

Evaluación del uso de la energía térmica en una central eléctrica de motores de combustión interna

Assessing the use of thermal energy in an internal combustion engines power plant

Lázaro Javier Peralta-López¹ <https://orcid.org/0000-0003-4083-3042>

Juan Pedro Hernández-Touset^{2*} <https://orcid.org/0000-0002-0032-8685>

Agustín García-Rodríguez² <https://orcid.org/0000-0002-8897-0671>

Luis Gómez-Rodríguez² <https://orcid.org/0000-0003-4264-1693>

¹Central Eléctrica Santa Clara Industrial. Fuel Oil, Villa Clara. Cuba

²Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Villa Clara. Cuba

*Autor para la correspondencia juanpedro@uclv.edu.cu

RESUMEN

La planta termoeléctrica, objeto de estudio, actualmente carece de un sistema de evaluación del uso de la energía térmica durante diferentes modos de operación o ante cambios tecnológicos, lo que dificulta el control sistemático del desempeño energético y el aprovechamiento del potencial de recuperación de la energía térmica. El objetivo de la investigación es determinar la eficiencia de la recuperación de la energía térmica mediante el análisis energético y la integración de calor. En la revisión energética se aplican los métodos de análisis del uso de la energía basados en la norma ISO 50001 y de integración de calor con el uso del software Aspen Energy Analyzer. La generación de vapor satisface la demanda del proceso, en el cual solo se requiere reponer el 16,39 % de agua con un ahorro potencial de 1016,21 CUP por concepto de eliminación de las pérdidas de calor asociadas a fugas y aislamiento. Como resultado del análisis del uso de la energía, se definen cinco indicadores de desempeño energético, actualmente no reportados por esta entidad, que contribuyen a la definición de una línea base energética para la medición sistemática de la eficiencia térmica. Mediante el intercambio agua y

gases se logra recuperar el 100 % de la energía térmica en la caldera de recuperación, con un requerimiento mínimo de servicio de vapor que constituye el 28,57 % de la potencia térmica total actual con un valor de 0,7 MW.

Palabras clave: energía; generación distribuida; Integración de calor.

ABSTRACT

The thermoelectric plant, the subject of this study, currently lacks a system for assessing thermal energy use during different operating modes or in response to technological changes, hindering the systematic control of energy performance and the utilization of thermal energy recovery potential. The objective of this research is to determine the efficiency of thermal energy recovery through energy analysis and heat integration. The energy review applies energy use analysis methods based on the ISO 50001 standard and heat integration, using aspen energy analyzer software. Steam generation satisfies the process duties, requiring only 16,39% water replacement, with a potential savings of 1016,21CUP due to the elimination of heat losses associated with leaks and insulation. As a result of the energy use analysis, five energy performance indicators, not currently reported by this entity, are defined. These indicators contribute to establishing an energy baseline for the systematic measurement of thermal efficiency. Through the exchange of water and combustion gases, 100% of the thermal energy is recovered in the recovery boiler, with a minimum steam service requirement that constitutes 28,57% of the current total thermal power with a value of 0,7 MW

Keywords: energy; distributed generation; heat integration.

Recibido: 16/12/2025

Aceptado: 14/01/2026

Introducción

Entre las funciones que tiene el Ministerio de Energía y Minas en cuanto a la actividad de petróleo y gas están: (1) Promover la introducción de los resultados de las investigaciones, la transferencia de tecnologías y los avances tecnológicos en el sector del petróleo y gas, controlando su inclusión en los planes a corto, mediano y largo plazo; (2) Propiciar las relaciones de

colaboración con las universidades y los centros de investigaciones en el sector de petróleo y gas; (3) Controlar el programa de investigación desarrollo del Sector de Petróleo y Gas, así como la aplicación de sus resultados. ⁽¹⁾ El motor de combustión interna se ha convertido en una máquina relativamente perfecta gracias a la mejora y el desarrollo continuos. Este motor ha pasado por muchas etapas de desarrollo y se ha mejorado una tras otra. ⁽²⁾

La literatura predominante sobre generación distribuida (GD) muestra que las definiciones utilizadas para GD no son consistentes y, sin embargo, no existe una definición generalmente adoptada por las empresas de servicios públicos. El Departamento de Energía de los Estados Unidos (US-DOE) define la GD de la siguiente manera: “La generación distribuida es el uso integrado o autónomo de recursos de generación de energía (eléctrica y/o térmica) pequeños y modulares, ubicados cerca del punto de consumo de energía. Los sistemas distribuidos incluyen turbinas eólicas, microturbinas, pilas de combustible, motores/grupos electrógenos, sistemas termosolares y fotovoltaicos, turbinas de combustión, generadores de biomasa y técnicas de almacenamiento y control. Las tecnologías distribuidas pueden ser independientes de la red o estar conectadas a la red”.

A pesar de estos posibles beneficios teóricos de la generación distribuida de energía, aún existen complejidades y limitaciones (técnicas, económicas y regulatorias) que impiden su mayor penetración en la matriz energética, y que también restringen el avance hacia un nuevo modelo de redes eléctricas. Sin embargo, estos problemas y complejidades deben abordarse y resolverse para allanar el camino hacia un futuro energético sostenible basado en una gran proporción de GD. ⁽³⁾ El uso de combustibles fósiles en la generación de energía y el transporte ha ido en aumento como resultado de la creciente demanda de electricidad. Esto se ha combinado para aumentar las emisiones y el agotamiento de las reservas energéticas. ⁽⁴⁾ El campo de la mejora de la eficiencia térmica abarca diversas áreas de investigación, como intercambiadores de calor avanzados, recuperación de calor residual, sistemas de cogeneración y estrategias de gestión avanzadas. ⁽⁵⁾ La integración de calor aumenta la eficiencia general de los procesos químicos y las plantas industriales y contribuye significativamente a su funcionamiento económico. Se considera el principal avance en el campo de la integración de procesos, en un

intento por aumentar la eficiencia de las plantas y los procesos industriales. De la literatura se deduce que aumentar la eficiencia energética general de las plantas químicas e industriales mediante la recuperación de calor entre sus componentes y la reutilización del calor residual es una práctica común y se está implementando con éxito. ⁽⁶⁾

La energía primaria que consume la planta es el fuel oil y el agua en este proceso constituye un recurso valioso dada la calidad que debe tener y los gastos de recursos para su tratamiento.

La estación generadora de electricidad requiere un control sistemático del desempeño energético y del aprovechamiento del potencial de recuperación de la energía térmica para el mantenimiento de valores apropiados de los indicadores eficiencia energética. El objetivo de la investigación es determinar la eficiencia de la recuperación de la energía térmica mediante el análisis energético y la integración de calor.

Materiales y métodos

La evaluación del desempeño energético de la central eléctrica se sustenta en la implementación de las actividades de la revisión energética según la norma cubana ISO 50001(2019) para los sistemas de gestión de la energía, con el objetivo de determinar, analizar y comparar evaluativamente los indicadores de desempeño energético (IDEns). Se aplican las metodologías del balance termoenergético, ⁽⁷⁾ y el procedimiento del uso de la energía, ⁽⁸⁾ para la realización de las actividades de la revisión energética, con el objetivo de determinar, analizar y comparar evaluativamente los indicadores de desempeño energético (IDEns). Se aplica la integración de calor en el proceso de generación de energía eléctrica para el análisis y diseño de red de intercambiadores de calor (RIC) mediante la aplicación de la Metodología del Análisis del Pellizco ⁽⁹⁾ y el uso del software Aspen Energy Analyzer. ⁽¹⁰⁾

Análisis del uso de la energía

El sistema termoenergético de vapor de la Central Eléctrica Santa Clara Fuel Oil está conformado por 12 motores de combustión interna que utiliza combustible fuel oil para la generación de gases de escape, estos gases son utilizados para calentar el agua y generar vapor en el domo de las 3 calderas recuperadoras, vapor que es consumido en las 3 unidades de tratamiento de combustible (HTU), en los 2 tanques principales de almacenamiento y el

tanque de agua caliente. Estos equipos tienen una extracción de condensados puros, que este es depositado en un tanque de agua caliente antes de ser recirculado al domo de la caldera, como se observa en la figura 1.

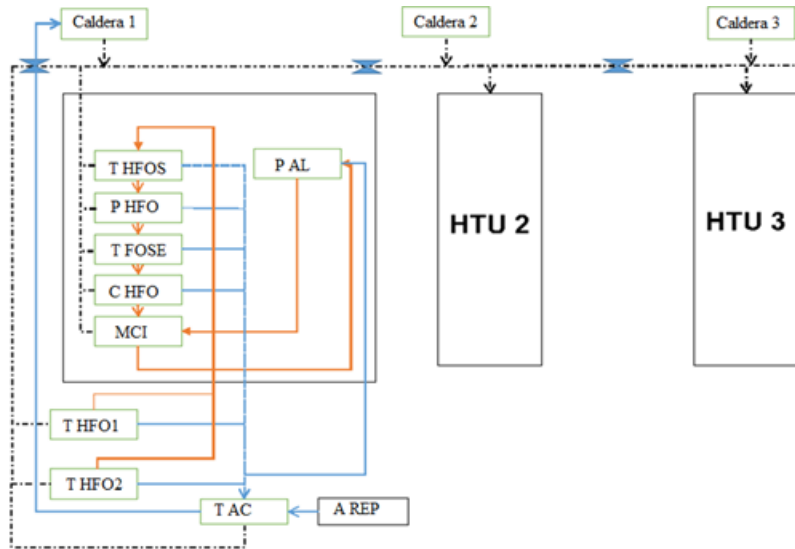


Fig.1- Esquema energético de la central eléctrica

Nomenclatura: T HFOS=tanque de fuel oil sucio, P HFO = purificadora de fuel oil, T FOSE = tanque de fuel oil de servicio, C HFO = calentador de fuel oil, P AL = purificadora de aceite lubricante, MCI = motor de combustión interna, T HFO1= tanque de almacenamiento 1, T HFO2 = tanque de almacenamiento 2, T AC = tanque de agua caliente, A REP=agua de reposición.

En la figura 2 se muestra el comportamiento de la generación neta y bruta, de la central con respecto al consumo de combustible para el primer mes de trabajo del año 2025.

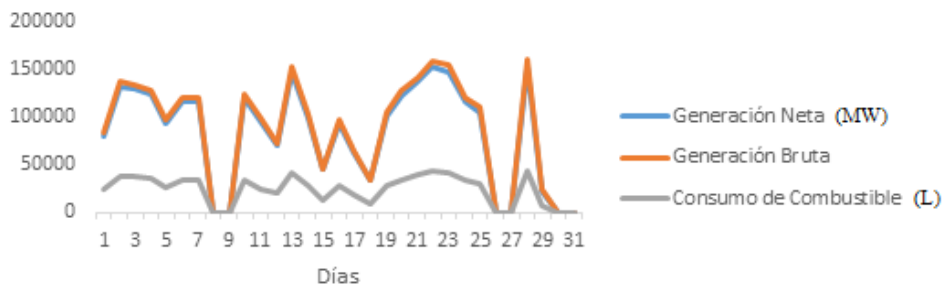


Fig. 2- Comportamiento del consumo de combustible

Se observa que no existe estabilidad en la generación y el consumo de combustible, aunque no afecta los resultados, ya que se toman los parámetros

en condiciones de operación estable en tiempo real, reportados por el sistema de control del proceso.

Resultados y discusión

Determinación del desempeño energético actual

Se aplica el balance de energía al proceso de generación de energía eléctrica para proceso vinculado a una caldera, de las tres que posee, para determinar el consumo de vapor en los tanques de almacenamiento de fuel oil 1 y 2 (DTHFO1) y (DTHFO2), tanque de agua caliente (DTAC), tanque de fuel oil sucio (DTHFOS) y tanque de fuel oil de servicio (DTFOSE) y equipos tecnológicos: purificadora de fuel oil (DPHFO), purificadora de aceite lubricante (DPAL) y calentador de fuel oil (DCHFO).

En la tabla 1 se muestran los consumos de vapor, donde la demanda total de vapor es de 0,93 t/h muy cercana a la capacidad de generación de la caldera (1 t/h). Se aplica el balance de condensados para determinar la disponibilidad de condensados puros (D_{puros}), la disponibilidad de condensados contaminados (D_{cont}) así como el consumo de agua de reposición ($D_{\text{agua rep}}$) en el proceso. En la tabla 2 se muestran los resultados del balance de condensados y las ecuaciones empleadas para su cálculo.

Tabla 1- Resultados de los balances de vapor

Equipos	Ecuación	Demanda (kg/h)
Tanque de fuel oil sucio	$D_{\text{THFOS}} = \frac{m_{\text{THFOS}} \cdot C_p \cdot (T_s - T_e)}{\lambda_v}$ (1)	4,13
Purificadora de fuel oil	$D_{\text{PHFO}} = \frac{m_{\text{PHFO}} \cdot C_p \cdot (T_s - T_e)}{\lambda_v}$ (2)	1,41
Tanque de fuel oil de servicio	$D_{\text{TFOSE}} = \frac{m_{\text{TFOSE}} \cdot C_p \cdot (T_s - T_e)}{\lambda_v}$ (3)	1,45
Calentador de fuel oil	$D_{\text{CHFO}} = \frac{m_{\text{CHFO}} \cdot C_p \cdot (T_s - T_e)}{\lambda_v}$ (4)	6,20
Purificadora de aceite lubricante	$D_{\text{PAL}} = \frac{m_{\text{PAL}} \cdot C_p \cdot (T_s - T_e)}{\lambda_v}$ (5)	1,79
Tanque de almacenamiento de fuel oil 1	$D_{\text{THFO1}} = \frac{m_{\text{THFO1}} \cdot C_p \cdot (T_s - T_e)}{\lambda_v}$ (6)	310,08
Tanque de almacenamiento de fuel oil 2	$D_{\text{THFO2}} = \frac{m_{\text{THFO2}} \cdot C_p \cdot (T_s - T_e)}{\lambda_v}$ (7)	413,44
Tanque de agua caliente	$D_{\text{TAC}} = \frac{m_{\text{TAC}} \cdot C_p \cdot (T_s - T_e)}{\lambda_v}$ (8)	38,01
Otros (calentador de tubería)	$D_{\text{OTRO}} = 0,04 \cdot D_{\text{tecn}}$ (9)	31,06
Consumo total	$D_{\text{Tproc}} = D_{\text{tecn}} \cdot 1,05$ (10)	928,72

Nomenclatura: D= demanda de vapor (kg/h), m= flujo de la corriente, Cp= calor específico

(kJ/kg ° C), T= temperaturas (° C), λ_v = calor latente de vapor. ⁽¹¹⁾

Tabla 2 - Resultados obtenidos en los balances de condensados

Condensados	Ecuaciones	Demanda (kg/h)
Disponibilidad de condensados puros	$D_{puros} = D_{tecn} - D_{cont}$ (11)	776,52
Disponibilidad de condensados contaminados	$D_{cont} = D_{otros}$ (12)	31,06
Consumo de agua de reposición	$D_{agua\ rep} = D_{proc} - D_{puros}$ (13)	152,20

Se realizó el balance de calor para determinar la cantidad de calor o potencia térmica necesaria en el proceso de generación de energía eléctrica (Q_{Tproc}), el destinado a otras funciones (Q_{otros}), a los condensados (Q_{cond}), las pérdidas generales (Q_{perd}) y la demanda de los equipos tecnológicos (Q_{proc}). En la tabla 3 se muestran los resultados del balance de calor y las ecuaciones empleadas para su cálculo.

Tabla 3- Resultados del balance de calor

Energía	Ecuaciones	Resultados (kJ/h)
Q_{proc}	$Q_{proc} = D_{proc} \cdot i_v$ (14)	2575373,21
Q_{cond}	$Q_{cond} = D_{tecn} \cdot i_{cond}$ (15)	292779,52
Q_{perd}	$Q_{perd} = Q_{Tproc} - (Q_{proc} + Q_{cond})$ (16)	705886,66

La comparación de los valores de distribución de energía obtenidos en la fábrica y los propuestos en la literatura permite evaluar medidas para la conservación de la energía en el proceso. En la tabla 4 se muestran los valores de distribución de la energía térmica en el sistema y los valores reportados. ⁽⁷⁾

Tabla 4- Distribución de la energía térmica en el sistema

Distribución de la energía	Ecuaciones	Valores calculados	Valores reportados
Proceso, %	$\%_{proc} = \frac{Q_{proc}}{Q_{Tproc}} \cdot 100$ (17)	61,22	69 - 80%
Condensados, %	$\%_{cond} = \frac{Q_{cond}}{Q_{Tproc}} \cdot 100$ (18)	11,37	10 -15%
Pérdidas generales y otros, %	$\%_{pérdidas} = \left(\frac{Q_{perd}}{Q_{Tproc}} + \frac{Q_{otros}}{Q_{Tproc}} \right) \cdot 100$ (19)	27,41	2 - 7%

La energía se distribuye de forma similar a la reportada por la literatura y experiencia industrial. El consumo específico de vapor está dado por la ecuación (20) y la eficiencia de la generación por la ecuación (21). La eficiencia térmica general es la diferencia del 100 % y el porcentaje de pérdidas generales.

$$\text{Consumo específico de vapor} = \frac{D_{T\text{proc}}}{\left(\frac{Q_{T\text{proc}}}{VCN_{\text{gases}}}\right)} \quad (20)$$

$$\text{Eficiencia de la generación} = \frac{D_{T\text{proc}}}{D_{\text{nom}}} \cdot 100 \quad (21)$$

En la tabla 5 se muestran los indicadores de eficiencia de la central termoeléctrica.

Tabla 5- Indicadores de desempeño energético

Indicadores	Calculado	Reportado
Consumo de vapor, kg vapor/kg gases de combustión	5,10	
Porcentaje de agua de reposición, %	16,39	<15 %
Porcentaje de pérdidas de calor, %	27,41	< 5 %
Eficiencia térmica, %	72,59	90-95 %
Eficiencia de la generación, %	92,87	90- 100 %

Como se observa en la tabla 5, las pérdidas de calor son superiores a los valores reportados, ⁽⁷⁾ lo cual influye en la baja eficiencia térmica general, aunque se recuperan todos los condensados de los equipos. Se definen 5 indicadores de desempeño energético que actualmente no se reportan en las entidades de la Empresa. Estos indicadores se pueden tener en cuenta en el establecimiento de una línea base energética para la evaluación sistemática de la energía por los productores.

Las pérdidas de recursos materiales y financieros en la central eléctrica están dadas por el agua de reposición y los gases de combustión asociado a las pérdidas de calor.

Análisis de la red de recuperación de calor

La determinación de los requerimientos mínimos de servicios de calentamiento y de enfriamiento, la máxima recuperación de energía (MER), la ΔT_{min} y el área mínima, se realiza mediante la aplicación de métodos gráficos y numéricos combinados (Smith, 2016). En la figura 3 se muestra el diagrama

simplificado del proceso de generación de energía eléctrica y en la tabla 6 los datos de las corrientes. Los flujos de las corrientes se determinaron mediante los balances de materiales y energía, realizados en el presente estudio.

Las corrientes consideradas en el análisis son: fuel oil (C1 hasta C6), aceite (C7), agua reposición (C8), condensado (C9), agua caliente (C10), gases de la combustión (H1)

La corriente de servicio de calentamiento es el vapor (V).

Los equipos son: tanque de fuel oil sucio (1), purificadora de fuel oil (2), tanque de fuel oil de servicio (3), calentador de fuel oil (4), purificadora de aceite lubricante (5), tanque de almacenamiento de fuel oil 1 (6), tanque de almacenamiento de fuel oil 2 (7), tanque de agua caliente (8), caldera de recuperación (9).

Las variables son: m = flujo másico, c_p = calor específico, CP = flujo de capacidad calorífica, T_i = temperatura inicial, T_f = temperatura final, variación de entalpía (ΔH), h = coeficiente pelicular de transferencia de calor.

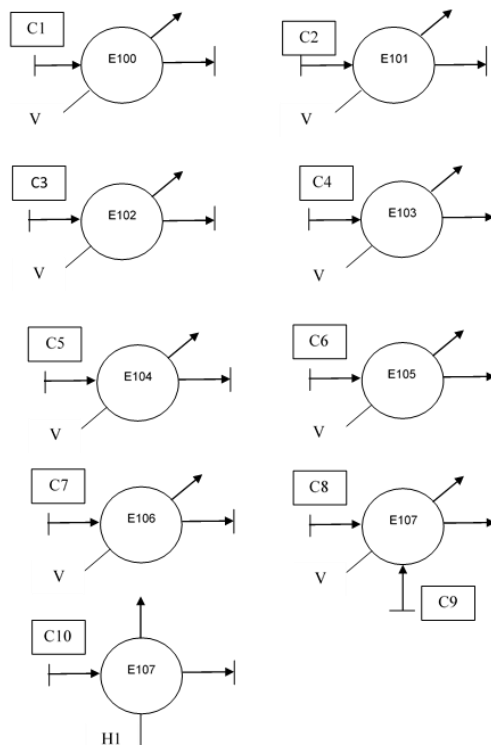


Fig. 3- Diagrama simplificado del proceso de generación de energía eléctrica

Tabla 6- Datos térmicos de las corrientes

Corriente		Flujo	cp	CP = m·cp	Ti	Tf	ΔH	Coeficiente pelicular, h (kJ/hm ² °C)
Nombre	Tipo	(kg/h)	(kJ/kg°C)	(kW/°C)	(°C)	(°C)	(kJ/h)	
H1	Caliente	603	2,53	1525,59	350	290	91535,4	1800
C1	Fría	2290	4,19	9595,1	80	165	719632,5	9198,4

Se adopta la convención: H o h (caliente) y C o c (fría). Se asigna una ΔT_{min} de 185 °C, la cual es la menor ΔT de las corrientes implicadas. En la figura 4 se muestra el diagrama de energía. Se observa que ΔT_{min} se encuentra en el umbral de Δt_{min} . Superior a $\Delta T_{min} = 196$ °C se incrementan los servicios de calentamiento y enfriamiento.

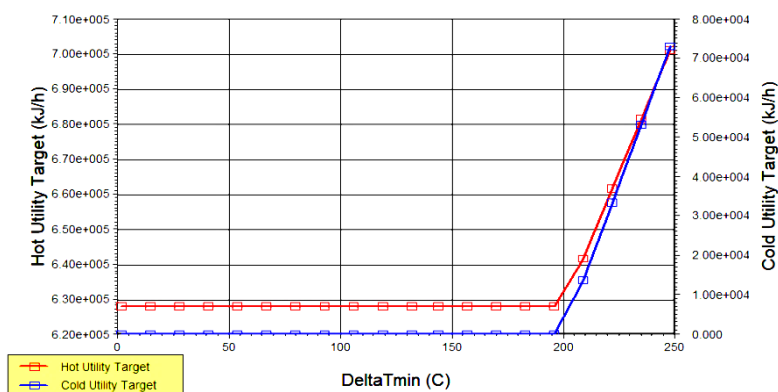


Fig. 4- Diagrama de energía

En la figura 5(a) se muestra el diagrama de las curvas compuestas que definen el objetivo energético de calentamiento (Qh), ya que se satisface el servicio de enfriamiento.

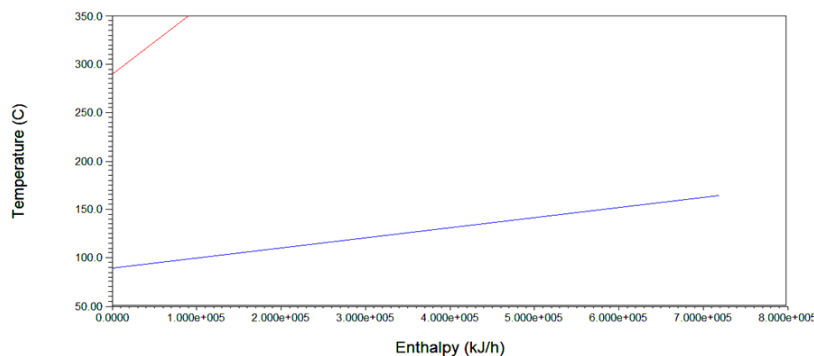


Fig. 5- (a) Diagrama de las curvas compuestas de RIC actual

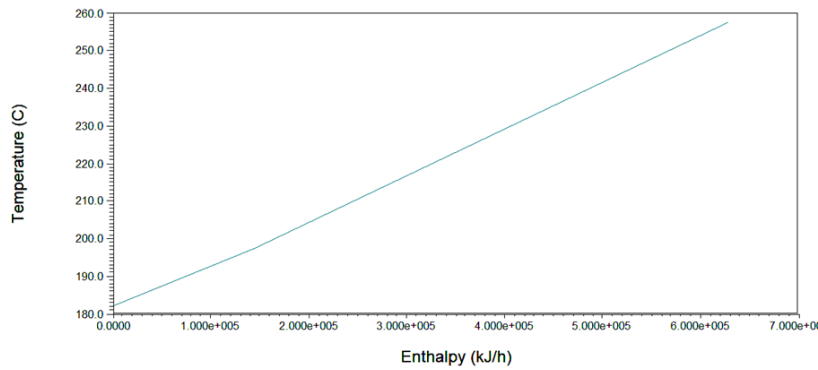


Fig. 5- (b) Curva compuesta combinada (Aspentech, 2017)

En la figura 5 (b) se muestra la curva compuesta combinada donde se muestra el punto de Pellizco con un valor 182 °C.

Los objetivos mínimos de desempeño energético son: mínimo requerimiento de calentamiento (Q_{hmin}) = 628 060 kJ/h, mínimo requerimiento de enfriamiento (Q_{cmin}) = 0 (sufiente), máxima recuperación de calor (MER) = 91 535,4 kJ/h, punto de Pellizco (T_p): 182 °C.

La máxima recuperación de energía gráficamente, es la región entre Q_{cmin} y Q_{hmin} y se determina mediante la diferencia de la energía disponible acumulativa de la corriente fría (719 600 kJ/h) y el requerimiento mínimo de calentamiento (628 060 kJ/h), esto define un potencial energético recuperable de 91 540 kJ/h, mediante intercambio de calor entre corrientes del proceso, donde se logra recuperar el 100 % del calor mediante intercambio entre los gases de combustión y el agua alimentada a la caldera.

Para satisfacer estas dos reglas, el proceso se debe dividir en el pellizco. Esto se hace de forma clara al representar los datos de corrientes en un diagrama de rejillas. La figura 6 muestra los datos de las corrientes en una rejilla. Sobre el pellizco se puede usar vapor (hasta Q_{hmin}) con una demanda de 628 060 kW y por debajo del pellizco agua fría o refrigerada (hasta Q_{cmin}), no es necesaria en este caso porque se satisface.



Fig. 6- Diagrama de rejilla del diseño de la RIC

El emparejamiento de las corrientes comienza con ΔT_{min} en el Pellizco y trasladándose desde el pinch: $C_{Ph} \leq C_{Pc}$ (sobre el pinch) y $C_{Ph} \geq C_{Pc}$ (bajo el Pellizco) basado en el algoritmo para la división de corrientes (Smith, 2016).

El número de corrientes calientes (N_H) es menor que el número de corrientes frías (N_C) y se comprueba que $C_{Ph} \leq C_{Pc}$ (arriba del pellizco), es decir, $1\ 525,59 < 9\ 595,1$, por tanto, es factible la combinación de las corrientes H1 y C1.

La energía acumulada disponible de la corriente caliente es 91 540 kJ/h. Para una $\Delta T_{min} = 185^\circ\text{C}$ la máxima energía recuperable (MER) entre las corrientes calientes y frías según las curvas compuestas determina un valor de 91 540 kJ/h, el cual tiene que ser satisfecho mediante intercambio entre corrientes del proceso. El único intercambio posible es calentar la corriente de agua caliente (C1) mediante los gases de la combustión (H1), lo que favorece la disminución del consumo de vapor para el calentamiento del condensado y del consumo de agua para el enfriamiento.

En la figura 7 (a) se muestra el resultado del diseño del intercambiador, con un área mínima de $0,2716\ \text{m}^2$ y en la figura 7 (b) la conectividad de las corrientes.

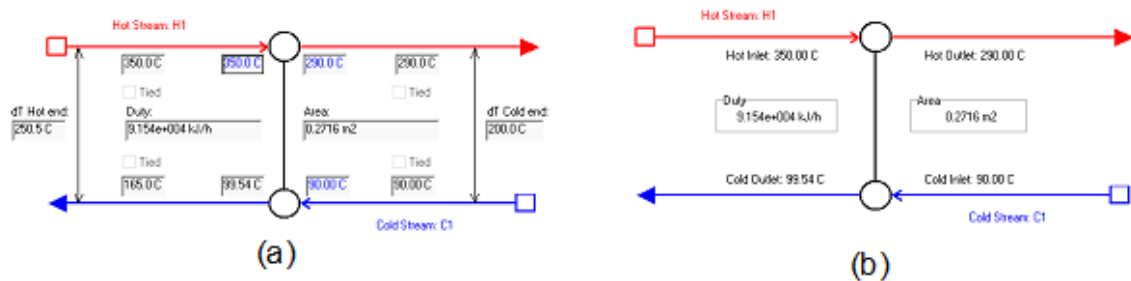


Fig. 7 - (a) Datos del intercambiador y (b) Conectividad de las corrientes

En próximo paso se determina en qué medida se satisfacen las demandas de vapor y agua de enfriamiento. El requerimiento mínimo de servicio de calentamiento es 628 060 kJ/h, por tanto, el flujo mínimo de vapor se calcula para un vapor a 0,9 MPa, con un calor latente de 2 773,03 kJ/kg⁽¹¹⁾

$$\text{Consumo mínimo de vapor} = Q_{H_{min}} / \lambda = 628\ 060 / 2\ 773,03 = 226,49\ \text{kg/h}$$

El consumo actual de vapor es 928,72 kg/h aproximadamente 4 veces el consumo mínimo. La potencia térmica total actual es 0,7 MW y el requerimiento mínimo de servicio de vapor es 0,2 MW, resultados que

dependen del sistema de extracción de datos para la aplicación del método de integración de calor.

No obstante, esta diferencia, la integración de calor ha permitido identificar las demandas mínima de servicio de calentamiento y enfriamiento y el potencial de recuperación de la energía térmica con un valor de 91540 kJ/h de calor igual a la MER, lo que significa que se recupera el 100 % de la energía, sin violaciones termodinámicas.

Evaluación económica

Como resultado del análisis energético y la integración de calor se realizan los siguientes análisis: (1) ahorro potencial de agua, asociado a pérdidas de calor, (2) consumo de gases de combustión asociado a la recuperación del calor.

El agua de reposición se determina mediante la ec. (22). El gasto de gas en t/año se determina mediante la ec. (23) con un precio del agua de 18 CUP. En la determinación de las cantidades respectivas, se asumen un valor calórico neto (VCN)¹² del gas de combustión de 14 150 kJ/kg, 365 días de operación al año, 24 horas/día y precio del agua de 18 CUP/m³, cuyos resultados se muestran en la tabla 6.

$$D_{\text{agua rep}} = D_{\text{agua}} - D_{\text{cond puros}} \quad (22)$$

$$D_{\text{agua rep}} = 152,20 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{24\text{h}}{1\text{d}} \cdot \frac{365\text{d}}{1\text{año}} \cdot \frac{1\text{t}}{1000\text{kg}} \cdot \frac{18 \$}{24 \text{ m}^3} \cdot \frac{1\text{m}^3}{0,984\text{t}} = 1016,21 \frac{\text{CUP}}{\text{año}}$$

$$\text{Consumo de gases asociado a pérdidas de calor} = \frac{Q_{\text{perd}}}{\text{VCN}_{\text{gases}}} \quad (23)$$

Tabla 6- Determinación del consumo de gases y ahorros potenciales de agua

Recurso	Pérdidas		Ahorro potencial		CUP/año
	kJ/h	m ³ /h	gases (t/a)	Agua (m ³ /a)	
Gases de combustión	705886,66	-	437	-	
Agua	-	0,15	-	1354,95	1016,21

En la tabla 7 se muestra el resumen de las demandas de servicios de calentamiento, los requerimientos mínimos de servicios de calentamiento, la máxima recuperación de calor (MER) y la demanda mínima de gases de combustión.

El análisis del uso de la energía y la aplicación del método de integración de calor aportaron ahorros de recursos energéticos y financieros; estos últimos con un valor total de 1016,21 \$/año.

Tabla 7- Determinación de la demanda mínima de gases de combustión

Demandas	Análisis energético		Integración de calor $\Delta T_{min} = 185^{\circ}C$				
	MW	t/h	Servicio mínimo		MER	t gases /año	
			MW	m ³ /h	t/h	kW	
Calentamiento (vapor)	0,7	0,9	0,2	-	0,2	25,43	19,8
Enfriamiento (agua)	-	-	-	-	-	-	-

Conclusiones

1. La generación de vapor satisface la demanda del proceso, en el cual solo se requiere reponer el 16,39 % de agua con un ahorro potencial de 1016,21 pesos por concepto de eliminación de las pérdidas de calor asociadas a fugas y aislamiento.
2. Como resultado del análisis del uso de la energía, se definen cinco indicadores de desempeño energético, actualmente no reportados por esta entidad, que contribuyen a la definición de una línea base energética para la medición sistemática de la eficiencia térmica.
3. Mediante el intercambio agua – gases de combustión se logra recuperar el 100 % de la energía térmica en la caldera de recuperación, con un requerimiento mínimo de servicio de vapor que constituye el 28,57 % de la potencia térmica total actual con un valor de 0,7 MW.

Referencias bibliográficas

- 1-MINEM. (2024). Funciones. <https://www.minem.gob.cu/es/actividades/petroleo-y-gas>
2. JU, C. Analysis of the Research Status of Internal Combustion Engines. *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 2023, 53, 214-219. [3aae050cfe2fcdff6151d3f50943621ce889.pdf](https://doi.org/10.14710/ijred.9.2.189-205)
2. KHETRAPAL, P. Distributed Generation: A Critical Review of Technologies, Grid Integration Issues, Growth Drivers and Potential Benefits. *Int. Journal of Renewable Energy Development*. 2020, 9(2), 189-205. [doi:10.14710/ijred.9.2.189-205](https://doi.org/10.14710/ijred.9.2.189-205)
3. KABEYI, M. J. B., & OLANREWAJU, O. A. Cogeneration potential of an operating diesel engine power plant. *Energy Reports*. 2022, 8, 744-754. ISSN 2352-4847 [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.447](https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.447)
4. OSINTSEV, K.; Aliukov, S.; Kuskarbekova, S.; Tarasova, T.; Karelin, A.; Konchakov, V.; Kornyakova, O. Increasing Thermal Efficiency: Methods, Case Studies, and Integration of Heat Exchangers with Renewable Energy Sources and Heat Pumps for Desalination. *Energies*. 2023, 16, 4930, 1-36. <https://doi.org/10.3390/en16134930>
5. SAEB GILANI, B. y MOROSUK, T. Heat Exchanger Networks: Applications for Industrial Integrations. *Energies*. 2025, 18, 3021, 1-15. <https://doi.org/10.3390/en18123021>
6. ESPINOSA PEDRAJA, R., Hernández, J. P., Espinosa, J., Ulivis, J., Castellanos, J. *Gestión Energética Eficiente y Análisis de los Sistemas Auxiliares en las Plantas Químicas*, La Habana: Editorial Universitaria Félix Varela. 2019. ISBN 978-959-07-2326-1. <http://bibliografia.eduniv.cu:8083/read/32/pdf>
7. HERNÁNDEZ TOUSET, J.P., de Armas, A. C., Espinosa, O., Pérez, O., Guerra, Procedimiento de análisis energético para la conversión de industrias de la caña de azúcar en biorrefinerías. *Revista Universidad y Sociedad*. 2021, 13 (5). 277-288. ISSN: 2218-3620. <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus>
8. SMITH, R. *Chemical Process Design and Integration*, England: John Wiley & Sons, Ltd., 2005. ISBN 0-471-48680-9.
9. ASPENTECH. *Aspen Energy Analyzer V 10*. Aspen Technology Inc. USA, 2017.

10. CHEMICALOGIC STEAM TAB COMPANION. *Thermodynamic and Transport Properties of Water and Steam V 2.0*. [en línea]. ChemicalLogic Corporation. Copyright 1999-2003. [Consultado: 20.11.2025]. <http://www.chemicalogic.com>

11. ENGINEERING TOOLBOX. *Fuels - Higher and Lower Calorific Values* [en línea], 2003 [Consultado 13.10.2025]. https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Lázaro Javier Peralta López: extracción de datos de la industria y aplicación de los balances de materiales y energía.

Juan Pedro Hernández Touse: aplicación de la integración de calor y escritura del artículo.

Agustín García Rodríguez: asesoría en la terminología y revisión.

Luis Gómez Rodríguez: asesoría en la terminología y revisión.