

# Desarrollo y aplicación de un software para el análisis energético de una planta de harina y aceite de pescado

## Development and application of a software for the energy and exergetic analysis of a fishmeal and fish oil plant

Recibido: noviembre 01 de 2024 | Revisado: noviembre 30 de 2024 | Aceptado: diciembre 06 de 2024

LUIS ENRIQUE ZANABRIA ALAN<sup>1</sup>  
GIANCARLO VALVERDE PADILLA<sup>1</sup>

### RESUMEN

La producción de harina y aceite de pescado es fundamental en la industria alimentaria, pero conlleva un alto consumo energético y pérdidas térmicas significativas. Este trabajo presenta el desarrollo de un software en Python para el análisis energético y exergetico de una planta de harina y aceite de pescado. A través de simulaciones computacionales, se evalúa el rendimiento térmico de equipos clave como calderas, cocinas, secadores y tanques. Los resultados indican que el modelo es preciso en la mayoría de los equipos, con diferencias menores al 2% en calor requerido y consumo de vapor, aunque se identificaron discrepancias del 12.03% en los secadores rotadiscos, lo que requiere ajustes. El análisis exergetico destaca áreas críticas para mejorar la eficiencia energética. El software proporciona una herramienta integral para la optimización de procesos industriales, y se planea expandir con simulaciones de carga variable y análisis termoeconómico para mejorar aún más la eficiencia y reducir los costos operativos.

**Palabras** Análisis energético, análisis exergetico, software en Python, planta de harina y aceite de pescado, eficiencia energética

### ABSTRACT

The production of fishmeal and fish oil is essential in the food industry, but it involves high energy consumption and significant thermal losses. This paper presents the development of Python software for the energy and exergy analysis of a fishmeal and fish oil plant. Through computational simulations, the thermal performance of key equipment such as boilers, stoves, dryers and tanks is evaluated. The results indicate that the model is accurate in most of the equipment, with differences of less than 2% in required heat and steam consumption, although discrepancies of 12.03% were identified in the rotadisk dryers, which require adjustments. The energy analysis highlights critical areas for improving energy efficiency. The software provides a comprehensive tool for industrial process optimization and is planned to be expanded with variable load simulations and thermoeconomic analysis to further improve efficiency and reduce operating costs.

**Keywords:** Energy analysis, exergy analysis, Python software, fishmeal and fish oil plant, energy efficiency

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Ingeniería,  
Lima-Perú

Correo electrónico de contacto:  
lzanabriaa@uni.edu.pe

© Los autores. Este artículo es publicado por la Revista Campus de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de San Martín de Porres. Este artículo se distribuye en los términos de la Licencia Creative Commons Atribución No-Comercial – Compartir-Igual 4.0 Internacional (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite el uso no comercial, distribución y reproducción en cualquier medio siempre que la obra original sea debidamente citada. Para uso comercial contactar a: [revistacampus@usmp.pe](mailto:revistacampus@usmp.pe).

<https://doi.org/10.24265/campus.2024.v29n38.12>

## Introducción

La harina y el aceite de pescado son productos clave en la industria alimentaria, particularmente, en la producción de alimentos para animales y en la elaboración de productos para consumo humano. Entre 2014 y 2023, Perú exportó 10,827,949 toneladas métricas de productos derivados de anchoveta, con un valor superior a los 18,173 millones de dólares. De este total, 9,119,302 toneladas correspondieron a harina de pescado que generó ingresos de 13,910 millones de dólares, lo que representa el 84.2% de las exportaciones. Por su parte, el aceite de pescado alcanzó las 1,494,786 toneladas, con una valorización de 3,781 millones de dólares, lo que equivale al 13.8% de las exportaciones de derivados de anchoveta (Estrada, 2024).

No obstante, la producción de estos productos está asociada a un alto consumo energético y pérdidas térmicas significativas. Las plantas de procesamiento, como la de Pesquera Exalmar S.A.A. (Figura 1), que representa el 13% de las exportaciones de harina y aceite de pescado del país (Estrada, 2024), operan con una infraestructura energética compleja y carecen de herramientas integradas para evaluar eficientemente su rendimiento.

El análisis energético y exergético emerge como una herramienta esencial para mejorar el desempeño térmico y la eficiencia global de la planta. Mientras que el análisis energético cuantifica el consumo total de energía sin considerar la calidad de la misma (Cengel & Boles, 2013), el análisis exergético evalúa la calidad de la

energía y cuantifica las irreversibilidades en los procesos, facilitando la identificación de pérdidas de trabajo útil y ofreciendo oportunidades para mejorar la eficiencia energética Kotas (1985), Rosen *et al.* (2008). La combinación de ambos enfoques es clave para identificar puntos críticos en el sistema y guiar el diseño de mejoras operativas.

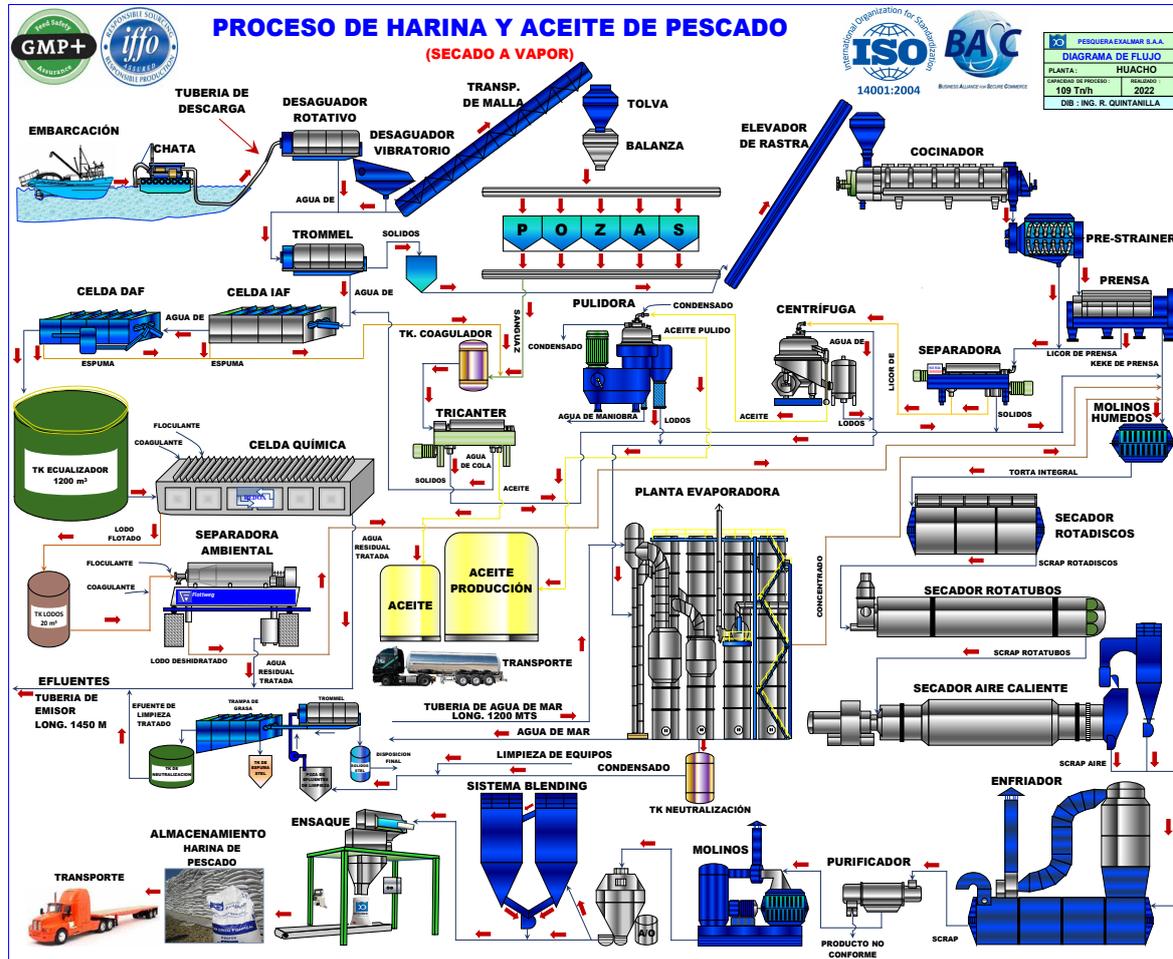
El objetivo de este trabajo es desarrollar un software para realizar el análisis energético y exergético de la planta de harina y aceite de pescado de Pesquera Exalmar S.A.A. (Planta CALLAO, con una capacidad de procesamiento de 115 toneladas por hora). Este software proporciona una herramienta integral para evaluar la eficiencia de los equipos y procesos dentro de la planta, sirviendo como base para estudios de carga variable en el futuro.

Para ello, se simula la operación de la planta, partiendo de un diseño existente. El modelo termodinámico se valida mediante el análisis de la transferencia de calor desde las calderas de vapor hacia los artefactos térmicos. Se programan funciones para calcular las propiedades termodinámicas de los fluidos en el ciclo térmico de vapor, y se desarrollan rutinas para calcular la transferencia de calor en las áreas de intercambio térmico. Además, se integran formularios de usuario y objetos para realizar los cálculos térmicos de los calderos y el análisis del ciclo térmico de vapor. El software, desarrollado en Python, incluye capacidades para realizar cálculos iterativos y constituye una herramienta útil para almacenar y analizar los resultados obtenidos en esta investigación.

Figura

1

Diagrama de flujo del proceso de harina y aceite de pescado de la planta HUACHO de la Pesquera Exalmar S.A.A.



Nota. Pesquera Exalmar S.A.A, Diagrama de flujo realizado por Ing. R. Quintanilla, 2022.

## Método

### Metodología del desarrollo del software

El software fue desarrollado en Python, utilizando Tkinter para la creación de interfaces gráficas (Python Software Foundation, 2024) y la biblioteca CoolProp para el cálculo de propiedades termodinámicas (CoolProp Developers, n.d.). El programa integra múltiples módulos funcionales que permiten modelar el desempeño energético y exergético de una planta de harina y aceite de pescado.

## Cálculo térmico

El programa simula los balances energéticos de los principales equipos térmicos: cocinas, secadores rotadiscos y rotatubos, tanques de calentamiento de espumas y sanguaza, e intercambiador de calor.

Para cada equipo se emplearon ecuaciones específicas que permiten calcular el calor requerido y el consumo de vapor, adaptándose a las características operativas de cada uno, como se muestra en el Anexo A (Cengel & Boles, 2013;

Tester & Modell, 1997). En el caso de las cocinas, se evalúa el calor necesario para el proceso de cocción, mientras que en los secadores rotadiscos y rotatubos se analiza el calor requerido para la eliminación de humedad residual en la materia prima. De manera similar, para los tanques de sanguaza y espuma, así como para el intercambiador de calor, se determinan los requerimientos energéticos asociados al calentamiento y la recuperación de calor en el sistema.

### Cálculo de Brake Horsepower (BHP)

El Brake Horsepower (BHP) se calcula para cada equipo basado en el consumo de vapor. La fórmula empleada es (Kern, 1986; Wark & Richards, 2001):

$$BHP = \frac{\text{Kilogramos de vapor por hora}}{15.65} \quad (1)$$

Donde 15.65 es un factor estándar utilizado para convertir kilogramos de

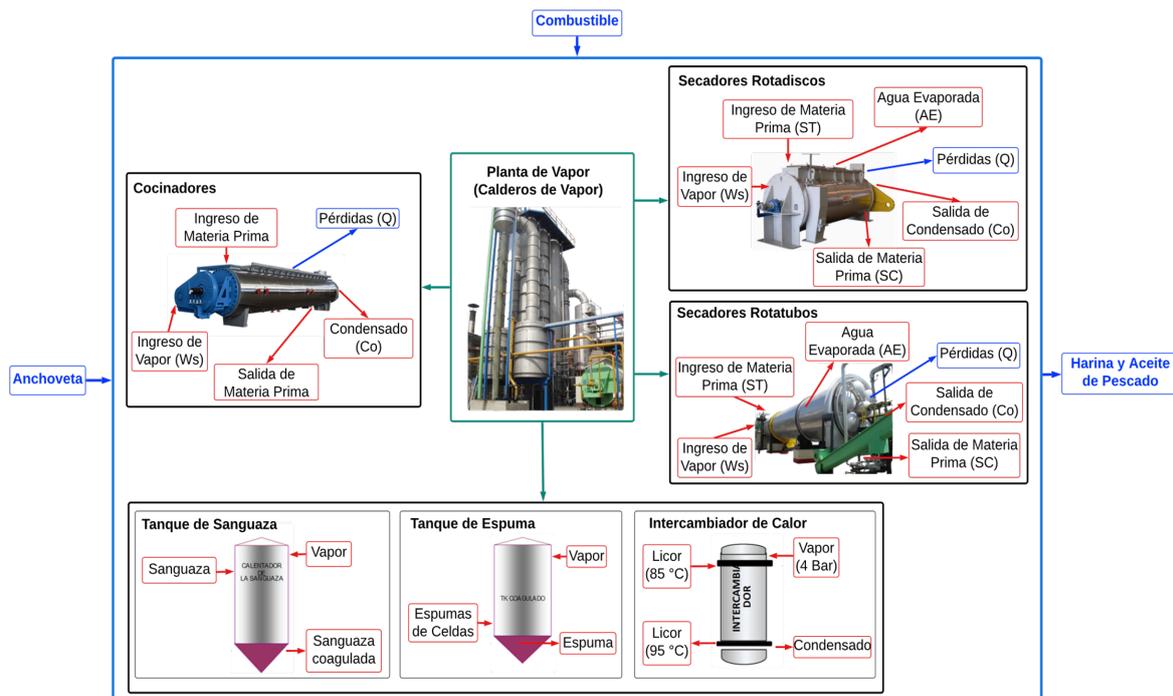
vapor por hora a BHP, basado en el poder calorífico del vapor.

### Análisis exergético

El análisis exergético del sistema se desarrolla considerando el balance de cada componente térmico involucrado en el proceso, incluyendo las cocinas, los secadores rotadiscos y los secadores rotatubos.

El análisis exergético del sistema se desarrolla considerando el balance de cada componente térmico involucrado en el proceso, incluyendo las cocinas, los secadores rotadiscos y los secadores rotatubos. En la Figura 2 se detallan los ingresos y salidas de la planta de harina y aceite de pescado, lo que permite visualizar el balance energético del sistema y sus flujos clave.

**Figura 2**  
*Ingresos y salidas de la planta de harina y aceite de pescado*



Este análisis tiene como objetivo no solo cuantificar el consumo energético, sino también evaluar con mayor precisión y profundidad la eficiencia en el uso del vapor. A diferencia de un análisis energético convencional, el análisis exergético permite determinar la cantidad real de vapor consumido por cada uno de estos equipos térmicos y por el sistema en su conjunto.

La finalidad de este enfoque es

$$Q + W = MP_0 h_i + C_0 \cdot h_j - w_s \cdot h_i - MP \cdot h_k \quad (2)$$

Donde  $Q$  y  $W$  son las entradas y salidas de energía en forma de calor y trabajo, respectivamente,  $h_{i,j,k}$  son las entalpías específicas de los diferentes componentes del sistema en los puntos  $i, j$  y  $k$  y  $MP_0, C_0$  y  $w_s$ , y corresponden a las masas o flujos de entrada y salida, mientras que  $MP$  es la masa de materia prima procesada.

Para calcular las pérdidas de calor ( $Q$ ), se utiliza la siguiente fórmula:

$$Q = MP \cdot (h_2 - h_5) - w_s \cdot \lambda \quad (3)$$

Donde,  $\lambda$  es calor latente del vapor.

La cantidad masa de vapor ( $w_s$ ) requerida para alcanzar el cambio de temperatura deseado en la materia prima,

optimizar tanto la generación como la distribución del vapor dentro del sistema, lo que conlleva una reducción en el consumo de combustible en las calderas.

El balance exergético se basa en la aplicación de la Primera Ley de la Termodinámica, que describe las entradas y salidas de energía dentro del sistema. Las pérdidas de calor específicas se calculan mediante la siguiente ecuación (Kern, 1986; Wark & Richards, 2001):

considerando las pérdidas de calor, se calcula con la siguiente fórmula:

$$w_s = \frac{MP \cdot C_p \cdot (T_2 - T_0) - Q}{\lambda} \quad (4)$$

Donde,  $C_p$  es el calor específico de la materia prima, y  $T_0$  y  $T_2$  son las temperaturas inicial y final.

### Interfaz del software

El software presenta una interfaz gráfica que permite el ingreso de datos específicos para cada equipo de la planta, incluyendo las cocinas (Figura 3), los secadores rotadiscos (Figura 4) y rotatubos (Figura 5), los tanques de sanguaza y espuma, así como el intercambiador de calor (Figura 6). Además, permite el ingreso de las variables generales y de la planta (Figura 7).

**Figura 3**

*Ingreso de datos de las cocinas de la planta de harina de Pesquera Exalmar S.A.A. en el software de simulación*

**Valores predeterminados** **Guardar** **Procesar**

**COCINAS**

**SECADORES ROTADISCOS RTD**

**SECADORES ROTATUBOS RTB**

**CALOR EN SANGUAZA ESPUMAS E INTERCAMBIADOR DE CALOR**

**VARIABLES GENERALES Y DE PLANTA**

**Cocina 1**  
 Diámetro de la cocina: 1.4 m  
 Longitud de la cocina: 11.2 m  
 Masa de la cocina: 20000.0 Kg

**Cocina 2**  
 Diámetro de la cocina: 1.1 m  
 Longitud de la cocina: 11.0 m  
 Masa de la cocina: 15000.0 Kg

**Cocina 3**  
 Diámetro de la cocina: 1.3 m  
 Longitud de la cocina: 12.0 m  
 Masa de la cocina: 25000.0 Kg

**Calor para cocción de la cocina**

**Análisis de composición**

Porcentaje de Agua: 76.25 %  
 Porcentaje de Grasa: 4.08 %  
 Porcentaje de Sólidos: 19.67 %

**Calor Requerido para Calentamiento**

Temperatura Inicial: 18.0 °C  
 Temperatura Final: 100.0 °C  
 Número de ciclos de calentamiento: 100.0

**Cálculo de exergía**

Temperatura del alimento de ingreso: 165.0 °C  
 Temperatura del vapor salida: 120.0 °C  
 Temperatura del alimento de salida: 100.0 °C

**Figura 4**

*Ingreso de datos de los secadores rotadiscos de la planta de harina de Pesquera Exalmar S.A.A. en el software de simulación*

**Valores predeterminados** **Guardar** **Procesar**

**COCINAS**

**SECADORES ROTADISCOS RTD**

**SECADORES ROTATUBOS RTB**

**CALOR EN SANGUAZA ESPUMAS E INTERCAMBIADOR DE CALOR**

**VARIABLES GENERALES Y DE PLANTA**

**Sec. Rotadisk 1**  
 Diámetro: 2.0 m  
 Longitud: 9.0 m  
 Masa: 30000.0 Kg

**Sec. Rotadisk 2**  
 Diámetro: 2.0 m  
 Longitud: 9.0 m  
 Masa: 30000.0 Kg

**Sec. Rotadisk 3**  
 Diámetro: 3.0 m  
 Longitud: 10.0 m  
 Masa: 50000.0 Kg

**Variables de maquina**

% Sólidos en materia prima húmeda: 40.1 %  
 % Grasas en materia prima húmeda: 3.9 %  
 % Sólidos en materia prima seca: 50.36 %  
 % Grasas en materia prima seca: 4.64 %  
 Presión trabajo secador: 6.0 Bar  
 Presión trabajo equipos: 4.0 Bar

**Calor para el 1er secado**

T alimentación: 65.0 °C  
 T final del scrap 2do secado: 85.0 °C  
 T salida de los vahos: 98.0 °C  
 Masa de sólidos secos: 24794.0 Kg/hr  
 Masa de líquido de ingreso: 31556.0 Kg/hr  
 Masa de líquido de salida: 20286.0 Kg/hr

**Cálculo de exergía**

T ingreso de vapor: 165.0 °C  
 T ingreso del alimento: 65.0 °C  
 T salida de vapor: 120.0 °C  
 T salida del alimento: 85.0 °C  
 T salida (VAHOS): 98.0 °C  
 Masa de alimento de ingreso: 56350.0 Kg  
 Masa de SCRAP: 45080.0 Kg  
 Masa de VAHOS: 11270.0 Kg

**Q calentamiento de secador**

Temperatura inicial: 18.0 °C  
 Temperatura final: 100.0 °C  
 Horas trabajadas por año: 1500.0 hr

**Figura 5**

*Ingreso de datos de los secadores rotatubos de la planta de harina de Pesquera Exalmar S.A.A. en el software de simulación*

Valores predeterminados
Guardar
Procesar

COCINAS

SECADORES ROTADISCOS RTD

SECADORES ROTATUBOS RTB

CALOR EN SANGUAZA ESPUMAS E INTERCAMBIADOR DE CALOR

VARIABLES GENERALES Y DE PLANTA

**Sec. Rotatubo 1**

Diametro:  m

Longitud:  m

Masa:  Kg

**Sec. Rotatubo 2**

Diametro:  m

Longitud:  m

Masa:  Kg

**Variables de maquina**

% Solidos en materia prima húmeda:  %

% Grasas en materia prima húmeda:  %

% Solidos en materia prima seca:  %

% Grasas en materia prima seca:  %

Presion trabajo secador:  Bar

Presion trabajo equipos:  Bar

**Calor para el 2do secado**

T alimentacion:  °C

T final del scrap 2do secado:  °C

T salida de los vahos:  °C

Masa de solidos secos:  Kg/hr

Masa de liquido de ingreso:  Kg/hr

Masa de liquido de salida:  Kg/hr

**Cálculo de exergia**

T ingreso de vapor:  °C

T ingreso del alimento:  °C

T salida de vapor:  °C

T salida del alimento:  °C

T salida (VAHOS):  °C

Masa de alimento de ingreso:  Kg

Masa de SCRAP:  Kg

Masa de VAHOS:  Kg

**Calor de calentamiento de secador**

Temperatura inicial:  °C

Temperatura final:  °C

Horas trabajadas por año:  hr

**Figura 6**

*Ingreso de datos de los tanques de sanguaza y espuma, así como del intercambiador de calor, al software de simulación para la planta de harina de Pesquera Exalmar S.A.A*

Valores predeterminados
Guardar
Procesar

COCINAS

SECADORES ROTADISCOS RTD

SECADORES ROTATUBOS RTB

CALOR EN SANGUAZA ESPUMAS E INTERCAMBIADOR DE CALOR

VARIABLES GENERALES Y DE PLANTA

**Calor en SANGUAZA**

Temperatura de ingreso de la sanguaza:  °C

Temperatura de salida de licor:  °C

Flujo masico:  Tn/hr

Presion:  Bar

% Solidos:  %

% Grasa:  %

% Agua:  %

Calor de calentamiento del tanque:  kcal/hr

Calor de calentamiento del tanque(perdidas):  kcal/hr

**Demanda de Vapor para calentar las espumas**

Temperatura de ingreso de la sanguaza:  °C

Temperatura de salida de licor:  °C

Flujo masico:  Tn/hr

Presion:  Bar

% Solidos:  %

% Grasa:  %

% Agua:  %

Calor de calentamiento del tanque:  kcal/hr

Calor de calentamiento del tanque(perdidas):  kcal/hr

**Intercambiador de Calor**

Temperatura de ingreso de la sanguaza:  °C

Temperatura de salida de licor:  °C

Flujo masico:  Tn/hr

Presion:  Bar

% Solidos:  %

% Grasa:  %

% Agua:  %

Calor de calentamiento del tanque:  kcal/hr

Calor de calentamiento del tanque(perdidas):  kcal/hr

**Figura 7**

*Ingreso de los datos de las variables generales y de la planta de harina de Pesquera Exalmar S.A.A. en el software de simulación*

Variables generales		Variables de planta	
Cp de solido	0.32	Coc 1	40.0 Tn/hr
Cp de aceite	0.5	Coc 2	25.0 Tn/hr
Cp de agua	1.0	Coc 3	50.0 Tn/hr
Presion trabajo	4.0 Bar	Capacidad	115.0
Cp de fierro	0.115	Producción de harina de la planta	28.43
Temperatura del ambiente	18.0 °C	BHP Equivalente	0.28 Gtu/hr
Temperatura de la superficie exterior a la cocina	40.0 °C	Tipo de cambio USD	3.75
Temperatura del ambiente (exerga)	20.0 °C	Relacion SCRAP	0.0
Masa de pescado	115000.0 Kg	%Humedad ingreso	20.0 %
BHP	15.65 kg de vapor/hr	%Humedad salida	7.5 %
kcal/Kg	4.1868	Rendimiento energético del secador	0.5 %
Gl de Petróleo R-500	4.2 Gl/Ton Harina	Poder calorífico del petróleo R-500	37850.0 Kcal/GL
Costo del petróleo Residual R-500	11.39 \$/		

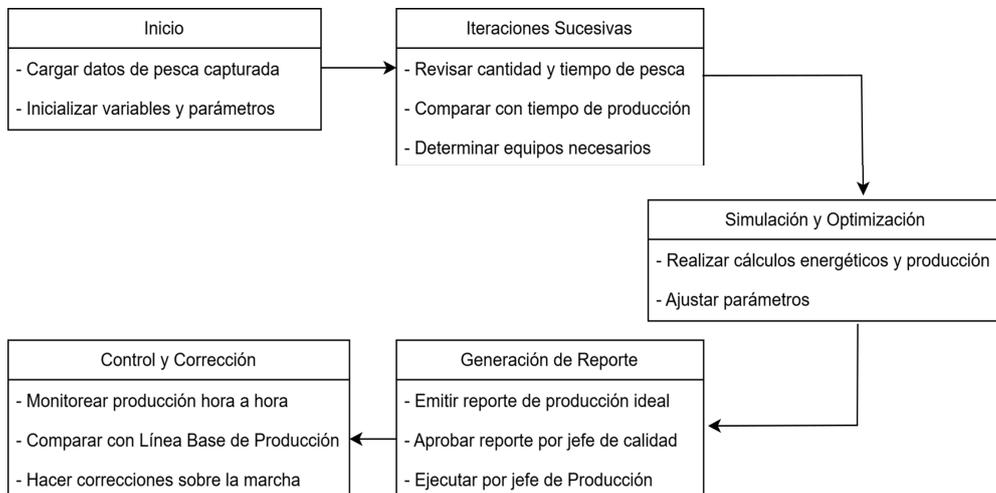
**Simulación de carga variable**

La simulación de carga variable, en desarrollo, utiliza iteraciones sucesivas para optimizar la producción, considerando regímenes de carga del 10% al 100%. El programa calcula la producción ideal,

ajusta equipos y genera reportes para ser aprobados por los responsables, como se observa en la Figura 8. Aunque busca ajustarse a la planificación, el factor humano puede generar pérdidas, por lo que se trabaja en automatizar el proceso para mejorar la eficiencia.

**Figura 8**

*Etapas de la simulación de carga variable*



## Resultados y Discusión

El software desarrollado generó informes detallados en formatos PDF y HTML, proporcionando datos sobre el desempeño energético de los equipos de la planta de harina Pesquera Exalmar S.A.A. Los parámetros analizados incluyeron el calor requerido, el consumo de vapor, la

potencia producida (BHP) y la exergía asociada a cada equipo.

Estos resultados permitieron realizar un análisis integral del balance energético y exergético de la planta. En la Tabla 1 se resumen los resultados obtenidos de la simulación.

**Tabla 1**

*Resultados de la simulación*

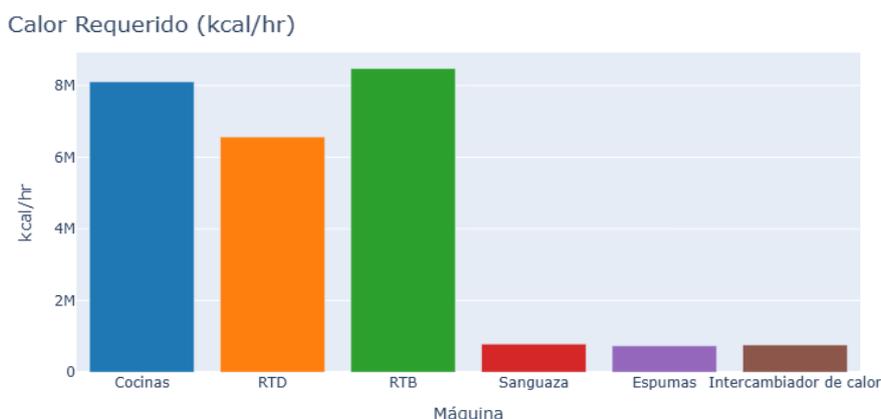
Máquina	Cantidad	Calor requerido	Consumo de vapor	BHP producidos	Exergía
Cocinas	3.00	8,106,354.22	16,100.01	1,143.06	7211884.33
RTD	3.00	6,565,711.58	13,176.30	935.48	8629281.99
RTB	2.00	8,476,807.72	16,924.56	1,201.60	11557635.64
Sanguaza	1.00	783,150.00	1,540.07	109.34	0.0
Espumas	1.00	733,050.00	1,468.33	104.25	0.0
Intercambiador de calor	1.00	756,256.00	1,487.29	105.59	0.0
Total		25,421,329.52	50,696.55	3,599.33	27398801.96

Para este análisis, se consideró una pérdida del 10% de energía debido a la caída de presión del vapor durante el transporte en las tuberías, lo que eleva la necesidad de generación de vapor a (3,959.26 BHP).

El software también genera gráficos interactivos que permiten visualizar el consumo de energía de cada equipo, facilitando la interpretación de los resultados.

**Figura 9**

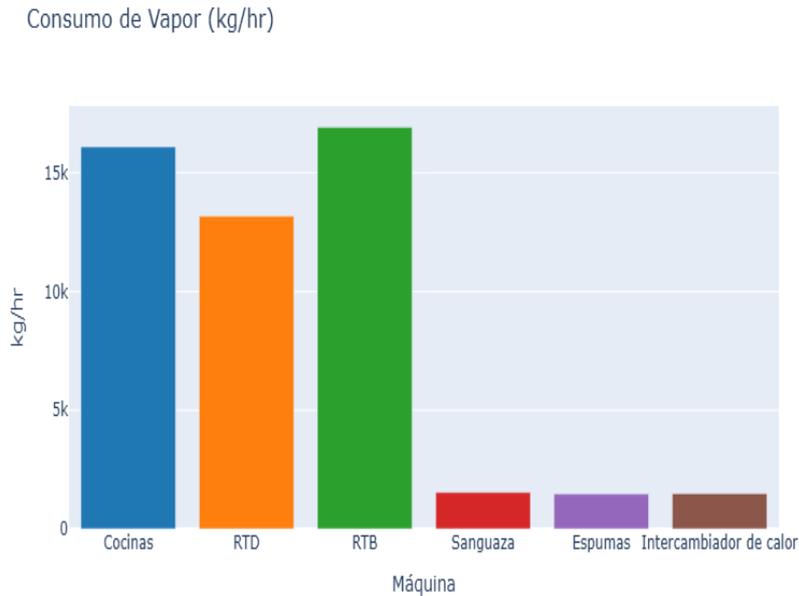
*Gráfico de barras generado por el software de simulación que muestra el calor requerido (en kcal/hr) por cada máquina de la planta de harina Pesquera Exalmar S.A.A.*



*Nota.* Se observa que las cocinas y los secadores rotatubos (RTB) son los equipos con mayor demanda de calor, alcanzando valores superiores a 7 millones de kcal/hr. En cambio, los equipos como los tanques de sanguaza, espumas y el intercambiador de calor presentan una demanda de calor mucho menor, con valores cercanos a las 750,000 kcal/hr.

**Figura 10**

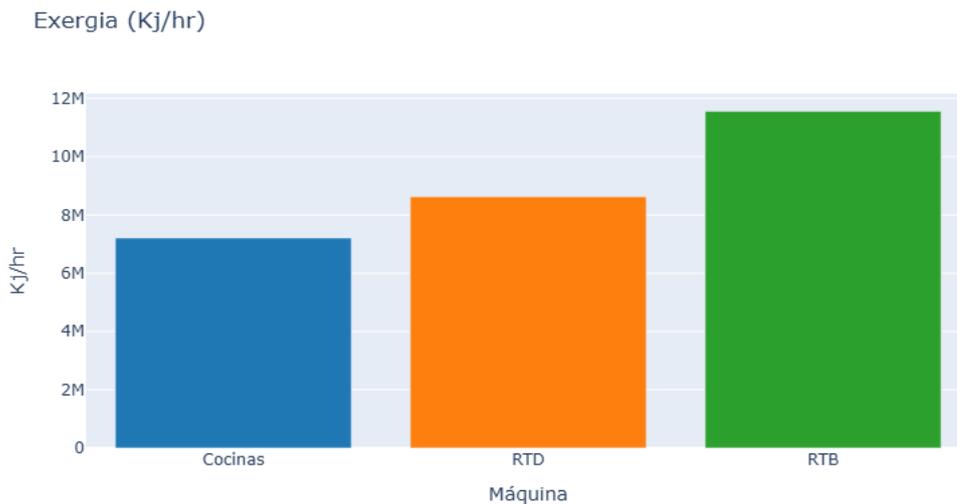
Gráfico de barras generado por el software de simulación, que muestra el consumo de vapor (en kg/hr) por cada máquina de la planta de harina Pesquera Exalmar S.A.A.



*Nota.* Se observa que las cocinas y los secadores rotatubos (RTB) tienen los consumos de vapor más elevados, con valores superiores a 15,000 kg/hr. En contraste, los tanques de sanguaza, espumas y el intercambiador de calor presentan un consumo de vapor significativamente más bajo, con valores cercanos a los 1,500 kg/hr.

**Figura 11**

Gráfico de barras generado por el software de simulación, que muestra la exergía (kJ/hr) de las máquinas principales de la planta de harina de Pesquera Exalmar S.A.A.



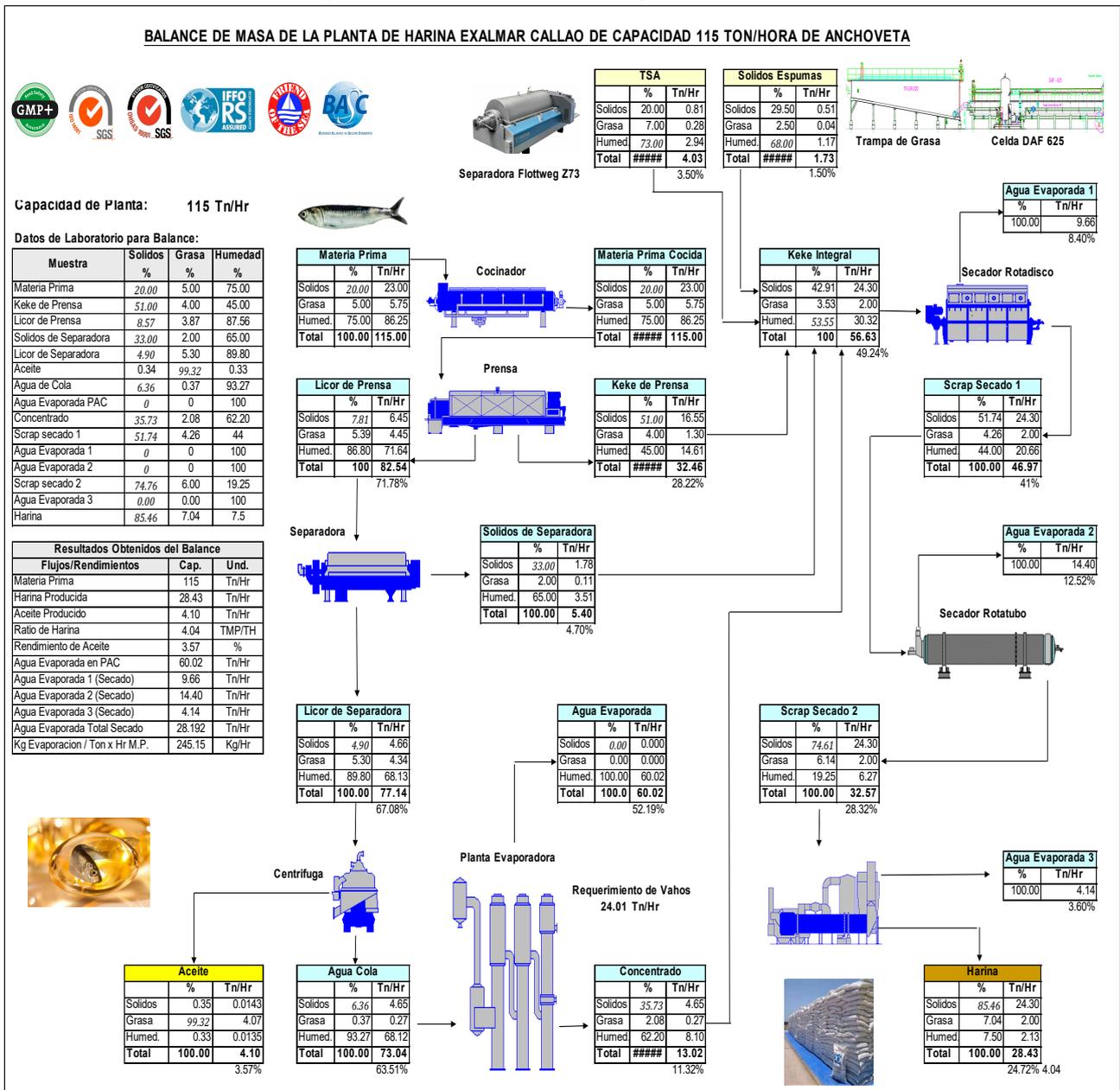
*Nota.* Se observa que los secadores rotatubos (RTB) tienen la mayor exergía, alcanzando aproximadamente 11.6 millones de kJ/hr, seguidos de los secadores rotadiscos (RTD) con 8.6 millones de kJ/hr y las Cocinas con 7.2 millones de kJ/hr. Este análisis subraya el elevado impacto energético de los RTB, que superan significativamente a los demás equipos en este indicador.

### Comparación con los datos operativos de la planta

Se realizaron comparaciones entre los resultados obtenidos en la simulación y los datos operativos reales de la planta de harina y aceite de pescado de Pesquera Exalmar S.A.A. (Planta Callao, con una

capacidad de procesamiento de 115 toneladas por hora (Figura 12) para validar el modelo matemático del software. Los valores registrados durante la operación real se presentan en la Tabla 2, donde se detallan los valores de calor requerido y el consumo de vapor de cada equipo en la planta.

**Figura 12**  
 Balance de masa de una planta de harina y aceite de pescado



**Tabla 2***Valores operativos de la planta de harina de Pesquera Exalmar S.A.A de la Figura 11*

<b>Máquina</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Calor Requerido</b>	<b>Consumo de Vapor</b>
Cocinas	3.00	7,976,309	15,841
RTD	3.00	7,463,742	15,125
RTB	2.00	8,302,372	16,746
Sanguaza	1.00	783,150.00	1,558.21
Espumas	1.00	733,050.00	1,457.53
Intercambiador de calor	1.00	756,256.00	1,504.79
<b>Total</b>		<b>26,014,879.00</b>	<b>52,232.53</b>

Para las cocinas, la simulación estimó un requerimiento de calor de 8,106,354.22 kcal/hr, mientras que los datos reales mostraron un valor de 7,976,309 kcal/hr, lo que representa una diferencia de solo el 1.63%. Asimismo, el consumo de vapor estimado fue de 16,100.01 kg/hr, frente a los 15,841 kg/hr en la operación real, resultando en una diferencia del 1.63%. Las pequeñas variaciones en los resultados se deben a las pérdidas de energía por convección inherentes al diseño de las cocinas. Estas pérdidas podrían mitigarse con un mejor aislamiento térmico, optimizando el uso del vapor y reduciendo el consumo energético.

Para los secadores rotadiscos (RTD), el modelo subestimó el calor requerido, con un valor de 6,565,711.58 kcal/hr frente a los 7,463,742 kcal/hr reales, lo que implica una diferencia significativa del 12.03%. En cuanto al consumo de vapor, se estimaron 13,176.30 kg/hr en la simulación, mientras que los datos reales indicaron un consumo de 15,125 kg/hr, lo que representa una diferencia del 12.88%. Las discrepancias se deben a las pérdidas por convección, inherentes al diseño de los secadores, que podrían reducirse con un mejor aislamiento térmico (ADD), optimizando

su eficiencia energética. En los secadores rotatubos (RTB), la simulación estimó un calor requerido de 8,476,807.72 kcal/hr, muy cercano a los 8,302,372 kcal/hr reales, con una diferencia mínima del 2.10%. El consumo de vapor en este caso presentó una diferencia aún menor, de solo un 1.06%. Estas diferencias evidencian la efectividad del modelo en los secadores rotatubos. Sin embargo, las pérdidas de calor por convección, inherentes al diseño del sistema, fueron elevadas. Estas pérdidas podrían reducirse mediante la mejora del aislamiento térmico en los secadores rotatubos (ADT), optimizando así su eficiencia energética.

Para los tanques de sanguaza y espumas, los resultados de la simulación coincidieron casi perfectamente con los valores reales, con un calor requerido de 783,150 kcal/hr para el tanque de sanguaza y 733,050 kcal/hr para el tanque de espumas. Las diferencias en el consumo de vapor fueron menores al 1%, lo que demuestra una alta precisión en el modelo para estos equipos.

Por último, en el intercambiador de calor, el calor requerido estimado por el modelo fue exactamente igual al valor real de 756,256 kcal/hr, mientras que el consumo de vapor mostró una diferencia

pequeña de 1.16%. Esto sugiere que el intercambiador de calor opera de manera eficiente en términos de la simulación, con una pequeña variación en el consumo de vapor, que puede atribuirse a factores operativos no modelados.

### Conclusiones

El modelo térmico desarrollado en esta investigación ha demostrado ser eficaz para predecir el comportamiento de la planta de harina y aceite de pescado de Pesquera Exalmar S.A.A. (Planta Callao, con una capacidad de procesamiento de 115 toneladas por hora), con una diferencia del 1.63% en el calor requerido y el consumo de vapor en las cocinas, lo que valida la metodología utilizada. Sin embargo, en los secadores rotadiscos, se observó una diferencia del 12.03% en el calor requerido, lo que indica la necesidad de ajustes en el modelo. A pesar de esta

discrepancia, el desempeño en general fue positivo, especialmente en los secadores rotatubos, donde la diferencia fue solo del 2.10%.

El análisis exergético permitió identificar áreas críticas en términos de consumo energético y pérdidas térmicas, ofreciendo oportunidades para la optimización operativa de la planta. Esto es clave para mejorar la eficiencia energética y reducir las pérdidas térmicas.

El software está en proceso de mejora, con la implementación de la simulación de carga variable y la inclusión del análisis termoeconómico. Estos avances permitirán optimizar tanto el rendimiento térmico como los costos operativos, brindando una solución más integral para la optimización de procesos industriales.

### Referencias

- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2013). *Termodinámica: Un enfoque de ingeniería mecánica* (7a ed.). McGraw-Hill.
- CoolProp. (n.d.). CoolProp: A comprehensive thermophysical property library. <http://www.coolprop.org/index.html>
- Estrada, M. (2024, March 24). La voraz demanda de la acuicultura pone en jaque a la anchoveta. OjoPublico. <https://ojo-publico.com/5022/la-voraz-demanda-la-acuicultura-pone-jaque-la-anchoveta>
- Kern, D. Q. (1986). *Procesos de transferencia de calor*. McGraw-Hill.
- Kotas, T. J. (1985). *The exergy method of thermal plant analysis*. Butterworths.
- Pesquera Exalmar S.A.A. (2022). Diagrama de flujo realizado por Ing. R. Quintanilla. Pesquera Exalmar S.A.A. <https://www.exalmar.com.pe/>
- Python Software Foundation. (2024). Tkinter: Interfaz gráfica de

- usuario. Documentación oficial de Python. <https://docs.python.org/es/3/library/tkinter.html>
- Rosen, M. A., Dincer, I., & Kanoglu, M. (2008). Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact. *Energy Policy*, 36 (1), 128-137.
- Tester, J. W., & Modell, M. (1997). *Thermodynamics and Its Applications* (3ra ed.). Prentice Hall.
- Wark, K., Jr., & Richards, D. E. (2001). *Termodinámica*. McGraw- Hill.