



Oscilaciones de Potencia, Tensión y Corriente en Unidades de Generación Distribuida

Power, Voltage and Current Oscillations in Distributed Generation Units

Marcos A.- de Armas Teyra
Alvinn – Ruiz Pérez

Recibido: Septiembre del 2012
Aprobado: Enero del 2013

Resumen/ Abstract

En las plantas de generación distribuidas accionadas por motores reciprocantes es necesario conocer las fluctuaciones de tensión, corriente y potencia para evaluar la calidad de la energía que entregan estos grupos electrógenos y como criterio de diagnóstico técnico. Las causas de estas fluctuaciones son diversas. La fundamental se debe a la presencia de oscilaciones forzadas producidas por el momento irregular de los motores primarios. Otras razones se encuentran en las excentricidades constructivas, el desbalance de corriente, los armónicos espaciales y de tiempo, la variación de la configuración del sistema, etc. En este trabajo fueron evaluadas satisfactoriamente las oscilaciones de una máquina conectada a la red mediante la instalación de un analizador de redes de 32 cortes por ciclo a la salida del generador de una de estas unidades. Se expone como caso de estudio las oscilaciones observadas en un generador de 425 kVA/480 V accionado por un motor Diesel de seis cilindros y cuatro tiempos en la Provincia de Cienfuegos, Cuba.

Palabras clave: calidad de la energía, generadores accionados por motores reciprocantes, oscilaciones.

In distributed and standby power plants driven by reciprocating motors, is important to know the voltage, current and power oscillation as a delivery power quality and diagnostic criteria. There are several oscillation causes. The fundamental is due to the irregular torque of primary motors. Other causes are due to constructive eccentricities, current unbalance, time and spatial harmonics, changes in systems configuration, etc. In this paper the fundamental oscillations of a grid connected machine were evaluated with a power analyzer installed in one generating power plant. As a case there are shown the observed oscillations in 425 kVA generator driven by a four times, six cylinders Diesel motor in Cienfuegos Province of Cuba.

Key words: oscillations, power quality, reciprocating engines driven generator.

INTRODUCCIÓN

En Cuba, con la generación distribuida y con la extensión de la generación emergente a múltiples servicios, se ha incrementado en varios cientos el número de grupos de generación que emplean motores de combustión interna. Por ejemplo, según datos estadísticos de 2009 [1], existen en el país 416 grupos de generación de fuel oil con 904,2 MW de capacidad, 893 grupos de generación Diesel con 1219,8 MW y 6000 grupos emergentes con 1320,0 MW. La principal función de estas máquinas es para suplir carga base, para suministrar o reducir la carga pico en el Sistema

Eléctrico Nacional o como fuentes emergentes de hospitales, centros de comunicación, acueductos y otros servicios. Un aspecto de interés relacionado con las plantas de generación Diesel es la fluctuación continua de los parámetros de potencia, tensión y corriente al perturbarse el equilibrio entre el momento aplicado al eje del generador y el electromagnético desarrollado [2-3]. Este desequilibrio puede deberse, por ejemplo, a la asimetría en el disparo de los cilindros y aún en máquinas nuevas, perfectamente balanceadas y en buen estado operacional, existen oscilaciones que dependen del número de cilindros de la máquina y de los tiempos en el movimiento del pistón. Por supuesto, también surgen oscilaciones debidas a la asimetría constructiva, al desbalance en las corrientes de línea y de fase, debido a la presencia de armónicos espaciales en el campo, al efecto distorsionante de la reacción de armadura, a la existencia de armónicos temporales en la forma de onda de la corriente, etc. Estas distorsiones, para mayor complicación, varían con el estado de carga, con las perturbaciones de una naturaleza u otra en los parámetros de la red eléctrica exterior y debido a las averías que pueden presentarse en el sistema de excitación del generador y en el motor primario. En este trabajo se exponen las causas fundamentales de estas perturbaciones y se observan los resultados obtenidos mediante la instalación de un analizador de redes a la salida de una unidad que entrega su potencia a una red de distribución en el municipio de Cumanayagua en Cienfuegos, Cuba.

MATERIALES Y MÉTODOS

Oscilaciones forzadas

Las oscilaciones forzadas surgen debido al carácter armónico del momento del motor primario. Los armónicos del momento están asociados a la asimetría de encendido de los cilindros y a la frecuencia de encendido de éstos. En el caso de motores de dos tiempos, y N cilindros, la frecuencia que se manifiesta tendrá el orden N , y en una máquina de cuatro tiempos será $N/2$. Por supuesto esto corresponde a una operación perfectamente balanceada. En una máquina real, aún nueva, surgen armónicos debido a que todos los cilindros no producen el mismo momento. Por ejemplo, si un cilindro no posee la ignición correcta, su momento se reduce y surge una oscilación de baja frecuencia. [2-5] La ecuación general es la dada por (1):

$$M_{EMG} + M_J + M_{SDES} + M_{AM} = M_{EJEMEDIO} + \sum_{v=1}^n M_{vm} \cos(v\omega_e t + \mathcal{G}_v) \quad (1)$$

Donde:

- P es el número de polos
- J es la constante de inercia de la máquina
- v es el orden del armónico de momento presente
- α es la desviación angular de la fuerza electromotriz con relación a la tensión exterior
- ω_e es la velocidad angular de rotación del motor

\mathcal{G}_v es el ángulo de fase correspondiente al armónico de orden v

M_{vm} es la amplitud del momento armónico desarrollado

M_{EMG} es el momento electromagnético

M_J es el momento de inercial;

M_{SDES} es el momento sincronizador

M_{AM} es el momento amortiguador que en el caso de oscilaciones pequeñas es proporcional a la velocidad de variación del ángulo α

Si se consideran las variaciones en las cuales no da tiempo de reaccionar al regulador del motor primario, los momentos electromagnéticos; M_{EMG} y medios; $M_{EJEMEDIO}$ se cancelan y las oscilaciones debidas a la acción forzada quedarán determinadas por la expresión (2):

$$\frac{J}{P} \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + K_{AM} \frac{d\alpha}{dt} + M_{SDES} \times \alpha = \sum_{v=1}^n M_{vm} \cos(v\omega_e t + \mathcal{G}_v) \quad (2)$$

La solución de esta ecuación diferencial es tradicional y es determinada totalmente si se conocen los coeficientes lineales y la función temporal que la define. Sin embargo, esta tarea puede complicarse por la carencia de información y por la influencia de otros factores colaterales a la acción forzada del motor primario. Por ejemplo, y sólo con la intención de simplificar, si el generador se encuentra desconectado de la red y en vacío, se pueden despreciar el momento amortiguador y el momento sincronizador. De esta forma el problema se reduce a resolver la ecuación diferencial (3):

$$\frac{J}{P} \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = \sum_{v=1}^n M_{vm} \cos(v\omega_e t + \vartheta_v) \quad (3)$$

La solución de esta ecuación tiene la forma dada en (4):

$$\alpha = - \sum_{v=1}^n \frac{P}{J} \frac{M_{vm}}{(v\omega_e)^2} \cos(v\omega_e t + \vartheta_v) \quad (4)$$

De donde:

La máxima amplitud es la dada por (5):

$$\alpha_{v\max} = \frac{P}{J} \frac{M_{vm}}{(v\omega_e)^2} \quad (5)$$

A partir de estas ecuaciones y conociendo las amplitudes de tensión armónica arrojadas por el analizador instalado en los terminales del generador, es posible conocer los componentes armónicos del momento en vacío. Conocer las oscilaciones del momento en vacío, tanto en magnitud como en frecuencia, es una información que depende del estado técnico del motor primario y puede utilizarse con el propósito de:

1. Caracterizar las oscilaciones del momento del motor primario
2. Diseñar una herramienta de diagnóstico que permita identificar posibles fallas en el mismo

Para ello se deben registrar, clasificar y comparar la magnitud de los momentos desarrollados. En cierta medida ello indica utilizar el propio generador como sensor de los armónicos de torsión presentes debido a las irregularidades del motor. Este aspecto será presentado con mayores detalles en un trabajo posterior.

Las técnicas utilizadas por los fabricantes de grupos electrógenos para reducir estas oscilaciones se fundamentan en la selección adecuada del momento de inercia J , en el empleo de devanados amortiguadores en los generadores y de estabilizadores de potencia que controlan la excitación. También cuando se operan baterías de generadores, el control de la secuencia del ángulo de encendido en toda la batería conduce a la reducción de las oscilaciones de potencia. [2]

Otros factores que influyen en el análisis armónico

La presencia armónica en los generadores se complica debido a otros factores. Por ejemplo, en un generador surgen armónicos de tiempo en la tensión con una frecuencia múltiple a la fundamental que se deben a la forma de onda espacial no sinusoidal del campo de excitación. Como se sabe estos armónicos se tratan de reducir al mínimo desde la etapa de diseño al modificar las zapatas polares en los generadores de polos salientes, con la distribución del devanado de excitación en los generadores de rotor cilíndrico, con la conexión y la reducción del paso y la distribución del devanado del estator del generador, con el control del entrehierro y con el grado de saturación de la máquina, etc. No obstante, con el incremento de la carga y la reacción de armadura, el campo se deforma y el contenido armónico aumenta. A esta situación se añade el hecho de que debido a la presencia de cargas no lineales, a transformadores saturados, y a otras razones, en las líneas sobre todo industriales y de distribución, pueden circular corrientes que

poseen un comportamiento no sinusoidal en el tiempo. Estas corrientes se componen de diferentes armónicos temporales de orden n a cada uno de los cuales se asocian armónicos espaciales de orden ν en el entrehierro que incrementan aún más el espectro armónico temporal de tensión.

Por otra parte, la reluctancia variable debido a la presencia de las ranuras del estator provoca variaciones de flujo que inducen armónicos de tiempo cuyo orden y magnitud depende del número y la conformación de la ranura de la máquina. También la excentricidad y la asimetría constructiva de los generadores producen armónicos en la tensión. Otro tipo de armónicos existente en los generadores se debe a la corriente de secuencia negativa debido al desbalance de las corrientes del estator. Esta corriente produce vibraciones como resultado de la interacción del flujo de excitación y del flujo de secuencia negativa que crea en el estator. Del mismo modo, surgen armónicos por la interacción del campo fundamental del estator, con el creado por las corrientes inducidas de doble frecuencia en el rotor por el campo de secuencia negativa provocado por la asimetría.

Como cabe suponer, todo este escenario complica el análisis y la discriminación de los componentes armónicos en los generadores accionados por máquinas Diesel particularmente cuando se encuentran bajo carga. No obstante, de las causas mencionadas son precisamente las oscilaciones forzadas las que provocan los armónicos y las variaciones de la calidad de la energía más considerables en estos grupos. [2-4]

La figura 1, muestra un esquema simplificado de la batería donde fueron realizadas las mediciones.

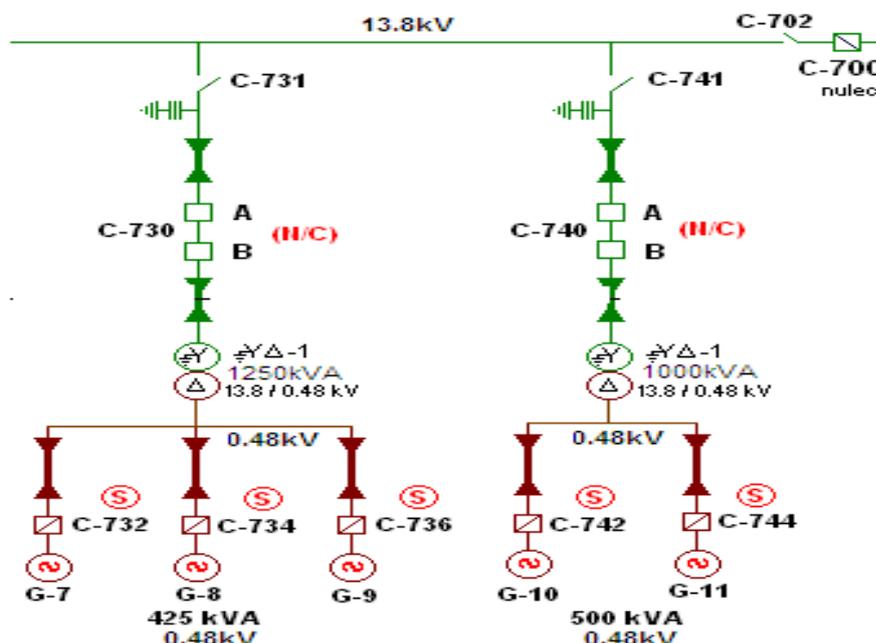


Fig. 1 Batería el Tablón.

Las figuras 2 y 3, muestran las formas de onda de tensión y corriente obtenidas de una máquina de 425 kVA, 1800 rpm. En las figuras 4, 5, 6 y 7, se observa el contenido armónico correspondiente como resultado de la aplicación de la transformada rápida de Fourier a estas señales. Las mayores amplitudes se asocian a los 60 Hz naturales del sistema.

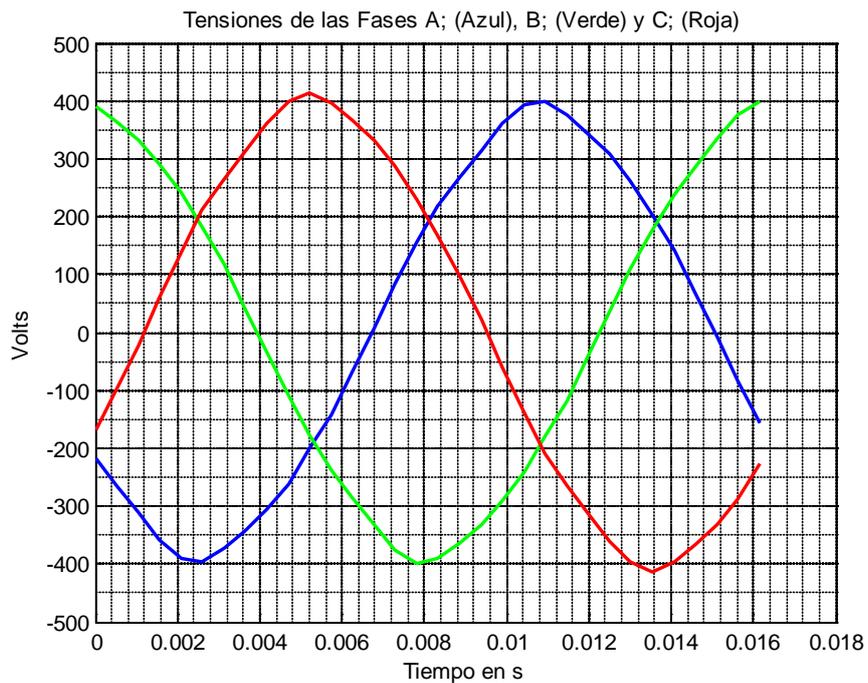


Fig. 2 Formas de onda de tensión.

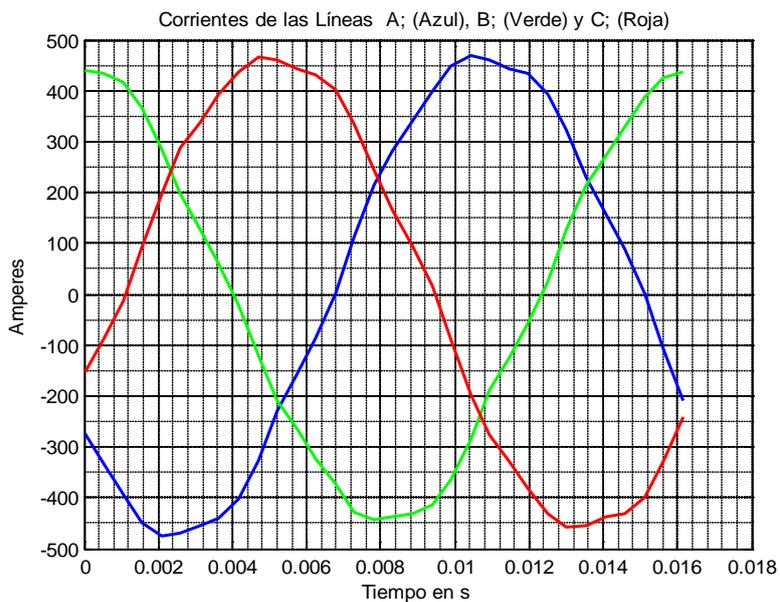


Fig. 3 Formas de onda de la corriente.

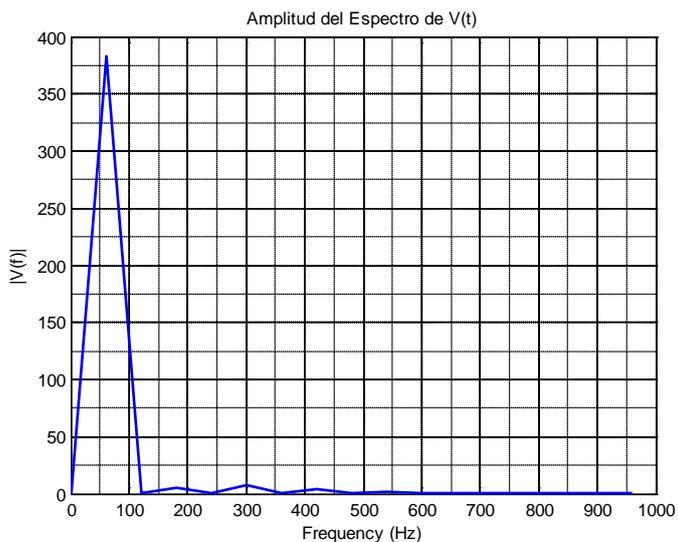


Fig. 4 Espectro de tensión.

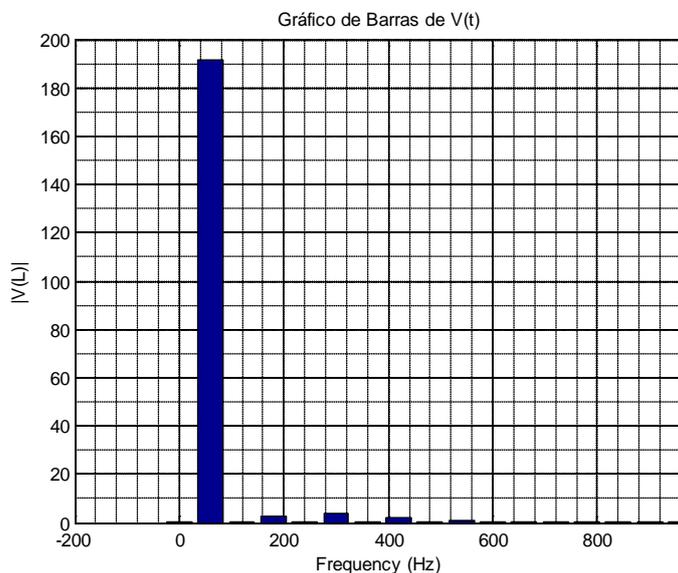


Fig. 5 Gráfico de barras del espectro de tensión.

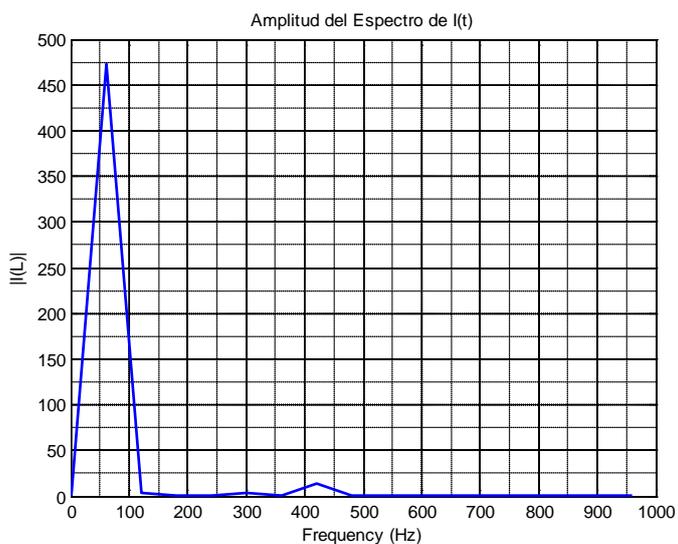


Fig. 6 Espectro de corriente.

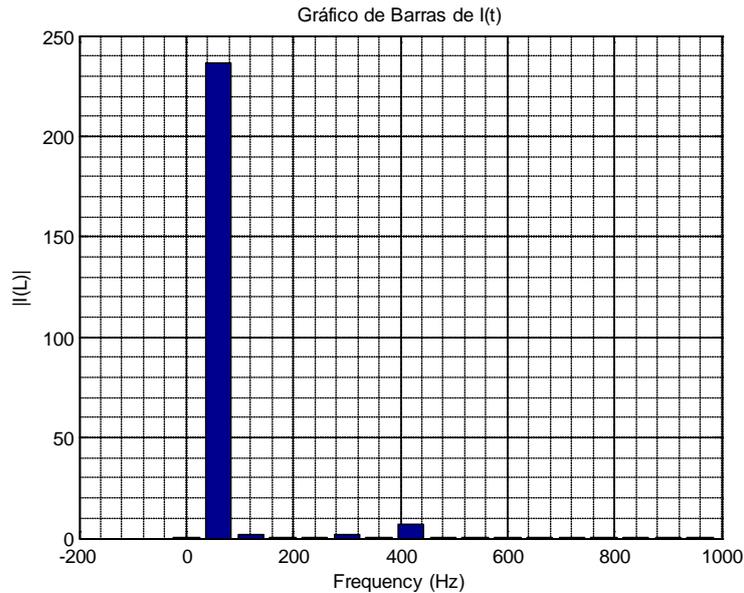


Fig. 7 Gráfico de barras del espectro de corriente.

La figura 8, muestra las variaciones de la potencia entregada a la carga y su valor medio durante un ciclo determinada a partir de la composición armónica de la tensión y de la corriente. Todas las mediciones fueron realizadas con un analizador de redes *CANDURA Instruments EnergyPro EP600* clase 0,5% y 32 muestras por ciclo instalado en los terminales de salida del generador.

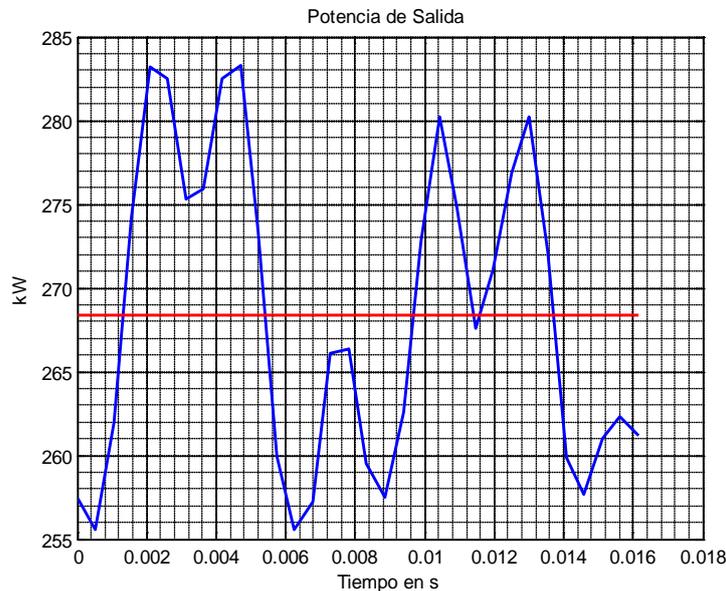


Fig. 8 Oscilaciones en la potencia de salida.

Consideraciones sobre el momento en el entrehierro

Entre los muchos procedimientos existentes, las mediciones eléctricas en los terminales del generador son útiles para evaluar y determinar el momento en el entrehierro. De los métodos disponibles los eléctricos poseen la mayor precisión [6-7]. Esta posibilidad es aprovechada como se puede observar a continuación para obtener las oscilaciones del motor en este trabajo

En la figura 9, se muestra el flujo de potencia de un generador sincrónico. En él P_{exc} , P_{fb} , P_{ad} , $P_{Núcleo}$ y P_{Cu1} representan la potencia en el sistema de excitación; las pérdidas de fricción y batimiento, adicionales, de núcleo y de cobre del estator. P_{mec} representa la potencia mecánica entregada por el motor primario y W_{mec} es la velocidad de rotación correspondiente a la frecuencia angular del sistema. $T_{ELÉCTRICO}$ y T_{AG} son el torque eléctrico y en el entrehierro respectivamente.

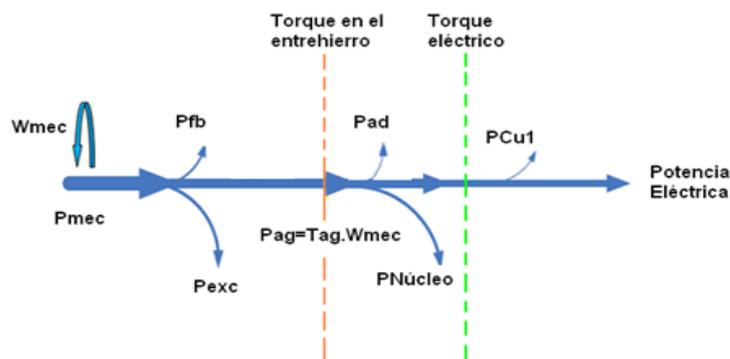


Fig. 9 Flujo de potencia en el generador

Como la potencia eléctrica de salida es una componente rotacional, el torque eléctrico interno de la máquina se puede determinar como la suma de la potencia de salida más las pérdidas de cobre del estator dividido por la velocidad angular dado por (6).

$$T_{ELÉCTRICO} = \frac{P_G + P_{CU1}}{W_e} \quad (6)$$

La potencia en el entrehierro se obtiene al adicionarle las pérdidas de núcleo y las adicionales de estator a la potencia desarrollada por el momento eléctrico. La expresión es la dada en (7)

$$P_{AG} = T_{ELÉCTRICO} \times W_{mec} + P_N + P_{ad1} \quad (\text{kW}) \quad (7)$$

Al dividir la potencia en el entrehierro por la velocidad de rotación mecánica del rotor se obtiene el momento en el entrehierro como se muestra en (8).

$$T_{AG} = P_{AG} / W_{mec} \quad (\text{N-m}) \quad (8)$$

Si se considera que en estado estable la razón de variación de la energía magnética es aproximadamente cero, las pérdidas de núcleo son constantes y dado que las pérdidas adicionales poseen una magnitud relativamente pequeña se puede asumir que el momento en el entrehierro y el momento eléctrico poseen la misma composición armónica. Estas ecuaciones son las que permiten utilizar la medición de la potencia de salida del generador como sensor de las acciones y estado técnico del motor. Debe tomarse precauciones si la caída de tensión en la resistencia del estator es considerable y si la composición armónica de la corriente es variable pues potencialmente pueden modificar esta relación [3-4].

RESULTADOS Y DISCUSIONES

A partir de las mediciones realizadas, y empleando como recurso básico MATLAB y los datos de los registros de un analizador de redes instalado a la salida de la batería formada por los generadores 7, 8 y 9 de la figura 1, estando en funcionamiento sólo el generador número 9 accionado por un motor de combustión interna de 6 pistones y cuatro tiempos, se obtuvieron los resultados mostrados en las figuras dadas a continuación: En las figuras 10 y 11, se muestran los gráficos de las oscilaciones de potencia de salida y de tensión.

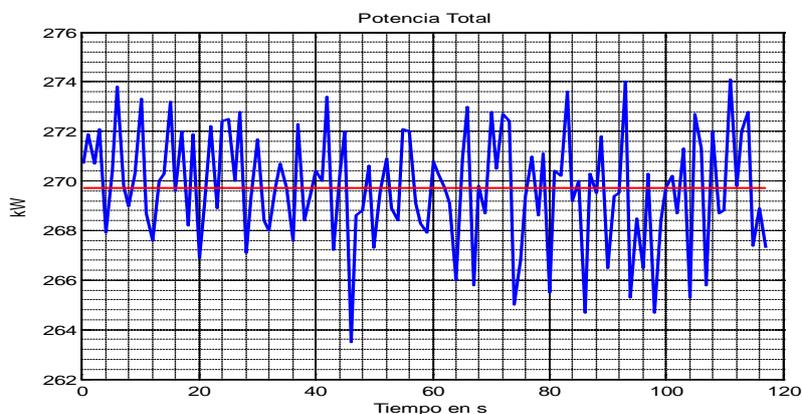


Fig. 10 Gráfico de las oscilaciones en la potencia de salida.

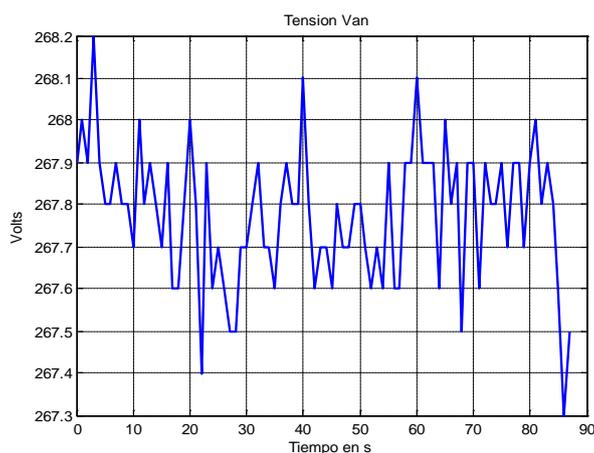


Fig. 11 Gráfico de oscilaciones de tensión.

Las figuras 12 y 13, muestran las oscilaciones de corriente y de frecuencia.

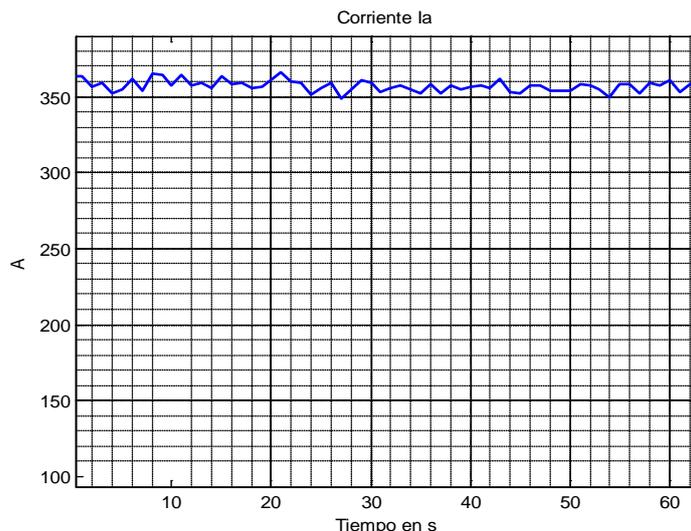


Fig. 12 Gráfico de variaciones de la corriente.

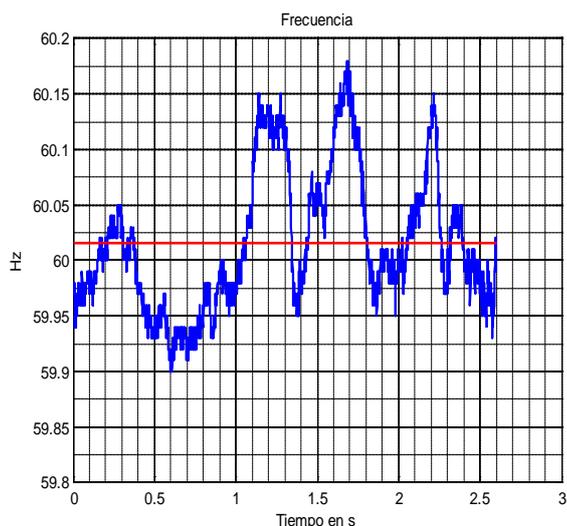


Fig. 13 Gráfico de variación de la frecuencia.

Un aspecto a considerar es que el tratamiento posterior de estas oscilaciones mediante herramientas como la transformada wavelet, redes neuronales probabilísticas u otras podría determinar anomalías en el sistema, asimetrías en el funcionamiento mecánico del motor, etc. En un trabajo posterior, empleando un analizador de 128 cortes por ciclos, y operando la máquina en vacío, se pretende avanzar en este tipo de investigación.

Debe considerarse que en un conjunto de máquinas operando en paralelo, es posible desarrollar mediciones en los totalizadores que conduzcan a un análisis similar del emplazamiento. Existen posibilidades de reducir estas oscilaciones mediante procedimientos reportados en otros trabajos como el desfasaje del ángulo de encendido de los pistones en las máquinas en servicio. Esto presupone un nuevo sistema de control que puede ser solicitado a los proveedores. [2]

CONCLUSIONES

1. En los grupos de generación distribuida accionados por los motores diesel se producen oscilaciones de potencia que modifican la calidad de la energía entregada y pueden evaluarse con poca complejidad.
2. Las oscilaciones en vacío provocadas por el motor primario pueden ser utilizadas para el desarrollo de herramientas de diagnóstico.
3. El procedimiento puede ser aplicado a emplazamientos de baterías para evaluar los resultados de la calidad del servicio entregado.

REFERENCIAS

- [1]. José A. Suarez, Pedro A. Beaton, Ronoldy F. Escalona and Ofelia Pérez Montero. "Energy Environment and development in Cuba". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. ELSEVIER 16 (2012) p 2724-2731.
- [2]. Platero, Carlos A., Francisco Blázquez, *et al.*, "Coordinated Power Quality Improvement in Multiunit Diesel Power Plants" *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, n. 4, p. 1102 -1111, December 2010.
- [3]. Amin Almasi, "Advanced torsional study method and coupling selection for reciprocating machines" 5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09), *Karabuk, Turkey* May 13-15, 2009.
- [4]. S.H. Gawande, *et al.*, "Detecting Power Imbalance in Multi-Cylinder Inline Diesel Engine Generator Set" ISSN 978-1-4244-5586-7 Vol1 2010 pp 218-223
- [5]. K. Ashwini, G. N. Sreenivas and T. Giribabu, "Modeling and simulation of engine driven induction generator using hunting network method" *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*. JUNE 2009, vol. 4, p. 90-96, ISSN 1819-6608.
- [6]. B. Herndler, Dr P. Barendse and Dr M.A. Khan, "Considerations for Improving the Non intrusive Efficiency Estimation of Induction Machines Using Air Gap Torque Method" 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC) p. 1516-1521.
- [7]. Bin Lu, Thomas G. Habetler and Ronald G. Harley, "A Nonintrusive and In Service Motor Efficiency Estimation Method Using Air Gap Torque with Considerations of Condition Monitoring" in Proc. IEEE Industry Applications Annual Meeting. October 2006, vol. 3, p. 1533-1540.

AUTORES

Marcos Alberto de Armas Teyra

Ingeniero Eléctrico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA), Facultad de Ingeniería. Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cienfuegos, Cuba.

e-mail: marmas@ucf.edu.cu

Alvin Ruiz Pérez

Ingeniero Eléctrico, M.Sc en Eficiencia Energética. Especialista en Redes y Sistemas de la Organización Básica Eléctrica del Municipio de Cumanayagua