

Comportamiento operacional de grupos electrógenos: particularidades del índice de consumo específico de combustible

Operational behavior of generating sets: particularities of the specific fuel consumption index

Aliniuska Noa-Ramírez^I, Reineris Montero-Laurencio^I, Arístides Alejandro Legrá-Lobaina^{II}, Alien Reyes-Almaguer^{III}, Dilsania Maresma-Laurencio^{IV}

I. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. Holguín. Cuba

II. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Facultad de Geología y Minas. Holguín. Cuba

III. Empresa Productora de Níquel, Comandante Ernesto Che Guevara. Holguín. Cuba

IV. Empresa Puerto Moa. Holguín. Cuba

Correo electrónico: anoar@ismm.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 4 de abril de 2017

Aceptado: 20 de julio de 2017

Resumen

Fue analizado el método de cálculo del índice de consumo de combustible de Grupos Electrógenos Diésel; se caracterizó esta tecnología considerando los distintos niveles de carga y fue presentado el resultado en forma gráfica. En el proceso de combustión se caracterizó el comportamiento de las temperaturas y presiones del diésel, del lubricante, del aire y del líquido refrigerante con respecto al índice de consumo de combustible. Mediante el método de estimación UPD han sido modelados matemáticamente estos comportamientos, asumiendo que

dependen de los niveles de carga y el tiempo de operación del punto donde se estima. Con la presente investigación y mediante un estudio experimental se definieron las regularidades del comportamiento operacional de los grupos electrógenos diésel durante su trabajo al 75 %, 80 %, 90 % y 100%.

Palabras claves: índice de consumo de combustible, grupos electrógenos diésel, método de estimación UPD, estudio experimental, modelo matemático.

Abstract

The calculation method of the fuel consumption index of Diesel Generating Sets was analyzed; this technology was characterized considering the different load levels and the result was presented in graphic form. In the combustion process, the behavior of the temperatures and pressures of diesel, lubricant, air and coolant with respect to the fuel consumption index was characterized. Using the UPD estimation method, these behaviors have been modeled mathematically, assuming that they depend on the load

levels and the operating time of the point where it is estimated. With the present investigation and by means of an experimental study the regularities of the operational behavior of the diesel generator sets during their work were defined at 75%, 80%, 90% and 100%.

Key words: fuel consumption index, diesel generating sets, UPD estimation method, experimental study mathematical model.

Introducción

Esta investigación se centra en el análisis de la operación de grupos electrógenos diésel (GED) que se usan en baterías (BGED). Estas plantas operan sincronizadas (régimen paralelo) al Sistema Electroenergético Nacional (SEN) o de forma aislada (régimen isla) en los horarios picos cuando existe déficit de generación o ante contingencias que clasifiquen como situaciones excepcionales [1].

Ante el creciente costo del combustible fósil, la limitada capacidad instalada de estas plantas y la necesidad de utilizarlas a la máxima potencia de generación disponible, resulta necesario analizar las variables operacionales (VO) que inciden en el consumo del combustible (Cc) del GED de estas plantas.

El fabricante establece las VO, conocimiento científico-técnico que se obtiene generalmente de los experimentos que se le realizan en el conjunto motor de combustión interna y generador en bancos de pruebas, además de las pruebas de consumo de combustible que efectúa el fabricante y los especialistas de mantenimiento y operación de la BGED durante el periodo de amortización y de explotación de la planta. Para estos trabajos se toma como guía las normas ISO 8528-1, 8528-3 y 3046-1 que regulan las pautas relacionadas con: la potencia de salida, los valores de corrección de la temperatura, presión, el ajuste de potencia y del consumo de combustible en el GED.

En los últimos 15 años los estudios realizados en Cuba en relación con los grupos electrógenos se centran en un análisis de la eficiencia operacional [2]. Dentro de los aspectos más pertinentes que se abordan están: la

distribución económica de la carga de los motogeneradores en régimen paralelo o isla para minimizar el consumo y el costo del combustible [3-5]; la identificación de las causas de algunas ineficiencias en la operación del motor de combustión interna (MCI) a través de diagnósticos técnicos por análisis de tendencia; el análisis de fiabilidad para el pronóstico de fallo [6,7] y los métodos estadísticos para caracterizar el consumo de aceite. [8].

Como insuficiencia de las investigaciones mencionadas anteriormente se puede mencionar que no se considera el efecto que las VO tienen en el comportamiento del Cc y de índice de consumo específico de combustible (Ce). Para poder estimar racionalmente el Cc y calcular el Ce real, se debe poder formalizar las regularidades de las variables operacionales para cada característica operacional (niveles de carga), debido a que la interrelación entre las VO y el Ce, les permite a los operadores conocer los niveles de carga factibles a los que se deben de operar los GED.

En el comportamiento del Ce inciden un conjunto de factores relacionados con la potencia a generar según la demanda del SEN, los niveles de carga que se fijen en el GED, las características del combustible suministrado (viscosidad, contenidos de azufre, poder calórico, densidad), las mezclas que se realizan en los tanques de almacenamiento con combustibles de distinta calidad, los errores de medición y pérdidas del combustible así como las pérdidas de energía eléctrica. Debido al elevado grado de incertidumbre en los factores que condicionan el Ce, se hace necesario realizar un muestreo de los estados de las VO e identificar patrones (o reglas) que permitan caracterizar el comportamiento operacional de los GED.

Basado en todos los aspectos anteriores, el presente trabajo se propone realizar un análisis integral acerca del índice de consumo específico de combustible y una caracterización de las principales variables operacionales de los GED. Los resultados se sustentan en experimentos exploratorios del tipo bifactorial para mostrar la interrelación del Ce y las VO involucradas. La información obtenida sirve de base de conocimiento para identificar un modelo que describa las principales regularidades y el comportamiento de las variables operacionales a distintos niveles de carga.

Métodos y Materiales

Una BGED consta de 8 GED y utiliza para el almacenamiento de combustible un sistema de 4 tanques: 3 de recepción, 1 de operación de una capacidad de 100 m³ cada uno y 8 de servicio diario de 2 m³ un tanque para cada uno de los 8 GED con una potencia a la salida de 1888 kW, 8 transformadores (TF) 0,48/13,8 kV y 2,5 MW que se conectan por medio de una barra a la entrada de un transformador de fuerza (TP) con una potencia de 20 MVA, encargado de elevar la tensión de 13,8/33,5 kV y de conectarse a la subestación que distribuirá la energía, además cuenta cada GED con un sistema de Control Automático del Generador (*Automatic Generator Control_AGC*) que supervisa y monitorea las VO.

En los tanques de recepción, de operación, y de uso diario para determinar las existencias físicas del combustible se utiliza la técnica de medición de aforos geométricos que tienen una incertidumbre del 0,5 % de desviación, certificada por la oficina territorial de normalización (OTN). Las mediciones del combustible en los tanques de almacenamiento, se realizan utilizando una cinta milimetrada y las pastas indicadoras de nivel, tanto de agua como combustible certificada por centro de metrología territorial (CMT) y se realiza la corrección de la densidad del combustible, mediante la estimación del valor diario de la temperatura atmosférica media promedio ajustada a las diferentes épocas del año, y se realiza la corrección de la densidad ponderada, esta se calcula a partir de la densidad referida a 15 °C y el factor de corrección certificado por ASTM D 4052, lo cual introduce un error del 1 %, lo que provoca un incremento del índice de consumo debido a que la densidad disminuye sensiblemente a medida que aumenta la temperatura, según la ISO12917-1,2002.

De los GED se analizan los principales parámetros y factores que garantizan en el MCI el correcto funcionamiento de los subsistemas aire de sobrealimentación y de escape; de combustible con sistema de inyección a base de electro-inyectores (*common-rail*); de aceite lubricante, de refrigeración, y de gestión electrónica y de control, documentados en el manual técnico *Daimler Chrysler. Technical Publication. Motor Diesel 16V4000G.1*. Se seleccionan las VO y las variables de producción (VP) que mayor incidencia tienen en el Ce. Como VO se analizan para los niveles de carga (K, %): 75, 80, 90 y 100%: las presiones en bar (10⁵Pa) y las temperaturas en (°C): del aceite (Ta, Pa), el aire (Tai, Pai), el combustible (Td, Pd) la temperatura del líquido refrigerante (Tr) y las VP: consumo de combustible (Cc, l), la potencia de generación bruta (PgB, kWh) y la densidad del combustible (ρ_c , g/l).

Para obtener datos sobre el comportamiento de las VO se realizaron experimentos exploratorios de diseño bifactorial con 4 niveles para la variable K y con 6 niveles para la variable tiempo (t, min). Con técnicas manuales se realizó la medición del Cc en este caso t con 1 nivel. Se realizaron réplicas del experimento durante 15 días desde las 8:30 am hasta las 10:30 am, horario en que las BGED generalmente operan sincronizadas al SEN. Durante los experimentos se constató que la temperatura ambiente variaba entre 26 y 28 °C y la humedad relativa entre el 50 y 55 % en condiciones ambientales, cumpliendo con la norma ISO 3046-1.

La base de datos se obtuvo mediante el software Eros que son supervisados por el AGC, y para el almacenamiento y la estructuración de la base de datos se empleó el software Microsoft Excel. Con el propósito de garantizar la calidad y la limpieza de los datos, se realizó un estudio exploratorio con técnicas (clasificación y correlación) y herramientas (Wekey Matlab) de minería de datos [9], métodos que son factibles para este tipos de estudio en sistemas de generación distribuida y grupos electrógenos [10-12].

Para la modelación de las superficies $VO = f(K,t)$ y $VP = g(K,t)$ se empleó el Método UPD que consiste en estimar la variable dependiente como una combinación lineal de potencias de distancias (PD)[13].

En el caso de la modelación de las VO se dividió la base de datos en dos, una mitad para el entrenamiento y la otra para la validación. Y se usa el estimador (método UDP) para la modelación de curvas de superficie que favorecen la obtención de los modelos matemáticos de las temperaturas y las presiones, a partir de los cuales se construyen los gráficos de isofranjas en 2D.

Para el análisis del método de cálculo del índice de consumo específico de combustible de los GED se parte de la ecuación que actualmente se usa en la BGED, la cual establece la relación entre el C_c , la ρ_c y la PgB_i (ver ecuación 1).

Donde PgB_i : es la potencia de generación de cada unidad de generación i , o sea, $PgB = \sum_{i=1}^m PgB_i$

$$Ce = \frac{C_c}{PgB} \cdot \rho_c \quad (1)$$

En la que C_c : consumo de combustible (l), ρ_c densidad promedio del combustible utilizado (g/l), y PgB_i : generación de energía eléctrica bruta, (kWh). La PgB_i relaciona la generación neta (PgN_i , kWh), Hod_i las horas de operación diaria (h) y Cv_j demanda de cada ventiladores de los motores diésel turboaspirador j , (de 62,1 kW) variable que no es controlada por el AGC, como se presenta en la ecuación (2).

$$PgB_i = PgN_i + Hod_i \cdot Cv_j \quad (2)$$

Para determinar los problemas que inciden en la efectividad del método de cálculo del índice de consumo de combustible, se inicia el análisis a partir de los métodos de medición y corrección en el sistema de tanque donde se identificaron problemas de medición y de almacenamiento, esencialmente porque no se cuenta con instrumentos de medición (flujómetros) para medir el combustible almacenado, el cual además, está sometido a cambios de temperaturas, los cuales deben mantenerse en el rango entre 15 °C y 40 °C. Superior a este rango se producen variaciones de densidad y la viscosidad del combustible respectivamente según la ASTM D 4052 y D 445.

El consumo de combustible se determina por medio de la ecuación (3) establecida por el centro de metrología nacional [14]

$$C_c = V_{TQ-00} - V_{TQ-24:00} + V_{rec} \quad (3)$$

Donde V_{TQ-00} : es el volumen de combustible almacenado en los tanques a las 00 horas, $V_{TQ-24:00}$: es el volumen de combustible almacenado en los tanques a las 24:00 horas, y V_{rec} : es el volumen de combustible recibido de los camiones cisternas durante las 24 horas transcurridas, en litros, l.

Cada una de estas variables utilizadas para calcular el C_c presenta errores que incide en que el valor calculado del C_e presente también errores:

El valor del volumen de combustible almacenado en los tanques tiene un error aproximadamente igual a 0,5 % del volumen almacenado, debido a que este es el error con que se certifica la tabla de aforo correspondiente, teniendo en cuenta que las mismas no están referidas a un valor dado de temperatura y que esto se introduce un error adicional en el valor de la capacidad del tanque. Además, como no se trabaja con los valores del volumen de combustible referidos a una temperatura de referencia se añade otro error por la dilatación del combustible con la temperatura que resulta significativo (error de 1 %), normado en ISO12917-1,2002.

Debido al valor del volumen de combustible recibido en los camiones cisterna, también se considera el error en la calibración del contador del camión. Como no se tiene en cuenta los valores del volumen de combustible referidos a una temperatura de referencia también se tiene el error adicional por el mismo fenómeno de la dilatación del combustible con la temperatura igual al 1%.

Este error se evalúa por medio de las ecuaciones (4) y (5):

$$\Delta(C_c) = \sqrt{(0,01 \cdot V_{TQ-00})^2 + (0,01 \cdot V_{TQ-24:00})^2 + (0,01 \cdot V_{rec})^2} \quad (4)$$

$$\Delta(C_c) = 0,01 \cdot \sqrt{(V_{TQ-00})^2 + (V_{TQ-24:00})^2 + (V_{rec})^2} \quad (5)$$

Como la cantidad de combustible en los 4 tanques de 100 m³ y 8 tanques de servicio diarios de 2 m³, es un valor elevado en comparación con el combustible que se consume durante la operación de los GED, el $\Delta(Cc)$ es significativo e incide en que el error relativo $\delta(Cc)$ sea importante tal como se presenta en la ecuación 6:

$$\delta(Cc) = \frac{\Delta(Cc)}{C_c} \quad (6)$$

Puede aceptarse razonablemente que el error relativo del consumo específico C_e es igual al consumo específico de C_c , tal como se muestra en (7):

$$\frac{\Delta(C_e)}{C_e} = \frac{\Delta(C_c)}{C_c} \quad (7)$$

Entonces el error absoluto en la determinación del índice de consumo se determina por la ecuación (8):

$$\Delta(C_e) = \left(\frac{\Delta(C_c)}{C_c} \right) * C_e \quad (8)$$

Se observa que el $\Delta(C_e)$ que se obtiene del C_e calculando a partir del consumo de combustible continua es considerablemente grande, por lo tanto se debe de agregar $\Delta(C_c)$ a la ecuación 1.

$\Delta(C_c)$, como se muestra en la ecuación 9.

$$C_e = \frac{[C_c - \Delta(C_c)]}{PgB} \cdot \rho_c \quad (9)$$

Además de los problemas en la medición del C_c planteados en [14], se considera necesario para el análisis integral del método de cálculo del C_e la medición y estimación de las pérdidas de combustible. Se determinó que las pérdidas de combustible más significativas para cada GED (p_{c_i}) son: por concepto de arranque (p_{ca}) de 18,56 l/min, por el trabajo en vacío (p_{iv}) de 19,51 l/min y por mantenimiento correctivo (p_{matt}) de 38,07 l/min. Estas pérdidas de combustibles están presentes durante el tiempo de operación de los GED, por lo tanto se debe de estimar el error en que se incurre al no tenerlas en cuenta durante el cálculo del C_e , estas variables se deben de agregar a la ecuación (9). Tal como se muestra en la ecuación (10).

$$C_e = \frac{[C_c - (\Delta(C_c) + p_{c_i})]}{PgB} \cdot \rho_c \quad (10)$$

Siendo p_{c_i} pérdidas de combustible (l), donde $p_{c_i} = p_{ca_i} + p_{iv_i} + p_{matt_i}$

A la ecuación (10) se debe añadir las pérdidas de energía eléctrica (p_e), entre las más significativas se encuentran las pérdidas de energía eléctrica en el MCI para el calentamiento del líquido refrigerante (p_{lr}) en cada GED es de 9 kW/min y en los transformadores elevadores (p_t) el promedio es de 1,1 kW esta VO no es controlada por el AGC.

Finalmente queda la ecuación de cálculo del C_e como se muestra a continuación en (11) para que la estimación del C_e .

$$C_e = \frac{[C_c - (\Delta(C_c) + p_{c_i})]}{(PgB + p_{e_i})} \cdot \rho_c \quad (11)$$

Siendo p_e pérdidas de energía eléctrica (kW), donde $p_{e_i} = p_{lr_i} + p_{T_i}$

Como se puede apreciar (en la ecuación 10) el valor del C_e depende de varias variables (pérdidas de combustible y energía eléctrica) que actualmente no se miden o no se analizan como coeficientes o errores de medición del proceso de producción de energía de los GED. Por lo tanto, al no disponer de una base de datos, ni registros (hojas de electrónicas de Microsoft Excel) de las pérdidas: p_{ca} , p_{iv} , p_{matt} y p_{lr} , no se puede determinar el nivel de incidencia de las mismas en el método de cálculo del C_e .

Resultados y Discusión

Para el experimento se seleccionó el GED con más horas de operación anual acumuladas y que además, había recibido mantenimiento capital. Se analiza el comportamiento del C_e en el conjunto GED y TF de 2,5

MW y el C_e del GED para el cual no se evalúa el C_v y la P_T . Se constató que en ambas curvas en la medida en que se incrementa los niveles de carga el C_e disminuye y que la diferencia de las curvas radica en la estimación de las pérdidas en el cálculo de este índice, figura 1. Este resultado nos permite plantear la importancia que tiene para la eficiencia energética de la BGED incorporar las pérdidas: p_{ca} , p_{iv} , p_{matt} y p_{lr}

mencionadas en materiales y métodos, además del error de medición del C_c , como se plantea en la ecuación 11.

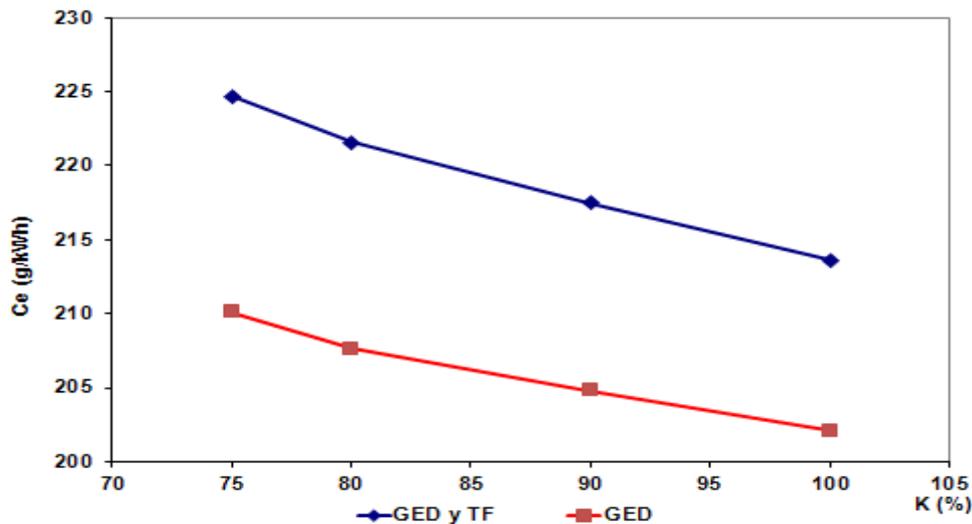


Fig. 1. Comportamiento del C_c en un GED y en un sistema motogenerador

Caracterización de las variables operacionales vs índice de consumo de combustible

Inicialmente se obtuvo una representación gráfica de los valores de: T_a , T_{ai} , T_d , T_r , y P_a , P_{ai} , P_d , y se calcularon los C_c : 224,7, 221,75, 217,48 y 213,63 g/kWh respectivamente.

El comportamiento de los indicadores se muestra en la figura 2 en donde se observa la tendencia de las presiones a disminuir, a excepción de la P_{ai} que se incrementa para cada K. Las temperaturas aumentan en la medida que se incrementa K.

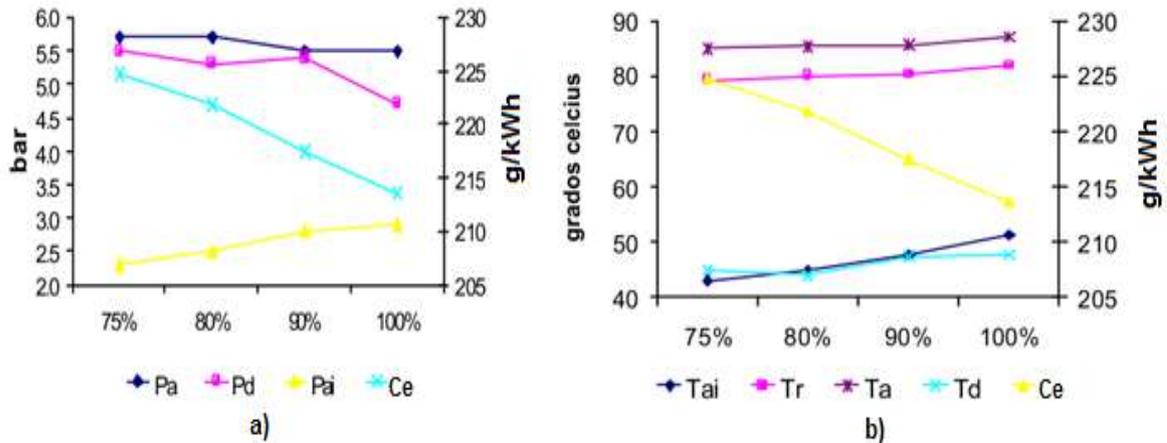


Fig. 2. Comportamiento del C_c vs presiones a) y temperaturas b) para diferentes K. En la tabla 1 se muestran los valores máximos de los experimentos exploratorios para el 75 % y el 100 %.

Tabla 1. Valores máximos de las presiones y temperaturas en el MCI

Niveles de Carga GED (%)	Presiones MCI, bar (10^5 Pa)			Temperaturas MCI ($^{\circ}$ C)			
	P_a	P_{ai}	P_d	T_a	T_{ai}	T_d	T_r
75 - 100 (%)	5,7 - 5,5	2,3 - 2,9	5,5 - 4,7	85 - 87,1	43 - 51,3	44,8 - 47,7	79,3 - 81,8

Como resultado se considera que la tendencia a disminuir de la P_a y de la P_d indica que el MCI necesita mantenimiento, aunque está dentro de los rangos normados por el fabricante, tabla 2; que la tendencia a aumentar de la P_{ai} representa que el sistema de combustión del MCI está operando de forma eficiente.

También se analizó, que en el caso particular del T_a solo faltó $0,1^{\circ}$ C para llegar el límite superior permisible, tabla 2, lo que significa que en cualquier momento debe de ocurrir un disparo o alarma gestionada por el sistema de control del MCI. Independientemente de este caso, la tendencia a aumentar de las T_{ai} y T_d debe de estar relacionada con el proceso de la cámara de combustión del MCI, proceso que provoca un aumento en la disipación de calor en el interior del MCI que se refleja en el comportamiento de las T_r y T_a .

Tabla 2. Valores mínimo y máximo permisibles de presiones y temperaturas en el MCI normado por el fabricante de GED (según ISO 8528-3)

Presiones MCI, bar(10 ⁵ Pa)			Temperaturas MCI (°C)			
Pa	Pai	Pd	Ta	Tai	Td	Tr
5,0 - 6,0	2,3 - 3,2	4 - 7	82 - 87	35 - 60	25 - 50	82 - 87

En el cambio de régimen de carga del 80 % al 90 % se identificó un comportamiento estable de los valores de Pd y Td, es decir, en este intervalo el proceso de combustión es eficiente, vea la figura 2 a. Además se considera que en estos K es donde se aprovecha todo el combustible, permitiéndole al MCI desarrollar más trabajo útil que responde a la variación de K.

Estos resultados sugieren que el comportamiento del Ce depende principalmente de las Tai y Td. En la figura 2b se observa que en la medida en que la Tai y Td se incrementan, los Ce disminuyen al aumentar los K y consecuentemente la velocidad en rpm del MCI.

Modelación de las variables operacionales a distintos niveles de carga

Se identificaron los valores máximos de las temperaturas del diésel, el lubricante, el aire utilizado en el proceso de combustión y el líquido refrigerante (ver la tabla 3) durante el experimento y se constató que todas se incrementan. El incremento de la Tr es 3,6 °C, de la Ta es de 2,5 °C, de las Tai y Td es de 8,1 °C respectivamente; y que la Td mantiene valor estable de 60 °C al 80 % y al 90 %. Además se observó que del 90 % al 100 % la Ta disminuye en 1,6 °C. Se considera que este comportamiento se deba al estado técnico del DEG.

Tabla 3. Valores máximos de las temperaturas para los diferentes niveles de carga

Temperaturas MCI (°C)	Niveles de Carga del GED (%)			
	75%	80%	90%	100%
Tai	43,6	46,2	49	51,7
Td	55,9	60	60	64
Ta	83,9	85,7	89,1	87,5
Tr	79,6	80	81,30	82,1

Respecto a las presiones (en este experimento no se analiza el líquido refrigerante) se identificaron los valores máximos del diésel, el lubricante, el aire utilizado en el proceso de combustión, tabla 4. Se pudo observar un incremento en Pai y Pade 0,5 bar y de 0,2 bar respectivamente, y un decremento en la Pd de 0,9 bar. También se identificó que Pa disminuye en 0,2 bar desde el 80 % al 90%, coincidiendo con el comportamiento de Ta para los mismos niveles de carga.

Tabla 4. Valores de las presiones para los diferentes niveles de carga

Presiones MCI bar (10 ⁵ Pa)	Niveles de Carga del GED (%)			
	75%	80%	90%	100%
Pai	2,5	2,5	2,8	3
Pd	6,2	5,7	5,5	5,3
Pa	5,8	5,9	5,7	6

Seguidamente para estimar y pronosticar el comportamiento de las variables Td, Ta, Tai, Tr, Pd, Pa y Pai, se obtienen los modelos y los gráficos de isofranjas en 2D, figuras 3 y 4. Nótese la similitud entre los resultados de los gráficos y el comportamiento de los indicadores descritos de la figura 2, lo que demuestra la eficacia de los modelos a través del estimador UPD.

Modelos de las temperaturas:

$$Td = 0,1441347 d_{1P} + 0,0810973 d_{2P} + 0,0173248 d_{3P} + 0,0295659 d_{4P} + \dots - 0,0953378 d_{93P} + 0,0132057 d_{94P} - 0,0754243 d_{95P} - 0,1732924 d_{96P} + 51,1427083$$

$$Ta = -0,0064779 d_{1P} - 0,0140608 d_{2P} + 0,0342084 d_{3P} + 0,0579087 d_{4P} + \dots - 0,0122918 d_{93P} + 0,0236435 d_{94P} - 0,06072416 d_{95P} - 0,0812559 d_{96P} + 85,215625$$

$$Tai = 0,1649114 d_{1P} + 0,2391873 d_{2P} + \dots + 0,18766506 d_{3P} + 0,2208530 d_{4P} + \dots - 0,0952858 d_{93P} + 0,1216652 d_{94P} - 0,0706989 d_{95P} - 0,3744569 d_{96P} + 46,905208$$

$$Tr = -0,0097130 d_{1P} + 0,0736403 d_{2P} + 0,0776865 d_{3P} + 0,0422114 d_{4P} + \dots - 0,0077222 d_{93P} - 0,0238926 d_{94P} - 0,0350609 d_{95P} - 0,0327506 d_{96P} + 80,2427083$$

Modelos de las presiones:

$$Pd = -0,0248498 d_{1P} - 0,0181088 d_{2P} - 0,0247246 d_{3P} - 0,0020803 d_{4P} + \dots + 0,0034430 d_{93P} + 0,0036505 d_{94P} + 0,0034923 d_{95P} + 0,0132720 d_{96P} + 5,453125$$

$$Pa = 0,0015468 d_{1P0} + 0,01491655 d_{2P} - 0,00244439 d_{3P} + 0,0292008 d_{4P} + \dots - 0,0027819 d_{93P} - 0,0027627 d_{94P} - 0,0118165 d_{95P} + 0,0135349 d_{96P} + 5,64166666666667$$

$$Pai = -0,0007933 d_{1P} - 0,0039044 d_{2P} - 0,0033904 d_{3P} - 0,0033222 d_{4P} + \dots + 0,0007631 d_{93P} - 0,0039481 d_{94P} - 0,0059268 d_{95P} - 0,0109211 d_{96P} + 2,6614583$$

Donde d_{iP} es la distancia Euclidiana entre las coordenadas de los puntos $P_i = (k_i, t_i)$ y $P = (k, t)$, como se muestra en la ecuación 12 [15].

$$d_{iP} = \sqrt{(k_i - k)^2 + (t_i - t)^2} \tag{12}$$

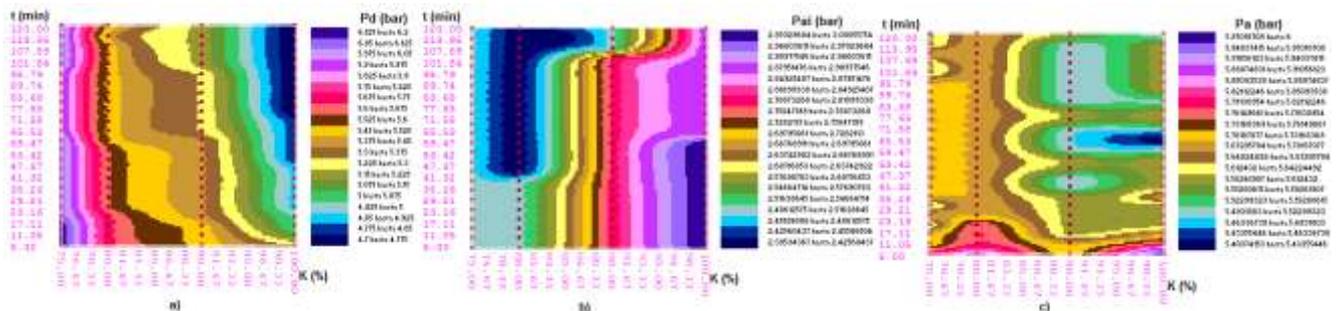


Fig. 3. Isofranjias en 2D de las presiones, bar ($10^5 Pa$): a) Pd, b) Pai y c) Pa

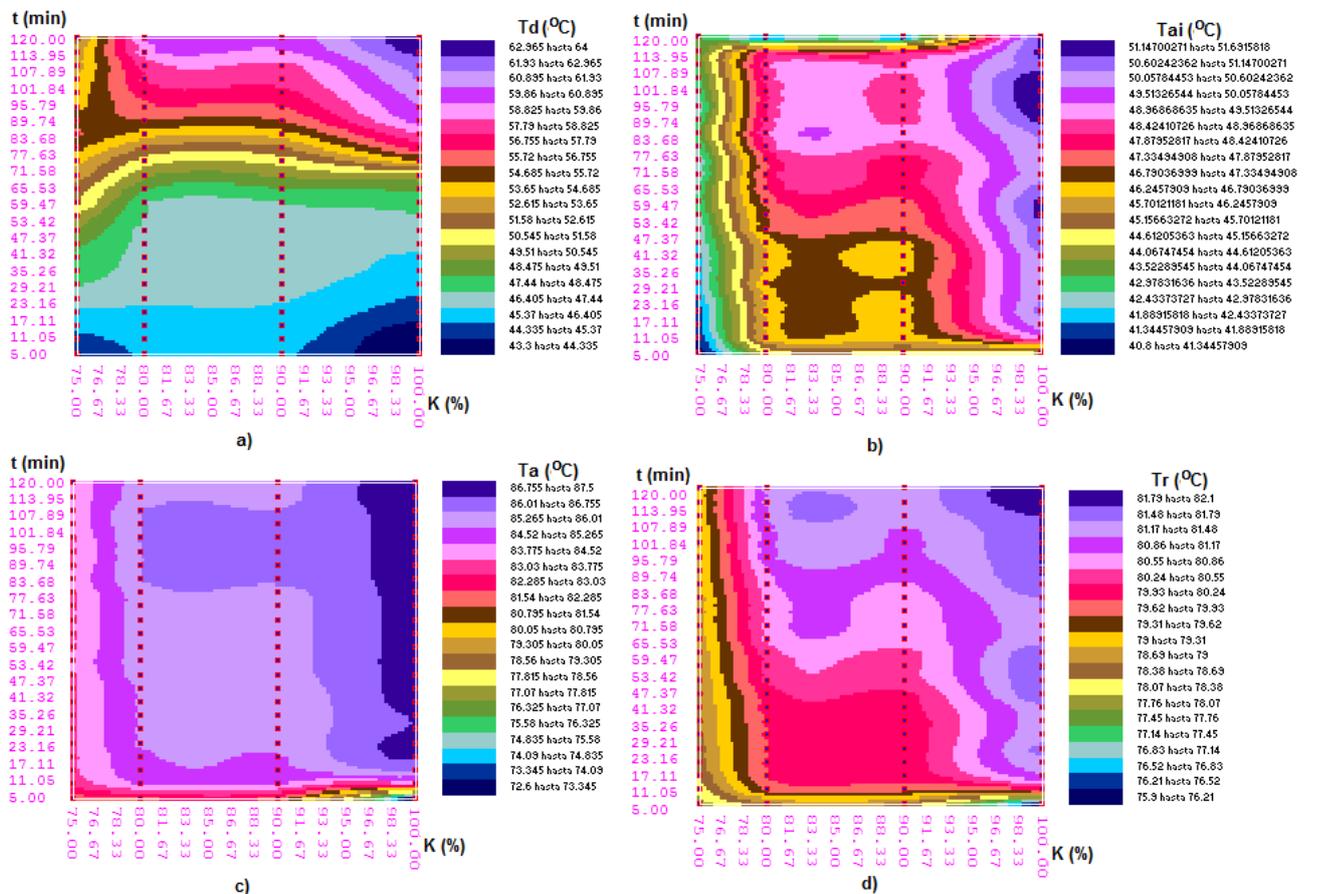


Fig. 4. Isofranjias en 2D de las temperaturas, ($^{\circ}C$): a) Td, b) Tai, c) Ta y d) Tr

A partir de los patrones obtenidos con el estimador de modelación de isofranjas, se pueden plantear las siguientes regularidades en el comportamiento de las variables en relación con los niveles de carga:

1. La P_d disminuye en la medida en que se incrementan los niveles de carga.
2. Las T_a y T_{ra} aumentan con el incremento de los niveles de carga.

Estas observaciones nos permiten plantear que el estado técnico del GED requiere de una revisión.

La T_d aumenta en la medida en que se incrementa el nivel de carga y el tiempo de trabajo y la P_d disminuye ante el incremento del nivel de carga.

3. Las T_{ai} y P_{ai} en ambas aumentan progresivamente con el incremento de los niveles de carga.

Estas observaciones nos permiten conocer que el subsistema de combustible con sistema de inyección a base de electro-inyectores y de aire de sobrealimentación y de escape están funcionando bien. Puntualmente se puede considerar por la regularidad 4 que a mayor temperatura en la cámara de combustión se tiene una mejor combustión y la 3 nos permite considerar que es necesario revisar los filtros de combustibles. Se debe enfatizar que para una mayor certeza en la información que se extraen de las regularidades observadas son necesarias más mediciones puntuales en los subsistemas del MCI.

Para obtener una idea operacional de la relevancia de la regularidad 3, se presenta una caracterización del ciclo de utilización de los filtros de combustible de la BGED.

Características de los filtros de combustibles

Los cambios de los filtros de combustibles en los GED analizados se realizaron cada 350 h, teniendo en cuenta que el tiempo de trabajo de estos filtros depende de las características del tipo de combustible que se utilice. Es conocido que cuando P_d disminuye de forma considerable, se activa una alarma en el AGC del GED, indicando bajo nivel de presión en el filtro de combustible, figura 5.

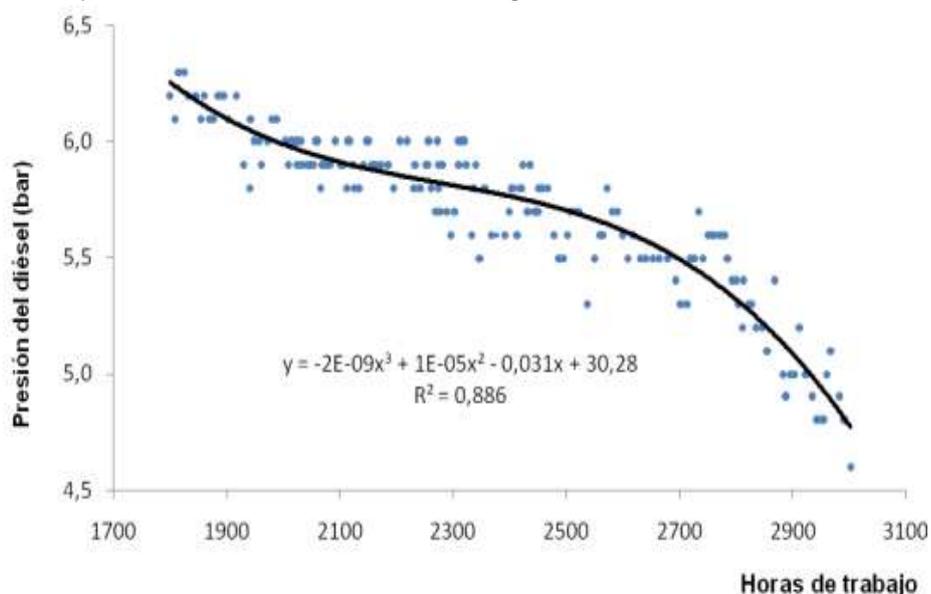


Fig. 5. Caracterización de la vida útil del filtro de combustible hasta las 1287h

Se obtuvo la línea de tendencia que mejor se ajusta al comportamiento de P_d del filtro del GED analizado para un periodo de trabajo de 1800 h hasta 3107 h, o sea, 1287 h de trabajo diario. Se obtuvo un polinomio de tercer orden, $y = -2E-09x^3 + 1E-05x^2 - 0,0313x + 30,283$, con un coeficiente de determinación, $R^2 = 0,886$ (88,6 %), como se muestra en la figura 4. El rango de variación de P_d en el filtro de combustible es de 4,6 bar hasta 6,3 bar, y en promedio la P_d durante el tiempo de trabajo de filtro fue de 5,6 bar.

Conclusiones

Después de realizar un análisis integral acerca de método de cálculo del índice de consumo específico de combustible (g/kWh) en una batería de grupos electrógenos diésel, se concluye que hasta el momento no se consideran el error referido a la medición del consumo de combustible y las pérdidas de combustible y energía eléctrica, lo cual constituye una insuficiencia en el método de cálculo que afecta directamente la evaluación de la eficiencia energética de estas plantas. Se puede corregir esta dificultad a partir de la utilización de la ecuación propuesta número 11.

Se caracterizaron las principales variables operacionales de los GED y se evaluó el comportamiento operacional de los grupos electrógenos diésel, esto trajo como conclusión que estos deben operarse a niveles de carga de 80 % o 90 % haciendo énfasis en la supervisión de las temperaturas y presiones del diésel y el aire, que son los subsistemas que deciden en mayor grado la eficiencia operacional. Además, se propuso un

modelo a partir del método UPD que facilita la formalización de la dependencia del índice de consumo de combustible con respecto a otras variables.

Referencias

1. Best RJ, Morrow DJ, McGowan DJ, et al. Synchronous Islanded Operation of a Diesel Generator. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2007; 22(4):2170-2.
2. De Armas Teyra M, Gómez Sarduy T, Viego Felipe, P. Operación eficiente de bloques generador-transformador en las unidades de generación distribuida. *Revista de Ingeniería Energética*. Septiembre-Diciembre 2012; XXXIII(3):240-9.
3. De la Fé Dotres S, García DJ. Distribución óptima de carga en emplazamientos de generadores. *Revista de Ingeniería Energética*. 2012; XXXIII(1):87-94.
4. Grainger JJ, Stevenson WD. *Análisis de Sistemas de Potencia*. 2da ed. México: McGraw-Hill/Interamericana; 1996.
5. De la Fé Dotres S, Domínguez Fontanil J, Sierra J A. Pronóstico del consumo de combustible de grupos motogeneradores empleando una red neuronal. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*. 2010;1(1-2):53-8.
6. Hidalgo Batista E, Villavicencio Proenza D D. La fiabilidad en motores de combustión interna diésel estacionarios. *Revista Ciencias Holguín*. 2011;XVII:1-10.
7. Hidalgo Batista E. Propuesta de dispositivo para diagnosticar las bombas de alta presión de los grupos electrógenos MTU serie 4000. *Revista Ciencias Holguín*. 2015;XXI:1-9.
8. Hechavarría Pérez J R, Castañeda Sandes J C, Iskander Concepción Y. Análisis del consumo de aceite de motor en grupos electrógenos de la provincia de Holguín. *Revista Ciencias Holguín*. 2015;XXI:1-12.
9. Huang S, Lin J. Enhancement of power system data debugging using GSA based data mining technique. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2002;17(4):1022-4.
10. Figueiredo V, Rodríguez F, Vale Z, et al. An electric energy consumer characterization framework base and data mining techniques. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2005; 20(2):596-8.
11. McArthur S D, Booth C D, McFadyen I T. An agent-based anomaly detection architecture for condition monitoring. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2005; 20(4):1675-6.
12. El-Arroudi K J, Joós G. Data mining approach to Threshold Settings of islanding relays in distributed generation. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2007;22(3):1113-7.
13. Legrá Lobaina A A. Modelos de malla basados en estimadores (A,U,Θ). *Revista HOLOS*. 2017;33(4):88-110.
14. Alonso Preciado L Y, Suárez Piña W. Vías para incrementar la calidad del índice de consumo en los grupos electrógenos de diésel instalados en Cuba. *Boletín Científico Técnico INIMET*. 2011(1):27-41.
15. Legrá Lobaina A A. Método UPD-L para estimar valores de una variable geominera medidos en un conjunto de puntos de R^n . *Revista de Minería y Geología*. 2015;31(1):1-12.