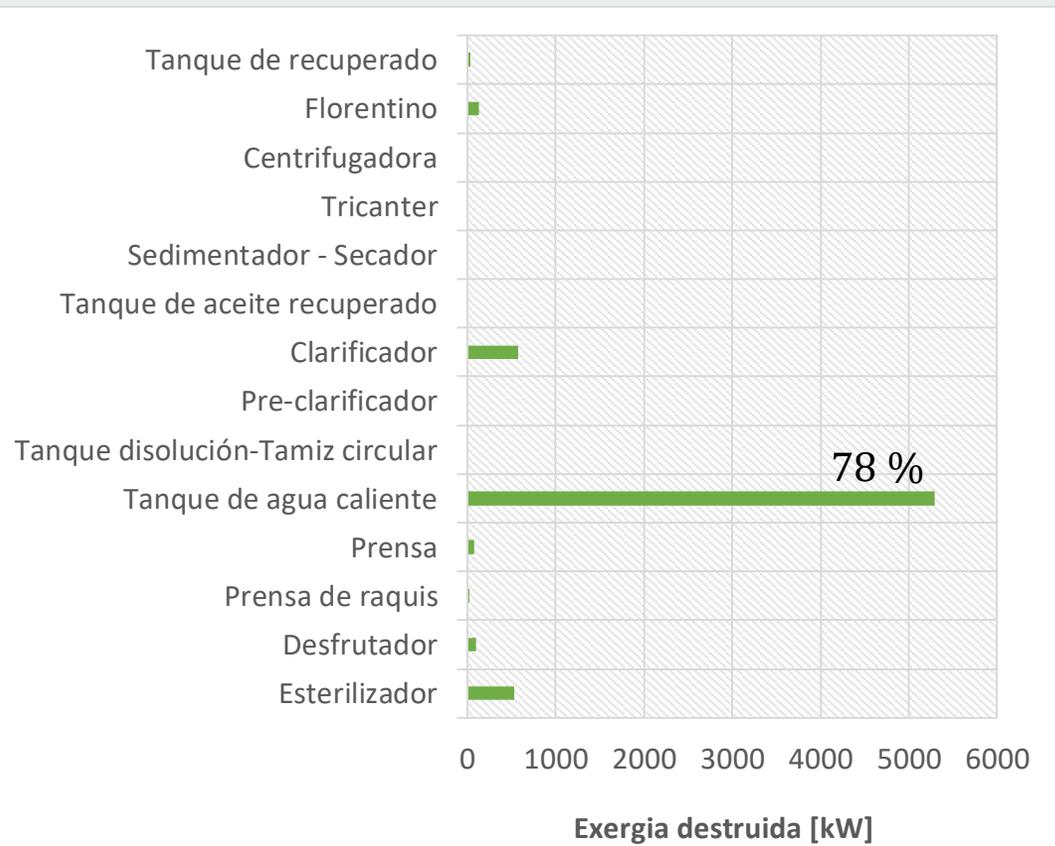
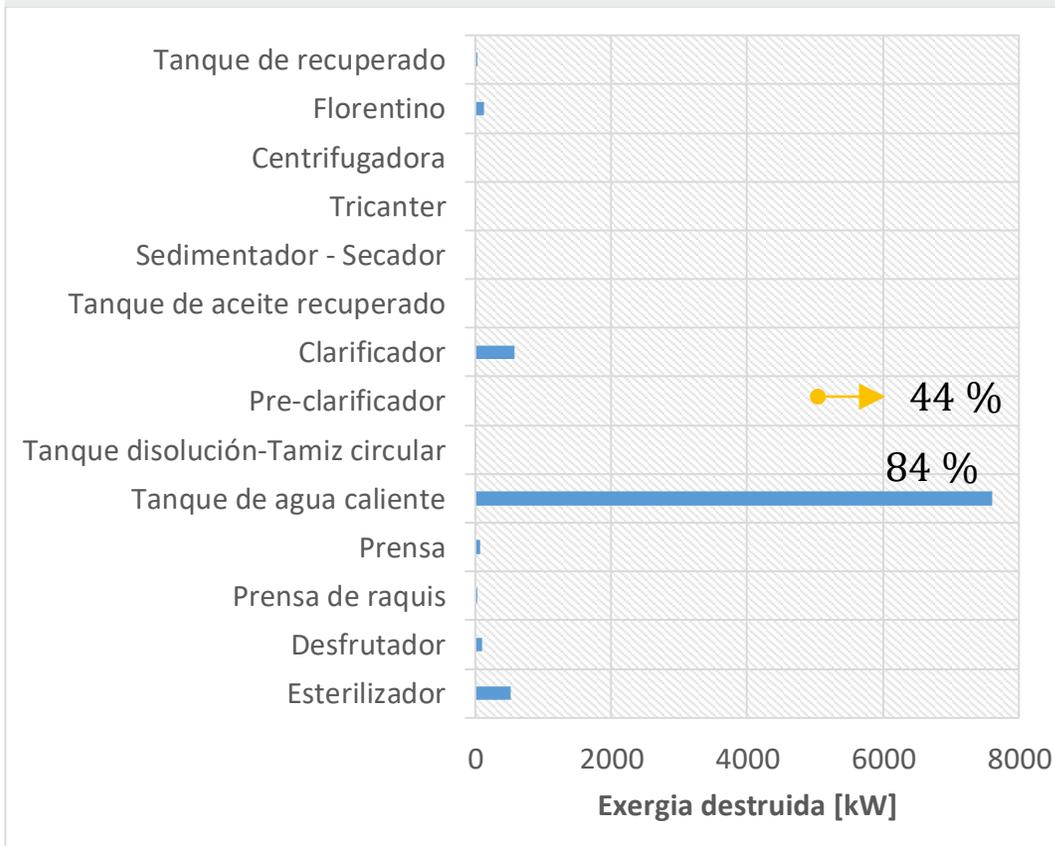


ILUSTRACIÓN 25 Exergía destruida en cada etapa del proceso para un flujo de vapor de 17311 [kg/h]



Inyección de vapor → 42 %

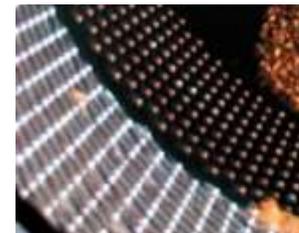
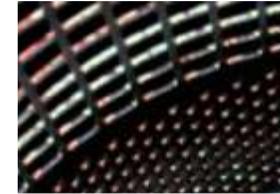


# CONCLUSIONES

Mediante el análisis exergético de la Planta Extractora de aceite de Palma de Oro se identificó la localización y magnitud de las principales pérdidas de exergía, en las cuales se destruye la exergía disponible en el sistema. Los principales factores que representan mayores pérdidas, para el flujo de vapor de 14426 [kg/h] y para el flujo de vapor de 17311 [kg/h] son: el costo de presentación de la materia prima, el costo de presentación de la materia prima y el costo de presentación de la materia prima. La exergía se estima en el 84% seguida del esterilizador y en el 95% y en el segundo caso con un 95%.

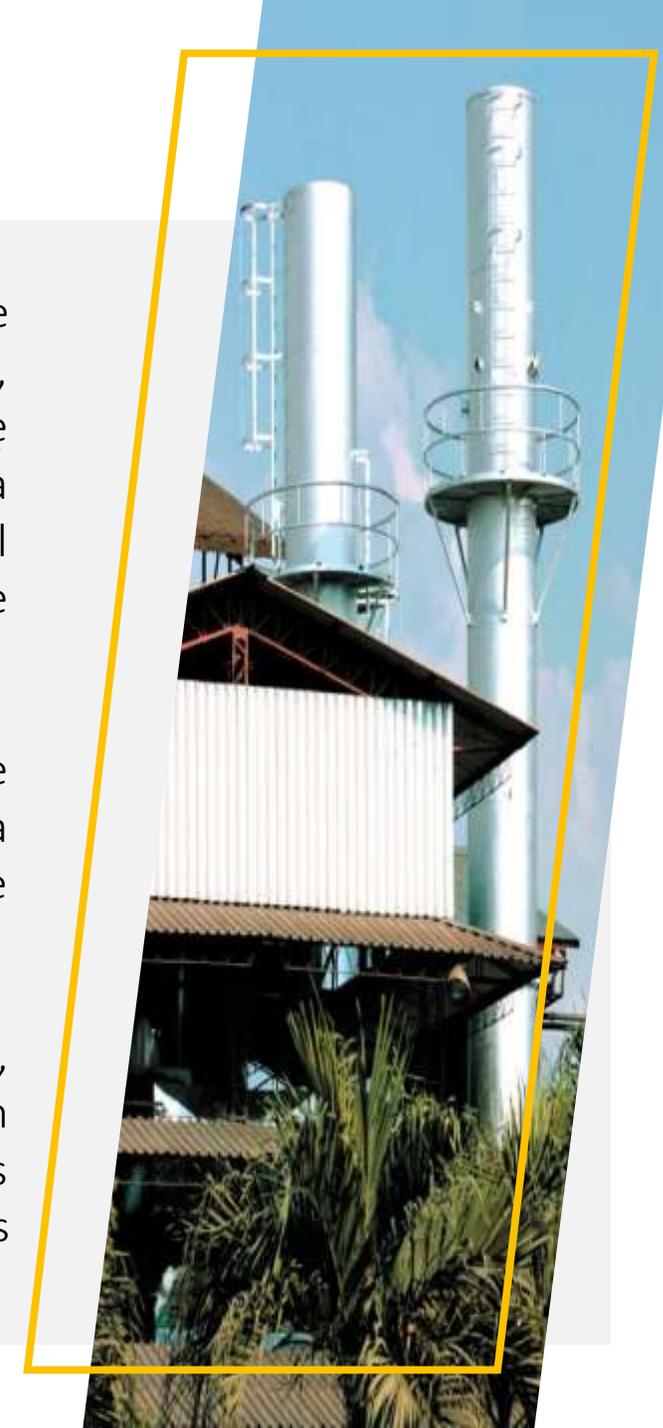
Tabla 14. Costo de producción de la Planta Extractora de aceite de Palma de Oro en el caso de vapor de 14426 [kg/h] y vapor de 17311 [kg/h].

Flujo de vapor [kg/h]	Costo del vapor [\$US/kJ]	Costo del trabajo [\$US/kJ]	Costo del calor [\$US/kJ]
14426	0,00007502	0,00008903	0,00005055
17311	0,0000743	0,00008811	0,00006494



# OBSERVACIONES

- Se ha supuesto el siguiente método de cálculo para el flujo de vapor que entra a la etapa "tanque de agua caliente": al vapor generado en la caldera, Extractora de Aceite de Palma Oro Rojo, se han debido rectificar y suponer mediante se le restará el valor necesario para el funcionamiento en la etapa de esterilización (6600 [kg/h]) y el calentamiento de agua que entra a la caldera, el resultado obtenido entraría en su totalidad para el calentamiento del agua que se implementará en los demás procesos de extracción de aceite de palma.
- Para el balance de energía y entropía se han debido buscar mediante revisión de literatura las temperaturas a las cuales trabajan los procesos de extracción de aceite de palma y estimar en dado caso de no encontrarse las temperaturas de las corrientes de cada etapa y el  $C_p$  de las cenizas, biomasa, aceite de palma y residuos sólidos de palma.
- Para la mayoría de corrientes en el sistema de extracción de aceite de palma se asumen estar conformadas por: Agua, Aceite y Solido, la estimación de cada una de ellas dependerá de la etapa en la que se encuentre y el nivel de información obtenido.
- Se realizó revisión de artículos científicos que permitieran determinar la composición química, poder calorífico y exergía de la biomasa residual (cascarilla y fibra) obtenida como desecho en el Sistema de extracción de aceite de palma e implementado como combustible para la caldera de vapor.
- La estimación de costos para el aceite de palma, sub-productos del aceite, agua, y biomasa, costos de equipos e instalación fueron revisados en literatura para un periodo de tiempo de no más de 2 años o suministrados por la Planta Extractora de Aceite de Palma Oro Rojo como datos actualizados del presente año.



# REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS



## INTRODUCCION

[1] Vargas, D., Yáñez, E., García, J. (2011). Cogeneración con biomasa de palma de aceite en el sistema eléctrico colombiano: barreras, perspectivas y oportunidades. *PALMAS*, 32, pp. 49-6.

[6] Rocha, S. Vesga, J. (2011). *Evaluación exergético del proceso de extracción de aceite de palma africana*. (Trabajo de grado). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Bucaramanga

## RECOPIACION DE DATOS

[7] Corporación para el desarrollo industrial de la biotecnología y producción limpia. Evaluación de las variedades más promisorias para la producción de aceite vegetal y su potencial implementación en Colombia. Colombia, Bogotá.

[8] Bernal, G.A. (2005) Apéndice 2. En G.A. Bernal, *Sinopsis del proceso de palma de aceite*. (FEDEPALMA, pp. 2 – 68). Bogotá.

[15] Planta Extractora de Aceite de Palma Oro Rojo. Grupo empresarial de INDUPALMA. Sabana de Torres, Santander, Colombia.

## MODELAMIENTO MATEMATICO

[16] Song, C., Shen L., Xiao J. (2011). Estimating Specific Chemical Exergy of Biomass from Basic Analysis Data. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, (50), pp. 9758–9766.

[21] Alderetes, C. (2016). *Calderas a Bagazo – Proyecto, operación y mantenimiento*, Argentina: [s.n].

[22] Cabrera, G., Madriñan, S., Muñoz, M. (2013). Evaluación de índices de conversión energética en la producción de gas combustible a partir de biomasa. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, (2), pp. 118-125.

[23] Fono-Tamo, R.S., Koya O.A. (2013). Characterisation of Pulverised Palm Kernel Shell for Sustainable Waste Diversification. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, (4), No 4, pp. 1-10.

[24] Rincón, S., Martínez, S. (2009) Análisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria. *PALMAS*, (30), No 2, pp. 11-24.

[25] Alvarado, M.O. (2010) Evaluación del proceso de clarificación en la planta de beneficio Palmagro S.A. (Tesis de pregrado) Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.



# REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS



## MODELAMIENTO MATEMATICO

[26] García, J.A. (1996) Manejo de efluentes de plantas extractoras. CENIPALMA, No 10, pp. 9-40

[27] Duarte, S.R. (2006) Influencia de las diferentes fases (aceite-agua-lodos) en el comportamiento de la clarificación, Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

## EXERGOECONOMIA

[32] Y. Huang , Y.D. Wang , S. Rezvani, D.R. McIlveen-Wright, M. Anderson, J. Mondol, A. Zacharopoulos, N.J. Hewitt. (2013) A techno-economic assessment of biomass fuelled trigeneration system integrated with organic Rankine cycle. Applied Thermal Engineering, No 53, pp 325-33.

[33] Pellegrini, L., Pacheco, R., Oliveira, S. (2005) A Atribuição de Custos em Sistemas Energéticos: A Termoeconomia como base de cálculo. ENEGEP, pp 1976- 1983.

[34] Briceño, I., Valencia, J. y Posso, M. (2015). Potencial de generación de energía de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia. Palmas, 36(3), pp 43-53.

[35] Montes, J.M., García, J., Querol, E. (2009) Termoeconomía y optimización energética. Fundación Gómez Pardo. Madrid, España.

[36] Vidliana, S. (2010) Optimal palm oil processing plant size in south sumatera, Tesis de pregrado, California Polytechnic State university, Faculty of the Agribusiness Department.

[37] Mosquera, M., Valderrama, M., Ruíz, E., López, D., Castro, L., Fontanilla, C., & González, M. A. (2017). Costos de producción para el fruto de palma de aceite y el aceite de palma en 2015: estimación en un grupo de productores colombianos. Palmas, 38(2), 11-27.

[38] Van Dam, J. (2016). Subproductos de la palma de aceite como materias primas de biomasa. Palmas, 37(Especial Tomo II), pp. 149-156.



GRACIAS

MICHELLE JOHANNA BELTRÁN

DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO | CARLOS ALIRIO DIAZ GONZÁLEZ  
CO-DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO | MARIO JONATÁN ACERO CABALLERO

