

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 ALAN¹

GIANCARLO VALVERDE PADILLA¹

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

¹ 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.

<https://>

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

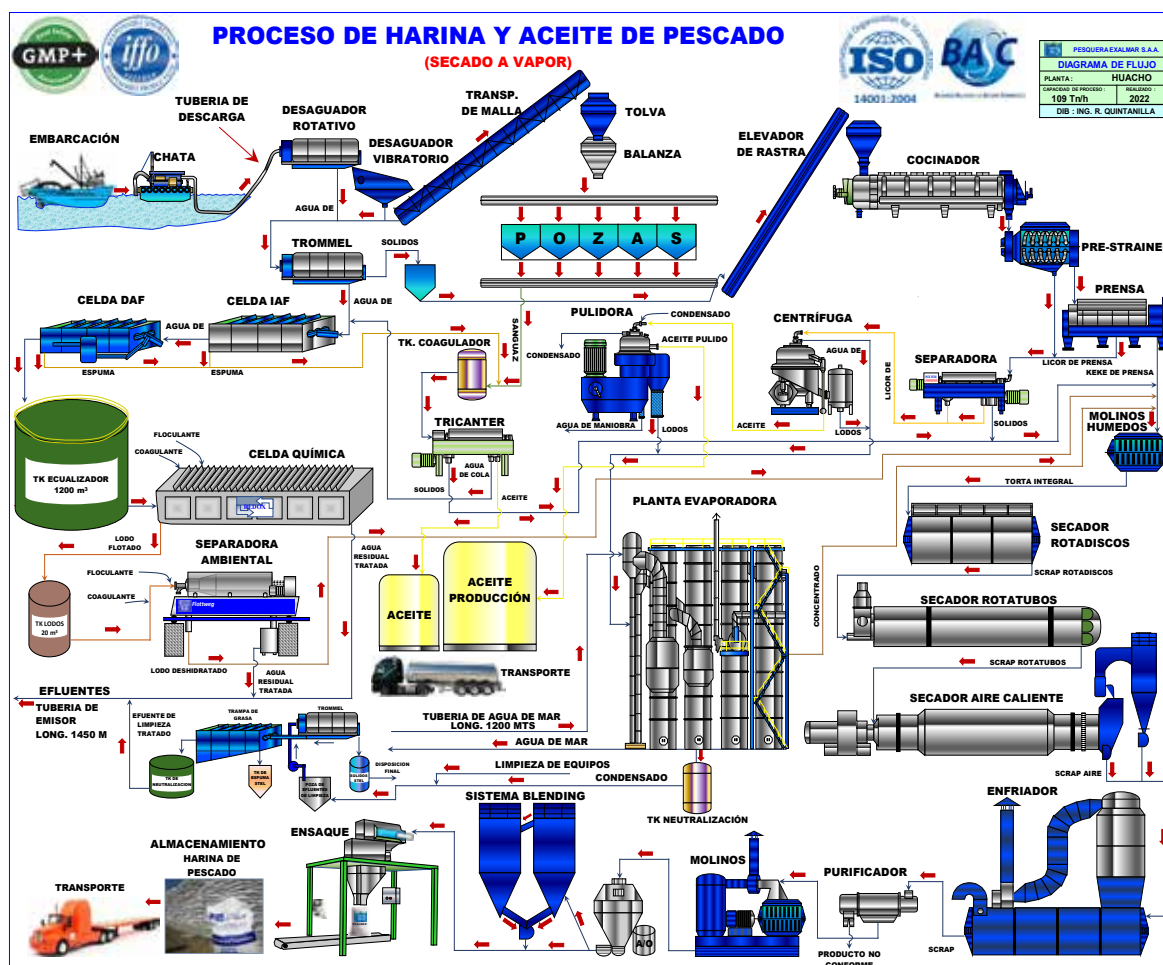
energía y cuantifica las irreversibilidades en los procesos, facilitando la identificación de pérdidas de trabajo útil y ofreciendo oportunidades para mejorar la eficiencia energética Kotas (1985), Rosen *et al.* (2008). La combinación de ambos enfoques es clave para identificar puntos críticos en el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

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.

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.

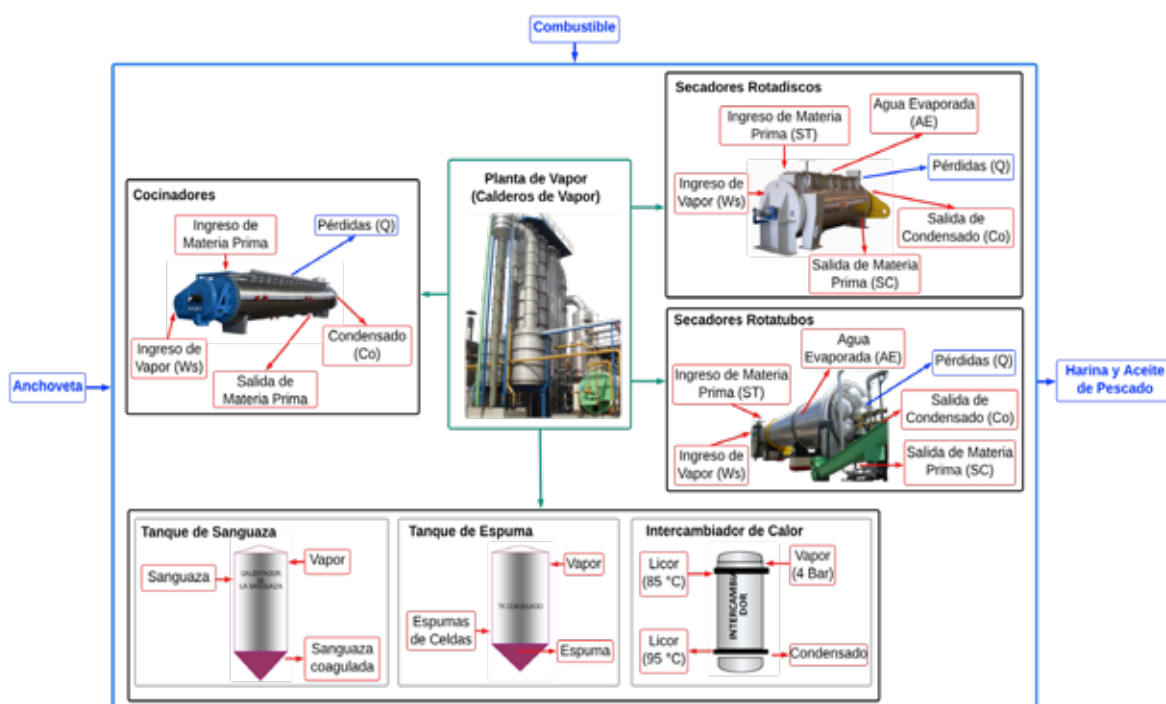
Análisis exergético

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

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):

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

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 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, λ es calor latente del vapor.

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

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

Diametro de la cocina1.4 m

Longitud de la cocina11.2 m

Masa de la cocina20000.0 Kg

Cocina 2

Diametro de la cocina1.1 m

Longitud de la cocina11.0 m

Masa de la cocina15000.0 Kg

Cocina 3

Diametro de la cocina1.3 m

Longitud de la cocina12.0 m

Masa de la cocina25000.0 Kg

Calor para cocción de la cocina

Análisis de composición

Porcentaje de Agua76.25 %

Porcentaje de Grasa4.08 %

Porcentaje de Solidos19.67 %

Calor Requerido para Calentamiento

Temperatura Inicial18.0 °C

Temperatura Final100.0 °C

Número de ciclos de calentamiento100.0

Cálculo de exergia

Temperatura del alimento de ingreso165.0 °C

Temperatura del vapor salida120.0 °C

Temperatura del alimento de salida100.0 °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

Diametro2.0 m

Longitud9.0 m

Masa30000.0 Kg

Sec. Rotadisk 2

Diametro2.0 m

Longitud9.0 m

Masa30000.0 Kg

Sec. Rotadisk 3

Diametro3.0 m

Longitud10.0 m

Masa50000.0 Kg

Variables de maquina

% Solidos en materia prima húmeda40.1 %

% Grasas en materia prima húmeda3.9 %

% Solidos en materia prima seca50.36 %

% Grasas en materia prima seca4.64 %

Presion trabajo secador6.0 Bar

Presion trabajo equipos4.0 Bar

Calor para el 1er secado

T alimentacion65.0 °C

T final del scrap 2do secado85.0 °C

T salida de los vahos98.0 °C

Masa de solidos secos24794.0 Kg/hr

Masa de liquido de ingreso31556.0 Kg/hr

Masa de liquido de salida20286.0 Kg/hr

Cálculo de exergia

T ingreso de vapor165.0 °C

T ingreso del alimento65.0 °C

T salida de vapor120.0 °C

T salida del alimento85.0 °C

T salida (VAHOS)98.0 °C

Masa de alimento de ingreso56350.0 Kg

Masa de SCRAP45080.0 Kg

Masa de VAHOS11270.0 Kg

Q calentamiento de secador

Temperatura inicial18.0 °C

Temperatura final100.0 °C

Horas trabajadas por año1500.0 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

COCINAS

SECADORES ROTADISCOS RTD

SECADORES ROTATUBOS RTB

CALOR EN SANGUAZA ESPUMAS E INTERCAMBIADOR DE CALOR

VARIABLES GENERALES Y DE PLANTA

Valores predeterminados

Guardar

Procesar

Sec. Rotatubo 1

Diametro

3.1

m

Longitud

20.0

m

Masa

80000.0

Kg

Sec. Rotatubo 2

Diametro

3.5

m

Longitud

22.0

m

Masa

100000.0

Kg

Variables de maquina

% Solidos en materia prima húmeda

50.7

%

% Grasas en materia prima húmeda

4.3

%

% Solidos en materia prima seca

73.5

%

% Grasas en materia prima seca

6.5

%

Presion trabajo secador

5.5

Bar

Presion trabajo equipos

4.0

Bar

Calor para el 2do secado

T alimentacion

75.0

°C

T final del scrap 2do secado

88.0

°C

T salida de los vahos

100.0

°C

Masa de solidos secos

24794.0

Kg/hr

Masa de liquido de ingreso

20286.0

Kg/hr

Masa de liquido de salida

6198.5

Kg/hr

Cálculo de exergia

T ingreso de vapor

165.0

°C

T ingreso del alimento

75.0

°C

T salida de vapor

120.0

°C

T salida del alimento

88.0

°C

T salida (VAHOS)

100.0

°C

Masa de alimento de ingreso

45080.0

Kg

Masa de SCRAP

30992.5

Kg

Masa de VAHOS

14087.5

Kg

Calor de calentamiento de secador

Temperatura inicial

18.0

°C

Temperatura final

100.0

°C

Horas trabajadas por año

1500.0

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

COCINAS

SECADORES ROTADISCOS RTD

SECADORES ROTATUBOS RTB

CALOR EN SANGUAZA ESPUMAS E INTERCAMBIADOR DE CALOR

VARIABLES GENERALES Y DE PLANTA

Valores predeterminados

Guardar

Procesar

Calor en SANGUAZA

Temperatura de ingreso de la sanguaza

20.0

°C

Temperatura de salida de licor

95.0

°C

Flujo masico

10.0

Tn/hr

Presion

4.0

Bar

% Solidos

5.0

%

% Grasa

3.0

%

% Agua

92.0

%

Calor de calentamiento del tanque

23300.0

kcal/hr

Calor de calentamiento del tanque(perdidas)

46600.0

kcal/hr

Demanda de Vapor para calentar las espumas

Temperatura de ingreso de la sanguaza

20.0

°C

Temperatura de salida de licor

95.0

°C

Flujo masico

10.0

Tn/hr

Presion

4.0

Bar

% Solidos

6.0

%

% Grasa

15.0

%

% Agua

79.0

%

Calor de calentamiento del tanque

23300.0

kcal/hr

Calor de calentamiento del tanque(perdidas)

46600.0

kcal/hr

Intercambiador de Calor

Temperatura de ingreso de la sanguaza

85.0

°C

Temperatura de salida de licor

95.0

°C

Flujo masico

76.0

Tn/hr

Presion

4.0

Bar

% Solidos

8.0

%

% Grasa

8.5

%

% Agua

83.5

%

Calor de calentamiento del tanque

23300.0

kcal/hr

Calor de calentamiento del tanque(perdidas)

46600.0

kcal/hr

| ISSN (IMPRESO): 1812-6049 | ISSN (EN LÍNEA): 2523-1820 |

427

| CAMPUS | V. XXIX | N. 38 | JULIO-DICIEMBRE | 2024 |

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

Valores predeterminados

Guardar

Procesar

COCINAS

SECADORES ROTADISCOS RTD

SECADORES ROTATUBOS RTB

CALOR EN SANGUAZA ESPUMAS E INTERCAMBIADOR DE CALOR

VARIABLES GENERALES Y DE PLANTA

Variables generales

Cp de solido0.32

Cp de aceite0.5

Cp de agua1.0

Presion trabajo4.0Bar

Cp de fierro0.115

Temperatura del ambiente18.0°C

Temperatura de la superficie exterior a la cocina40.0°C

Temperatura del ambiente (exergia)20.0°C

Masa de pescado115000.0Kg

BHP15.65kg de vapor/hr

kcal/Kg4.1868

Gl de Petróleo R-5004.2Gl/Ton Harina

Costo del petroleo Residual R-50011.39\$/

Variables de planta

Coc 140.0Tn/hr

Coc 225.0Tn/hr

Coc 350.0Tn/hr

Capacidad115.0

Producción de harina de la planta28.43

BHP Equivalente0.28Gl/hr

Tipo de cambio USD3.75

Relacion SCRAP0.0

%humedad ingreso20.0%

%humedad salida7.5%

Rendimiento energético del secador0.5%

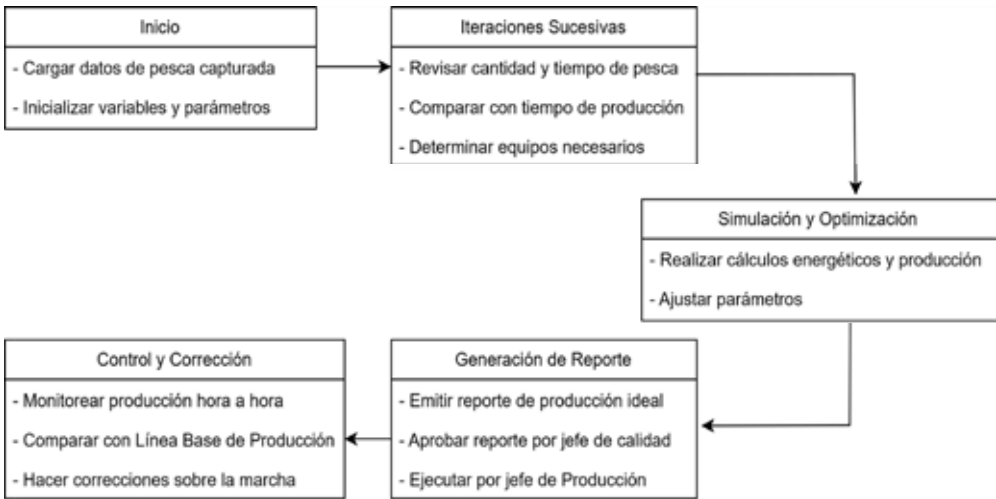
Poder calorifico del petroleo R-50037850.0Kcal/GL

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.

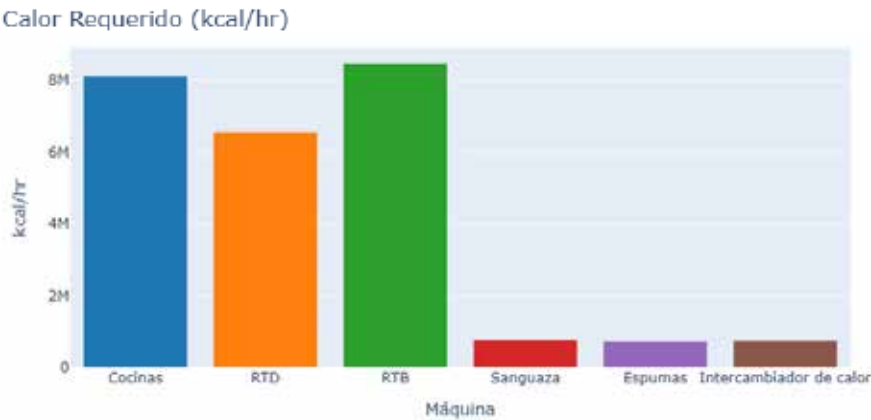
Tabla 1
Resultados de la simulación

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.

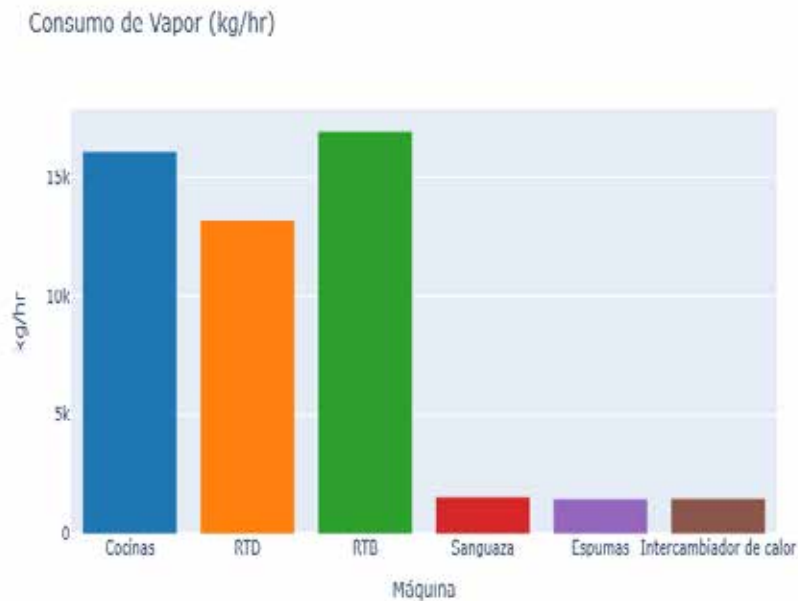
Figura 9
Gráfico de barras generado por el software de simulación que muestra el calor requerido (en kcal/hr) por cada máquina de la planta de harina Pesquera Exalmar S.A.A.



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

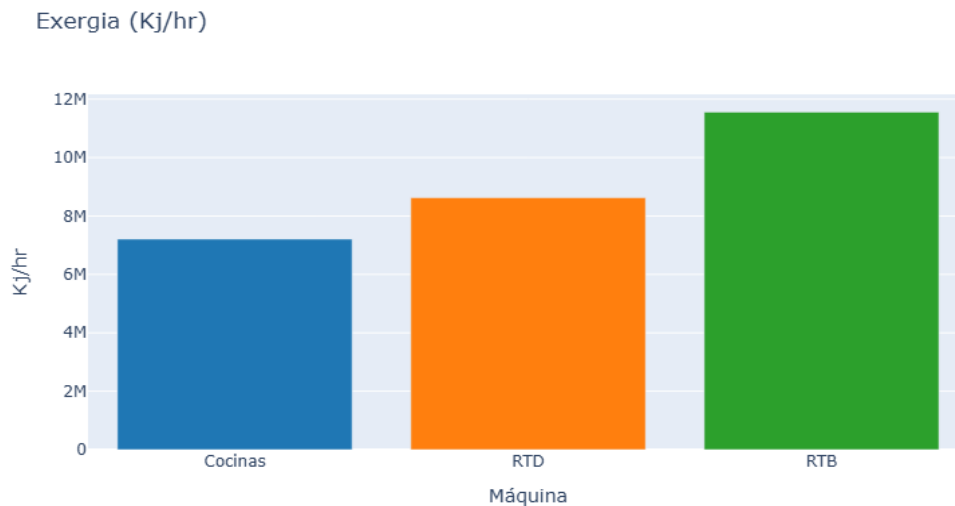
Gráfico de barras generado por el software de simulación, que muestra el consumo de vapor (en kg/hr) por cada máquina de la planta de harina Pesquera Exalmar S.A.A.



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

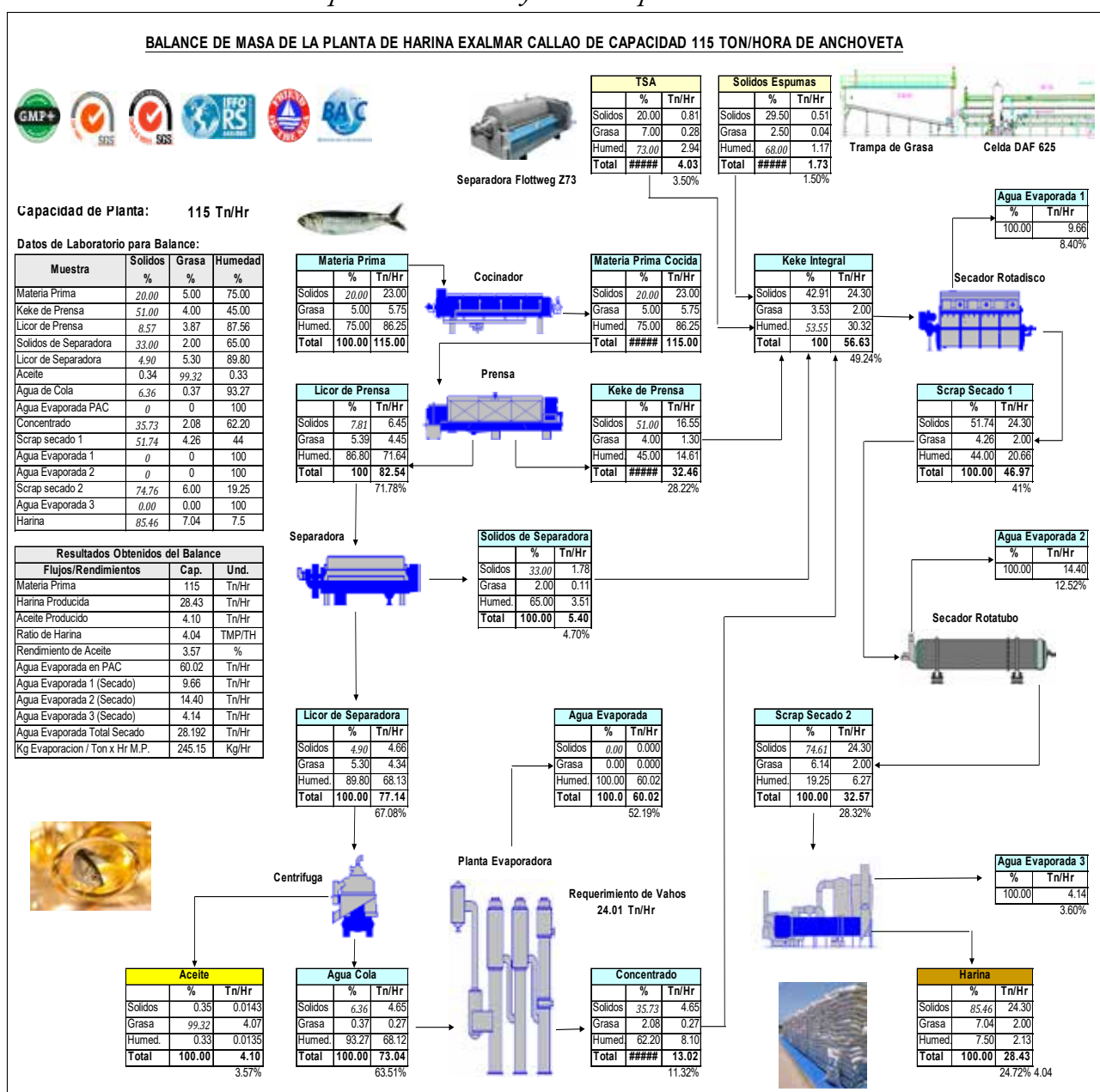


Tabla 2*Valores operativos de la planta de harina de Pesquera Exalmar S.A.A de la Figura 11*

Máquina	Cantidad	Calor Requerido	Consumo de Vapor
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
Total		26,014,879.00	52,232.53

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.