

Artículo Original

CARACTERIZACIÓN DEL PETRÓLEO UTILIZADO EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS

CHARACTERIZATION OF PETROLEUM USED IN THERMOELECTRIC PLANTS

Yosvany González Díaz¹ <https://orcid.org/0000-0002-9735-9137>
Isnel Benítez Cortés^{1*} <https://orcid.org/0000-0003-2427-640X>
Francisco García Reina² <https://orcid.org/0000-0001-5721-3363>
Grety Márquez Pañamaría¹ <https://orcid.org/0000-0001-7678-7274>
Luis Fernando Prieto Montenegro³ <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 Mecánica Aplicada, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad de Ciego de Ávila
"Máximo Gómez Báez", Ciego de Ávila, Cuba.

³ Pentol GmbH, La Habana, Cuba.

Recibido: Abril 18, 2026; Revisado: Mayo 5, 2026; Aceptado: Mayo 25, 2026

RESUMEN

Introducción:

El petróleo crudo cubano, así como las diferentes mezclas utilizadas en el proceso de generación de energía en centrales termoeléctricas, resulta un aspecto de gran importancia en el momento de evaluar sus efectos en la eficiencia del generador de vapor. Por tanto, su empleo exige una caracterización físico-química rigurosa.

Objetivo:

Caracterizar los combustibles empleados en centrales termoeléctricas cubanas mediante la determinación de sus propiedades físico-químicas a partir de una serie histórica.

Materiales y Métodos:

Para la caracterización de los combustibles utilizados se tienen en cuenta los resultados históricos de sus propiedades físico químicas, disponibles en el laboratorio central de la termoeléctrica, los cuales se determinan según las normas ASTM-D, para productos del petróleo. La obtención de los datos históricos se lleva a cabo en los registros de



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: Isnel Benítez, Email: isnel.benites@reduc.edu.cu



combustibles en el laboratorio central. Con los datos, se realiza la estadística descriptiva de los mismos y el coeficiente de variación, para determinar qué propiedades exceden del 10 %.

Resultados y Discusión:

Para todos los combustibles empleados, existe una gran variabilidad en casi todas las propiedades, muchas de las cuales se encuentran por encima del 10 %, en particular para la composición en metales como aluminio, silicio, sodio y vanadio.

Conclusiones:

Las propiedades físico químicas de los combustibles empleados presentan una gran variabilidad, mostrando afectaciones en su calidad. Estas características traen múltiples afectaciones operacionales, tanto en su manipulación, transportación y combustión, que hay que tener en cuenta en la explotación de las unidades de generación.

Palabras clave: PCNM; petróleo crudo cubano; termoeléctrica.

ABSTRACT

Introduction:

Cuban crude oil, as well as the various blends used in the power generation process at thermoelectric plants, is a crucial factor when evaluating its effects on steam generator efficiency. Therefore, its use requires a rigorous physicochemical characterization.

Objective:

To characterize the fuels employed in Cuban thermoelectric power plants by determining their physicochemical properties based on a historical series.

Materials and Methods:

For the characterization of the fuels used, the historical results of their physicochemical properties, available at the central laboratory of the thermoelectric power plant, are taken into account. These properties are determined according to ASTM-D standards for petroleum products. The collection of historical data is carried out from the fuel records in the central laboratory. Based on these data, descriptive statistics and the coefficient of variation are performed to determine which properties exceed 10%.

Results and Discussion:

For all fuels used, there is a great variability in almost all properties, many of which are above 10%, particularly for the composition in metals such as aluminum, silicon, sodium, and vanadium.

Conclusions:

The physicochemical properties of the fuels used exhibit considerable variability, affecting their quality. These characteristics lead to numerous operational challenges, including handling, transportation, and combustion, which must be considered in the operation of power generation units.

Keywords: PCNM; Cuban crude oil; thermoelectric plant.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando se habla del empleo de combustible fósil para la generación de electricidad, la caracterización físico-química del petróleo crudo utilizado, los análisis de las emisiones de gases y las tecnologías disponibles para mitigar las afectaciones producidas por ellos son aspectos que tienen alta prioridad (Concha & Ruz, 2023). En los procesos de combustión de los generadores de vapor instalados en Cuba, se han utilizados diferentes tipos de petróleos crudos, los importados y los nacionales mejorados (PCNM) (Martínez, 2023).

Sánchez (2012), deja explícito en sus trabajos las afectaciones que pueden producirse en las termoeléctricas debido a la utilización de los PCNM. La compleja y variable composición química de este combustible, es responsable de los ensuciamientos de las superficies de los componentes de los generadores de vapor y los inevitables problemas de corrosión en las zonas de alta y baja temperatura. Contaminantes como el azufre, el vanadio, el sodio, asfaltenos, entre otros, son muy dañinos, aunque su presencia sea relativamente baja, ya que causan problemas en la combustión y la generación de vapor. Los análisis de las propiedades físico-químicas que se realizan a los petróleos crudos y derivados empleados en la generación de electricidad están regidos por las normas ASTM-D. La densidad específica, la viscosidad cinemática y dinámica, la volatilidad, el punto de inflamación, el punto de enturbiamiento, el punto de congelación, el contenido de azufre, el valor calórico superior e inferior, la acidez mineral libre (AML), el porcentaje de agua, las cenizas, los asfaltenos, el carbón Conradson, las propiedades reológicas, el contenido de metales presentes, las propiedades dieléctricas, entre otras, son ejemplos de ellas.

Las designaciones de los petróleos crudos se relacionan comúnmente con su origen geográfico y, generalmente, se caracterizan por tener una densidad relativa a 15 °C que varía entre 800 y 980 kg/m³ y una gravedad API que permite clasificarlos en livianos, pesados y extrapesados.

La viscosidad cinemática medida a 40 °C puede llegar a alcanzar valores de 0,02 m²/s (20 000 cSt). El porcentaje en peso de azufre puede estar en el intervalo de 0,05-7,0 % en los petróleos crudos (Okoye & Oboli, 2024). Un alto contenido de azufre indica que hay que actualizar la tecnología del equipo de combustión (quemadores, intercambiadores de calor y otros equipos) y aumentar la cantidad de aire para lograr con mayor efectividad la combinación de los elementos del combustible y el oxígeno del aire atmosférico (Rodríguez & Rosabal, 2023).

Los asfaltenos son macromoléculas de color marrón oscuro a negro que forman parte de los petróleos crudos pesados, extrapesados y bitúmenes. Estos compuestos se encuentran en suspensión coloidal junto con las resinas (Piedra et al., 2020) y tienen una elevada polaridad en comparación con otros componentes del petróleo crudo (Robertson et al., 2021). En su estructura tienen anillos aromáticos policondensados que, cuando cambian las condiciones de presión y temperatura, interactúan entre sí, formando agregados de gran tamaño que no tienen forma definida, llamados racimos (clúster) que pueden precipitar con facilidad. Para mitigar estos depósitos de tuberías provocados por estas deposiciones se utilizan aditivos (Remolina et al., 2019).

El contenido de carbón Conradson del petróleo crudo es un parámetro de calidad relacionado con su combustión. Su cuantificación se realiza luego que estos

combustibles son degradados térmicamente. Un elevado contenido de asfaltenos propenso a generar mayores cantidades de residuos carbonosos (Robertson et al., 2021) y estos residuos están directamente vinculados a las emisiones de hollín producto de una combustión incompleta de los hidrocarburos (Ponce, 2022). Esta propiedad se puede predecir, conociendo la composición del crudo a través de las técnicas analíticas avanzadas y la vinculación con métodos matemáticos propios de la quimiometría (Henrique et al., 2021).

Las cenizas son la cantidad de residuos sólidos indeseables que quedan tras la combustión del petróleo crudo. También pueden proceder de las impurezas presentes en el petróleo o de aditivos utilizados en su procesamiento. Se depositan en las superficies de los calentadores y recalentadores de vapor, provocando el ensuciamiento de las áreas de transferencia de calor en el eje convectivo de una central termoeléctrica, fenómeno que afecta la eficiencia del generador de vapor (Ikonen et al., 2023) ya que resulta una importante resistencia a la transferencia de calor (Lim & Kim, 2022). Por tanto, tiene una implicación directa en la disminución de los coeficientes de transferencia de calor (Kumari et al., 2023). Por otra parte, la presencia de cenizas agresivas provoca la corrosión de las tuberías de intercambio de calor, disminuyendo la vida útil de las mismas (Haiyan et al., 2023), así como incrementos en la emisión de CO₂ y combustión incompleta con aumento del CO y los NO_x (Shi et al., 2019).

De forma general, los resultados que se obtienen de dichas propiedades están regidos por la composición química del combustible y las condiciones de los yacimientos (El-Hoshoudy, & Desouky, 2019). Debido a la diversidad existente de los petróleos crudos utilizados como combustibles en las termoeléctricas y en las refinerías, es importante llevar a cabo los análisis de las propiedades físico-químicas para conocer sus particularidades y poderlos utilizar correctamente.

El aporte fundamental de esta investigación radica en superar el enfoque que ha predominado en la caracterización de los petróleos crudos cubanos, donde los análisis se limitan generalmente a las muestras puntuales, sin tener en cuenta la variabilidad de los valores de sus propiedades. Emplear una serie histórica de datos de propiedades físico-químicas con su correspondiente análisis estadístico, permite estimar la variabilidad real de estas propiedades, influenciada por factores como: la explotación de diferentes horizontes del yacimiento, la mezcla con crudos de otras procedencias, los procesos de mejora térmica aplicados y los cambios en las condiciones de operación de los pozos. Esta perspectiva hace posible identificar tendencias, detectar desviaciones significativas respecto a los valores de diseño de los equipos de combustión, y establecer correlaciones entre la composición química del combustible y la operación real de las CTE, en cuanto a ensuciamiento de calentadores, corrosión, emisiones, eficiencia térmica, entre otros. En consecuencia, la investigación no solo actualiza el conocimiento sobre las propiedades del crudo cubano, sino que proporciona una herramienta práctica para la toma de decisiones en la gestión del combustible, el mantenimiento predictivo de los equipos y la optimización de los parámetros de combustión.

Por tanto, el objetivo de este trabajo es caracterizar los combustibles empleados en centrales termoeléctricas cubanas mediante la determinación de sus propiedades físico-químicas a partir de una serie histórica.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Caracterización de los combustibles

La caracterización de los combustibles en las centrales termoeléctricas se lleva a cabo siguiendo las normas ASTM D establecidas por la industria del petróleo. El combustible empleado en Cuba en los procesos de generación de energía eléctrica y refinación, tiene diferentes fuentes de procedencia, tanto nacionales como extranjeras. Por tales motivos, se realiza un estudio del comportamiento histórico de estas propiedades en los últimos tiempos, y su comparación con las normas establecidas, con el objetivo de evaluar la variabilidad de las mismas. Para realizar este estudio se solicitan al laboratorio de la central termoeléctrica los certificados de los combustibles empleados y en uso, entregados por la Empresa Comercializadora de Combustible CUPET. Este combustible puede ser importado o de procedencia nacional. La estadística descriptiva de los datos, se obtiene utilizando el *Microsoft Excel*.

Los análisis de estas propiedades se realizan en el momento de arribo de los combustibles a la central. Además, se preparan compósito en el laboratorio, producto del tiempo de almacenamiento del combustible, obteniéndose de esta manera si hay cambios o no en estas propiedades.

Cada combustible tiene sus propias características, por tanto, para cada propiedad emitida en el certificado de calidad pueden variar los límites normativos, aunque estos deben cumplirse.

2.2 Comportamiento histórico de las propiedades físico-químicas empleados

El combustible empleado en Cuba en los procesos de generación de energía eléctrica y refinación, tiene diferentes fuentes de procedencia, tanto nacionales como extranjeras. Por tales motivos, en esta etapa se realiza un estudio del comportamiento histórico de las propiedades físico-químicas de los mismos y su comparación con las normas establecidas para evaluar la variabilidad existe en cada una de ellas para cada combustible.

El combustible trae un certificado de declaración de conformidad, que muestra datos del cliente y contrato, el tipo de combustible, número del lote, volumen, origen de la muestra, número de la declaración, número de la muestra, fecha de emisión, hora, las propiedades físico-químicas medidas, las normas de análisis de laboratorio, los rangos de aceptación y resultados reales del laboratorio de la empresa que los realiza. Una vez en planta, este combustible se somete a un proceso de caracterización por los técnicos de laboratorio de la entidad para corroborar estos resultados. La tabla 1 muestra los análisis que se realizan a los combustibles, las normas utilizadas, las unidades en que se expresan y los valores límites establecidos.

Tabla 1. Propiedades físico químicas de los combustibles, métodos de ensayos y valores límites establecidos

<i>Propiedad</i>	<i>Norma</i>	<i>Zuata 300</i>	<i>Merey 16</i>	<i>PCNM-650 cSt</i>	<i>PCNM-1100 cSt</i>	<i>PCNM-1400 cSt</i>
Viscosidad cinemática (cSt)	ASTM D445/D88	< 80-100	< 100-200	< 650,00	< 1100,00	< 1400,00
Carbón Conradson (% m/m)	ASTM D189	< 12	< 12	< 15	< 15	< 15
Densidad a 15 °C (g/cm ³)	ASTM D1298	< 970	< 965	< 992,4	< 995,9	< 999,4
Gravedad Específica a 50 °C (°API)	ASTM D1298/287	> 14	> 15	> 11	> 10,5	> 10
Valor Calórico Inferior y Superior (MJ/kg)	ASTM D240	> 38937,2	> 38937,2	> 37681,2	> 37262,5	> 37262,5
Agua por destilación (% v/v)	ASTM D95	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Sedimentos por extracción (% m/m)	ASTM D473	< 0,1	< 0,1	< 0,15	< 0,15	< 0,15
Cenizas (% m/m)	ASTM D482	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Azufre (% m/m)	ASTM D2418	< 4	< 3,5	< 7,8	< 8	< 8
Asfaltenos (% m/m)	ASTM D6560	< 8	< 8	< 18	< 18	< 18
Vanadio (ppm)	ASTM D5863	< 400	< 400	< 150	< 150	< 150
Na (ppm)	ASTM D5863	< 60	< 60	< 280	< 280	< 280
Al + Si (ppm)	ISO 10478	< 80	< 80	< 80	< 80	< 80

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados del comportamiento histórico de las propiedades físico químicas

Las tablas 2 a la 6 muestran el comportamiento histórico de estas propiedades de algunos combustibles que se tomaron de los registros del laboratorio central de la CTE “10 de octubre” y del laboratorio de la ETE “Lidio Ramón Pérez”. Las propiedades medidas fueron: ν_c -viscosidad cinemática 50 °C (cSt = 10⁻⁶ m²/s), CC-carbón Conradson (% m/m), ρ -densidad a 15 °C (kg/m³), GE-gravedad a 15 °C (API), VCS- Valor Calórico Superior (kJ/kg), VCI- Valor Calórico Inferior (kJ/kg), H₂O_D-agua por destilación (% v/v), S.p.E-sedimentos por extracción (% m/m), C-cenizas (% m/m), S-azufre, (% m/m), Asf.-asfaltenos (% m/m), V-vanadio (ppm), Na-sodio (ppm), Al+Si-aluminio más silicio (ppm). El período analizado fue del 2015 al 2023.

Tabla 2. Resultados históricos de las propiedades físico químicas del petróleo crudo nacional mejorado PCNM-650 cSt

Parámetros	ν_c	S	CC	ρ	GE	VCI	H₂O_D
Muestras	2	2	2	2	2	2	2
Mínimo	478,4	6,1	11,2	978,7	11,3	38 191,2	1,2
Máximo	1 032,0	7,0	13,8	990,3	13,0	38 232,4	2,1
Promedio	755,2	6,6	12,5	984,5	12,2	38 211,8	1,7
Desviación estándar	391,5	0,6	1,8	8,2	1,2	29,2	0,6
Coeficiente de variación	51,8	9,4	14,5	0,8	9,9	0,1	38,6
Parámetros	S.p.E.	C	Asf.	V	Na	Al + Si	
Muestras	2	2	2	2	2	2	
Mínimo	0,0	0,06	14,6	80,0	53,2	5,0	
Máximo	0,1	0,07	15,8	105,5	141,0	51,9	
Promedio	0,0	0,07	15,2	92,7	97,1	28,5	
Desviación estándar	0,0	0,01	0,8	18,0	62,1	33,2	
Coeficiente de variación	70,7	18,35	5,4	19,4	63,9	116,6	

Tabla 3. Resultados históricos de las propiedades físico químicas del petróleo crudo nacional mejorado PCNM-1100 cSt

Parámetros	ν_c	S	CC	ρ	GE	VCI	H₂O_D
Muestras	45	43	44	45	45	42	45
Mínimo	528,0	5,2	10,2	897,5	10,9	37 465,24	0,7
Máximo	1 225,0	7,8	13,5	993,1	13,7	38 790,70	1,8
Promedio	881,4	7,0	12,2	984,5	11,9	38 158,19	1,4
Desviación estándar	170,3	0,7	0,7	14,0	0,6	282,5	0,3
Coeficiente de variación	19,3	10,3	5,8	1,4	5,1	0,7	22,0
Parámetros	S.p.E.	C	Asf.	V	Na	Al + Si	
Muestras	42	44	44	44	44	44	
Mínimo	0,0	0,70	12,7	29,0	39,8	4,6	
Máximo	0,1	1,80	16,1	144,0	163,0	78,8	
Promedio	0,1	1,35	14,0	76,1	93,6	22,3	
Desviación estándar	0,0	0,31	0,8	23,7	35,5	17,4	
Coeficiente de variación	7,8	23,19	5,5	31,2	38,0	77,7	

Tabla 4. Resultados históricos de las propiedades físico químicas del petróleo crudo nacional mejorado PCNM-1400 cSt

Parámetros	ν_c	S	CC	ρ	GE	VCI	H₂O_D
Muestras	31	29	29	30	31	28	31
Mínimo	778,7	1,9	6,6	906,2	10,0	37 861,2	0,1
Máximo	1 472,0	7,4	13,3	999,4	13,0	38 688,1	2,2
Promedio	1 176,7	6,5	12,0	989,7	11,1	38 124,5	1,5
Desviación estándar	180,6	1,0	1,2	16,1	0,6	188,0	0,4

Coeficiente de variación	15,4	15,7	10,3	1,6	5,3	0,5	28,9
Parámetros	S.p.E.	C	Asf.	V	Na	Al + Si	
Muestras	28	29,00	29	27	26	26	
Mínimo	0,0	0,04	9,9	45,0	20,0	5,0	
Máximo	0,7	0,10	16,8	199,0	188,0	34,0	
Promedio	0,1	0,07	15,2	84,1	76,1	12,0	
Desviación estándar	0,1	0,01	1,4	30,6	37,4	5,4	
Coeficiente de variación	138,2	16,49	9,5	36,4	49,1	44,9	

Tabla 5. Resultados históricos de las propiedades físico químicas del petróleo crudo importado Zuata-300

Parámetros	ν_c	S	CC	ρ	GE	VCI	H₂O_D
Muestras	5	4	4	4	4	3	4
Mínimo	39,6	2,3	4,2	942,8	14,4	39 368,5	0,2
Máximo	182,0	3,6	10,1	969,3	18,5	40 549,2	2,5
Promedio	104,8	3,1	7,9	960,9	16,2	39 999,8	0,9
Desviación estándar	52,4	0,6	2,6	12,2	1,9	594,6	1,0
Coeficiente de variación	50,0	18,6	32,7	1,3	11,7	1,5	110,7
Parámetros	S.p.E.	C	Asf.	V	Na	Al + Si	
Muestras	3	4	3	4	4	2	
Mínimo	0,0	0,0	4,3	167,1	3,8	9,7	
Máximo	0,1	0,1	4,7	338,0	37,8	11,0	
Promedio	0,0	0,1	4,6	244,5	21,8	10,3	
Desviación estándar	0,0	0,0	0,2	70,5	17,7	0,9	
Coeficiente de variación	108,3	56,0	4,8	28,8	81,1	8,6	

Tabla 6. Resultados históricos de las propiedades físico químicas del petróleo crudo importado Merey-16

Parámetros	ν_c	S	CC	ρ	GE	VCI	H₂O_D
Muestras	15	14	12	14	15	12	16
Mínimo	151,4	2,1	8,7	952,3	15,5	38 876,3	0,3
Máximo	320,0	3,9	12,0	962,0	17,7	42 831,0	2,3
Promedio	203,4	2,9	11,0	958,5	16,1	40 278,3	0,9
Desviación estándar	40,8	0,4	1,0	2,6	0,6	913,1	0,6
Coeficiente de variación	20,1	13,8	9,2	0,3	3,5	2,3	67,0
Parámetros	S.p.E.	C	Asf.	V	Na	Al + Si	
Muestras	14	12	12	13	13	10	
Mínimo	0,010	0,0	4,1	275,2	17,0	6,6	
Máximo	0,020	0,1	8,5	398,0	176,5	28,5	
Promedio	0,012	0,05	5,2	336,0	56,4	18,0	
Desviación estándar	0,004	0,02	1,5	44,1	39,6	7,6	
Coeficiente de variación	35,1	36,0	29,5	13,1	70,1	42,0	

Los resultados muestran que existe una gran variabilidad de las propiedades físico-químicas de ambos combustibles nacionales (PCNM-1100 cSt y PCNM-1400 cSt), excepto en la gravedad API, la densidad y el valor calórico inferior. Sin embargo, cuando se analizan la viscosidad cinemática, el azufre, carbón Conradson, agua por destilación, vanadio, sodio y aluminio más silicio, presentan valores de coeficiente de variación elevados, confirmando como cambian estos resultados para un mismo combustible cada vez que llega un lote diferente. Estas propiedades son de gran importancia para el trasiego del combustible, almacenamiento y los problemas que surgen producto de la combustión.

Los combustibles importados (Merey-16 y Zuata-300) presentan un comportamiento similar en cuanto la variabilidad de las propiedades físico-químicas. Son combustibles que presentan menor cantidad de azufre, asfaltenos, pero tienen el inconveniente de poseer elevados valores de vanadio, lo cual no es favorable, por la formación de diferentes óxidos cuando se combina con el oxígeno durante el proceso de combustión, actuando además como catalizador de la reacción de la oxidación del SO_2 a SO_3 (Benítez, 2022).

Por otro lado, se aprecia que los niveles de viscosidad del PCNM 1400 cSt son cinco veces superiores a los del Merey, lo cual indica que se debe incrementar la temperatura de trasiego del mismo e introducirlo a los quemadores a un nivel de temperatura mayor, por lo que se puede justificar el uso de aditivos para reducirla.

En el caso del valor calórico inferior, se aprecia que el Merey presenta valores mayores lo cual es favorable. El agua por destilación muestra valores superiores para el PCNM 1400 cSt, aunque el Merey presenta mayores desviaciones de su valor promedio, aun cuando en ambos casos se encuentran dentro de la norma.

Los sedimentos presentan un comportamiento similar para ambos combustibles, siendo ligeramente superior en el PCNM 1400 cSt. Igual comportamiento presenta el porcentaje de cenizas. El contenido de azufre es, como promedio, 2,24 veces superior en el PCNM 1400 cSt con una mayor desviación estándar. Igual comportamiento presentan los asfaltenos siendo alrededor de 2,92 veces superior. Este comportamiento sugiere utilizar aditivos dispersantes de asfaltenos para mejorar su combustión.

En el caso del vanadio, el Merey presentan valores superiores en el orden de las 9,23 veces mientras que, para el sodio, solo es de 1,15 mayor. Para ambos casos de propiedades y de tipo de combustibles, los resultados muestran una gran variabilidad de sus valores. Estos resultados de la relación sodio vanadio deben tenerse muy en cuenta en el momento de mezclar estos combustibles, por las consecuencias catastróficas de las cenizas adherentes que se pueden formar. Esto presupone el uso de aditivos que permitan la formación de cenizas menos adherentes que faciliten la limpieza de las áreas de transferencia de calor. La relación de aluminio más sílice se mantiene con comportamiento similar para ambos combustibles.

Una comparación de los valores de las propiedades físico químicas con las normas establecidas para cada uno de los combustibles, muestra que el Zuata 300, Merey 16 y los PCNM 1100 cSt y 1400 cSt no siempre han cumplido con la norma de viscosidad.

En cuanto a la densidad, aunque los valores establecidos por la norma se cumplen siempre para todos los combustibles, en el caso de la gravedad específica no siempre se cumple para el PCNM 1100 cSt. El agua por destilación solo se cumple para el PCNM

1100 cSt. Para los otros combustibles no siempre este parámetro se encuentra dentro de las normas. Por su parte, los sedimentos por extracción no siempre se cumplen para el Merey y el PCNM 1400 cSt. Los valores de cenizas han cumplido con las normas establecidas para cada combustible, con excepción del PCNM 1100 cSt que ha presentado valores por encima del valor máximo permisible, 0,1 % m/m. El contenido de asfaltenos cumple con las normas para cada combustible, aunque se presentan valores ligeramente superiores para el Merey. El valor calórico, el contenido de vanadio y de aluminio más silicio se cumple para todos los combustibles, no así para el sodio el cual presentan reiterados valores por encima de la norma para el Merey.

Estas variaciones en las propiedades de los combustibles están relacionadas con su origen geográfico, las condiciones de los yacimientos (El-Hoshoudy, & Desouky, 2019) y se pueden caracterizar, generalmente, por una densidad relativa a 15 °C que varía entre 800 kg/m³ y 980 kg/m³. Esto implica una gran variabilidad en los valores de gravedad API, que permite clasificarlos como livianos, pesados o extrapesados. La viscosidad cinemática, medida a 40 °C, puede alcanzar hasta 0,02 m²/s (20 000 cSt). Además, el contenido en peso de azufre, ceras y asfaltenos puede llegar a ser de 5 %, 15 % y 5 %, respectivamente. Esto requiere un conocimiento profundo de su composición química y de sus características físico-químicas para su correcta clasificación y uso posterior (Shishkova et al., 2022). En su composición elemental, el petróleo contiene entre 82-87 % de carbono y 11-14 % de hidrógeno, junto con oxígeno, nitrógeno, azufre, vanadio, níquel y sales minerales en distintas proporciones (Alcívar, 2022; Arias, 2023). Estos aspectos son la causa fundamental de la gran variación que existe en las propiedades físico químicas de los combustibles.

La figura 1 presenta los valores de los coeficientes de variación de las propiedades físico químicas de todos los combustibles utilizados durante el periodo evaluado.

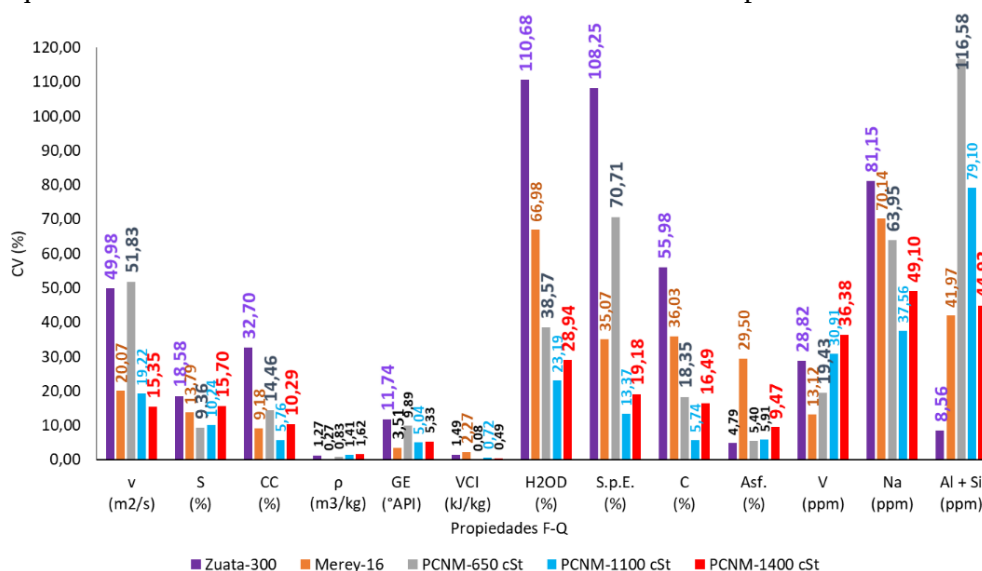


Figura 1. Coeficientes de variación de las propiedades físico químicas de los combustibles

En la misma se aprecia que existe una variabilidad muy grande en casi todas las propiedades, muchas de las cuales se encuentran por encima del 10 %. Para el caso particular de los combustibles preparados con petróleo crudo cubano, PCNM 650 cSt, PCNM 1100 cSt y PCNL 1400 cSt, las propiedades que presentan coeficiente de

variación por debajo del 10 % son el contenido de azufre para el PCNM 650 cSt y el PCNM 1100 cSt. La gravedad específica se mantiene por debajo del 10 % para todas las mezclas, al igual que el valor calórico inferior y el contenido de asfaltenos. En el caso particular del PCNM 1100 cSt, el contenido de carbono cumple con esta condición. Las otras propiedades presentan valores de coeficientes de variación por encima del 10 %, siendo más significativas la composición en metales como aluminio, silicio, sodio y vanadio. En el caso de estos últimos metales, es muy importante establecer la composición de cada uno de ellos ya que son la causa fundamental de la corrosión en las zonas de baja temperatura, como el economizador, los calentadores de aire, el ventilador de tiro inducido y la chimenea, debido a la formación de óxidos de vanadio ($VxOy$) y sulfatos (Kumari et al., 2023). Estos son especialmente relevantes por su bajo punto de fusión, que impacta en la intensidad del ensuciamiento y porque, al combinarse con el óxido de sodio (Na_2O), forman vanadil-vanadato de sodio ($5Na_2O \cdot V_2O_4 \cdot 11V_2O_5$), el eutéctico en el diagrama de fase vanadio-sodio (Rodríguez & Rosabal, 2023).

4. CONCLUSIONES

1. Los PCNM presentan mayor contenido de asfaltenos (9,9-16,8 % m/m), menor contenido de vanadio (29-199 ppm), mayor contenido de azufre (5,2-7,8 % m/m), menor gravedad específica (10-13 °API), mayor viscosidad (528-1472 cSt) y mayor carbón Conradson (6,6-13,8 % m/m) que los importados. Por otra parte, existe una variabilidad muy grande en la calidad de los combustibles nacionales y los de importación.
2. Las principales variaciones en las propiedades físico químicas se centran en la viscosidad, el agua por destilación, los sedimentos por extracción y el contenido de vanadio, sodio y aluminio más silicio, las cuales presentan un coeficiente de variación por encima del 10 %.

AGRADECIMIENTOS

Al proyecto territorial PT223CM005-003: Uso de aditivos para modificar la composición química de las cenizas y la temperatura de rocío de los gases de la combustión del petróleo crudo cubano en centrales termoeléctricas, del programa territorial PT223CM005: Desarrollo energético resiliente y sostenible de la provincia de Camagüey.

REFERENCIAS

- Alcívar, L. S. (2022). *Caracterización físico-química del crudo pesado del campo Pungarayacu*. [Tesis en opción al título de Ingeniero en Petróleos, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23029>
- Arias, H. M. (2023). Determinación del contenido de sales totales en petróleo crudo por el método electrométrico para ser procesado en Refinería Estatal Esmeraldas. *Ibero-American Journal of Engineering & Technology Studies*, 3(2), 12-25. <https://doi.org/10.56183/iberotecs.v3i2.628>
- Benítez, A. (2022). *Evaluación de la influencia de la temperatura en la etapa de conversión catalítica de la UEB Rayonitro*. [Tesis presentada en opción al título
-

- de Ingeniero Químico, Universidad de Matanzas, Cuba]. <https://rein.umcc.cu/bitstream/handle/123456789/1937/TD22%20Agustin.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Concha, M., & Ruz, G. A. (2023). Evaluation of atmospheric environmental regulations: The case of thermoelectric power plants. *Atmosphere*, 14(2), 358. <https://doi.org/10.3390/atmos14020358>
- El-Hoshoudy, A., & Desouky, S. (2019). PVT Properties of Black Crude Oil. En *Processing of Heavy Crude Oils - Challenges and Opportunities*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.82278>
- Haiyan, L., Huan, L., Wang, G., Zhang, X., Tongzhou, C., Yun, Y., & Hong, Y. (2023). Review on Erosion-wear and Protection of Heat Exchange Surface in Power Station Boilers. *Journal of Chinese Society for Corrosion and protection*, 43(5), 957-970. <https://doi.org/10.11902/1005.4537.2022.282>
- Henrique, E., Silveira, G., Paixão, L., Nascimento, M., Pereira, P. H., Cunha, A., & Filgueiras, P. R. (26-27 octubre de 2021). *Seleção de variáveis aplicada a rmn de 13c para a determinação do poder calorífico superior em petróleo*. Conferencia XXI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação, São José dos Campos, São Paulo, Brasil. <https://www.researchgate.net/publication/377299943>
- 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>
- Kumari, S. A., Starbino, A. V., Priya, B., & Stonier, A. A. (2023). Statistical model identification and variable selection for prediction of heat exchanger fouling. *Mathematical Problems in Engineering*, 1, 3040310. <https://doi.org/10.1155/2023/3040310>
- Lim, J., & Kim, 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>
- Martínez, F. (2023). Corrosión. Tipos. Prevención. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 32(2), e-10. https://www.redalyc.org/journal/932/93275373010/93275373010_1.pdf
- Okoye, C. I. & Oboli, O. D. (2024). Asphaltene Structure, Separation and Purification Steps: A Short Review. *Eurasian Journal of Science and Technology*, 4(3), 230-243. <https://doi.org/10.48309/EJST.2023.417300.1093>
- Piedra, V. I., Salvador, M., Guzmán, L., Santos, R. A., & Chango, J. I. (2020). Estudio de la viscosidad en un crudo aditivado con dispersantes y disolventes asfálticos. *Revista Politécnica*, 46(2), 7-20. <https://doi.org/10.33333/rp.vol46n2.01>
- Ponce, S. (31 de julio de 2022). Analizarán muestras de hollín que emanan de planta termoeléctrica Francisco Villa en Delicias. *El Heraldo de Chihuahua*. <https://oem.com.mx/elheraldodechihuahua/local/analizaran-muestras-de-hollin-que-emanan-de-planta-termoelectrica-francisco-villa-en-delicias-15212173>
- Remolina, S. A., Luna, C. A., Espitia, J., & Patiño, É. J. (2019). Una mirada al desarrollo de aditivos reductores de viscosidad y sus aplicaciones en el transporte de crudos pesados. *Revista ION*, 32(1), 35-48.

<https://doi.org/10.18273/revion.v32n1-2019003>

- Robertson, G., Adiningtyas, K. V., Ebrahim, S. A., Scoles, L., Baranova, E. A., & Singh, D. (2021). Understanding the nature of bio-asphaltenes produced during hydrothermal liquefaction. *Renewable Energy*, 173, 128-140. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.099>
- 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. <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/3953>
- Sánchez, B. A. (2012). Corrosión en la zona de alta temperatura tubos de los generadores de vapor en centrales termoeléctricas., Monografía. <https://www.monografias.com/trabajos94/corrosion-paneles-tubos-centrales-termoelectricas/corrosion-paneles-tubos-centrales-termoelectricas>
- Shi, Y., Wen, J., Cui, F., & Wang, J. (2019). An Optimization Study on Soot-Blowing of Air Preheaters in Coal-Fired Power Plant Boilers. *Energies*, 12(5), 958. <https://doi.org/10.3390/en12050958>
- Shishkova, I., Stratiev, D., Kolev, I. V., Nenov, S., Nedanovski, D., Atanasov, K., & Ribagin, S. (2022). Challenges in Petroleum Characterization-A Review. *Energies*, 15(20), 7765. <https://doi.org/10.3390/en15207765>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Dr.C. Yosvany González Díaz. Análisis formal, investigación, validación, metodología, redacción - revisión y edición.
 - Dr.C. Isnel Benítez Cortés. Conceptualización, metodología, visualización, redacción – primera redacción.
 - Dr.C. Francisco García Reina. Análisis formal, conceptualización, metodología.
 - M.Sc. Gretty Márquez Pañamaría. Análisis formal, conceptualización.
 - M.Sc. Luis Fernando Prieto Montenegro. Conceptualización, metodología, validación.
-