

Artículo Original

EFFECTO DE LA EMULSIÓN DEL PETRÓLEO CRUDO CUBANO EN LA EFICIENCIA DEL GENERADOR DE VAPOR DE CENTRALES TERMOLÉCTRICAS

**EFFECT OF CUBAN CRUDE OIL EMULSION ON THE EFFICIENCY OF THE
STEAM GENERATOR IN THERMOELECTRIC POWER PLANTS**

Yosvany González Díaz^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-9735-9137>

Isnel Benítez Cortés² <https://orcid.org/0000-0003-2427-640X>

Francisco García Reina³ <https://orcid.org/0000-0001-5721-3363>

Grety Márquez Pañamaría¹ <https://orcid.org/0000-0001-7678-7274>

Pablo Ángel Galindo Llanes² <https://orcid.org/0000-0003-1738-8761>

Luis Fernando Prieto Montenegro⁴ <https://orcid.org/0009-0006-6348-0090>

¹ Departamento de Química. Facultad Ciencias Aplicadas. Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz, Camagüey, Cuba.

² Departamento de Ingeniería Química. Facultad Ciencias Aplicadas. Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz, Camagüey, Cuba.

³ Departamento de Mecánica Aplicada. Facultad de Ciencias Técnicas. Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Ciego de Ávila, Cuba.

⁴ Pentol GmbH, Camagüey, Cuba.

Recibido: Agosto 20, 2025; Revisado: Septiembre 22, 2025; Aceptado: Octubre 17, 2025

RESUMEN

Introducción:

El uso de la emulsión de petróleo crudo cubano en agua mezclado con un agente dispersante de asfaltenos, se utiliza para la mejora de la combustión. Se requiere estudiar su efecto en la eficiencia del generador de vapor.

Objetivo:

Evaluar la efectividad de la emulsión en agua de un aditivo dispersante de asfaltenos, el PentoMuls 3C, en la eficiencia del GV de la unidad 6 de la central termoeléctrica CTE 10 de octubre de Nuevitas.



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Yosvany González, Email: yosvany.gonzalez@reduc.edu.cu



Materiales y Métodos:

Se parte de diferentes niveles de concentración de agua y aditivo dispersante de asfaltenos para conformar las emulsiones. La eficiencia se determina por el método indirecto.

Resultados y Discusión:

De forma general, los parámetros determinados para el cálculo de la eficiencia presentan coeficientes de variación por debajo del 10 % indicando que no existe una gran influencia en la emulsión en los niveles de porcentaje de agua y de aditivo estudiados. El uso de la emulsión tiene una influencia directa en la reducción del consumo específico de combustible PCNM 1400, en la carga térmica y un incremento de la eficiencia del generador de vapor. Con el tratamiento de emulsión del combustible añadida la presencia del aditivo, se incrementa la estabilidad de la emulsión, logrando que el proceso de combustión sea completo y homogéneo.

Conclusiones:

La eficiencia del generador de vapor se incrementa en un 0,38 % con el uso de la emulsión, mientras disminuye el consumo específico de combustible y la carga térmica del generador de vapor.

Palabras clave: carga térmica; consumo específico; eficiencia del generador de vapor; emulsión.

ABSTRACT

Introduction:

The use of an emulsion of Cuban crude oil in water mixed with an asphaltene dispersing agent is used to improve combustion. Its effect on steam generator efficiency needs to be studied.

Objective:

To evaluate the effectiveness of the water emulsion with an asphaltene dispersant additive, PentoMuls 3C, on the efficiency of the steam generator of unit 6 of the 10 de Octubre thermoelectric power plant in Nuevitas.

Materials and Methods:

Different concentration levels of water and asphaltene dispersant additive are used to form the emulsions. The efficiency is determined using the indirect method.

Results and Discussion:

In general, the parameters determined for the efficiency calculation present coefficients of variation below 10%, indicating that the emulsion does not have a significant influence at the water and additive percentage levels studied. The use of the emulsion has a direct influence on the reduction of the specific consumption of PCNM 1400 fuel, the thermal load, and an increase in the efficiency of the steam generator. With the fuel emulsion treatment and the presence of the additive, the stability of the emulsion is increased, achieving a complete and homogeneous combustion process.

Conclusions:

The efficiency of the steam generator increases by 0.38% with the use of emulsion, while the specific fuel consumption and thermal load of the steam generator decrease.

Keywords: thermal load; specific consumption; steam generator efficiency; emulsion.

1. INTRODUCCIÓN

La eficiencia de los generadores de vapor (GV) se refiere a la efectividad con la que este equipo aprovecha la energía liberada por el combustible para producir vapor (Jiménez et al., 2021). Dada la alta demanda energética de las centrales termoeléctricas (CTE), optimizar la eficiencia térmica permite generar ahorros significativos (Sánchez, 2022). Liaño et al., (2021) y Lv et al., (2012), entre otros, identifican varios factores que impactan la eficiencia térmica de los GV, como son las propiedades del combustible, la eficiencia del sistema de combustión, las características de las superficies de intercambio térmico, el tipo de transferencia de calor, la velocidad de los fluidos involucrados, la diferencia de temperaturas entre los mismos, la calidad del aislamiento térmico, las pérdidas de calor en las tuberías y los sedimentos que pueden acumularse en las superficies de intercambio. El ensuciamiento de las áreas de transferencia de calor en los calentadores y recalentadores del sistema convectivo de una CTE es un fenómeno que afecta la eficiencia de los GV (Ding et al., 2023; Ikonen et al., 2023), ya que representa una resistencia significativa a la transferencia de calor (Lim, 2022).

Existen varios parámetros que indican una combustión correcta del combustible, lo que se traduce en una buena eficiencia de los GV (Rodríguez & Rosabal, 2023; Sánchez, 2022). Entre ellos se encuentran: Índice de Bacharach: un valor entre 3 y 4 indica una calidad de combustión media; Exceso de aire: conocer este parámetro es esencial para determinar la eficiencia máxima de la combustión, que se logra con un mínimo exceso de aire u oxígeno; Contenido de CO₂: un porcentaje superior al 12 % en los gases de combustión señala una combustión completa; Contenido de O₂: un contenido inferior al 5 % sugiere que hay suficiente combustible disponible para una combustión eficiente; Temperatura de los gases de escape: debe situarse entre 150 °C y 250 °C, lo que indica eficiencia en la transferencia de calor y adecuadas condiciones de combustión y Humo: la presencia de humo gris pardo en la chimenea indica una combustión correcta, mientras que el exceso de humo oscuro sugiere combustión incompleta.

Según García (2021), es esencial considerar el índice de generación de vapor y el consumo específico de combustible respecto a la producción total de electricidad, entre otros factores.

En los GV, el rendimiento térmico bruto se puede calcular mediante dos métodos: el directo (MD) y el indirecto (MI). El MD define la eficiencia de la caldera como la relación entre la energía aprovechada en la transformación del agua en vapor y la energía suministrada por el combustible. Este método involucra la cantidad de calor absorbido por el agua (para transformarse en vapor saturado, en el recalentador y el calor de las purgas) con el calor entregado por el combustible, el aire y el vapor de atomización (García, 2021; Turro, 2021).

El MI, también denominado método de balance de energía, permite evaluar el rendimiento de los GV mediante la identificación y medición de las pérdidas de energía que atraviesan la frontera del sistema (Jiménez et al., 2021; Morales, 2022; Turro, 2021). En la CTE 10 de octubre de Nuevitas, se utiliza el Petróleo Crudo Nacional Mezclado (PCNM) 1400. Rodríguez & Rosabal, (2023) señalan que el control riguroso del proceso de combustión en el horno, junto con la aplicación de aditivos adecuados, es fundamental para lograr una mayor eficiencia en el uso de este tipo de combustible y coinciden en el uso de las emulsiones para favorecer los procesos de combustión, mejorando la calidad

de la mezcla aire-combustible (Domínguez, 2021). Sin embargo, no existen reportes en la literatura acerca del efecto que puede tener la emulsión del combustible con la adición del PentoMuls 3C, en diferentes concentraciones alrededor de la que sugiere el fabricante, que permitan tener una valoración de su efecto en aspectos tan importantes como son el consumo de combustible, la carga térmica y la eficiencia del generador de vapor. Por otra parte, no existen registros en la central termoeléctrica que corroboren la validez de utilizar la emulsión y el aditivo en estudio en estos aspectos. Por tanto, el objetivo de este trabajo es evaluar la efectividad de la emulsión en agua de un aditivo dispersante de asfaltenos, el PentoMuls 3C, en la eficiencia del GV de la unidad 6 de la central termoeléctrica CTE 10 de octubre de Nuevitas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. *Elaboración de la emulsión y del combustible con la emulsión*

La emulsión se prepara en una planta instalada por la firma Pentol, que consta de un emulsionador estático donde entra agua y PentoMuls 3C a una alta velocidad. La planta cuenta con un sistema de control automático para ajustar las diferentes dosificaciones de agua y aditivo, tomando varios valores por encima y por debajo de la dosificación sugerida por el fabricante, que es de $2,5 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ de combustible y 6 % de H₂O. Para el nivel de agua se evalúan el 4, 5, 6 y 7 % y 1,5; 2; 2,5; 3 y 3,5 $\text{e}^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ de combustible de PentoMuls 3C. Para cada dosificación de agua se probaron las diferentes dosificaciones del PentoMuls 3C.

2.2. *Determinación del Valor Calórico Superior*

Para cada combinación agua/aditivo, se determina el Valor Calórico Superior del combustible y las mezclas según la ASTM D-240-92, (2020) en el calorímetro marca Parr modelo 6200, disponible en el Laboratorio Central del emplazamiento de grupos electrógenos fuel de la Empresa de Mantenimiento de los Grupos Electrógenos de Fuel (EMGEF). La composición química del combustible se toma por la ficha del combustible que suministra Cuba Petróleo (Cupet). Los valores de flujo de combustible, presión barométrica, temperatura de gases salida del calentador de aire regenerativo (CAR), temperatura aire ambiente, temperatura del combustible, temperatura vapor atomización, presión vapor atomización, presión vapor sobrecalentado, temperatura vapor sobrecalentado, temperatura del agua alimentar y flujo vapor sobrecalentado, se determinan en tiempo real, a partir de una serie de sensores instalados en el generador de vapor, que transmiten esa señal, en tiempo real, hasta la sala de control y se recogen en una hoja de cálculo en *Microsoft Excel* cada un segundo y son promediados cada un minuto. Estos datos se hacen coincidir con la fecha y hora en que se realizaron las mediciones para las diferentes combinaciones agua/PentoMuls 3C evaluadas. Los valores de porcentaje de agua en los gases de combustión, humedad relativa, oxígeno en gases antes del CAR y monóxido de carbono antes del CAR, se determinan con un analizador de gases TESTO 350, disponible en el Departamento Técnico de Producción e Índices, medidos en tiempo real en el momento que se realizaba la emulsión con las dosificaciones. Para esto, se espera un tiempo prudencial de 30 minutos para que el combustible ascienda hasta los quemadores, combustione y los gases atraviesen todas las superficies de intercambio de calor y poder realizar las mediciones antes de los CAR.

2.3 Determinación de la eficiencia del generador de GV

La eficiencia se determina por el método indirecto, metodología reportada por Tanquero et al. (1987). Los pasos del procedimiento son los siguientes: 1) Análisis de laboratorio del combustible para determinar las propiedades físico químicas; 2) Análisis de los gases de la combustión; 3) Toma de datos operacionales del proceso de generación eléctrica; 4) Cálculo de los volúmenes de aire y gases de combustión; 5) Cálculo de los calores específicos del aire y los gases de combustión; 6) Cálculo del al entalpía del aire y el combustible; 7) Cálculo del calor disponible; 8) Cálculo de las pérdidas de calor en el GV; 9) Cálculo del eficiencia del GV.

Se tiene en cuenta los volúmenes reales de gases de la combustión, la composición elemental del combustible, la composición de las emulsiones (relación petróleo / agua / aditivo), los análisis de gases de combustión y los valores operacionales de la unidad, datos estos que aparecen en el sistema de reporte horario de la caldera, los cuales se registran en hojas de cálculo de Microsoft Excel. Se procesan en una hoja de cálculo disponible en la CTE 10 de octubre donde se determinan los volúmenes de aire y gases de combustión y los valores de sus calores específicos, el cálculo de las pérdidas del GV, la eficiencia del GV y la eficiencia corregida a la temperatura ambiente de diseño, entre otros.

Para evaluar el efecto de la emulsión en la eficiencia del generador de vapor, los resultados obtenidos en las diferentes combinaciones estudiadas se comparan con el valor de la eficiencia cuando se utiliza el petróleo crudo cubano sin emulsión, lo cual permite corroborar el efecto real de la emulsión. Los datos presentados en la primera fila de la tabla 1 corresponden al petróleo crudo cubano solo sin emulsión ya que son los datos primarios para el cálculo de la eficiencia cuando la concentración del PentoMuls 3C es de 0 m³/kg de combustible y el contenido de agua es de 1,2 %, valor determinado para el combustible sin el agua de emulsión. Los datos utilizados para el cálculo de la eficiencia del GV se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Datos para el cálculo de eficiencia del GV con el PCNM-1400 cSt y las emulsiones

<i>F_c</i> (kg/h)	<i>c(PMuls)</i> (e ⁷ m ³ /kg de combustible)	<i>H₂O</i> (%)	<i>C</i> (%)	<i>H</i> (%)	<i>S</i> (%)	<i>N</i> (%)	<i>O</i> (%)	<i>Ce</i> (%)
32170	0	1,2	79,7	10,9	7	0,5	0,5	0,06
32830	1,5	4	76,3	11,1	7,7	0,5	0,5	0,06
32800	2,0	4	77	11,1	6,9	0,5	0,5	0,06
33080	2,5	4	76,1	11,1	7	0,34	0,5	0,09
33010	3,0	4	78,7	11	5,5	0,34	0,5	0,09
32970	3,5	4	76,7	11	7,2	0,5	0,5	0,06
33210	1,5	5	76,4	11	7,4	0,46	0,47	0,09
32600	2,0	5	75,6	11,1	6,9	0,34	0,5	0,09
32800	2,5	5	75,6	11	6,4	0,34	0,5	0,09
32640	3,0	5	75,8	11	7,3	0,46	0,47	0,09
32620	3,5	5	76,7	11	6,4	0,46	0,47	0,09

32930	1,5	6	74,8	11,1	7,4	0,46	0,47	0,09
32360	2,0	6	76	11	6	0,5	0,5	0,06
33230	2,5	6	74,5	11,1	7,7	0,5	0,5	0,06
32510	3,0	6	75,3	11	7,2	0,5	0,5	0,06
32440	3,5	6	74,8	11,1	6,5	0,5	0,5	0,06
32340	1,5	7	74,7	11,1	7,8	0,34	0,5	0,09
32450	2,0	7	77,5	11,1	6,6	0,3	0,45	0,09
32070	2,5	7	71,8	11	7,7	0,46	0,47	0,09
32480	3,0	7	74,9	11,1	6,7	0,34	0,5	0,09
32260	3,5	7	72,5	11	7,5	0,34	0,5	0,09
VCI (kJ/kg)	VCS (kJ/kg)	VCS_M (kJ/kg)	H₂O_D (%)	T_{GS} (°C)	T_{AA} (°C)	O_{aCAR} (%)	CO_{aCAR} (ppm)	F_{VS} (t/h)
38028,6	40358	38338,9	1,2	153	32,5	1,29	440	349,1
37389,9	39698	37364,8	4,2	152	31,9	1,21	311,23	349,1
36724,9	38929	37501,5	4,2	152,6	32,2	1,2	291,03	348,8
36197,1	38326	37191,9	3,8	152,8	32,3	1,16	274,16	348,2
35932,7	37998	37877,8	3,8	152,5	32,0	1,16	262,5	348,1
35689,9	37738	37375,4	4,2	152,7	32,3	1,16	257,73	346,3
36007,3	38180	37292,5	5	151,7	32,1	1,21	271,5	348,7
35944,5	38118	36950,4	5,4	151,9	32,3	1,19	277,2	348,5
35554,2	37658	36892	5	151,8	32,2	1,19	263,91	348,5
35498,8	37578	37062,5	4,8	151,6	32,0	1,15	257,99	347,6
35092,1	37095	37285,7	4,8	151,1	31,9	1,13	256	347,5
36789,5	39070	36739,7	5,7	150,9	32,2	1,14	262,75	347,9
35831,2	37978	36932,9	5,8	150,8	32,1	1,16	265,02	347,9
35818,1	37959	36708,5	5,5	150,7	31,9	1,16	260,1	347,7
35763,9	37892	36808,3	5,8	150,0	31,7	1,11	254,52	347,1
35733,5	37832	36668,2	5,9	150,2	31,8	1,08	249,78	346,9
34567,1	36601	36745,2	6,4	149,7	31,8	1,04	256,66	347,4
34343,3	36296	37533,5	6,6	149,5	31,69	1,04	254,2	346,8
34105,7	36071	35664,3	7,8	149,8	31,9	1,01	249,99	347,0
33987,1	35887	36685,5	6,4	149,5	31,6	0,98	246,5	346,8
33820,2	35689	35872,3	8,4	149,6	31,7	0,96	239,5	346,8

En la tabla 2 se muestran parámetros que se consideran constantes para los cálculos.

Tabla 2. Parámetros constantes para todas las combinaciones de agua y PentoMuls 3C

Hr (%)	T_{AG} (°C)	T_C (°C)	T_{VA} (°C)	P_{VA} (MPa)	R_{VA/C} (adim)	P_{ACFE} (%)
85	31	153	250	19	2,27	0
P_{VS} (MPa)	T_{VS} (°C)	A_(T_V/T_C) (adim)	P_b (hPa)	Hr (%)	P_b (hPa)	
13,63	520	0,27	1020	85	1020	

Donde Fc-flujo de combustible, c(PMuls)-concentración de aditivo PentoMuls-3C®, H₂O- porcentaje de agua en la emulsión, C-carbono, H-hidrógeno, S-azufre, N-nitrógeno, O-oxígeno, Ce-Contenido de cenizas, VCI- Valor calórico inferior, VCS- valor calórico superior, VCS_M-valor calórico superior según Mendeléiev Qir, H₂Od- porcentaje de agua en los gases de combustión, A_(TV/Tc)-atomización relación entre la temperatura de vapor y temperatura de combustible, P_b-presión barométrica, H_r -humedad relativa, T_{GS}-Temperatura de gases salida CAR, T_{AG}-Temperatura aire ambiente garantía, T_{AA}-Temperatura aire ambiente, T_c-Temperatura del combustible, T_{VA}-Temperatura vapor atomización, P_{VA}-Presión vapor atomización, R_{VA/C}- Relación vapor atomización – combustible, P_{ACFE}-Parte del aire calentado por fuente exterior, O_{aCAR}-Oxígeno en gases antes del CAR, CO_{aCAR}-Monóxido de carbono antes del CAR, P_{vs}-Presión vapor sobrecalentado, T_{vs}-Temperatura vapor sobrecalentado, T_{AA}-Temperatura del agua alimentar, F_{vs}-Flujo vapor sobrecalentado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 3 muestra los valores mínimos, valores máximos, valores promedios, desviación estándar y coeficiente de variación de algunos de los parámetros calculados.

Tabla 3. Parámetros calculados del GV con el PCNM-1400 cSt y las emulsiones

Parámetros	Valor mínimo	Valor máximo	Valor promedio	Desviación estándar	Coeficiente de variación
H _{vs} (kJ/kg)	3384,22	3384,22	3384,22	0,00	0,00
H _{AA} (kJ/kg)	966,84	966,84	966,84	0,00	0,00
P _{VA} (hPa)	46,62	48,8	47,58	0,64	1,35
C _{AV} (g/m ³)	25,14	26,13	25,68	0,36	1,40
C _{HA} (adim)	1,04	1,04	1,04	0,00	0,00
V _{TA} (Nm ³ /kg)	9,57	10,23	9,91	0,15	1,49
V _{CO2} (Nm ³ /kg)	1,34	1,48	1,41	0,03	2,27
V _{N2} (Nm ³ /kg)	7,48	7,99	7,74	0,11	1,48
Var (Nm ³ /kg)	0,09	0,1	0,09	0,00	2,41
V _{SO2} (Nm ³ /kg)	0,04	0,05	0,05	0,00	9,17
V _{H2O} (Nm ³ /kg)	1,58	1,77	1,70	0,04	2,37
V _{GS} (Nm ³ /kg)	8,96	9,62	9,29	0,15	1,59
V _{GH} (Nm ³ /kg)	10,71	11,2	10,99	0,12	1,05
O ₂ (%)	0,96	1,29	1,13	0,08	7,41
Λ (adim)	1,04	1,06	1,05	0,01	0,51
V _{total} (Nm ³ /kg)	11,81	12,52	12,18	0,16	1,35
V _{GR} (Nm ³ /kg)	9,41	10,25	9,82	0,19	1,91
V _{RAH} (Nm ³ /kg)	10,43	11,32	10,87	0,20	1,82
V _{TVA} (Nm ³ /kg)	1,57	1,67	1,63	0,02	1,26
V _{AR} (Nm ³ /kg)	2,03	2,08	2,06	0,01	0,54

V _{ASG} (Nm ³ /kg)	0,43	0,63	0,53	0,05	9,10
X _{VA} (adim)	0,13	0,14	0,13	0,00	3,62

Donde H_{VS}- entalpía del vapor sobrecalentado, H_{AA}-entalpía del agua de alimentar, P_{VA}-presión del vapor de agua en el aire en límite de saturación, C_{AV}- contenido del vapor de agua en el aire, C_{HA}- coeficiente de humedad del aire (adimensional), V_{TA}-volumen total de aire, V_{CO2}-volumen de dióxido de carbono, V_{N2}-volumen de dinitrógeno, V_{ar}-volumen de aire, V_{SO2}-volumen de dióxido de azufre, V_{H2O}-Volumen de agua, V_{GS}-volumen de gases secos, V_{GH}-volumen de gases húmedos, O₂ -dioxígeno, λ-exceso de aire (adimensional), V_{Total}-volumen total de gases, V_{GR}-volumen de gases real, V_{RAH}-volumen real de aire húmedo, V_{TVA}-volumen teórico de vapor de agua, V_{AR}-volumen de agua real, V_{ASG}-volumen de aire seco en gases, X_{VA}-fracción volumen de agua (adimensional).

Los resultados muestran que no existe una gran variabilidad en los parámetros calculados al presentar valores del coeficiente de variación por debajo del 10 %. Esto indica que la emulsión no tiene influencia significativa en los rangos de porcentaje de agua y de PentoMuls 3C estudiados, no así en su comparación con el combustible cuando se utiliza sin la tecnología de emulsión.

Por su parte, la tabla 4 muestra los parámetros calculados del GV a partir de la temperatura de los gases de salida de los CAR, que se mantienen constantes para todas las combinaciones estudiadas o que presentan una variación muy pequeña.

Tabla 4. Parámetros calculados del GV con el PCNM-1400 cSt y las emulsiones que se mantienen constantes

<i>Cálculos con temperatura de gases de salida CAR</i>						
<i>CpcO₂</i> (kJ/Nm ³ K)	<i>CpsO₂</i> (kJ/Nm ³ K)	<i>CpN₂</i> (kJ/Nm ³ K)	<i>Cp_A</i> (kJ/Nm ³ K)	<i>CpH₂O</i> (kJ/Nm ³ K)	<i>Cp_{vz}</i> (kJ/Nm ³ K)	<i>Cp_G</i> (kJ/Nm ³ K)
1,77	1,7	1,3	0,93	1,48	1,2	1,38
<i>Cálculos con temperatura aire precalentado</i>			<i>Cálculos con temperatura ambiente</i>			
<i>CpH₂O_P</i> (kJ/Nm ³ K)	<i>Cp_A</i> (kJ/Nm ³ K)	<i>H_{ACE}</i> (kJ/Nm ³)	<i>Cp_{AA}</i> (kJ/Nm ³ K)	<i>Cp_A</i> (kJ/Nm ³ K)	<i>H_{AA}</i> (kJ/Nm ³)	<i>H_{PA}</i> (kJ/Nm ³)
1,49	1,3	44	1,49	1,3	43-44	57-58

Donde C_{pCO₂}-calor específico CO₂, C_{pSO₂}-calor específico SO₂, C_{pN₂}-calor específico N₂, C_{pA}- calor específico del aire, C_{pH₂O}-calor específico H₂O, C_{p_{vz}}-calor específico del vapor a temperatura ambiente, C_{pG}-calor específico total de los gases, C_{pH₂O_P}-calor específico del agua en el aire con precalentadores, H_{ACE}- entalpía del aire después de calentarlo con una fuente exterior, C_{pAA}-calor específico del agua en el aire ambiente, C_{pA}-calor específico del aire ambiente, H_{AA}-entalpía del aire ambiente, H_{PA}-entalpía del petróleo a temperatura ambiente.

La tabla 5 presenta los resultados del cálculo de las pérdidas y eficiencia del GV corregida de la caldera a la temperatura de garantía del aire y a temperatura ambiente con el PCNM-1400 cSt y las emulsiones estudiadas. La tabla 4 muestra los parámetros determinados que se mantienen constantes para todas las combinaciones de agua y PentoMuls 3C

estudiadas, mientras que la tabla 6 muestra los parámetros que varían con los cambios en las composiciones de agua y aditivo, con sus valores mínimos, máximos, valores promedios, desviación estándar y coeficiente de variación.

Tabla 5. Parámetros calculados del GV con el PCNM-1400 cSt y las emulsiones que permanecen constantes para todas las combinaciones agua aditivo utilizadas

H_{CDC} (kJ/Nm ³)	Q_{EAC} (kJ/kg)	Q_{EVA} (kJ/kg)	P_R (%)	P_{SV} (%)	η_{TG} (%)
323	0	2907	0,3	0,14	94

Tabla 6. Parámetros calculados del GV con el PCNM-1400 cSt y las emulsiones que varían según las combinaciones agua aditivo estudiadas

Parámetro	Valor mínimo	Valor máximo	Valor promedio	Desviación estándar	Coeficiente de variación
Q_{EC} (kJ/kg)	264	254	264,67	0,48	0,18
Q_{ECA} (kJ/kg)	36993	41200	38830,33	1084,44	2,79
P_{SV} (%)	0,08	0,14	0,09	0,01	15,77
P_{QS} (%)	4,98	5,36	5,18	0,09	1,80
η_A (%)	94,2	94,6	94,39	0,10	0,10

Donde H_{CDC} -entalpía del combustible después de calentarla con una fuente exterior, Q_{EAC} -calor entregado a la caldera por el aire caliente, Q_{EVA} -calor entregado a la caldera por el vapor atomización, P_R -pérdida por radiación al medio ambiente, P_{SV} -pérdidas por sustancias volátiles en gases (Química), η_{TG} -eficiencia corregida de la caldera a la temperatura de garantía del aire=31 °C, Q_{EC} -calor entregado a la caldera por el combustible, Q_{ECA} -calor entregado a la caldera por el combustible y el aire caliente, P_{SV} -pérdidas por sustancias volátiles en gases, P_{QS} -pérdidas por calor sensible de los gases, η_A -eficiencia de caldera a temperatura ambiente.

Los resultados mostrados en la tabla 6 muestran la influencia que tiene en las pérdidas por sustancias volátiles en gases de combustión, la composición de agua y aditivo en la emulsión en los rangos estudiados. Los otros parámetros reportados se mantienen con una baja variabilidad, por debajo del 10%.

El valor de eficiencia del GV al utilizar PCNM-1400 cSt sin emulsión alcanza 89,04 %. Una vez conformadas las emulsiones, se registra un mínimo de 89,04 %, con una concentración de PentoMuls-3C® de $1,5 \times 10^{-7}$ m³/kg de combustible y 5 % de agua. El máximo de 89,44 % se obtiene con $3,5 \times 10^{-7}$ m³/kg de combustible de PentoMuls-3C® y 7 % de agua. El análisis de optimización, realizado con Statgraphics 19-X64 refleja un valor óptimo de 89,42 %, alcanzado con una concentración de PentoMuls-3C® de $3,5 \times 10^{-7}$ m³/kg de combustible y 7 % de agua, representando el extremo superior del rango de experimentación (ver tabla 7).

Tabla 7. Resultados de la optimización para el cálculo de eficiencia de las emulsiones y resultados para el PCNM-1400 cSt

Factores	<i>Eficiencia</i>	<i>Consumo de combustible con VCS (kJ/s)</i>
	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>
c(PMuls 3C)	3,50E-07	3,50E-07
H ₂ O	7	7
Valor Óptimo	89,42	23217,70
PCNM-1400 cSt	89,04	23484,12

Donde c(PMuls)-concentración de aditivo PentoMuls (m^3/kg), H₂O- porcentaje de agua (%), eficienciacc-eficiencia corregida de la caldera a VCS (%), Consumo de combustible con VCS (kJ/h).

Aunque con el uso de la emulsión la mejora de la eficiencia del generador de vapor es de solo 0,38 % respecto a la eficiencia del generador de vapor cuando se utiliza el crudo sin emulsión, este resultado confirma la utilidad de la tecnología de emulsión con aditivos surfactantes, como PentoMuls-3C. La presencia de aditivos tensoactivos y agua incrementa la estabilidad de la emulsión (Martínez et al., 2016) y disminuye la viscosidad (Hernández et al., 2019), mejorando el proceso de trasiego del combustible y logrando una combustión más completa y homogénea.

Por otra parte, un adecuado uso de aditivos para la combustión del petróleo crudo cubano, mejora los procesos de transferencia de calor, ensuciamiento y corrosión, aspectos estos que inciden directamente en la eficiencia del generador de vapor (Rodríguez & Rosabal, 2023).

Además de reducir las emisiones de gases contaminantes, la emulsión incrementa el tiempo de servicio del GV, al disminuir la formación de incrustaciones en sus componentes (Rodríguez & Rosabal, 2023) y el consumo específico de combustible (ver figura 1).

La tabla 8 presenta los modelos ajustados para la eficiencia corregida de la caldera a VCS (ver ecuación 1), la carga térmica del GV (ecuación 2) y el consumo de combustible con VCS (ecuación 3), los cuales constituyen la base para futuros estudios de optimización de la dosis de aditivo y agua a emplear.

Tabla 8. Modelos de superficie para la eficiencia, carga térmica y consumo de combustible de las emulsiones

<i>Modelo</i>	<i>R</i> ²
$\eta_{CC} = 89,93 - 333429PMuls - 0,36H_2O + 6,43E11PMuls^2 + 194000PMuls \cdot H_2O + 0,032H_2O^2$ (1)	95,43 %
$Q = 234,98 - 7,23E6PMuls + 0,34H_2O - 1,76E13PMuls^2 + 2,09E6PMuls \cdot H_2O - 0,1H_2O^2$ (2)	89,05 %
$Cons. Comb. = 23321,2 - 6,54E8PMuls + 124,05H_2O - 1,94E15PMuls^2 + 1,62E8PMuls \cdot H_2O - 18,42H_2O^2$ (3)	94,62 %

Donde η_{CC} -eficiencia corregida de la caldera a VCS, Q-carga térmica del GV (MW), Cons. Comb.-consumo combustible con VCS (kg/h).

Aparejado al cálculo de eficiencia térmica, se encuentra la evaluación del consumo de combustible. El consumo de PCNM-1400 sin emulsión es de 23484,18 kg/h. El análisis

de optimización, realizado con Statgraphics 19-X64, refleja un valor óptimo de consumo de 23217,7 kg/h, cuando se emplea una concentración de PentoMuls-3C® de $3,5 \times 10^{-7}$ m³/kg de combustible y 7 % de agua. La aplicación de la tecnología de emulsión permite un ahorro de combustible de 266,48 kg/h (ver figura 1).

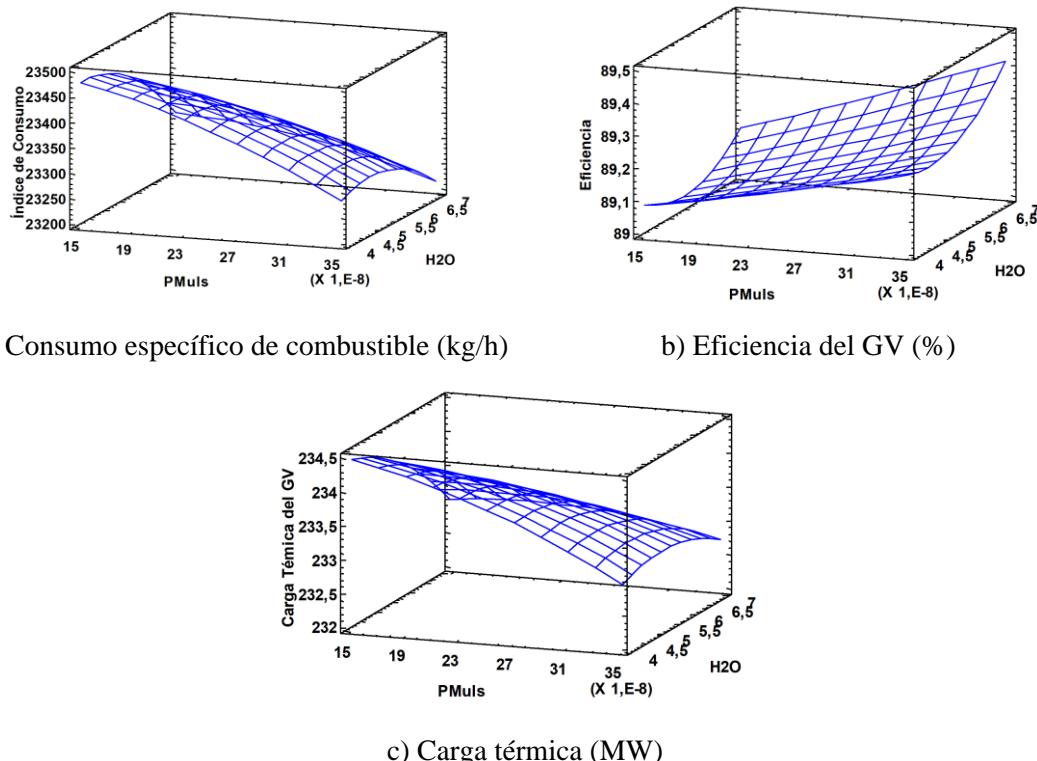


Figura 1. Diagramas de superficie del consumo específico de combustible, eficiencia del GV y de la carga térmica

4. CONCLUSIONES

La determinación de la eficiencia del generador de vapor de la unidad 6 de la central termoeléctrica 10 de octubre de Nuevitas, usando el combustible en emulsión de agua y el aditivo PentoMuls y sin emulsión, da lugar a que:

1. La eficiencia del generador de vapor se incrementa en un 0,38 % con el uso de la emulsión de agua y el aditivo con su consecuente impacto en el proceso de generación de energía, obteniéndose los mejores resultados para la adición de un 7 % de agua y concentración de PentoMuls 3C de $3,50 \times 10^{-7}$ m³/kg.
2. A medida que aumenta la concentración de agua y del aditivo PentoMuls 3C, disminuye el consumo específico de combustible y la carga térmica del generador de vapor, con su consecuente impacto técnico, económico y medioambiental.

AGRADECIMIENTOS

A la central termoeléctrica 10 de Octubre de Nuevitas y la firma Pentol GmbH® por permitir la realización de la investigación.

REFERENCIAS

- Ding, Y., Chen, T., Tian, H., Shu, G. & Zhang, H. (2023). Experimental and numerical investigation of soot deposition on exhaust heat exchanger tube banks. *Thermal Science and Engineering Progress*, 39(1), 101699. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101699>
- Domínguez, J.A. (2021). Las emulsiones de petróleo. *Revista Ingeniería Agrícola*, 11(2), 61-65. <https://www.redalyc.org/jatsRepo/5862/586266250009/586266250009.pdf>
- García, A. (2021). *Estudio de las emisiones de la central termoeléctrica Lidio Ramón Pérez y su impacto ambiental*. [Tesis de pregrado. Universidad de Matanzas, Cuba]. <https://rein.umcc.cu/bitstream/handle/123456789/1859/TD21%20Andy.pdf?sequence=1>
- Hernández, A., Falcón, J. & Rodríguez, H. L. (2019). Efecto de la relación petróleo/agua+emulgente en el comportamiento reológico y estabilidad de las emulsiones acuosas del petróleo CM-650 con emulgente P. *Tecnología Química*, 39(1), 75-88. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852019000100075
- Ikonen, E., Liukkonen, M., Hansen, A. H., Edelborg, M., Kjos, O., Selek, I. & Kettunen, A. (2023). Fouling monitoring in a circulating fluidized bed boiler using direct and indirect model-based analytics. *Fuel*, 346, 128341. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128341>
- Jiménez, R., Iturrealde, L. Á., Monteagudo, J. P. & Castillo, Y. (2021). Pérdidas por radiación en generadores de vapor con el apoyo de la técnica termográfica. *Universidad y Sociedad*, 13(3), 262-270. http://www.scieno.sld.cu/scieno.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202021000300262
- Liaño, N., Fernández, Y., González, G. & Pérez, A. (2021). Evaluación del sistema de generación, distribución y consumo de vapor de una empresa cárnica. *Ingeniería y Desarrollo*, 38(1), 163-180. <https://doi.org/10.14482/inde.38.1.621.41>
- Lim, J. (2022). Optimizing ash deposit removal system to maximize biomass recycling as renewable energy for CO₂ reduction. *Renewable Energy*, 190, 1006-1017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.095>
- Lv, T., Yu, L. & Song, J. (2012). A Research of Simplified Method in Boiler Efficiency Test. *Energy Procedia*, 17, 1007-1013. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.02.200>
- Martínez, E., Acosta, L. & Ramírez, F.D. (2016). Emulsificación de petróleo crudo para su transporte por oleoductos. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 17(03), 395-403. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.07.009>
- Morales, Y. (2022). *Propuestas para evaluación y operación de la caldera de vapor No. 5 de la empresa de perforación y extracción de petróleo del Centro-Cuba*. [Tesis de pregrado. Universidad de Matanzas, Cuba]. <https://rein.umcc.cu/handle/123456789/1878>
- NC ASTM D-240-92. (2020). *Método de prueba estándar para el calor de combustión de combustibles de hidrocarburos líquidos con el calorímetro de bomba ASTM D240*. <https://www.laboratuar.com/es/testler/astm-testleri/astm-d240-bomba-kalorimetresi-ile-sivi-hidrokarbon-yakitlarin-yanma-isisi-icin-standart-test->

yontemi/

Rodríguez, A. D., Rosabal, L. B. (2023). Aspectos esenciales para lograr el uso eficiente del combustible nacional, en las centrales termoeléctricas cubanas. *Universidad y Sociedad*, 15(4), 65-75.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202023000400065

Sánchez, L. (2022). *Evaluación termo-exergética del sistema de generación de vapor de la División Territorial de Combustible de Matanzas*. [Tesis de pregrado. Universidad de Matanzas, Cuba].
<https://rein.umcc.cu/bitstream/handle/123456789/1932/TD22%20Liliana.pdf?sequence=1>

Tanquero, N., Aballe, L. M. & Reyes, N. (1987). *Guía metodológica para proyectos de curso de generadores de vapor*. https://www.researchgate.net/profile/Luis-Manuel-Aballe-Infante/publication/333295204_Guia_Metodologica_para_proyectos_de_curso_de_generadores_de_vapor/links/5d9b67df299bf1c363fef6f1/Guia-Metodologica-para-proyectos-de-curso-de-generadores-de-vapor.pdf?tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19

Turro, I. de la C. (2021). *Metodología para la evaluación térmico-exergética del sistema de generación de vapor de la División Territorial de Combustible de Matanzas*. [Tesis de pregrado. Universidad de Matanzas, Cuba].
<https://rein.umcc.cu/bitstream/handle/123456789/1905/TD21%20Iracema.pdf?sequence=1>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaramos que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- M.Sc. Yosvany González Díaz. Análisis formal, conservación de datos, investigación, metodología,
- Dr.C. Isnel Benítez Cortés. Análisis formal, conceptualización, redacción - primera redacción, investigación, metodología.
- Dr.C. Francisco García Reina. Gestión de proyectos, investigación, metodología, obtención de financiación.
- M.Sc. Grety Márquez Pañamaría. Análisis formal, conceptualización, conservación de datos, investigación.
- Dr.C. Pablo Ángel Galindo Llanes. Análisis formal, software, validación, visualización.
- M.Sc. Luis Fernando Prieto Montenegro. Conceptualización, investigación, metodología, obtención de financiación, recursos, software, supervisión.