



APLICACIÓN DE LA COMPUTACIÓN

Procedimiento para la operación de un microsistema de grupos
electrógenos diesel en situaciones excepcionales

*Procedure for the operation of a microgrid of generating group diesel in
exceptional situation*

Aliniuska - Noa Ramírez
Arístides Alejandro - Legrá Lobaina
Yiezenia- Rosario Ferrer

Recibido: septiembre de 2013
Aprobado: abril de 2014

Resumen/ Abstract

En el presente trabajo se realiza una simulación de la operación del microsistema de los Grupos Electrógenos Diesel de los municipios Moa y Sagua de Tánamo en la provincia de Holguín, Cuba ante situaciones excepcionales. El método propuesto parte de la caracterización del Sistema Eléctrico de Potencia local y de la fundamentación del trabajo de los Grupos Electrógenos Diesel en régimen ISLA. Con la ayuda del Microsoft Excel se realiza un estudio del comportamiento de la demanda. Se evalúa la forma de operación del microsistema para el mes de mayor demanda en el día donde se alcanzó el máximo valor absoluto de la misma, como si actuara ante una situación excepcional con la posible desconexión del Sistema Electroenergético Nacional. Se propone un procedimiento para la toma de decisiones sobre la operación del microsistema en situaciones excepcionales y se realiza una simulación utilizando el Método Simplex de programación lineal.

Palabras clave: microsistema de grupos electrógenos diesel, procedimiento, simulación, situaciones excepcionales, toma de decisiones.

This work presents a simulation of the operation of a microgrid of Diesel Generating Group in the Moa and Sagua of Tanamo municipalities (Holguin, Cuba) in some exceptional situation. The method proposed starts with the characterization of local electric power system and the foundation of the Diesel Generating Group in ISLA regimen. A study of the electric energy request behavior was make with the Microsoft Excel. It is evaluated the operation form of the microgrid for the day where the maximum absolute value of electric energy request was attained in the month with its greater value, as if it act in any exceptional situation moment disconnected of the national electric system. A procedure for the making decision on the operation of the microgrid facing exceptional situation is proposed and it is a simulation comes true utilizing programming linear method.

Key words: microgrid of diesel generating group, procedure, simulation, exceptional situation, making decision.

INTRODUCCIÓN

En Cuba, en el marco de la Revolución Energética surgen instalaciones de generación distribuida accionadas por motores de combustión interna diesel; las cuales contribuyen a aumentar la confiabilidad y la disponibilidad de potencia de reserva [1], al ser conectadas al Sistema Electroenergético Nacional (SEN) ante situaciones excepcionales que impliquen la operación aislada del SEN.

La Ley 75 de la Defensa Nacional abordada en la Directiva No1 del Consejo de Defensa Nacional para la Reducción de Desastres describe que las Situaciones Excepcionales (SE) constituyen estados de ese carácter que se establecen, de forma temporal, en todo el territorio nacional o en una parte de él, en interés de garantizar la defensa nacional o proteger a la población y a la economía en caso o ante la inminencia de una agresión militar, desastres naturales, otros tipos de catástrofes u otras circunstancias que por su naturaleza, proporción o entidad afecten el orden interior, la seguridad del país o la estabilidad del Estado. Ante estas situaciones, cada sistema de generación distribuida tiene características propias de funcionamiento que relacionan la potencia demandada por la carga en los circuitos eléctricos y su capacidad de generación. Cualquier evento externo o situación excepcional que provoque la falta de fluido eléctrico desde el SEN, conlleva a la creación de un microsistema compuesto por la Batería de Grupos Electrónicos Diesel (GED) de Moa y los dos emplazamientos de grupos electrónicos diesel (GEA) del municipio Sagua de Tánamo. El microsistema presenta una significativa diversidad de exigencias en cuanto a: la potencia de generación disponible y la asignada (en línea) y potencia de reserva nominal y la disponible respectivamente, los porcentajes de explotación de los GED y el factor de carga dando lugar a múltiples posibles combinaciones de operación a tener en cuenta en la toma de decisiones ante las SE. El objetivo de este trabajo es presentar un procedimiento que permita la toma de decisiones para la operación ante situaciones excepcionales del microsistema de grupos electrónicos diesel Moa-Sagua de Tánamo.

DESARROLLO

Descripción del Sistema Eléctrico de Potencia de Moa y Sagua de Tánamo

El suministro de energía del Sistema Eléctrico de Potencia del territorio de Moa proviene de la subestación de Cueto, con un nivel de tensión de 220 kV, hasta la subestación ubicada en Punta Gorda. Desde esta se alimentan: las empresas "Comandante Ernesto Che Guevara" y la Moa Níquel SA; una línea a la Subestación 110 kV de Baracoa; y un circuito doble hasta la subestación Moa 110 kV, y hasta la Batería de GED y los GEA de Sagua de Tánamo conformando el llamado Microsistema Moa-Sagua de Tánamo de GED [2]. La Batería de GED y los tres GEA de Sagua de Tánamo, operan con motores diesel de la marca MTU (Alemania) de la serie 16V4000 G81 y 16V2000 G81, generadores sincrónicos de la marca Marrelli (Italia) con la serie MJB 500 MB4 respectivamente, tienen una estación de combustible y un sistema de centrifugado. Poseen varios transformadores reductores y un transformador de fuerza, del cual se alimenta un transformador reductor para uso de la planta, así como, transformadores monofásicos que se conectan de este transformador para alimentar un Panel General de Distribución (PGD) y energizar los equipos del alumbrado, las garitas, las bombas centrífugas, las bombas de succión del diesel. El transformador de fuerza entrega la energía eléctrica a la subestación de Moa 110 kV. Esta cuenta con varios interruptores que alimentan las líneas de las subestaciones encargadas de la distribución hacia los circuitos residenciales de Moa y Sagua de Tánamo donde, además de los consumidores residenciales, se encuentran objetivos de primera categoría de los cuales solo algunos cuentan con Grupos Electrónicos de Emergencia (GEE).

Estimación de la demanda eléctrica en Moa y Sagua de Tánamo

Para el estudio de la demanda promedio anual se tomaron las mediciones de la potencia activa por medio de los analizadores de redes (Nulec) instalados en las subestaciones de distribución. Mediante el software *Windows Switchgear Operating System (WSOS)* se exportaron los datos al software *Microsoft Excel* para el estudio de la demanda residencial, vea la figura. 1.

Se obtuvo que los meses de mayor demanda fueron: enero, marzo, mayo, junio, julio y agosto los mismos se concentran en la primavera y en el verano; el mes de mayor demanda fue Julio con 10455,1 MW.

Operación del microsistema Moa-Sagua de Tánamo ante situaciones excepcionales

Al sincronizarse la Batería y los emplazamientos de Sagua de Tánamo, el microsistema queda constituido por once máquinas con una capacidad instalada de 18,832 MW como se muestra en la tabla 1.

La operación de estos GED es al 75 %, 85 % o potencia nominal (PRP) *Principal Power* y se opera a plena capacidad por tiempo limitado o a potencia limitada por tiempo limitado [2,3]. El microsistema de GED frente a situaciones excepcionales opera aislado del SEN, o sea, en ISLA.

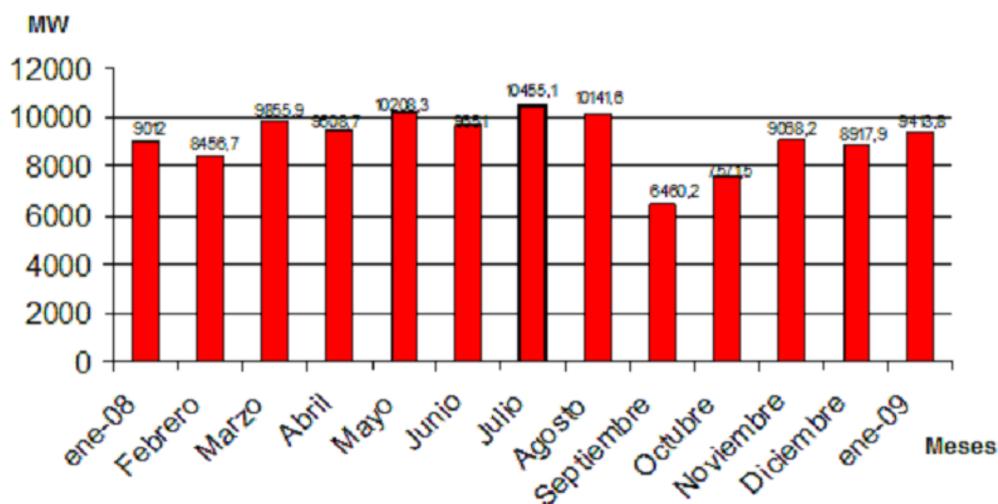


Fig. 1. Comportamiento de la demanda residencial mensual.

Grupos Electrógénos Diesel (GE)	Datos Nominales		
	S (MVA)	Factor de Potencia	P (MW)
8 GED (Batería) Moa	18,880	0,8	15,104
1 GEA Sagua de Tánamo	2,360	0,8	1,888
1 GEA Sagua de Tánamo	1,150	0,8	0,92
1 GEA El Carmen	1,150	0,8	0,92
Total: 11 GE	23,540	-	18,832

En este régimen de explotación en el microsistema se designa un solo grupo (GED líder) para realizar las operaciones de regulación de la frecuencia ante variaciones de carga, en un rango de potencia de 1 a 1,2 MW (con un tiempo de ajuste de 300 seg) para arrancar o parar un GED respectivamente. La designación del GED líder lo realiza la infraestructura de automatización y frecuentemente es el GED con menos horas de trabajo, se seleccionan los GED de la Batería únicamente, debido a que el sistema automatizado de los GEA no permite la designación de GED líder en microsistemas. Generalmente es la máquina #1, si dentro del esquema de arranque de la Batería no está disponible la máquina #1, entonces se selecciona la #2 y así sucesivamente hasta la #8. En este régimen la frecuencia estará controlada por el regulador de velocidad del GED líder. Las sobrecargas que sobrepasan la potencia máxima del GED líder (es la potencia adicional de un 10 % durante 1 hora en un periodo de 12 horas de explotación definida por el fabricante como la capacidad de sobrecarga) provocan una disminución de la frecuencia, automáticamente se conectan todos GED disponibles y se reajustan las potencias de generación. Si ante una SE no se garantizan los 1,2 MW de potencia disponible, entonces se desconectan algunos circuitos de distribución y se arrancan los GEE de los clientes de primera categoría afectados.

Por otra parte el regulador de voltaje del GED líder asegurará la estabilidad del voltaje en los circuitos alimentados, normalmente está prevista la operación de los GED que conforman el microsistema con un factor de potencia de 0,8 hasta 1 [4]. Desde el punto vista organizativo los usuarios del sector residencial forman una entidad independiente pues no son controlados por los operarios de los GED y del sistema cuando el microsistema opera en ISLA; en este caso, cada usuario toma la energía cuando la necesita sin realizar ningún análisis del estado de la situación excepcional. Desde el punto de vista operativo, las cargas eléctricas vinculadas con los usuarios constituyen los receptores de energía que consumen la producción de los GED y es esa la razón fundamental por la que el comportamiento de dichas cargas debe conocerse, para que la toma de decisiones por parte de los operarios se corresponda con la naturaleza, magnitud y duración de las cargas. Con este propósito se caracterizó el Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) y se analizó el comportamiento de las potencias horarias que se demandan.

Evaluación de la generación del microsistema Moa-Sagua de Tánamo ante situaciones excepcionales

A partir de la estimación de la demanda promedio anual puede ser evaluado el comportamiento de la generación considerando la ocurrencia de una situación excepcional en Moa o Sagua de Tánamo. Como caracterización del peor caso de comportamiento de la demanda promedio, se selecciona el día donde la demanda alcanzó su máximo valor absoluto en el mes de mayor demanda del año que se considera. Para el caso de estudio se seleccionó el comportamiento del 22 de julio ya que en este día a las 18 horas la demanda alcanzó el máximo valor absoluto de 21,4 MW, vea la figura. 2.

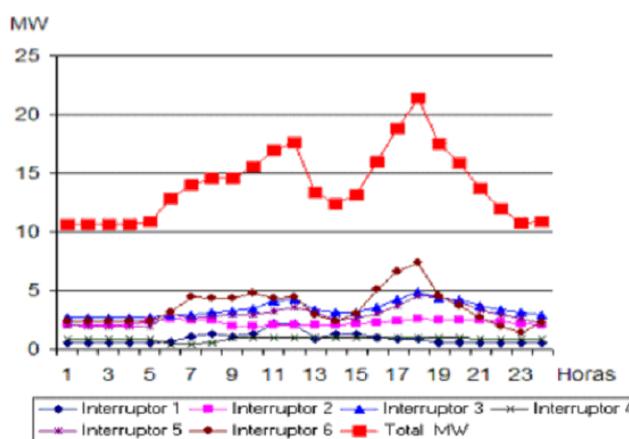


Fig. 2. Comportamiento de la potencia activa demandada por interruptores el 22 de Julio.

Se podrá evaluar la generación disponible para cualquier situación excepcional que requiera explotar el microsistema durante 24 horas, si se toma un valor igual o inferior a la demanda escogida. Por otra parte se debe tener en cuenta que para la operación del microsistema en ISLA la OBE municipal sincronizará el microsistema 2 horas antes de los horarios picos para poder tener disponible los GED de la Batería y para que los GEA puedan sincronizarse.

Para evaluar la generación disponible se consideró la Directiva No1 del Consejo de Defensa Nacional para la Reducción de Desastres en la cual se declaran como situaciones excepcionales: el estado de guerra o la guerra, el estado de emergencia y la movilización general. En este trabajo se analizan la primera y la segunda situaciones excepcionales. Además se consideran dos etapas: ante la inminencia de la situación excepcional y durante y después de la misma. En la primera etapa el microsistema trabaja en paralelo con el SEN y en la segunda en ISLA. Para la segunda etapa se deben conocer los repartos que quedan sin fluido eléctrico en los municipios de Moa o Sagua de Tánamo y la carga demanda, la cual se determina a través del siguiente procedimiento:

1. En los reparto afectados por la situación excepcional se debe determinar para cada circuito la cantidad y la capacidad de los transformadores de distribución de las cargas que se desconectan C_{t_j} ($j = 1, 2, \dots, P$) y P es la cantidad de transformadores.
2. Se determina el factor de potencia de los horarios de mínima (FP_{min}) y máxima demanda (FP_{max}) de las potencias demandadas por hora.
3. Se determinan los valores de los coeficiente de carga de las potencias demandas promedio anual por hora C_{c_k} ($k = 1, 2, \dots, 24$).
Este índice (C_{c_k}) se determinó con la ayuda del Microsoft Excel, a partir de las curvas de demanda anual de los horarios picos divididos entre los valores máximos de la demanda para cada hora en el año (en este caso se hizo también cada 15 min.) donde no hubo cambio de esquema o avería en los circuitos residenciales. Los datos de los coeficientes de carga de la demanda en cada hora están dispersos como promedio con respecto a la media en un valor de 5 % al 13 % en los horarios picos.
4. Para determinar las potencias horarias demandadas por la carga para cada situación excepcional se propone la ecuación (1).

$$Pc_k = Pcd_k - \left(\frac{(w_{\min} Fp_{\min} + w_{\max} Fp_{\max}) \sum_{j=1}^P Ct_j}{Cc_k} \right) \quad (1)$$

Donde: Pcd_k es la potencia horaria demandada por la carga del día 22 de julio, Pc_k son las potencias horarias demandadas por la carga con las que se construyeron las curvas para cada situación excepcional, w_{\min} y w_{\max} son coeficientes binarios que indican si es un horario de mínima o de máxima demanda y k representa las horas del día.

En la Primera Situación Excepcional: **Estado de Guerra o la Guerra.** Se considera la peor de las situaciones posibles. En ella se mantiene la energía eléctrica para la regulación del oscurecimiento y enmascaramiento de la luz, por lo que todo el sector residencial debe contar con el fluido eléctrico. El microsistema Moa-Sagua, no podrá asimilar la potencia demandada residencial en la hora pico de la tarde; se necesitará la conexión de todos los GEE de los clientes que se encuentran dentro de los circuitos residenciales hasta el momento en que falle el fluido eléctrico debido al ataque aéreo. En esta situación se desconectarán algunos o todos los circuitos residenciales, provocando la disminución del valor de la potencia demandada parcial o totalmente. Si disminuye parcialmente, los encargados de tomar decisiones en esta SE, decidirán que cargas alimentar. Para esta SE no se puede definir cuáles son los clientes de primera categoría que se afectan porque está en dependencia de los ataques del enemigo. Además se supone que los GED del microsistema no sean blancos directos o que no se hayan desconcentrado. De no cumplirse esta condición el análisis y los resultados serían diferentes a los planteados.

En la Segunda Situación Excepcional: Se considera al menos uno de los siguientes casos:

Inundaciones provocadas por la rotura de la presa Nuevo Mundo. Quedaría desconectada el 21,4 % de la carga. El microsistema cuenta con suficiente capacidad instalada. En la hora pico de la tarde se explotarían 8 grupos operando al 100 % y la máquina líder al 110 %. En esta situación excepcional se afecta directamente a 12 clientes de primera categoría de los cuales solo 2 cuentan con GEE.

Ciclones o tormentas tropicales. Se consideró como caso más crítico el huracán Ike (del 2008). Durante el paso de este fenómeno se produjo una reducción de aproximadamente un 65 % de la carga. El SEN estuvo disponible y los clientes de primera categoría trabajaron sin interrupción hasta que los vientos alcanzaron velocidades mayores a los 60 km/h, momento en que se desconectaron todos los circuitos. Después del paso del huracán, los daños causaron la necesidad de suplir aproximadamente 38,9 % de la carga. Para estas demandas, la Batería de GED de Moa tiene suficiente capacidad instalada, siendo innecesaria la conexión de los GEA, o sea, no se crea el microsistema. Como el huracán afectó la mayor parte de las redes de distribución de Moa y Sagua de Tánamo, 6 clientes de primera categoría quedaron aislados de estos, solamente 2 clientes tenían GEE, los mismos trabajaron ininterrumpidamente hasta que se restableció paulatinamente la red.

Inundaciones terrestres provocadas por intensas lluvias. Se estima que la desconexión probable de la carga es de un 6,64 %. La potencia demandada en el horario pico de la tarde no puede satisfacerse con el trabajo del microsistema Moa-Sagua de Tánamo. En el mismo deben explotarse 10 grupos al 100 % y la máquina líder al 110 %, el déficit de potencia de reserva disponible en la hora pico de la tarde es de 1,15 MW, por consiguiente, se desconectó un circuito con aproximadamente igual potencia demandada y tenía únicamente 1 cliente de primera categoría. Es importante precisar que la explotación de la Batería de GED y los GEA al 100 % no es recomendable por el tipo de potencia, o sea, de potencia continua por tiempo limitado de la máquina, que la OBE municipal es la que controla la desconexión y conexión de los circuitos de distribución y de los GEE y que la OBE provincial es la que establece el valor de la potencia de reserva nominal por el concepto de calidad de la energía (3 MW).

Como resultado del estudio se observó que: frente a los ciclones o tormentas tropicales y rotura de la presa, la potencia demandada de Moa y Sagua de Tánamo puede ser asumida por el microsistema en la hora pico. Además se mantiene aproximadamente la potencia de reserva nominal horaria. Y ante el estado de guerra o la guerra e intensas lluvias, la potencia demandada es mayor o igual que la potencia de generación disponible del microsistema, el GED líder se explotará al 110 %, durante 1 hora, seguidamente se procederá a la conexión de los GEE en dependencia de su disponibilidad, se desconectarán a su vez los circuitos de distribución con una potencia demandada aproximadamente igual al déficit de potencia de reserva disponible y se sacará después de transcurrida la hora pico el GED líder del estado de sobrecarga. En los

horarios cercanos a las horas pico de la mañana y la tarde la potencia de reserva nominal no se asegura. Solamente fuera de estos periodos es que se garantiza aproximadamente la misma.

Los valores de las potencias demandadas para cada situación excepcional y su relación con la generación disponible en el microsistema son fundamentales para la toma de decisiones de los operadores del microsistema y de la OBE, principalmente porque se podrá conocer en qué horarios la potencia de generación disponible no sufre la potencia demandada por la carga. Además se estimará la potencia de reserva nominal, el déficit de potencia reserva nominal y disponible respectivamente, la potencia a desconectar, los porcentajes de explotación de los GED y la condición del factor de carga, además de los clientes de primera categoría que se afectan y los GEE que se deben conectar.

Procedimiento para la operación del microsistema de grupos electrógenos diesel Moa - Sagua de Tánamo en situaciones excepcionales

La operación del microsistema de los N grupos electrógenos diesel Moa - Sagua de Tánamo en situaciones excepcionales es esencialmente la tarea de determinar los coeficientes porcentuales K_i de explotación de cada uno de los M grupos electrógenos diesel disponibles [5], de manera que se satisfaga, si es posible, la potencia de demanda horaria de la carga. Para proceder a esta tarea es necesario, además, conocer de cada generador GE_i ($i=1; 2; \dots; N$) las potencias nominales: P_{n_i} en MW y los índices de explotación para lo cual se proponen las ecuaciones (2), (3), (4) y (5).

1. Índice de sobre costo: ISC_i

$$ISC_i = 100 \left(\frac{CN_i - CR_i}{CN_i} \right) \quad (2)$$

Donde CN_i y CR_i son los costos de explotación nominal y disponible en % respectivamente.

2. Índice de tiempo de trabajo: ITT_i

$$ITT_i = 100 \left(\frac{T2_i}{T1_i} \right) \quad (3)$$

Donde $T1_i$ es el tiempo de trabajo que falta para el próximo mantenimiento y $T2_i$ es el tiempo de trabajo desde el último mantenimiento, expresados en horas.

3. Índice de probabilidad de rotura: IPR_i

$$IPR_i = 100 \left(\frac{NR_i}{TH_i} \right) \quad (4)$$

Donde NR_i : número de roturas en el año y TH_i : total de horas trabajadas en el año.

4. Índice general de penalización

$$U_i = \left(\frac{A_1 ISC_i + A_2 ITT_i + A_3 IPR_i}{A_1 + A_2 + A_3} \right) \quad (5)$$

Donde A_1 , A_2 y A_3 son factores de ponderación (pesos) que son establecidos por los encargados en la medida que sean más o menos influyentes los índices mencionados.

La tarea planteada puede modelarse matemáticamente como un problema de programación lineal [6], para lo cual se proponen las ecuaciones (6) y (7).

Donde P_{c_k} es la potencia demandada por la carga (MW), K_i es el porcentaje de explotación de los grupos en % y l_1 y l_2 son los límites inferior y superior para la búsqueda de K_i respectivamente.

La aplicación del Método Simplex a este modelo conduce a diferentes soluciones en dependencia de los valores de l_1 y l_2 . En la presente investigación se propone calcular las soluciones óptimas para diferentes combinaciones de valores de l_1 y l_2 de manera que se obtendrá un conjunto o espacio de soluciones que permite escoger aquella que mejor satisface las demandas no formalizables de la tarea, este método permitirá seleccionar los GED a explotar, de manera tal que el costo de combustible del microsistema sea el mínimo [7].

$$\left\{ \begin{array}{l} l_1 \leq K_1 \leq l_2 \\ \vdots \\ l_1 \leq K_M \leq l_2 \\ \sum_{i=1}^N K_i P n_i = P C_k \\ 1 \leq K_M \leq l_2 \\ \sum_{i=1}^N K_i U_i \rightarrow \text{minimizar} \end{array} \right. \quad (6)$$

$$l_2 \geq l_1 \quad (7)$$

Este procedimiento se implementó en una aplicación informática desarrollada mediante el IDE Borland Delphi 7.0, vea la figura. 3.

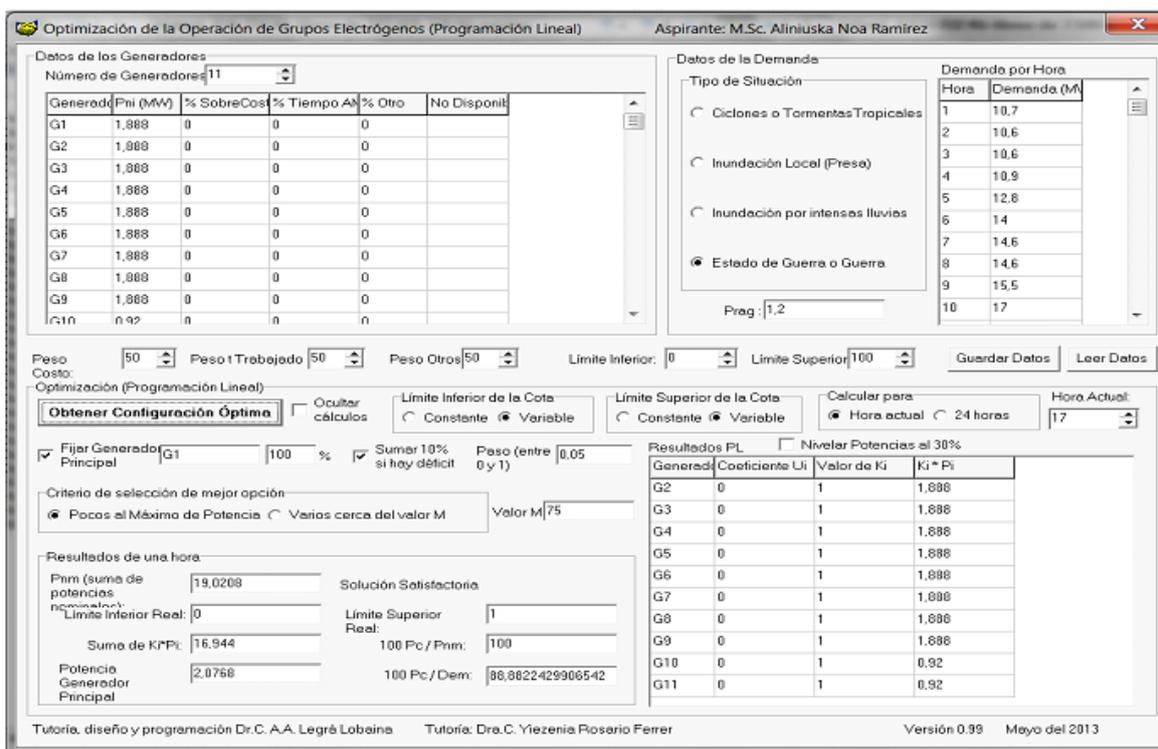


Fig. 3. Ventana de diálogo de la aplicación del procedimiento de cálculo de los coeficientes K_i de utilización de cada GE_i .

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Sea N el número de GED disponibles por su estado técnico. Frente a una situación excepcional que obligue la desconexión del SEN en el microsistema, el número de grupos dependerá de la potencia disponible, pero también de la necesidad de mantenimiento periódico de los grupos, por lo que la energía necesaria deberá poder quedar asegurada por $(N-1)$ grupos, sin necesidad de desconexión de las cargas. Además se sigue operando los GED al menos a un 50 % de su carga nominal, una tasa menor es perjudicial para los grupos. Por

ejemplo la explotación de los grupos por debajo del 30 % condiciona que el motor diesel gire en frío afectándose el proceso de combustión y de lubricación. Teniendo en cuenta estas condiciones se determina el grado de utilización del microsistema, o sea, el Factor de carga (Fc). En este tipo de instalación se debe analizar la posible avería de un grupo en explotación, teniendo ya uno fuera de servicio por mantenimiento, para estas condiciones el número de GE es (N-2). El mayor Fc inicial que puede utilizarse con N grupos instalados de manera que no se necesite la desconexión de cargas no prioritarias cuando (N-2) grupos funcionan, se obtiene por medio de la ecuación (8):

$$Fc = \left(\frac{N - 2}{N - 1} \right) \tag{8}$$

Donde Fc: es el factor de carga.

En este caso tenemos un microsistema con 11 grupos, como se muestra en la ecuación (9):

$$Fc = \left(\frac{11 - 2}{11 - 1} \right) = 90\% \tag{9}$$

El factor de carga más elevado para N = 11 será de 90%, es decir, se trabajará con M=9. Siendo posible conectar en paralelo un GED de reserva antes de parar otro por mantenimiento o avería, estos serán preferiblemente los GEA de Sagua de Tánamo. El procedimiento descrito se aplicó al microsistema Moa-Sagua de Tánamo para las 24 horas del día 22 de julio, asumiendo las demandas de este día para los cuatro casos descritos de situaciones excepcionales. Se consideró el GE₁ como máquina líder y el GE₁₀ o el GE₁₁ como reserva ya que son lo que tiene menor capacidad instalada (0,92 MW), vea tabla 1. Se asumieron iguales los índices ISC; ITT e IPR, así como sus ponderadores. Desde el punto de vista matemático se asume que los límites I₁ y I₂ son variables; el paso se tomó igual a 0,05. Los resultados donde K_i < 0,30 se elevan artificialmente a 0,30 y se reajustan los K_i de los GE cada vez que se nivela artificialmente a 0,30 en los casos de estudio en que es necesario mejorar los porcentajes de los GED para satisfacer racionalmente la demanda. Por otra parte en los casos donde no se cumple con la demanda la máquina líder se sobrecarga al 110%. Como criterio se seleccionó “Pocos al máximo de potencia”, con el mismo se establece que los GE deben explotarse con el porcentaje mayor posible de manera que se satisfaga la potencia demandada por la carga. Se realizaron cuatro simulaciones una para cada SE en la hora, vea la tabla 2. Además se tienen en cuenta las siguientes condiciones iniciales: se simulará inicialmente para un factor de carga del 90 % y sin nivelar o reajustar al 30% los porcentajes de explotación de los GED. En la simulación para 1 hora se determinaron los parámetros de explotación del Microsistema Moa-Sagua de Tánamo para cada caso de estudio, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Datos de los resultados de la simulación para 1 hora.

Cas. de est.	Pot. Dem. (MW)	Porcentajes de explotación de los GED del microsistema										Parámetros de explotación del microsistema			
		GE ₂ K2 (%)	GE ₃ K3 (%)	GE ₄ K4 (%)	GE ₅ K5 (%)	GE ₆ K6 (%)	GE ₇ K7 (%)	GE ₈ K8 (%)	GE ₉ K9 (%)	GE ₁₀ K10 (%)	GE ₁₁ K11 (%)	Potencia asignad. (MW)	Potencia asignad. líder (MW)	Potencia asignad. (%)	Potencia disponib. (%)
1	21,4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	16,944	2,0768	100	88,882
2	16,8	1	1	1	1	1	1	1	89,83	0	0	14,9111	1,888	89,209	100
3	12,9	1	1	1	1	1	83,26	0	0	0	0	11,011	1,888	68,500	100
4	17,7	1	1	1	1	1	1	1	1	85,65	0	15,981	1,888	85,652	100

Caso de estudio 1 (estado de guerra o la guerra): es el único caso de estudio donde no se mantienen ninguna de las condiciones iniciales. En esta hora se constata que la demanda se puede suplir solamente en un 88,882 %. Explotando 10 GED al 100 % y la GED líder al 110 %, por lo tanto, es necesario

desconectar cargas no prioritarias donde la suma de las potencias demandadas sean igual o mayor a los 2,379 MW.

Caso de estudio 2 (inundaciones por la rotura de la presa): La potencia demandada se supe al 100 % con 2 GED de reserva (dos GED de 0,92 MW) para un factor de carga del 90 % cumpliendo con las condiciones establecidas. Explotando 8 GED al 100 % y 1 al 89,83 % de su potencia nominal, se obtiene 89,209 % en la generación de la potencia asignada. Se cuenta con 2,033 MW de potencia de reserva disponible, con un déficit de reserva nominal de 0,967 MW. Este déficit se puede suplir si se saca de la reserva el GED, de tomarse esta decisión los directivos de la UNE-GD debe de valorar cuál de las dos opciones es más económica, mantener el nivel de voltaje en la líneas o gastar combustible durante la explotación del GED, la opinión de los autores, es no explotar el GED porque en situaciones excepcionales la reserva de combustible en emplazamiento y la disponibilidad del GED es más importante.

Caso de estudio 3 (ciclones o tormentas tropicales): La potencia demandada se puede suplir al 100 % con 4 GED de reserva (dos GED de 0,92 MW y dos de 1,888 MW) para un factor de carga del 70 %. Explotando 6 GE al 100% y 1 al 83,26 % de su potencia nominal, se alcanza un 68,5 % en la generación de la potencia asignada, conservándose 5,933 MW de potencia de reserva disponible para estas condiciones de explotación no se crea el microsistema porque con la Batería GED de Moa satisface la potencia demandada por la carga.

Caso de estudio 4 (inundaciones por intensas lluvias): La potencia demandada se supe al 100 % con 1 GED de reserva (un GED de 0,92 MW) para un factor de carga del 100 %. Explotando 9 GE al 100 % y 1 al 85,65 % de su potencia nominal, se obtiene 85,652 % en la generación de la potencia asignada. Se cuenta con 0,963 MW potencia de reserva disponible, con un déficit de reserva nominal de 2,037 MW. De las simulaciones de los casos de estudio, en el primero de ellos es donde el microsistema Moa-Sagua de Tánamo no tiene suficiente capacidad instalada para satisfacer la demanda de la carga. En la figura 4, que se muestra a continuación se observan los resultados de los parámetros del microsistema para esa situación excepcional. La determinación de la curva de la potencia que se generan y los déficit de reserva de potencia les permiten a los operados del microsistema y a los especialistas de la OBE poder planificar ante una situación excepcional de forma manual los porcentajes de trabajo de los grupos y conocer a qué hora se deben desconectar las cargas para afectar a la menor cantidad de consumidores.

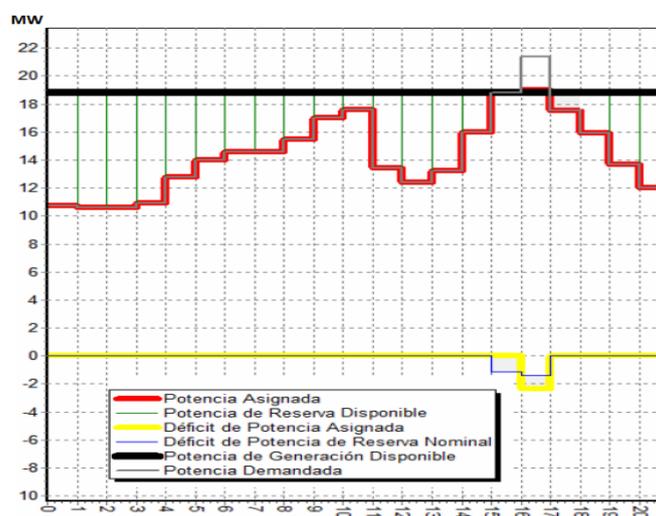


Fig. 4. Curvas del comportamiento del microsistema durante 24 horas del día 22 de Julio

CONCLUSIONES

El procedimiento propuesto constituye una técnica factible que apoya la toma de decisiones para la operación ante situaciones excepcionales del microsistema de grupos electrógenos diesel Moa-Sagua de Tánamo. El análisis del comportamiento de la demanda residencial en el año y en el día donde se obtuvo el

máximo valor absoluto de la misma permitió estimar las potencias a suplir por el microsistema en las cuatro situaciones excepcionales y determinar en cada una, cuáles son los clientes de primera categoría que se afectan y de estos los que disponen de GEE. Esta información se utilizó para simular los parámetros del microsistema y los porcentajes de explotación por medio del método Simplex de programación lineal, así como determinar los coeficientes porcentuales de explotación de cada grupo teniendo en cuenta factor de carga del microsistema y el criterio de "Pocos al máximo de potencia", obteniéndose para cada caso de estudio el valor de la potencia de generación asignada en MW y el porcentaje en que esta es satisfecha por los grupos en relación con la potencia demandada. El único caso de estudio donde el microsistema no tiene suficiente capacidad instalada para suplir la potencia demandada es en el Estado de Guerra o la Guerra y solo durante la hora 17. La rapidez del método y la velocidad con que se obtiene los resultados en las simulaciones permitirá mejorar la planificación de la explotación de los microsistemas de Grupos Electrógénos Diesel, de la Unión Nacional Eléctrica para la Generación Distribuida (UNE-GD) y la OBE.

REFERENCIAS

- [1]. Oficina Nacional de Estadística e Información (ONEI). Dirección de industria y medio ambiente. *Electricidad en Cuba: Indicadores seleccionados*, en línea, enero-junio 2012, p. 4-7, consultado: 2 de junio de 2013, Disponible en: <http://www.onei.cu/publicaciones/04industria/prodconselectricidad/ProdConsElectJuni12.pdf>.
- [2]. GUERRERO ROJAS, Y.; *et al.*, *Simulación de sistema híbrido de generación eléctrica para la ciudad de Moa*. En: IV EnerMoa, 2012, p. 4, Holguín, Cuba: ISMM, ISBN: 978-959-16-2067-5.
- [3]. PEREZ BICET, F., *Análisis de la eficiencia de los grupos electrógenos diesel Santiago Industrial y Santiago Este*. En: II Congreso Cubano de Ingeniería Eléctrica CCIE- Cujae, 2012, La Habana, Cuba, p. 2, ISBN: 978-959-261-4055.
- [4]. DE ARMAS, M.; *et al.*, "Operación eficiente de los bloques generador-trasformador en las unidades de generación distribuidas". *Revista Ingeniería Energética*, 2012, vol.33, n.3, p. 240-249, ISSN 1815-5901.
- [5]. DE LA FÉ, S.; DELMAR, J., "Distribución óptima de carga en emplazamientos de generadores". *Revista Ingeniería Energética*, 2012, vol.33, n.1, p. 87-94, ISSN 1815-5901.
- [6]. KHODR, H.M., *et al.*, "A Linear Programming Methodology for the Optimization of Electric Power-Generation Schemes". *IEEE Transactions on Power Systems*, 2002, vol.17, n.3, p. 864-869, ISSN 0885-8950.
- [7]. DE LA FÉ, S., *et al.*, "Pronóstico del consumo de combustible de grupos motogeneradores empleando una red neuronal". *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 2010, vol.4, p. 53-58, ISSN 2227-1899.

AUTORES

Aliniuska Noa Ramírez

Ingeniera Eléctrica, Profesora Asistente, Máster en Electromecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM). Las Coloradas. Holguín. Cuba.

e-mail: anoar@ismm.edu.cu

Arístides Alejandro Legrá Lobaina

Licenciado en Educación Especialidad Matemáticas, Profesor Auxiliar, Doctor en Ciencia Técnicas, Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa (CEETAM). Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM). Las Coloradas. Holguín. Cuba.

e-mail: alegra@ismm.edu.cu

Yiezenia- Rosario Ferrer

Licenciada en Ciencia de la Computación, Profesor Auxiliar, Doctora en Ciencias Técnicas. Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM). Las Coloradas. Holguín. Cuba.

e-mail: jessie@ismm.edu.cu