



SECCIÓN CIENCIAS TÉCNICAS

Artículo original de investigación

Procedimiento para la gestión óptima de la disponibilidad de grupos de generación *fuel oil*

Aliniuska Noa Ramírez ^{1*} <https://orcid.org/0009-0001-7726-3621>

Aristides Alejandro Legrá Lobaina ² <https://orcid.org/0000-0002-4793-4754>

Reineris Montero Laurencio ³ <https://orcid.org/0000-0003-0898-5011>

Daniel Mendiola Ellis ¹ <https://orcid.org/0009-00090-7116-9915>

¹ Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Metalurgia Electromecánica, Universidad de Moa Dr. Antonio Núñez Jiménez. Moa, Cuba

² Departamento de Matemáticas, Facultad de Geología y Minas, Universidad de Moa Dr. Antonio Núñez Jiménez. Moa, Cuba

³ Centro de Estudios de Energía y Tecnología Avanzada de Moa, Facultad de Metalurgia Electromecánica, Universidad de Moa Dr. Antonio Núñez Jiménez. Moa, Cuba

* Autor para la correspondencia: alinoaram81@gmail.com

Editor

Lisset González Navarro
Academia de Ciencias de Cuba.
La Habana, Cuba

Traductor

Darwin A. Arduengo García
Academia de Ciencias de Cuba.
La Habana, Cuba

RESUMEN

Introducción: En los sistemas de generación distribuida de energía eléctrica se operan grupos electrógenos *fuel oil* para los cuales, ante una demanda de potencia, se requiere de una gestión de disponibilidad que establezca su futura participación en el sistema eléctrico durante un intervalo temporal que va desde $t = t_a$ hasta $t = t_a + T$. **Objetivo:** Desarrollar un procedimiento para optimizar la gestión de disponibilidad de grupos electrógenos *fuel oil*, a partir de los datos de los fabricantes y del comportamiento histórico de las variables operacionales de los generadores, combinando técnicas y métodos de minería de datos y de programación lineal, para garantizar la eficacia, eficiencia y estabilidad operativa. **Métodos:** Construcción de un algoritmo bajo condiciones de optimización matemática basadas en los principios de historicidad, eficacia, eficiencia y estabilidad. **Resultados:** Para cada generador elegible de grupos electrógenos *fuel oil* se obtienen los rangos admisibles de los niveles de carga y cada uno es particionado de manera que a cada generador se le asocia un conjunto de intervalos en los cuales podrá buscarse su nivel óptimo de carga. Para cada combinación de estos intervalos se definen las condiciones de acotación del modelo que se propone para la optimización matemática al cual se aplica el método simplex de programación lineal obteniéndose un conjunto de configuraciones eficaces de costos mínimos de los niveles de carga de los generadores. **Conclusiones:** A cada configuración de conjunto de configuraciones eficaces se le asigna un índice de costos y de estabilidad, y se selecciona la configuración más aceptable según los valores de ambos índices.

Palabras clave: Generación distribuida de energía eléctrica; grupos electrógenos *fuel oil*; eficacia; eficiencia; estabilidad

Procedure for optimal management of the availability of fuel oil generation groups

ABSTRACT

Introduction: In distributed generation systems of electric power, fuel oil generator groups are operated, for which, given a power demand, an availability management is required to establish their future participation in the electrical system during a time interval from $t=t_a$ to $t=t_a+T$. **Objective:** To develop a procedure to optimize the availability management of fuel oil generator groups, based on manufacturer data and the historical behavior of the operational variables of the generators, combining data mining techniques and linear programming methods to ensure operational effectiveness, efficiency, and stability. **Methods:** Construction of an algorithm under mathematical optimization conditions based on the principles of historicity, effectiveness, efficiency, and stability. **Results:** For each eligible generator of the fuel oil generator groups, the admissible ranges of load levels are obtained, and each range is partitioned such that each generator is associated with a set of intervals within which its optimal load level can be sought. For each combination of these intervals, the bounding conditions of the proposed mathematical optimization model are defined, to which the linear programming simplex method is applied, obtaining a set of effective configurations with minimum cost load levels for the generators. **Conclusions:** Each set of effective configurations is assigned a cost index and a stability index, and the most acceptable configuration is selected according to the values of both indices.

Keywords: Distributed generation of electrical energy; fuel oil generating sets; effectiveness; efficiency; stability

INTRODUCCIÓN

El significativo aporte y el impacto por la penetración de los emplazamientos de generación distribuida de energía eléctrica y en las redes ha provocado un cambio de estrategia en la gestión de los sistemas eléctricos; entre ellos los grupos electrógenos. ^(1,2) En el caso de estos merecen especial atención los procedimientos y metodologías para la planificación, organización, control, dirección e innovación, es decir, la gestión de la disponibilidad que satisfaga la participación eficaz, eficiente y estable en un sistema eléctrico. ^(3,4,5)

Tanto la generación base como la generación distribuida con fuentes renovables y las no renovables necesitan ser gestionadas. ^(6,7) En investigaciones recientes se han desarrollado modelos, métodos y estrategias que abordan la disponibilidad y confiabilidad en sistemas de generación distribuida (GD) conectados a un sistema eléctrico en microrredes o integrados en redes inteligentes, ^(8,9,10) también se han empleado técnicas de inteligencia artificial (IA) que permiten optimizar la gestión de la disponibilidad en GD. ⁽¹¹⁾ Estos resultados reflejan la necesidad de desarrollar procedimientos para la gestión de la disponibilidad de la GD con enfoques multidisciplinarios y realizar búsquedas de la forma más efectiva de participación

tomando la disponibilidad y su nivel de penetración sobre la estabilidad operativa para satisfacer la demanda esperada.

En general, algunos autores reconocen que la gestión de la participación de los grupos electrógenos se enfoca desde la descalificación por indisponibilidad, lo cual implica salidas de operación y también desde la disponibilidad que implica la entrada y aporte en horizontes de operación correspondientes con las previsiones de la demanda. ⁽¹²⁾ En otro enfoque la propuesta de diferentes autores es calificar la disponibilidad de los grupos a partir del comportamiento de las variables operacionales, la programación de los mantenimientos y las necesidades diarias de generación. ⁽¹³⁾

En ambos casos la gestión de las necesidades de generación de los grupos electrógenos se realiza de diversas formas y según las características del sistema eléctrico se establecen criterios, modelos y métodos matemáticos que integrados en procedimientos e implementados en herramientas computacionales, permiten la toma de decisiones que facilitan la caracterización de la disponibilidad energética del grupo mediante configuraciones de los niveles de carga que respondan adecuadamente a las necesidades energéticas de los entornos tecnológicos y socioeconómicos en los horizon-

tes temporales considerados, descritos por intervalos de la forma $[ta; ta + T]$ ($T \geq 0$), donde se planifica la futura operación del grupo electrógeno fuel oil (GEFO) con las configuraciones determinadas. ⁽¹⁴⁾ También se define el subintervalo $\Delta t = \frac{T}{m} (m > 0)$ donde se espera que cada configuración particular de la operación sea estable. El valor T generalmente es definido por las necesidades de generación del GEFO (por ejemplo: 24 h); el valor de m se asume considerando que según este aumenta entonces la gestión será más precisa, pero a costa de cálculos más laboriosos y complejos (siguiendo el ejemplo anterior, para $m = 4$ se tiene que $\Delta t = 6$ h).

Sustentando estas ideas varios investigadores han contribuido con estudios interconectados sobre la gestión de grupos electrógenos como sistemas de GD. ⁽¹⁵⁾ De esta manera propone un modelo de optimización para el emplazamiento de grupos electrógenos sincronizados con el sistema eléctrico nacional y además se ha estudiado el impacto energético y localización óptima de emplazamientos de DG, en especial grupos electrógenos, con el objetivo de mejorar la confiabilidad y disponibilidad del sistema eléctrico. ^(16,17)

Se puede destacar que en ninguno de los casos revisados la gestión de disponibilidad (GDisp) es considerado un proceso de toma de decisiones con enfoque histórico-predictivo que permite evaluar las decisiones de operación de los grupos electrógenos para dar respuesta eficaz a una demanda de potencia $Pd(t)$ en un contexto temporal predeterminado, con eficiencia económica óptima y estabilidad, dentro de los rangos acordados por expertos. Cuando se tiene esa respuesta, se asume que la GDisp es satisfactoria para las condiciones dadas.

En particular debe señalarse que, de todas las decisiones, la elección primaria del curso de acción es cualitativa y consiste en decidir entre 2 posibles alternativas: operar o no operar un grupo electrógeno o un emplazamiento. Si se decide operar entonces se determinarán las configuraciones para obtener los niveles adecuados de sus cargas disponibles.

Un método tradicional para decidir sobre la operación de un grupo electrógeno es calificar su disponibilidad según el comportamiento de las variables operacionales (VO). Para ello se analizan los valores de estas variables en las últimas 24 h, se caracterizan las tendencias históricas de las variables más significativas en el período trabajado y en dependencia de la programación de los mantenimientos de cada grupo electrógeno, se evalúa el porcentaje de potencia disponible para el siguiente período. ⁽¹³⁾ Nótese que, en este proceso de calificación de la disponibilidad, existen factores que se toman como primarios para decidir sobre la disponibilidad, de forma explícita se convierten en decisiones de operación solo si se tiene en cuenta las 24 h anteriores a esa acción, por lo que se cierra

el abanico de combinaciones elegibles que impacten sobre la eficiencia y la estabilidad. Esta insuficiencia constituye una causa importante del problema tecnológico que constituyen hoy las frecuentes insatisfacciones de la GDisp y de la operación de los GEFO. Este problema es más significativo cuando se observa frecuentemente que para gestionar la disponibilidad no se consideran los criterios como los niveles históricos de carga y los parámetros de operación durante largos períodos históricos, de manera que estos datos también contribuyan a la gestión satisfactoria de un grupo electrógeno para horizontes temporales donde T sea mayor de 24 h.

Los decisores sobre la operación de grupos electrógenos, fundamentalmente los que utilizan *fuel oil* (GEFO), se basan en análisis históricos de consumo, eficiencia y comportamiento operacional, combinados con la experiencia técnica y la adecuación al contexto participativo del GEFO. ^(18,19,20) Sobre esto cabe destacar que en la bibliografía consultada está poco desarrollada la formalización científica rigurosa en los contextos teóricos de las ciencias matemáticas de modelos y métodos, para que la GDisp sea satisfactoria y especialmente para mejorar la eficiencia y la estabilidad de la toma de decisiones en GEFO. De esta situación se deduce que el problema tecnológico descrito tiene un problema científico dual cuya esencia es la necesidad de desarrollar un procedimiento matemático para la optimización del modelo que resulta de la integración de los modelos matemáticos que describen a los objetos, propiedades, procesos y los principios de historicidad, eficacia, eficiencia y estabilidad en el contexto de un GEFO.

Esto se confirma con la opinión de algunos autores que reconocen que hoy en Cuba falta conocimiento proposicional (saber cosas sobre los objetos, modelos) y conocimiento operativo proposicional (saber hacer las cosas, procedimientos) para gestionar satisfactoriamente la disponibilidad en los GEFO, entre otras causas, debido a la intensa dinámica operacional de los grupos electrógenos en operación, donde la GDisp se complejiza por la ausencia de herramientas computacionales adecuadas, que considerando los conocimientos científicos-tecnológicos pertinentes, conviertan a los datos disponibles de las VO en información y conocimiento. ^(21,22,23) El objetivo del presente artículo es desarrollar un procedimiento matemático para optimizar la GDisp de los GEFO, orientado a la búsqueda de la configuración de los niveles de carga de los grupos electrógenos elegibles, que permita tomar decisiones que propicien la satisfacción de los criterios relacionados con la eficacia, eficiencia y estabilidad operativa de estos sistemas.

En otro orden de cosas, los sistemas de gestión que hoy se utilizan en los escenarios GEFO no están concebidos para garantizar también la eficiencia y la estabilidad en la toma de decisiones operativas en la GDisp. Esta situación se agudiza

debido a los altos costos y difícil acceso al *software* foráneo. Entonces, queda argumentada la urgente necesidad de también desarrollar *software* nacional que implemente clásicos y novedosos enfoques, modelos y procedimientos para gestionar satisfactoriamente la generación de energía eléctrica distribuida de los grupos electrógenos en Cuba.

MÉTODOS

La presente investigación, de tipo teórica, ha sido desarrollada en la Universidad de Moa entre los años 2022 y 2025. El método general que se utiliza en el trabajo es el de la construcción de un algoritmo de toma de decisiones (columna vertebral del procedimiento propuesto) bajo condiciones de optimización matemática asumiendo que, para la optimización de la GDisp de los GEFO en cierto intervalo de tiempo, se debe considerar la modelación de los siguientes 4 principios: historicidad, eficacia, eficiencia y estabilidad.

Principio de historicidad: El conjunto de variables operacionales (CVOaT) de los valores de la VO de un GEFO en el horizonte temporal $[t_a; t_a + T]$ ($T \geq 0$) es consecuencia de la operación del grupo en los entornos históricos precedentes más cercanos a t_a . Asumir este principio justifica la selección y uso de datos nominales, operacionales e históricos que se obtienen de los Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) y una base de datos relacional de 3 años posteriores al cierre de garantía del fabricante; de las herramientas matemáticas más adecuadas para pronosticar los valores de CVOaT y de ese modo caracterizar los valores actuales y futuros de las VO del GEFO.

Deben precisarse las tareas principales para aplicar ese primer principio:

P1. a. ¿cuáles son las VO más importantes (VOMI) para realizar la GDisp y sus características numéricas? En primer lugar, las estadísticas; suponiendo conocidos los valores $t = t_a$ y T . Para cada VOMI:

P1. b. ¿cuáles son los modelos y procedimientos matemáticos que permitirán pronosticar adecuadamente los valores VO en $t \in [t_a; t_a + T]$?

P1. c. ¿cuál es el entorno histórico precedente que se necesita? ¿Cuál es el entorno histórico precedente más cercano a $t = t_a$ disponible, denominado EHPVOa?

P1. d. ¿cuál es la calidad de cada pronóstico realizado?

Debe señalarse que en la presente investigación, la denominada minería de datos y los estimadores multilineales se proponen como sistemas metodológicos principales y conjuntos de herramientas matemáticas para aplicar productivamente el principio de historicidad y obtener modelos explicativos y de pronóstico que, además, permitan evaluar

la calidad de las estimaciones (a partir del valor del error de cada estimación) y la estabilidad de los comportamientos de las variables modeladas en los grupos electrógenos. ^(24,25,26)

Principio de eficacia: Durante la GD una propuesta de configuración de cargas se denomina eficaz en t cuando, con la calidad requerida, se satisface $Pd(t)$ con la suma de las cargas resultantes de configurar las cargas efectivas de la manera propuesta. Durante la GDisp de un GEFO solo pueden admitirse propuestas eficaces de configuraciones de carga. Se denomina CCE(t) al conjunto de todas las configuraciones eficaces de costos en t el cual es vacío cuando $Pd(t)$ es mayor que la suma de todas las potencias efectivas del GEFO en ese instante. En ese caso entonces deberá disminuirse, numéricamente hablando, la demanda $Pd(t)$ de los usuarios del GEFO.

A cada configuración eficaz de cargas de un GEFO se le puede calcular un índice de costos $ICost(t)$ a partir de algunos indicadores de VO tales como los precios y los consumos reales y nominales de combustible, agua y aceite. Es obvio que existe una relación directa entre los indicadores reales y los indicadores nominales de manera que la eficiencia económica disminuye en la medida en que los primeros superan a los segundos. Cuando el conjunto CCE(t) es no vacío, a cada uno de sus elementos se le puede calcular el valor de $ICost(t)$ que, de ser necesario, se escribe como una función que dependa de otras VO.

Principio de máxima eficiencia económica: Si durante la GDisp en t de un GEFO se obtiene un conjunto no vacío CCE(t) entonces entre estas propuestas eficaces se denomina más eficiente aquella cuyo valor $ICost(t)$ sea mínimo siendo entonces candidata a ser seleccionada como configuración elegible para responder a la $Pd(t)$. Finalmente presentamos el cuarto elemento importante a considerar durante la GDisp en t de un GEFO: la estabilidad. Esta tiene que ver (intuitivamente) con la idea de planificar el uso de los generadores que tengan menos probabilidad de sufrir variaciones importantes de las VO (que pudieran disminuir la eficacia y la eficiencia y, en el peor de los casos, provocar la parada o rotura de algún equipo).

En esta investigación la estabilidad está dada por un índice $IEst(t)$ y puede considerarse como algo opuesto al cambio y a la variabilidad del comportamiento de una VO con respecto al tiempo o con respecto a los valores nominales. Puede asumirse que la estabilidad de una configuración de los niveles de cargas de un GEFO con mayores valores de $IEst(t)$ expresa la presencia de pocos cambios y variaciones de las demandas, cargas efectivas, costos y consumos en cada período $t + \Delta t$.

A partir de los planes y resultados de los mantenimientos (programados o no), así como las reparaciones por rotura o por marcada ineficiencia, a cada elemento del CCE(t) se le

puede calcular un índice $I_{Est}(t)$ que permite tomar decisiones para que la G_{Disp} se dirija hacia la selección de configuraciones estables respecto a los valores de sus VO especialmente en cada período: $t + \Delta t$. De ser necesario $I_{Est}(t)$ puede escribirse como una función que dependa de otras VO.

Principio de máxima estabilidad: Entre las configuraciones más eficientes del conjunto $CCE(t)$ se seleccionan aquellas donde el $I_{Est}(t)$ sea mayor.

RESULTADOS

Los grupos electrógenos son sistemas de generación que están constituidos por un conjunto de $n > 0$ moto-generadores (MG) que se nombran particularmente MG_1, MG_2, \dots, MG_n ; y en general MG_i con $i = 1, 2, \dots, n$. Estos MG trabajan en paralelo como un sistema y poseen características semejantes de diseño, operacionales y tecnológicas.

Los MG_n se pueden explotar en paralelo a un sistema eléctrico para contribuir con la regulación de la frecuencia y atenuar los problemas de déficits en la generación en el sistema; y bajo ciertas condiciones, pueden operarse en isla de modo independiente o paralelas entre sí, para garantizar la continuidad de servicio frente a déficit de generación o situaciones excepcionales que provoquen la desconexión del sistema. ^(27,28) Un grupo electrógeno para la generación distribuida (GEGD) se identifica como uno de estos sistemas. En esta investigación se estudian los GEFO que son sistemas GEGD.

Entre las diversas VO que se asocian a cada MG_i están, por ejemplo:

El voltaje y la frecuencia (que generalmente es la misma para todo el sistema).

Las potencias nominales (o de chapa) P_{ni} y las potencias efectivas $Pe_i(t)$, donde $i = 1, 2, \dots, n$. Nótese que las potencias nominales son constantes y las potencias efectivas son funciones de t que se determinan a partir del EHPVOa.

Basta que un MG del GEFO esté declarado técnicamente disponible y operativo, para afirmar que el sistema está disponible con una potencia efectiva $Pe_{TotalGEFO}(t)$ igual a la suma de las potencias efectivas $Pe_i(t)$ de sus MG_i disponibles. Obviamente, cuando pasa cierto tiempo de explotación

cambian los valores de algunas de las VO y esta realidad debe incorporarse a las modelaciones y procedimientos para realizar la G_{Disp} del GEGD en $t \in [t_a; t_a + T]$ y especialmente para determinar la configuración de los niveles de carga de los MG_i .

Cada configuración obtenida para $t \in [t_a; t_a + T]$ puede describirse por un vector $K(t) = (K_1[t], K_2[t], \dots, K_n[t])$ donde sus componentes son valores porcentuales. En particular, $K_i(t)$ cuantifica el porcentaje de $Pe_i(t)$ que aporta MG_i a la configuración. Ahora puede definirse una condición de eficacia asociada al segundo principio:

Condición de eficacia

Cada configuración obtenida para $t \in [t_a; t_a + T]$ puede describirse por un vector $K(t) = (K_1[t], K_2[t], \dots, K_n[t])$ donde sus componentes son valores porcentuales. En particular, $K_i(t)$ cuantifica el porcentaje de $Pe_i(t)$ que aporta MG_i a la configuración. Ahora puede definirse una condición de eficacia asociada al principio P2: CEfic: para $t \in [t_a; t_a + T]$, la suma $P_{GEFO}(t)$ de las cargas de n motogeneradores MG_i de un GEFO debe ser igual a la potencia demandada $P_d(t)$. La expresión 1 constituye una condición esencial para cada MOM.

En este trabajo la eficiencia de una configuración se establece como un parámetro vinculado a los costos de operación del GEFO. En la práctica este vínculo debe expresar que a mayores costos reales se tiene menor eficiencia y viceversa. La siguiente expresión (2) determina porcentualmente el valor de la eficiencia en función de los costos de operación (nótese que el costo nominal total y el costo real total nunca tendrán valor nulo):

Condición de costos mínimos

En términos prácticos una mayor eficiencia tiene que ver con gastar lo previsto o menos. Una fórmula sencilla para el escenario de esta investigación es (2):

Son importantes 2 aspectos:

- a) queda establecido que:
 - cuando los costos reales son iguales a los costos nominales entonces la eficiencia toma valor 100;

$$P_{GEFO}(t) = 0,01 \sum_{i=1}^n K_i(t) Pe_i(t) = P_d(t) \quad (1)$$

$$\text{Eficiencia} = 100 \left(\frac{\text{Costos nominales}}{\text{Costos reales}} \right) \quad (2)$$

- cuando los costos reales son menores que los costos nominales entonces la eficiencia es mayor que 100;
- cuando los costos reales son mayores que los costos nominales entonces la eficiencia es menor que 100.

b) Para costos nominales fijos, se obtiene eficiencia óptima cuando se minimizan los costos reales. Entonces, se hace necesario definir una función de costos de operación de un GEFO para una configuración dada en $t \in [t_a; t_a + T]$. En el presente trabajo se considera que los costos varían en el tiempo (aunque también pueden ser función de los niveles de carga) y por su importancia, solo se incluyen los costos de combustible, aceite y agua consumidos durante las operaciones, aunque pueden incluirse otros rubros.

Un primer paso es determinar a partir del EHPVO_a los modelos temporales de los costos unitarios:

- VCo(t), costo en el instante t de 1 g de combustible (pesos/g),
- VAc(t), costo en el instante t de 1 L de aceite (pesos/l),
- VAg(t), costo en el instante t de 1 litro de agua (pesos/l).

Un segundo paso es determinar a partir del EHPVO_a los modelos, temporales y por nivel de carga, de los consumos específicos: ^(29,30)

- CECoi(t, K_i(t)) es el consumo específico bruto de combustible de MG_i, dado en g/kWh,
- CEAC_i(t, K_i(t)) es el consumo específico bruto de aceite de MG_i, dado en l/kWh,
- CEAG_i(t, K_i(t)) es el consumo específico bruto de agua de MG_i, dado en l/kWh.

Un tercer paso es determinar a partir de los valores nominales y del EHPVO_a, los rangos dentro de los cuales son admisibles los valores buscados del vector K(t). En este caso, será asumido que el rango donde se moverá cada K_i(t) está dado por el intervalo (3):

Siendo Mi(t) uno de sus puntos y en particular, si es el punto medio del intervalo $\varepsilon_i(t)$ entonces se calcula (4);

$$\varepsilon_i(t) = [\alpha_i(t); \beta_i(t)] \quad (3)$$

$$M_i(t) = 0,5[\alpha_i(t) + \beta_i(t)] \quad (4)$$

$$K_i(t) \leq \beta_i(t) \quad \text{para } i = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$K_i(t) \geq \alpha_i(t) \quad \text{para } i = 1, \dots, n \quad (6)$$

$$FO = I_{Cost}(t) = MIN \left(\sum_{i=1}^n K_i(t) P e_i(t) \frac{\Delta t}{100} \left[\frac{CECoi(t, M_i(t)) VCo(t) + CEAC_i(t, M_i(t)) VAc(t)}{CEAG_i(t, M_i(t)) VAg(t)} \right] \right) \quad (7)$$

Ahora al MOM se pueden agregar un total de 2n desigualdades (ecuaciones 5 y 6):

Y se define la función objetivo (FO) de costos (dada en pesos y denominado índice de costos) para $t \in [t_a; t_a + T]$ y el período Δt de operación estable del GEFO con la configuración a determinar en t (7)

Nótese que el MOM definido por las expresiones 1, 5, 6 y 7, es de programación lineal y, aplicando el método simplex, se podrá obtener (si existe) el vector K(t) que define la configuración más eficaz y eficiente del GEFO con $K_i(t) \in \varepsilon_i(t)$ y los parámetros de costo en el período t + Δt. ^(31,32)

En cualquier modelación matemática con propósitos explicativos y pronosticadores, la calidad de los resultados depende en primer lugar de la calidad de los datos respecto a representatividad, exactitud (se refiere a menores desviaciones de las muestras respecto al valor verdadero), precisión (referida a menores desviaciones de los valores muestreados respecto a la media aritmética de estos valores) y estabilidad en los casos en que esta sea deseable. En segundo lugar, dicha calidad depende de la elección de los parámetros de los modelos y procedimientos matemáticos para garantizar una adecuada sensibilidad de los estimadores, bajos valores de los errores de estimación, y en los casos donde sea deseable, algún tipo de estabilidad de los valores de los resultados. ^(33,34,35)

En este trabajo, cuando se estime cada valor $P e_i(t)$, VCo(t), VAc(t), VAg(t), CECoi(t, Mi(t)), CEAC_i(t, Mi(t)), CEAG_i(t, Mi(t)) y $\varepsilon_i(t)$ deberán evaluarse previamente las correspondientes representatividad, exactitud, precisión y estabilidad de los datos en EHPVO_a. También deberán calcularse y evaluarse críticamente: el error de estimación y el número de condición μ, así como la estabilidad de los resultados en [ta; ta + T], para los 3 primeros casos; y la estabilidad de los resultados en [ta; ta + T] y en $\varepsilon_i(t)$ (i = 1, ..., n) para los 3 últimos casos. ⁽³⁴⁾ La estabilidad general temporal de m

datos de una VO, por ejemplo, $X(t)$ se puede calcular porcentualmente para $t \in [t_0; t_a]$ de EHPVOa mediante un coeficiente de variación (8): ⁽³⁶⁾

donde:

- t_0 es el instante en que se inició una operación tecnológica sin interrupciones hasta la proximidad del instante actual $t = t_a$,
- MA es la media aritmética de los q datos $(t_j; X_j)$, con $j = 1, 2, \dots, q$, medidos en el intervalo $[t_0; t_a]$,
- DE es la desviación estándar de los q datos $(t_j; X_j)$, con $j = 1, 2, \dots, q$, medidos en el intervalo $[t_0; t_a]$.

Considerando a MA constante, cuando el valor DE es nulo entonces la estabilidad de X en ese intervalo es máxima (100 %); y cuando DE aumenta entonces el valor de la estabilidad disminuye pudiéndose percibir que para $DE \geq MA$ la estabilidad se define convenientemente nula. Con el propósito de pronosticar el valor de X para valores de $t \in [t_a; t_a + T]$ se pueden usar estimadores puntuales tales como los basados en el ajuste de funciones mínimos cuadrados, los interpoladores polinómicos y trigonométricos, Spline, Kriging, funciones de base radial, inverso de la distancia, y otros. ⁽²⁶⁾ Estos estimadores usan algunos o todos los datos $(t_j; X_j)$, con $j = 1, 2, \dots, q$ y un asunto de máxima importancia es la selección de los puntos que se utilizan en cada estimación ya que deben ser un número suficiente, tomados entre los más cercanos a t .

En particular, la suma de los cuadrados de las diferencias en un modelo lineal mínimo cuadrado indica la variabilidad de X en $[t_0; t_a]$ y la pendiente de esta recta indica si el comportamiento general es decreciente, constante o creciente que son elementos útiles para caracterizar la estabilidad de X en ese intervalo. Si se determinan configuraciones en varios puntos del intervalo $[t_a; t_a + T]$ entonces puede estudiarse la estabilidad de los componentes de los vectores $K(t)$ aplicando la expresión 8. Dichos resultados son críticos y permiten decidir el mejor valor de T que define el alcance temporal más adecuada para el uso de los datos en la GDisp y de Δt que define el período de operación estable del GEFO con la configuración determinada en t . Es razonable asumir que la estabilidad general de una configuración se defina por la mayor estabilidad obtenida para estos vectores.

Finalmente debe resolverse un problema de primerísima importancia. Resulta que del modo en que se ha di-

señado el MOM, el conjunto CCE(t) a lo sumo solo podrá disponer para cada valor de $t \in [t_a; t_a + T]$ un elemento (o sea, de una configuración de los niveles de carga del GEFO, eficaz de mínimo costo y con una estabilidad conocida que no puede ser mejorada sin cambiar el contexto. Es obvio que pudieran existir otras configuraciones eficaces, con menor eficiencia, pero aún en un rango aceptable y con mayor estabilidad que las convierten en candidatas a ser elegidas durante la GDisp.

Para lograr esta diversidad de configuraciones se propone que para cada valor de $t \in [t_a; t_a + T]$, cada intervalo $\epsilon_i(t) = [\alpha_i(t); \beta_i(t)]$ sea particionado en s_i subintervalos (no necesariamente iguales) de manera que (ecuación 9):

Y se asume que $M_{ir_i}(t)$ es uno de los puntos del intervalo $\epsilon_{ir_i}(t)$ (donde $i = 1, \dots, n$ y $r_i = 1, \dots, s_i$). Si en particular $M_{ir_i}(t)$ es el punto medio de $\epsilon_{ir_i}(t)$ entonces se calcula mediante la ecuación (10):

Ahora se construye un MOM local para cada una de las $s_1 s_2 s_3 \dots s_n$ combinaciones de:

- s_1 sub-intervalos $\epsilon_{11}(t), \epsilon_{12}(t), \dots, \epsilon_{1s_1}(t)$ de $\epsilon_1(t)$, con sus respectivos puntos medios $M_{11}(t), M_{12}(t), \dots, M_{1s_1}(t)$
- s_2 sub-intervalos $\epsilon_{21}(t), \epsilon_{22}(t), \dots, \epsilon_{2s_2}(t)$ de $\epsilon_2(t)$, con sus respectivos puntos medios $M_{21}(t), M_{22}(t), \dots, M_{2s_2}(t)$
- ...
- s_n sub-intervalos $\epsilon_{n1}(t), \epsilon_{n2}(t), \dots, \epsilon_{ns_n}(t)$ de $\epsilon_n(t)$, con sus respectivos puntos medios $M_{n1}(t), M_{n2}(t), \dots, M_{ns_n}(t)$

Asumiendo que cada combinación se construye cuando cada contador r_i toma uno de los valores $1, 2, 3, \dots, s_i$, entonces cada MOM local (expresión 11) tiene para $t \in [t_a; t_a + T]$ las siguientes ecuaciones simultáneas:

Al resolver cada MOM local se determina (si existe) una nueva configuración eficaz $K(t)$ de los niveles de las n cargas del GEFO que tiene costo mínimo y una evaluación de su estabilidad en la correspondiente combinación de subintervalos. Estas configuraciones obtenidas pasan a formar parte del conjunto CCE(t) y entre ellas se podrán tomar las decisiones que definan la GDisp.

$$EstabGenX[t_0; t_a] = \begin{cases} 100 \left(1 - \frac{DE}{MA} \right) & \text{para } DE \leq MA \\ 0 & \text{para } DE > MA \end{cases} \quad (8)$$

$$\varepsilon_i(t) = \varepsilon_{i1}(t) \cup \varepsilon_{i2}(t) \cup \dots \cup \varepsilon_{is_i}(t) = \bigcup_{r_i=1}^{r_i=s_i} \varepsilon_{ir_i}(t) \quad (9)$$

$$M_{ir_i}(t) = 0,5 [\alpha_{iir_i}(t) + \beta_{iir_i}(t)] \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} FO = I_{Cost}(t) = MIN \left(\sum_{i=1}^n K_i(t) Pe_i(t) \frac{\Delta t}{100} \left[\begin{array}{l} CECoi(t, M_i(t)) VCo(t) + \\ CECAC_i(t, M_i(t)) VAc(t) + \\ CEAG_i(t, M_i(t)) VAg(t) \end{array} \right] \right) \\ 0,01 \sum_{i=1}^n K_i(t) Pe_i(t) = Pd(t) \\ K_i(t) \leq \beta_i(t) \quad \text{para } i = 1, \dots, n \\ K_i(t) \geq \alpha_i(t) \quad \text{para } i = 1, \dots, n \end{array} \right. \quad (11)$$

Debe señalarse, además, que para la selección del mejor vector K también pueden introducirse indicadores tecnológicos no formalizados en el MOM que se ha explicado. Por ejemplo, propiedades de los combustibles, aceite y agua; presiones, temperaturas, parámetros mecánicos de los equipos, procesos de mantenimiento; condiciones de trabajo de máquinas y obreros; entre otros, que facilitan y contribuyen a la toma de decisiones.

DISCUSIÓN

A continuación, se describe el procedimiento:

Paso 1, caracterizar la demanda que se gestiona:

- establecer los valores de t_a y $T > 0$ que definen el intervalo $[t_a; t_a + T]$,
- establecer el valor de $m > 0$ y calcular el valor de $\Delta t = \frac{T}{m}$. Determinar el conjunto de puntos: *
- describir la demanda $P_d(t)$ para el conjunto E, estudiar su estabilidad y obtener su modelo de pronóstico: $P_d(t) = F_{pd}(t)$ para $t \in [t_a; t_a + T]$.

Paso 2, realizar minería de datos:

- establecer el conjunto EHPVO_a. En particular describir el intervalo $[t_0; t_a]$ y conformar el conjunto D con sus puntos de muestreo t_j con $j = 1, 2, \dots, q$.
- asociar a cada punto del conjunto D los valores medidos de las VO: $VCo(t_j)$, $VAc(t_j)$, $VAg(t_j)$, la potencia real producida por MG_i: $Pr_i(t_j)$ y la configuración utilizada para MG_i: $K_i(t_j)$, así como el valor calculado: $Pe_i(t_j) = \frac{Pr_i(t_j)}{0,01K_i(t_j)}$ (para $i = 1, \dots, n$)
- para cada valor t_j y cada valor $K_i(t_j)$ asociar los valores medidos: $CECo_i(t_j, K_i(t_j))$; $CEAC_i(t_j, K_i(t_j))$, $CEAG_i(t_j, K_i(t_j))$;

- para cada t_j establecer el costo general: $I_{Cost}(t_j)$, tomando $M_i(t) = K_i(t)$ y $t = t_j$ en la expresión 7;
- considerando los datos conocidos en el intervalo $[t_0; t_a]$ para cada variable VO mencionada:
- evaluar la estabilidad de los comportamientos precedentes de las VO consideradas,
- establecer modelos explicativos-pronosticadores con la capacidad de evaluar los errores de estimación (EE) que se cometan. En primer lugar: $(VCo, EE) = FVCo(t)$, $(VAc, EE) = FVAc(t)$, $(VAg, EE) = FVAg(t)$ y $(I_{Cost}, EE) = FICost(t)$. En segundo lugar, para $i = 1, \dots, n$ se calculan: $(CECo_i, EE) = FCECo_i(t, K_i(t))$, $(CEAC_i, EE) = FCEAC_i(t, K_i(t))$, $(CEAG_i, EE) = FCEAG_i(t, K_i(t))$, $(Pr_i, EE) = FPr_i(t)$, $(K_i, EE) = FK_i(t)$ y $(Pe_i, EE) = FPe_i(t)$.
- aplicar los modelos anteriores en el conjunto E y evaluar la calidad y la estabilidad de los comportamientos de las VO en el intervalo $[t_a; t_a + T]$,
- Para cada $l = 1, \dots, m$ tal que $t_l \in E$ ejecutar los pasos 4, 5 y 6:
- Paso 3: caracterizar la diversidad de los MOM
- a partir de los valores nominales admisibles de cada K_i y de sus valores medidos y modelos en el intervalo $[t_0; t_a]$, establecer los intervalos $\varepsilon_i(t)$
- Para cada intervalo $\varepsilon_i(t_l)$ se determina:
 - el número s_i de subintervalos.
 - los subintervalos de $\varepsilon_1(t_l)$ y sus respectivos puntos medios;
 - los subintervalos de $\varepsilon_2(t_l)$ y sus respectivos puntos medios;
 - ...
 - los subintervalos de $\varepsilon_n(t_l)$, y sus respectivos puntos medios.

$$* \{t_1 = t_a, \quad t_2 = t_1 + \Delta t, \quad t_3 = t_2 + \Delta t, \dots, t_m = t_{m-1} + \Delta t = t_a + m\Delta t = t_a + T\}$$

Paso 4, para $t_i \in E$ plantear un total de s_1, s_2, \dots, s_n MOM locales y obtener $CCE(t_i)$.

Para cada combinación de los subintervalos $\varepsilon_i(t_i)$ establecidos en el paso anterior, teniendo en cuenta la expresión 10, se determina el MOM de programación lineal ⁽¹¹⁾:

Por ejemplo, sea $n = 2$ el número de MG y sean $s_1 = 3$ y $s_2 = 2$. El total de combinaciones es: $s_1 s_2 = 6$ y algunos de los MOM que se obtienen para $t = t_i$ son los siguientes:

para $r_1 = 1$ y $r_2 = 1$ se obtiene el MOM (12)

para $r_1 = 3$ y $r_2 = 2$ se obtiene el MOM (13):

Para cada combinación de los sub-intervalos $[\alpha_{ir_1}(t_i); \beta_{ir_1}(t_i)]$ se aplica el método simplex a su correspondiente expresión (11) y se obtiene (si existe) un vector $K(t_i)$ que describe niveles de carga eficaces y localmente eficientes así como los valores de $ICost(t_i)$ y de las diferencias $FICost(t_i) - ICost(t_i)$, que pasan a formar parte del conjunto $CCE(t_i)$.

Paso 5, ordenar los elementos de $CCE(t_i)$, en disposición ascendente según $ICost(t_i)$ y aprender su comportamiento estadístico. Asimismo, estudiar el comportamiento estadístico de la diferencia $FICost(t_i) - ICost(t_i)$.

Paso 6, eliminar de $CCE(t_i)$ ordenado aquellos elementos donde $ICost(t_i)$ es económicamente inadmisibles.

Aquí termina el trabajo para $t = t_i$. El resultado principal es que para cada valor t_i se ha obtenido un pequeño conjunto $CCE(t_i)$ de configuraciones eficaces y muy eficientes, ordenado de forma ascendente según los valores de $ICost(t_i)$.

Paso 7, para cada $t = t_i$ escoger una configuración de $CCE(t_i)$ que proporcione estabilidad a los valores de $K_i(t)$ en todo intervalo $[t_a; t_a + T]$ para ello se propone el siguiente sub-procedimiento:

Para $t_i = t_1 = t_a$ tomar de $CCE(t_1)$ la configuración $K(t_1)$ tal que sea mínimo el valor $\sum_{i=1}^n |K_i(t_1) - F_{K_i}(t_1)|$, lo cual garantiza que el vector $K(t_1)$ seleccionado mantenga, hasta

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{MIN} \left\{ \begin{array}{l} K_1(t_i)Pe_1(t_i) \frac{\Delta t}{100} \left[\begin{array}{l} CEC_{o_1}(t_i, M_{11}(t_i))VCo(t_i) + \\ CEC_{Ac_1}(t_i, M_{11}(t_i))VAc(t_i) + \\ CEC_{Ag_1}(t_i, M_{11}(t_i))VAg(t_i) \end{array} \right] + \\ K_2(t_i)Pe_2(t_i) \frac{\Delta t}{100} \left[\begin{array}{l} CEC_{o_2}(t_i, M_{21}(t_i))VCo(t_i) + \\ CEC_{Ac_2}(t_i, M_{21}(t_i))VAc(t_i) + \\ CEC_{Ag_2}(t_i, M_{21}(t_i))VAg(t_i) \end{array} \right] + \\ 0,01[K_1(t_i) Pe_1(t_i) + K_2(t_i) Pe_2(t_i)] = Pd(t_i) \\ K_1(t_i) \leq \beta_{11}(t_i) \\ K_1(t_i) \geq \alpha_{11}(t_i) \\ K_2(t_i) \leq \beta_{21}(t_i) \\ K_2(t_i) \geq \alpha_{21}(t_i) \end{array} \right\} \end{array} \right. \quad (12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{MIN} \left\{ \begin{array}{l} K_1(t_i)Pe_1(t_i) \frac{\Delta t}{100} \left[\begin{array}{l} CEC_{o_1}(t_i, M_{13}(t_i))VCo(t_i) + \\ CEC_{Ac_1}(t_i, M_{13}(t_i))VAc(t_i) + \\ CEC_{Ag_1}(t_i, M_{13}(t_i))VAg(t_i) \end{array} \right] + \\ K_2(t_i)Pe_2(t_i) \frac{\Delta t}{100} \left[\begin{array}{l} CEC_{o_2}(t_i, M_{22}(t_i))VCo(t_i) + \\ CEC_{Ac_2}(t_i, M_{22}(t_i))VAc(t_i) + \\ CEC_{Ag_2}(t_i, M_{22}(t_i))VAg(t_i) \end{array} \right] + \\ 0,01[K_1(t_i) Pe_1(t_i) + K_2(t_i) Pe_2(t_i)] = Pd(t_i) \\ K_1(t_i) \leq \beta_{13}(t_i) \\ K_1(t_i) \geq \alpha_{13}(t_i) \\ K_2(t_i) \leq \beta_{22}(t_i) \\ K_2(t_i) \geq \alpha_{22}(t_i) \end{array} \right\} \end{array} \right. \quad (13)$$

donde sea posible, el comportamiento modelado del vector $K(t)$ cuando $t \in [t_0; t_a]$ de EHPVOa.

Para $t_l = t_2, t_3, \dots, t_m$ tomar de CCE(t_i) la configuración $K(t_l)$ tal que sea mínimo el valor $\sum_{i=1}^n |K_i(t_l) - K_i(t_{l-1})|$, lo cual garantiza que el vector $K(t_l)$ seleccionado mantenga, hasta donde sea posible, el comportamiento modelado del vector $K(t_{l-1})$ que le antecede en el tiempo.

Finalmente es necesario recordar que en el escenario de las Ciencias Matemáticas es suficiente asegurar el cumplimiento del principio de no contradicción lógica para asegurar la veracidad científica de un resultado científico matemático. ⁽³³⁾ Los resultados que se presentan en esta etapa de la investigación son modelos, métodos y algoritmos matemáticos reconocidos como válidos en textos precedentes de matemática y del campo de los estudios energéticos, entonces en este informe, por razones de espacio, no se presenta una aplicación particular exitosa del uso del procedimiento. El próximo paso de la presente investigación es la presentación de un software mediante el cual se ilustre el uso satisfactorio del procedimiento explicado en varios casos de estudio.

Conclusiones

El enfoque propuesto en la presente investigación se basa en asumir que ante cierta demanda de energía, la gestión de un GEFO debe basarse en los principios de historicidad, eficacia, eficiencia y estabilidad. Para realizar propiamente la gestión se propone un procedimiento matemático cuyo algoritmo propio, mediante el uso de los datos disponibles y de modelos y métodos matemáticos entre los cuales se destaca el método simplex de la programación lineal, permite obtener un conjunto de configuraciones eficaces y localmente eficientes tal que, usando criterios de estabilidad para un horizonte temporal de interés, se puedan seleccionar las configuraciones más convenientes.

Teniendo en cuenta la relativa simplicidad matemática y el reconocido potencial resolutivo que poseen las técnicas que conforman el procedimiento explicado, se puede afirmar que es viable y recomendable el desarrollo de una aplicación informática que utilice el potencial computacional clásico disponible y las novedades que en ese sentido aporta la inteligencia artificial, para aplicarlo en casos y tiempo reales tanto nacionales como foráneos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Martín González I. Planificación de la operación del Sistema Electroenergético Nacional. Revista Energética. 2010. [citado 13 sep 2024];XXXI(1):43-6. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3291/329127743006.pdf>
2. Li Z, Xu Y, Fang S and Mazzoni S. Operation and planning of distribution networks with integration of renewable distributed generators considering uncertainties: A review. IET Renewable Power Generation. 2017. [citado 25 may 2025];72:1177-1198. Disponible en: <https://digital-library.theiet.org/doi/full/10.1049/iet-rpg.2019.0036>
3. Dorta Herrera. S. Manual de Gestión MAGEST: Generación Distribuida de Electricidad Cubana (GDECU). Primera Edición. La Habana: Poligráfico Federico Engels; 2009; [citado 25 Mayo 2025]. 173-190. Disponible en: <http://sic.oc.une.cu/gdecu>
4. Filgueiras Sainz de Rozas ML, Castro Fernández M. La capacidad de absorción para la innovación: estudio de caso en la Generación Distribuida Cubana. Ingeniería Energética. 2012. [citado 25 may 2025];XXXIII(3):217-228. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012012000300005
5. Production Pools. La eficiencia de grupos electrógeno con Lean Management. Octubre. 2023. [citado 11 may 2025]. <https://productiontools.es>
6. Santos Valdés L y García Sánchez Z. Sistema de gestión para la operación de las fuentes renovables de energías. 2023. [citado 11 may 2025]; 1-18. Disponible en: <https://talleres.ucf.edu.cu/event/2/contributions/83/attachments/86/250/TIEMA%20018.pdf>
7. Vázquez L, Majanne Y, Castro M, Luukkanen J, Hohmeyer O, Vilaragut M and Díaz D. Energy system planning towards renewable power system: energy matrix change in Cuba by 2030. IFAC-PapersOnLine. 2018;51(28):522-527. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318334773>
8. Escalera A, Catronouvo ED, Prodanovic M, Pérez JR. Reliability Assessment of Distribution Networks with Optimal Coordination of Distributed Generation, Energy Storage and Demand Management Energies. 2019;12:1-17. DOI:10.3390/en12163202.
9. Thirunavukkarasu G S, Seyedmahmoudian M, Jamei E, Horan B, Mekhilef S, Stojcevski A. Role of optimization techniques in microgrid energy management systems-A review. Energy Strategy Reviews. 2022. [citado 30 may 2025];43:100899. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X22000931>
10. Chippada D and Reddy D. Renewable and non-renewable resources in Smart grid. Distributed Generation & Alternative Energy Journal. 2023. [citado 30 may 2025]; 38(3). Disponible en: <https://doi.org/10.13052/dgaej2156-3306.38314>
11. Ukob K, Olantuji K O and Madyira D M. Optimizing renewable energy systems through artificial intelligence: Review and future prospects. Energy & Environment. 2024. [citado 11 may 2025];35(7). Disponible en: <https://ideas.repec.org/a/sae/engenv/v35y2024i7p3833-3879.html>
12. IEEE 762TM-2006 IS. IEEE Standard definitions for use in reporting electric generating unit. Reliability, availability, and productivity. IEEE Power Engineering Society. 2007:1-66. DOI: 10.1109/IEEESTD.2007.335902.
13. Castro Álvarez A, Pérez, O, Bravo Amarante, E y Gómez Avilés, B. Análisis de la eficiencia y eficacia de la generación distribuida en la central eléctrica (fuel) de Sancti Spiritus. YAYABO-CIENCIA2015. 2015. [citado 15 sep 2024]; Sancti Spiritus: III

- Conferencia Científica Internacional de la UNISS. Disponible en: https://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:47017746
14. Mahmoud A H, Borut J, Bojan R2, Dejan D. Methods and Models for Electric Load Forecasting: A Comprehensive Review. Logistics & Sustainable Transport. 2020;11(1):51-76. DOI: 10.2478/jlst-2020-0004.
 15. Choodbari M, Moghaddam S M, Davarzani R. Robust distribution networks reconfiguration considering the improvement of network resilience considering renewable energy resources. Scientific Reports. 2024;14(23041). DOI:10.1038/s41598-024-73928-1.
 16. De la Fé Dotres S, García D J. Distribución óptima de carga en emplazamientos de generadores. Ingeniería Energética. 2012. [citado 28 may 2025];14(1). Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012012000100009
 17. Aderibgbe MA, Adoghe AU, Agbetuyi F and Airoboman AE. A review on optimal placement of distributed generators for Reliability improvement on distribution network. Conferences IEEE PES/IAS Power Africa. 2021. DOI: 10.1109/PowerAfrica52236.2021.9543266.
 18. Noa Ramírez A, Montero Laurencio, R, Legrá Lobaina, A. A, Reyes Almaguer, A y Maresma Laurencio, D. Comportamiento operacional de grupos electrógenos: particularidades del índice de consumo específico de combustible. Ingeniería Mecánica. 2018. [citado 13 sep 2024];21(1):19-27. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/325127576>
 19. Hourné Calzada M B. Análisis de criticidad de grupos electrógenos de la tecnología fuel oil en Cuba. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. 2012. [citado 13 Sep 2024];21(3):55-61. Disponible en: https://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S071-00542012000300009
 20. Figueredo Reinaldo O y Carmona Tamayo E. Cuba en Datos: ¿Qué es la generación distribuida y por qué es tan importante? Cuba-Debate. 18 de Noviembre. 2022. [citado 11 may 2025]. Disponible en: <https://http://www.cubadebate.cu/especiales/2022/11/18/cuba-en-datos-que-es-la-generacion-distribuida-y-por-que-es-tan-importante-en-la-generacion-electrica/>
 21. Huerta Mendoza R. El análisis de criticidad, una metodología para mejorar la confiabilidad operacional. Ingeniería Mecánica. 2000. [citado 13 sep 2024];(4):13-9. Disponible en: <https://scielo.sld.cu/scielo>
 22. Pardo Llosas Y, Haber Guerra R, Cobos Castro A, Llosas Albuérne Y, Domínguez Abreu H. Herramienta de monitorización para mejorar las prestaciones de los grupos electrógenos fuel oil en Cuba. Dyna. 2015;90:34-9. DOI: 10.6036/7156.
 23. Castillo Cobas LM, Febles Rodríguez JP, Fernández LM. Desarrollo de una Plataforma para la Gestión de la Información en una Empresa de Generación Distribuida de Energía Eléctrica en Cuba (GEDIMES). InSTEC. 2013. [citado 13 sep 2024];1-14. Disponible en: <https://www.academia.edu/29405707>
 24. Fayyad U, Piatetsky Shapiro G, Smyth P. From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. AI Magazine. 1996:37-54. DOI:10.1609/aimag.v17i3.1230.
 25. McArthur S, McDonald J R and McFadyen I T. An Agent-Based Anomaly Detection Architecture for Condition Monitoring. IEEE Transactions on Power Systems. 2005. 20(4):1675-82. DOI:10.1109/TPWRS.2005.857262
 26. Legrá Lobaina AA. Modelos de malla basados en estimadores (A,U,Θ). Revista HOLOS. 2017;33(4):88-110. DOI:10.15628/holos.2017.5351.
 27. Noa Ramírez A, Montero Laurencio R, Legrá Lobaina AA, Reyes Almaguer A, Maresma Laurencio D. Procedimiento para la operación de un microsistema de grupos electrógenos diésel en situaciones excepcionales. Ingeniería Energética. 2015. [citado 13 sep 2024];XXXVI:94-103. Disponible en: <https://scielo.sld.cu/scielo>
 28. Best R J, et al. Synchronous Islanded Operation of a Diesel Generator. IEEE Transactions on Power Systems. 2007;22(4). DOI:10.1109/TPWRS.2007.907449
 29. De la Fé Dotres S, Domínguez Fontanil J, Sierra JA. Pronóstico del consumo de combustible de grupos motogeneradores empleando una red neuronal. RCCI. 2010. [citado 13 sep 2024];4(1-2):53-8. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=378343669007>
 30. Alonso Preciado L, 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. [citado 13 sep 2024];27-41. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223022208004>
 31. Khodr HM. A linear programming methodology for the optimization of electric power generation schemes. IEEE Transactions on Power Systems. 2002;17(3):864-9. DOI 10.1109/TPWRS.2002.800982
 32. Moncayo Martínez LA, Fernando Muñoz D. Un sistema de apoyo para la enseñanza del Método Simplex y su implementación en computadoras. Univ. 2018. [citado 13 sep 2024];11(6). Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50062018000600029>
 33. Legrá Lobaina AA. Elementos teóricos y prácticos de la Investigación científico-tecnológica. Primera Edición. La Habana: Félix Varela. 2022. [citado 11 sep 2024];1-455. Disponible en: <http://bibliografia.eduniv.cu.8083/>
 34. Legrá Lobaina AA. Sensibilidad de los estimadores (A,U,Θ). Revista HOLOS. 2020. 36(1):1-18. DOI: 10.15628/holos.2020.7282.
 35. Legrá Lobaina A A. Evaluación del error en estimaciones (A,U,Θ). Revista HOLOS. 2018. 34(3):23-45. DOI: 10.15628/holos.2018.6193
 36. Miller I, Freund J and Johnson R. Probabilidades y Estadísticas para ingenieros. Cuarta Edición ed. México: Prentice-Hall Hispanoamericana S.A. 2005. [citado 13 Sep 2024]; Disponible en: https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9788429191233_A42647025/preview-9788429191233_A42647025.pdf

Recibido: 9/12/2024

Aprobado: 6/06/2025

Agradecimientos

Los autores agradecen a los operadores de la UEB Central de Motores Fuel oil de Moa que facilitaron el acceso a la información y el desarrollo de la investigación, especialmente a los ingenieros del despacho de operaciones, a los especialistas de mantenimiento, y al personal técnico y administrativo de la central.

Conflictos de intereses

Ninguno de los autores manifestó la existencia de posibles conflictos de intereses que debieran ser declarados en relación con este artículo.

Contribuciones de los autores

- Conceptualización: Arístides Alejandro Legrá Lobaina
- Curación de datos: Aliniuska Noa Ramírez
- Análisis formal: Aliniuska Noa Ramírez, Arístides Alejandro Legrá Lobaina, Reineris Montero Laurencio, Daniel Mendiola Ellis
- Investigación: Aliniuska Noa Ramírez
- Metodologías: Aliniuska Noa Ramírez, Arístides Alejandro Legrá Lobaina
- Redacción-borrador original: Aliniuska Noa Ramírez, Arístides Alejandro Legrá Lobaina, Reineris Montero Laurencio
- Redacción-revisión y edición: Aliniuska Noa Ramírez, Arístides Alejandro Legrá Lobaina, Reineris Montero Laurencio, Daniel Mendiola Ellis

Financiamientos

No se utilizó fuentes de financiamiento para realizar esta investigación.

Cómo citar este artículo

Noa Ramírez A, Legrá Lobaina AA, Montero Laurencio R, Mendiola Ellis D. Procedimiento para la gestión óptima de la disponibilidad de grupos de generación fuel oil. An Acad Cienc Cuba [Internet] 2025 [citado en día, mes y año];15(2):e2878. Disponible en: <http://www.revistaccuba.cu/index.php/revacc/article/view/2878>

El artículo se difunde en acceso abierto según los términos de una licencia Creative Commons de Atribución/Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0), que le atribuye la libertad de copiar, compartir, distribuir, exhibir o implementar sin permiso, salvo con las siguientes condiciones: reconocer a sus autores (atribución), indicar los cambios que haya realizado y no usar el material con fines comerciales (no comercial). © Los autores, 2025.

