

Influencia de la combustión del crudo cubano en el funcionamiento del mecanismo de compuertas de calderas de 100 mw

Influence of Cuban crude oil combustion on the performance of the 100 MW boiler dampers mechanism

Olanky Martínez-Pico^{1*} <https://orcid.org/0009-0001-1663-5890>

Roberto Sagaró-Zamora² <https://orcid.org/0000-0001-5808-1999>

Elaine Ojeda-Arnaiz³ <https://orcid.org/0000-0003-0238-7942>

¹Central Termoeléctrica Antonio Maceo Grajales “RENTE”, Santiago de Cuba, Cuba

²Universidad de Oriente. Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial, Santiago de Cuba. Cuba

³Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Química, Santiago de Cuba, Cuba

*Autor para la correspondencia: olankymartinezpico@gmail.com

RESUMEN

En Cuba la matriz energética actual depende mayormente de las plantas térmicas para la generación. A partir de la crisis económica global y los altos precios del combustible importado, se optó por el empleo del crudo nacional de alto contenido de vanadio y azufre. La combustión de estos combustibles pesados genera fuerzas de adherencia, fricción y compactación muy superiores a los ligeros en varios órdenes, que afectan significativamente el mecanismo de regulación de compuertas en las calderas de las unidades generadoras de 100 MW. En este trabajo se calculan los mencionados esfuerzos a partir de la combustión de los combustibles MAZUT 20, MAZUT100 y crudo cubano (PCNm 1100) y se modelan las tensiones y factor de seguridad en el brazo de accionamiento de hierro fundido 24 (NC 46-02) de las compuertas como resultado de la influencia de las propiedades del combustible. Los resultados de la modelación arrojan incrementos significativos de los esfuerzos con el empleo del crudo nacional y corroboran la aparición de una fractura por sobrecarga súbita del brazo de accionamiento y la necesidad de la sustitución del material. Se propone finalmente su

sustitución para garantizar mayor seguridad operativa en el mecanismo de compuerta de gases. La solución implementada ha permitido el funcionamiento estable del importante mecanismo aun en condiciones de combustión del crudo nacional.

Palabras clave: crudo nacional; incrustaciones; fricción; compuertas.

ABSTRACT

In Cuba, the current energy matrix relies primarily on thermal power plants for generation. Due to the global economic crisis and high prices of imported fuel, the use of domestic crude oil with high vanadium and sulfur content was adopted. The combustion of these heavy fuels generates adhesion, friction, and compaction forces significantly greater than those of lighter fuels, which considerably affect the gate regulation mechanism in the boilers of 100 MW generating units. This work calculates these forces from the combustion of MAZUT 20, MAZUT 100, and Cuban crude oil (PCNm 1100) and models the stresses and safety factor in the cast iron actuating arm 24 (NC 46-02) of the gates because of the influence of the fuel properties. The modeling results show significant increases in stress when using domestic crude oil and confirm the occurrence of a fracture due to sudden overloading of the actuating arm, necessitating material replacement. It is ultimately proposed that the material be replaced to ensure greater operational safety in the gas gate mechanism. The implemented solution has allowed for the stable operation of this important mechanism even under domestic crude oil combustion conditions.

Keywords: cuban fuel oil; deposits, friction, dampers.

Recibido: 06/01/2026

Aceptado: 05/03/2026

Introducción

Los hidrocarburos pesados y crudos (PCNm 1100) son combustibles que se caracterizan por su alta densidad y viscosidad, lo que los hace más difíciles de extraer y refinar que sus contrapartes más ligeras; sin embargo el uso de combustibles pesados en sistemas energéticos industriales sigue siendo común

debido a su disponibilidad y costo relativamente bajo, atendiendo a la composición variable de los mismos, su combustión plantea desafíos importantes, especialmente cuando el combustible contiene niveles elevados

de azufre y vanadio, el azufre favorece la formación de compuestos corrosivos, mientras que el vanadio contribuye a la generación de depósitos duros que se adhieren a las superficies mecánicas. Estas interacciones químicas producen fuerzas de adherencia, fricción y compactación que comprometen el desempeño de los mecanismos de compuerta de gases, aumentando el desgaste y reduciendo la confiabilidad operativa. En el caso de las termoeléctricas de vapor, estos fenómenos afectan directamente a componentes críticos como los sistemas de compuertas de gases en las calderas, donde las condiciones de operación con crudos pesados agravan los mecanismos de desgaste y fallo.^(1,2,3)

En este contexto, la composición química y por ende las propiedades del combustible se convierten en un factor determinante para el diseño mecánico de los componentes, debido a la acumulación de depósitos y por consiguiente las tensiones mecánicas resultantes, exigiendo una evaluación cuidadosa en la selección de materiales para garantizar durabilidad y seguridad en condiciones de operación adversas^(2,3).

En las calderas de las centrales termoeléctricas de 100 MW, las compuertas rectangulares de persianas de aire se utilizan para establecer el balance de masa de aire para la combustión de combustible según sea la potencia efectiva que se demande en el turbogenerador, (figuras 1, 2).



Fig. 1 - Sistema de compuertas de gases para calderas de 100 MW.

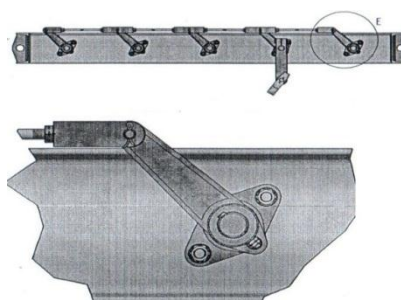


Fig. 2 - Detalle de los brazos de accionamiento

Una rotura del mecanismo afecta considerablemente la operación del bloque, pues se deja de aprovechar la temperatura de estos gases tanto para lograr

una buena combustión como la transferencia de la temperatura de éstos en la producción de un vapor adecuado para introducir a la turbina. Es importante también considerar que los gases al no ser aprovechados en el calentador de aire regenerativo escapan a mayor temperatura por la chimenea, traduciéndose en miles de toneladas de combustible equivalente que se quema sin ser aprovechado en las superficies de transferencia de calor, afectando el consumo específico de combustible. Por otra parte, el funcionamiento estable de las compuertas impide el incremento de la temperatura en el calentador y la acumulación de hollín. Su rol no es menos importante al regular la entrada de gases y aire en la ocurrencia de un incendio en el generador de vapor.

Las deposiciones de las incrustaciones como resultado de la quema del crudo nacional incrementan los esfuerzos necesarios para la regulación del mecanismo de accionamiento de las persianas de las compuertas, dando como resultado atascamiento o frenado del movimiento oscilatorio de las persianas y la rotura súbita del brazo de accionamiento, (figuras 3, 4).



Fig. 3 - Depositions in the housing of the cast iron arm SAE 24



Fig. 4 - Fractured arm

El objetivo de este trabajo de investigación es analizar la influencia del empleo del crudo nacional PCNm 1100 en sustitución de los tradicionales MAZUT 20 y 100, en el incremento de los esfuerzos sobre el brazo de accionamiento del sistema de compuertas de las calderas de 100 MW y la rotura del brazo de fundición gris, a la vez que proponer la sustitución de un material de mayor resistencia que garantice la funcionabilidad del mecanismo. Se incorpora además el índice de averías con el empleo de ambos materiales.

Materiales y métodos

Caracterización de los combustibles empleados

Para la determinación del régimen de carga adicional inducido por el efecto del combustible se consideraron tres tipos de crudos pesados, los dos primeros importados de Rusia (MAZUT 100 y 20) y que se emplearon desde 1964-1998 y el crudo nacional PCNm 1100. La determinación de las principales propiedades de estos se realizó en la UEB de la División Territorial de comercialización de combustible de Matanzas, Unión CUPET, del Ministerio de Energía y Minas. La tabla 1, refleja las principales propiedades y las normas empleadas para su determinación. ^(4,5)

Tabla 1 - Propiedades y las normas empleadas para la determinación de los combustibles empleados

Ensayos	U/M	Método	
		ASTM	Otros
Viscosidad a 50 ⁰ c	mm ² /s-cSt	D-445	
Viscosidad a 50 ⁰ c		D-88/2161	
Azufre Total	% m/m	D-4294	
Temperatura de Inflamación	⁰ C	D-93	
Temperatura de Fluidez	⁰ C	D-97	
Carbón Conradson	% m/m	D-189	
Densidad a 15 ⁰ C	g/cm ³	D-1298	
Gravedad a 15 ⁰ C	⁰ API		
Agua por destilación	% v/v	D-95	
Sales	ppm	D-3230	
Sedimentos por Extracción	% m/m	D-473	
Cenizas	% m/m	D-482	
Asfaltenos	% m/m	D-6560	
Vanadio	ppm	D-5863	
Sodio	ppm	D-5863	
Aluminio+ Silicio	ppm		ISO 10478

A partir de la determinación de las propiedades de cada uno de los crudos se establecieron las principales conjeturas sobre su influencia en la dinámica del sistema de compuertas de las calderas de 100 MW.

Determinación de las fuerzas que actúan sobre el sistema de compuertas

Para la determinación de las fuerzas que actúan sobre el mecanismo de compuertas se procedió con arreglo a la metodología establecida en ^(6,7). La fuerza motriz equivalente para accionar el mecanismo de compuertas se determina:

$$F_{\text{motriz equivalente}} = 1,2(F_{\text{adherencia}} + F_{\text{fricción}} + F_{\text{compactación}}) \quad (1)$$

donde:

F_{eq} - fuerza motriz equivalente.

F_{adh} - Fuerza de adherencia.

F_{fric} - Fuerza de fricción efectiva en elementos de sellaje.

F_{comp} - Fuerza de compactación en las holguras.

En la expresión anterior el valor 1,2 es un factor de corrección. Las razones de su inclusión están dadas por: la **variabilidad operacional** en sistemas termoeléctricos donde las condiciones reales (temperatura, depósitos, alineación mecánica) suelen incrementar las fuerzas más allá de lo calculado teóricamente, la **contaminación y desgaste**: debido a que el azufre, vanadio y asfaltenos generan incrustaciones que aumentan la fricción y la adherencia con el tiempo y como **factor de servicio** de seguridad para garantizar que el motor y el brazo de la compuerta tengan capacidad suficiente frente a picos de carga.

La fuerza de adherencia es la resistencia al despegue inicial entre dos superficies que han desarrollado enlaces intermoleculares o puentes químicos debido a la presencia de depósitos solidificados. Es también “La Energía necesaria para romper los puentes químicos que han soldado las superficies durante el reposo en las paradas prolongadas”. ^(8,9) El cálculo de la fuerza de adherencia se calcula a partir de la expresión: ⁽⁷⁾

$$F_{adh.} = \tau \times A_C \times C \times FS \quad (2)$$

donde:

τ - es el esfuerzo cortante de adhesión.

A_C - Área real de contacto de la persiana

C- Factor de contaminación y considera la pureza, dureza y edad de los depósitos

FS- Factor de seguridad que considera el nivel de incertidumbre, variaciones de régimen y condiciones extremas.

Como se puede observar esta expresión considera la resistencia al corte en superficies de contacto, considerando la influencia de depósitos químicos (azufre, vanadio, asfaltenos) y los niveles de deposición.

La fuerza de fricción surge por la resistencia al deslizamiento continuo entre dos superficies en contacto, una vez vencida la adherencia inicial. Depende de la rugosidad superficial, fuerza normal y propiedades de los materiales interpuestos; es también “La Energía disipada continuamente por la interacción mecánica de asperezas y partículas durante el deslizamiento.”⁽¹⁰⁾

La fuerza de fricción se determinó a partir de la fórmula:⁽⁷⁾

$$F_{\text{fricción}} = \mu_{\text{efectivo}} \times (F_{\text{Normal}} + F_{\text{sellado}} + F_{\text{Comp}}) \times N_{\text{Superficies}} \quad (3)$$

donde:

μ_{efectivo} - Coeficiente de fricción efectivo

F_{Normal} - Fuerza Normal

F_{sellado} - Fuerza de sellado

F_{comp} - Fuerza de compactación en las holguras

$N_{\text{superficies}}$ - Número de caras efectivas.

Es menester significar que el coeficiente de fricción efectivo en estos casos además de considerar el par de materiales en contacto incluye la contaminación con vanadio y azufre y su compactación.

$$F_{\text{sellado}} = P_{\text{contacto}} \times A_{\text{sello}} \quad (4)$$

donde

P- presión de contacto

A- Área de sellado

La fuerza de compactación es la resistencia debido al reacomodo y compresión del material particulado acumulado en holguras y espacios libres; es la fuerza necesaria para “exprimir” los depósitos para que las piezas puedan moverse y es también la energía requerida para comprimir y

redistribuir el material acumulado en los espacios libres antes de permitir el movimiento. (11, 12, 13)

$$F_{comp} = P_{comp} \times A_{holg} \times e \times C_c \quad (5)$$

donde:

P_{comp} - Presión de compactación

A_{holg} - Área de las holguras

e - espesor del depósito

C_c -Coeficiente que considera la homogeneidad del depósito

Modelación por el Método de los Elementos Finitos (MEF)

Materiales empleados en la modelación

Una vez determinadas las fuerzas que actúan sobre el brazo de accionamiento de las persianas del sistema de compuertas para cada uno de los combustibles, para determinar la influencia de la naturaleza del crudo en el fallo del mecanismo. Para la simulación los estudios se practicaron para un sistema de análisis estático, teniendo en cuenta que según los parámetros: ((propiedades de material, tipos de conexiones (contacto entre componentes), tipos de sujeción (Restricciones), cargas, y selección de mallado,)) dependerá la exactitud de los resultados con el modelo real. A los modelos analizados se les realizó un mallado tipo sólido tetraédrico de alto orden (16 nodos).

En cuanto a los materiales empleados se empleó el hierro fundido gris 24 (NC 46-02), material que por diseño emplean los brazos del sistema de accionamiento, y como material alternativo para la sustitución el acero AISI 1020. (14, 15, 16, 17)

La composición química y propiedades mecánicas del hierro fundido gris 24 se presentan en las tablas 2 y 3.

Tabla 2 - Composición química del hierro fundido 24

Material	Carbono (%)	Manganeso (%)	Fosforo (%)	Azufre (%)	Silicio (%)
HFG 24	3.3	0.75	0.09	0.07	1.55

Tabla 3 - Propiedades mecánicas del hierro fundido 24

Material	Módulo de elasticidad (GPa)	Coefficiente de Poisson	Densidad (g/cm ³)	Límite de resistencia σ_{rot} MPa	Dureza HB
HFG 24	65 ÷ 100	0.27	7,2	140 ÷ 170	155

Las tablas 4 y 5 resumen la composición química y propiedades mecánicas del acero AISI 1020.

Tabla 4 - Composición química del acero AISI 1020

Material	Carbono (%)	Manganeso (%)	Fosforo (%)	Azufre (%)	Silicio (%)
AISI 10120	0,18-0,23	0.30-0.60	Máx. 0.040	Máx. 0.050	0.15-1.35

Tabla 5 - Propiedades mecánicas del acero AISI 1020

Material	Módulo de elasticidad (GPa)	Coefficiente de Poisson	Densidad (g/cm ³)	Límite de resistencia σ_{rot} MPa	Dureza HB
AISI 1020	210	0,29	7,9	420	210

Resultados y discusión

Caracterización de los combustibles empleados

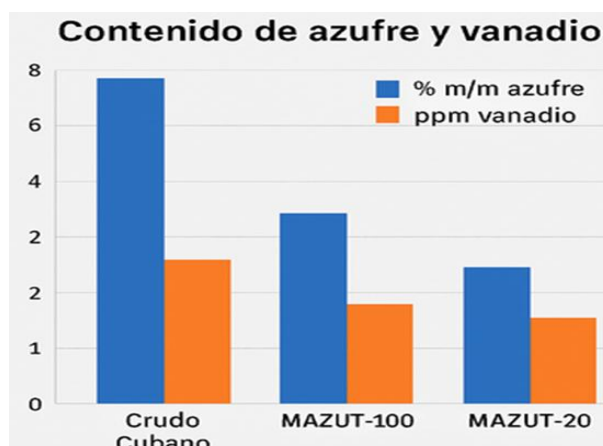
La tabla 6 presenta las principales propiedades determinadas para cada uno de los crudos seleccionados.

La gravedad API, la baja relación hidrógeno-carbono y la presencia de compuestos como azufre, oxígeno, compuestos órgano metálicos, sedimentos inorgánicos, nitrógeno y agua son las principales consideraciones que se deben tomar en cuenta para caracterizar el comportamiento de los crudos pesados.

La figura 5 resume comparativamente el contenido de vanadio y azufre de las muestras analizadas

Tabla 6 - Tabla comparativa de las propiedades físico- químicas de los combustibles analizados

Propiedad	Crudo Cubano	MAZUT-100	MAZUT-20
Viscosidad a 50 °C (cSt)	Alta 220-260)	180-220	80-120
Azufre total % m/m	6.61-8.0	3.5-5	2-3
Temperatura de Inflamación °C	Ambiente/60-70	60-80	70-90
Temperatura de Fluidez °C	(+15 máx./-12 sup.)	-5 a -10	-10 a -15
Carbón Conradson % m/m	15 máx.	10-12	7-9
Densidad a 15 °C g/cm ³	0.9959	0.95-0.97	0.93-0.95
Gravedad API	10.5	15-18	18-20
Agua por destilación % V/V	<= 2	<= 1	<= 0.5
Sales ppm	100-150	50-100	30-50
Sedimentos	0.15 máx.	0.1-0.2	0.05-0.1
Cenizas % m/m	0.1 máx.	0.05-0.1	0.03-0.05
Asfaltenos % m/m	18 máx.	10-12	6-8
Vanadio ppm	98-150	50-80	20-40
Sodio ppm	280 máx.	100-150	50-80
Aluminio + Silicio ppm	80 máx.	30-50	20-30

**Fig. 5** - Contenidos de azufre y vanadio en las muestras ensayadas

Como puntos claves de comparación de las muestras se pueden establecer: (18, 19, 20, 21)

El contenido de azufre total del 8,0 % del crudo nacional supera ampliamente el de las muestras de ambos combustibles MAZUT.

El contenido de vanadio (150 ppm) casi duplica el contenido en el MAZUT -100 y cuatriplica el del MAZUT- 20.

La densidad a 15 ° C, es ligeramente superior, 0,9959 g/cm³, en el crudo cubano.

La más baja Gravedad API, 10,5 del crudo nacional (muy baja, indica un crudo pesado).

El más alto contenido de carbón Conradson en la muestra de crudo cubano, 15 % máx.

Una cantidad de asfaltenos muy superior al resto de los combustibles, 18 % máx.

Una cantidad de sedimentos y cenizas si bien bajos superiores al MAZUT-100 y muy superiores al MAZUT 20.

Cálculo de las fuerzas involucradas en sistema mecánico de la compuerta

La tabla 7 muestra el resultado del cálculo de las fuerzas de adherencia, de fricción, de compactación y la fuerza motriz equivalente en el sistema de compuertas con el empleo de los tres tipos de combustibles (PCNm 1100, MAZUT-20, MAZUT-100). La tabla 7 muestra comparativamente los resultados.

Tabla 7 - Resultados comparativos de las fuerzas en la compuerta

Atributo	Crudo Cubano	MAZUT-100	MAZUT-20
Fuerza de Adherencia (N)	3766,55	1127,76	75,00
Fuerza de Fricción (N)	117513,00	36363,66	1715,81
Fuerza de Compactación (N)	372,65	372,65	372,65
Fuerza Motriz Equivalente (N)	140300,00	37856,68	2596,15
Fuerza del Brazo(5 persianas)(N)	273600,00	73860,00	5062,00
Fuerza del Brazo(1 persiana)(N)	56880,00	14780,00	1012,50

Como se puede observar comparativamente las mayores variaciones de las fuerzas se observan en las componentes de adherencia y de fricción que varían significativamente según el tipo de combustible, debido a la composición química (azufre, vanadio, viscosidad de residuos) que afecta la película de depósitos y el coeficiente de fricción y por consiguiente provocan incrementos de la fuerza equivalente en la compuerta y como se verá más adelante interviene en el incremento de la fuerza sobre el brazo que acciona las persianas provocando el fallo prematuro. (1, 2, 11)

El combustible MAZUT-20 más liviano, con menor contenido de azufre y vanadio presentó fuerzas de adherencia y fricción reducidas y por tanto operación más limpia. El crudo MAZUT-100 más viscoso y con mayor contenido de azufre y asfaltenos genera más depósitos y fricción que el MAZUT-20. Finalmente, el crudo nacional es el más severo por su alto contenido de azufre (6,61–8,0 %) y vanadio (98–150 ppm), lo que explica que

las mencionadas fuerzas sean mucho mayores y puedan comprometer el funcionamiento de la compuerta.

El Impacto en las fuerzas de compuerta puede resumirse de la siguiente forma:

- 1- Azufre y vanadio: generan depósitos corrosivos y adherentes, elevando la fuerza de fricción y la fuerza de adherencia.
- 2- Alta densidad y bajo API: combustión menos limpia, más residuos sólidos y por tanto mayor resistencia mecánica en las superficies móviles.
- 3- Asfaltenos y carbón Conradson: contribuyen a incrustaciones que aumentan el coeficiente de fricción.

Resultados de la modelación por el Método de los Elementos Finitos (MEF)

Como se ha mostrado anteriormente el uso del crudo nacional acarrea un buen número de inconvenientes relacionados con la corrosión, el desgaste, la formación de depósitos y un incremento de las fuerzas que actúan sobre la compuerta, lo cual puede incidir negativamente en la resistencia mecánica y por tanto la durabilidad de los elementos componentes de la compuerta que no han sido diseñados para el uso del crudo nacional. La figura 6 muestra el mallado practicado al brazo accionador de las persianas, con un total de 35 250 elementos y 53 780 nodos.

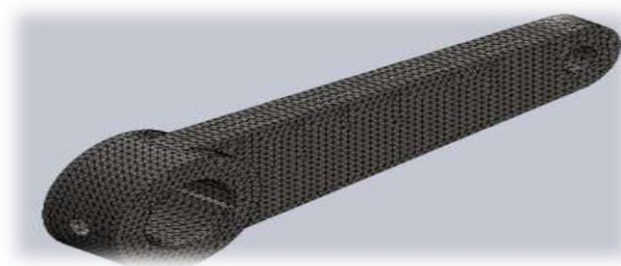


Fig. 6 - Mallado del brazo con un total de 35 250 elementos y 53 780 nodos.

Las figuras 7 y 8 muestran los resultados de la modelación en términos del estado tensional como resultado del incremento de la fuerza ($F= 56\ 880\ \text{N}$) por el uso del crudo nacional y el factor de seguridad resultante.

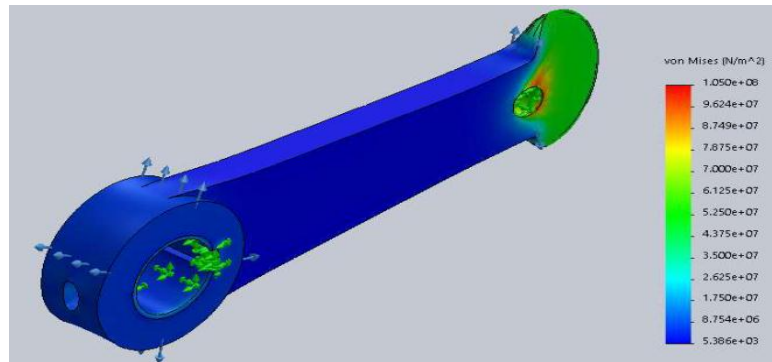


Fig. 7 - Estado tensional para el material hierro fundido gris 24.

$$\sigma_{\max}=105 \text{ MPa}$$

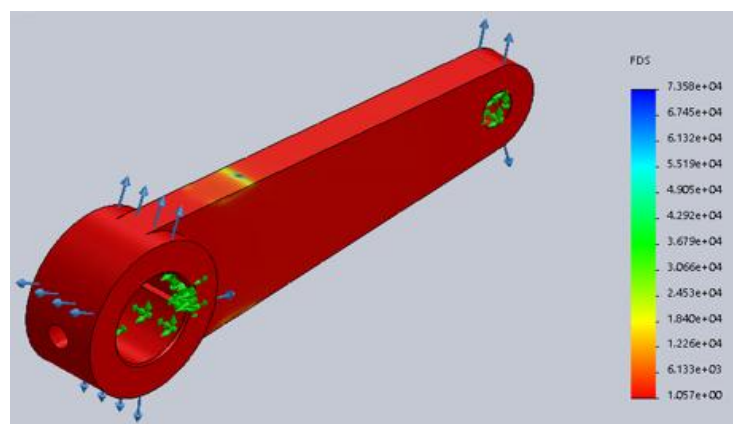


Fig. 8 - Factor de seguridad $FS_{\min} = 1,05$ para el brazo de hierro fundido 24

Como se puede observar el brazo en estas condiciones no presenta una reserva de seguridad y justifica los frecuentes fallos que experimenta la pieza con el uso continuado del crudo nacional.

Ante esta situación se procedió a la sustitución del material de hierro fundido. Se decidió emplear el material acero AISI 1020, de resistencia mecánica adecuada pues es un acero al carbono con buena tenacidad y ductilidad, lo que lo hace resistente a fuerzas de adherencia, compactación y fricción en compuertas que sufren atascamiento y con un comportamiento dinámico satisfactorio. Las figuras 9 y 10 reflejan los resultados de la modelación.

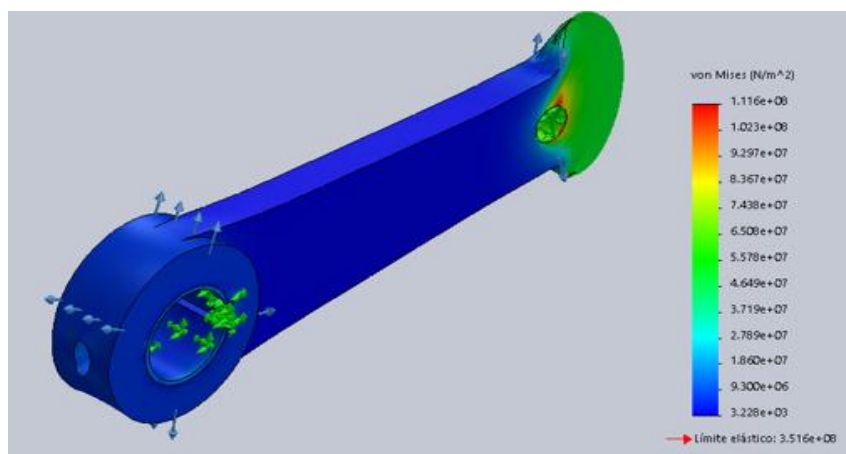


Fig. 9 - Estado tensional para el brazo de acero AISI 1020.

$$\sigma_{\max}=111 \text{ MPa}$$

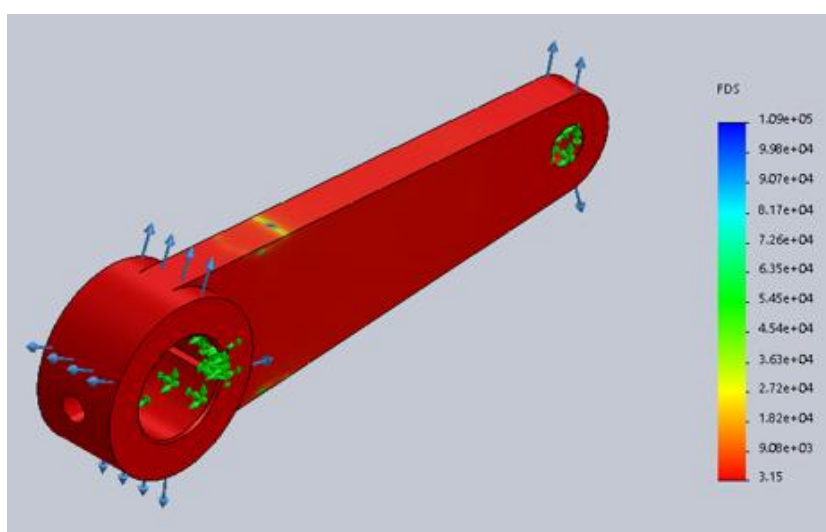


Fig. 10 - Factor de seguridad $FS_{\min} = 3.15$ para el brazo de AISI 1020

El acero AISI 1020 aun cuando no tiene alta resistencia a la corrosión, es una opción más económica (420-600 USD/ton) que los aceros inoxidable austeníticos cuyo costo oscila entre 2900-3200 USD/ton. Comoquiera que su vida útil es menor que los aceros inoxidable austeníticos se recomiendan mantenimientos preventivos y recubrimientos protectores para mitigar este problema.

Para el análisis del índice de averías se graficó la evolución histórica de las fallas del brazo de compuerta de la caldera de 100 MW, construidos de hierro fundido 24 respecto a los de acero AISI 1020; en la figura 11 se muestran las fallas por rotura súbita durante el proceso de combustión del crudo cubano.

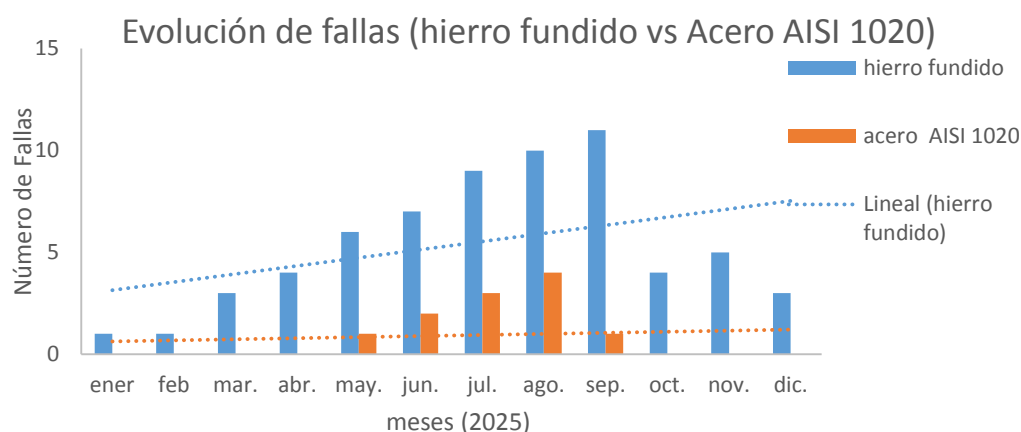


Fig. 11 - Gráfico de evolución de fallas de los brazos de la caldera de 100 MW

Este fenómeno, se agrava en los meses de verano en los cuales la temperatura atmosférica agravó las condiciones, favoreciendo el índice de fallas en el periodo estudiado (año 2025) más probado en el caso del hierro fundido 24; en cambio al analizar las incidencias con el acero AISI 1020 se identificó una disminución de las fallas que en este caso fueron causadas por corrosión progresiva por la exposición prolongada a los gases, no siendo consideradas como roturas súbitas.

El análisis general del índice de fallos mostró un comportamiento lineal ascendente en el caso del material de hierro fundido 24, mientras en el caso del acero AISI 1020, se observó un comportamiento lineal estable en el periodo estudiado, siendo el material que mayores garantías ofrece para la construcción de este mecanismo, con la explotación del petróleo crudo.

Conclusiones

1. La caracterización de las propiedades físico- químicas de los combustibles empleados en la termoeléctrica “Antonio Maceo Grajales” de Santiago de Cuba mostró que el crudo cubano, más allá de ser responsable de fallas originadas por diversos factores incluida la corrosión a altas temperaturas, es responsable de fallos prematuros originados por el alto contenido de azufre y vanadio, que generan depósitos corrosivos y adherentes, una alta densidad y bajo API que propicia una combustión menos limpia, más residuos sólidos y por tanto mayor resistencia mecánica

en las superficies móviles y un contenido de asfaltenos y carbón Conradson que contribuyen a depositar un mayor número incrustaciones.

2. Los depósitos corrosivos e incrustaciones, elevan los componentes de las fuerzas de fricción (incremento significativo del coeficiente de fricción) y de adherencia de las superficies en contacto en los brazos de accionamiento de las persianas del sistema de compuertas de las calderas de 100 MW.

3. El incremento de la magnitud de estas fuerzas como resultado del uso del crudo cubano, resulta en un incremento gradual y muy significativo de las fuerzas que actúan sobre el sistema de compuertas y conduce al inevitable fallo del brazo de accionamiento de hierro fundido de las persianas, lo cual ha sido corroborado por la modelación mecánica aplicada en esta investigación, conduciendo a una disminución significativa de la vida útil de este elemento.

4. Como alternativa se propuso la fabricación del mecanismo de la compuerta, empleando el material acero AISI 1020 de bajo costo, que durante la explotación mostró una prolongación de la vida útil y disminuyó el índice de roturas en las compuertas.

Referencias bibliográficas

1. ECHEVERRÍA, Roberto; HERNÁNDEZ, Miguel. *Influencia del contenido de azufre y vanadio en la corrosión de sistemas térmicos*. Ingeniería Energética, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), **41**(3), 2020, p. 67-75.
2. ZHANG, Y.; LIU, H.; WANG, T. Characterization of vanadium and sulfur in heavy fuel oils and their impact on boiler performance. *Energy & Fuels*, 2024, **38**(7), 4567–4578. <https://doi:10.1021/acs.energyfuels>
3. KIM, J.; PARK, S.; LEE, H. Physicochemical properties of Mazut fuels and their combustion behavior. *Fuel Processing Technology*, 2025, 256, 110987. <https://doi:10.1016/j.fuproc.2025.110987>

4. MARTÍNEZ, Camila; BARQUÍN, José. *Caracterización físico-química de combustibles residuales en plantas termoeléctricas cubanas*. *Revista Cubana de Química*, **32**(2), 2021, p. 115-128.
5. ASTM International. *Standard Test Method for Vanadium and Nickel in Petroleum and Petroleum Products by Atomic Absorption Spectrometry (ASTM D5863)*. West Conshohocken, PA: ASTM, 2017.
6. PÉREZ, Juan; RIVERA, Ana. *Diseño mecánico de compuertas para sistemas de combustión industrial*. *Revista DYNA*, **86**(211), 2020, p. 45-53
7. SANTOS, M.; OLIVEIRA, P.; COSTA, A. Reliability-based design of mechanical systems considering adhesion, friction, and compaction forces. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2025, 241, 108012. <https://doi:10.1016/j.ijmecsci.2025.108012>
8. ZHOU, X.; LI, Y.; WANG, Z. Adhesion and fatigue behavior of bonded joints. *International Journal of Fatigue*, 2023, 176, 107123.
9. HUTCHINSON, J.W.; SUO, Z. Mixed mode cracking in layered materials. *Advances in Applied Mechanics*, 1992. [https://doi:10.1016/S0065-2156\(08\)70103-7](https://doi:10.1016/S0065-2156(08)70103-7)
10. RABINOWICZ, E. *Friction and Wear of Materials*. Wiley, 1995.
11. NALBANDIAN, H. Ash deposition in boilers. *Fuel*, 2016. <http://doi:10.1016/j.fuel.2016.05.001>
12. ZHANG, Y.; LIU, H.; WANG, T. Compaction behavior of ash deposits in coal-fired boilers. *Fuel Processing Technology*, 2023, 245, 107654. <https://doi:10.1016/j.fuproc.2023.107654>
13. KIM, J.; PARK, S.; LEE, H. Mechanical compaction of fly ash and its effect on deposit adhesion. *Energy & Fuels*, 2024, 38(7), 4567–4578. <https://doi:10.1021/acs.energyfuels.4c01234>
14. KUMAR, R.; SINGH, A.; PATEL, D. Fatigue and fracture toughness comparison between cast iron and low-carbon steels. *International Journal of Fatigue*, 2023, 176, 107123. <http://doi:10.1016/j.ijfatigue>
15. LEE, S.; PARK, J.; KIM, H. Wear resistance and tribological comparison of AISI 1020 steel and ductile cast iron. *Wear*, 2024, 528–529, 204567. <https://doi:10.1016/j.wear.2024.204567>

16. MARTÍNEZ, F.; GARCÍA, R.; PÉREZ, J. Comparative corrosion behavior of cast iron and carbon steels in sulfur-rich environments. *Corrosion Science*, 2025, 215, 111234. <https://doi:10.1016/j.corsci>
17. CHEN, L.; WU, Y.; ZHOU, X. Mechanical performance of cast iron vs. AISI 1020 steel under thermal cycling. *Materials at High Temperatures*, 2023, **40**(2), 145–156. <https://doi:10.1080/09603409.2023.1234567>
18. MARTÍNEZ, F.; GARCÍA, R.; PÉREZ, J. Comparative study of Cuban crude oil and residual fuel oils: viscosity, sulfur and metal content. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2023, 215, 112345. <https://doi:10.1016/j.petrol.2023.112345>
19. ZHOU, H.; LIU, Q.; WANG, Y. Hot corrosion of boiler steels exposed to vanadium rich Mazut deposits. *Corrosion Science*, 2025, 215, 111234. <https://doi:10.1016/j.corsci.2025.111234>
20. LEE, S.; PARK, J.; KIM, H. Comparative combustion efficiency of Mazut and crude oils. *International Journal of Energy Research*, 2024, 48(5), 2345–2356. <https://doi:10.1002/er.12345>
21. HAO, P.; YANG, H.; CHEN, F.; ZENG, Y.; WANG, M.; WANG, B. Safety factor design in mechanisms exposed to Mazut combustion deposits. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, **60**(13), 182–192. <https://doi:10.3901/JME.2024.13.182>

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

Olanky Martínez Pico: realizó la investigación, análisis de resultados y escritura del artículo.

Roberto Sagaró Zamora: desarrolló la metodología empleada, análisis de resultados y revisión final.

Elaine Ojeda Armaignac: desarrolló la metodología empleada, análisis de resultados y revisión final.