

Facultad: Metalurgia y Electromecánica

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Trabajo de Diploma

En opción al Título de Ingeniero Eléctrico

*Estimación del Factor de Potencia para los porcentajes de
cargas nominales en la operación de los grupos electrógenos
Fuel Oil de Moa*

Autor: Wilfredo Almaguer Guerra

Tutor: Mr.C. Aliniuská Noa Ramírez

Dr.C. Reineris Montero Laurencio

Moa, Holguín, Cuba
Junio del 2017

"Año 59 de la Revolución"

Declaración de Autoridad

Yo:

Diplomante: Wilfredo Almaguer Guerra.

Tutores: Mr.C. Aliniuska Noa Ramírez y Dr.C. Reineris Montero Laurencio

Autor del Trabajo de Diploma:

Certifico la propiedad intelectual del trabajo de diploma “Estimación del Factor de Potencia para los porcentos de cargas nominales en la operación de los grupos electrógenos Fuel Oil de Moa” a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMMM), Dr. Antonio Núñez Jiménez, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime necesaria o conveniente.

Wilfredo Almaguer Guerra

(Diplomante)

Mr.C. Aliniuska Noa Ramírez

(Tutor)

Dr.C. Reineris Montero Laurencio

(Tutor)

DEDICATORIA:

Este Trabajo está dedicado por encima de todo a Dios, por darme la oportunidad de estudiar esta carrera y a mis padres Yamilé Guerra Escobar y Wilfredo Almaguer Saldívar por siempre estar ahí en los momentos más difíciles de la vida, por tanto amor, y por encargarse de que nunca me faltara nada.

A la memoria de mi abuela Elisa Saldívar por ser un ángel en mi vida.

AGRADECIMIENTO:

Quiero agradecerle ante todo a Dios por darme la oportunidad de estudiar esta carrera y ser mi motor impulsor en esta vida y por todos los recuerdos y cosas buenas que sucedieron durante estos años de carrera.

A mis padres Wilfredo y Yamilé por darme la fuerza, el apoyo y encargarse de forjarme durante todos mis estudios dándome el aliento de que no hay metas imposibles.

A mi hermana Roxángela Almaguer Guerra por ser esa niña linda capaz de dar los mejores consejos en los momentos más difíciles.

A mis abuelos Gladis, Sergio y Reynaldo por toda la ayuda brindada y por siempre apoyar y querer a su nieto.

A mis amigos Yoendry, Yonky, Luisi, Franki, y John por siempre estar ahí en todos los momentos durante estos largos 5 años, pueden estar seguros que donde quiera que esté nunca los olvidaré, porque una amistad así nunca se rompió.

A mi tutora Aliniuská Noa Ramírez por toda la ayuda brindada y por sus consejos para la tesis y también para la vida, gracias profe.

A todos mis compañeros de aula y aquellos que se preocuparon por mí durante el transcurso por la universidad.

A todos los que me han ayudado de una forma u otra como familiares, amigos y otros que se preocuparon por mí en los momentos que lo necesité.

A todas aquellas personas que pensaron que esto no sería posible.

Frase:

*El triunfo del verdadero hombre
surge de las cenizas del error.*

Pablo Neruda.

Resumen

En el presente trabajo se realiza la estimación de los factores de potencia (FP ; p.u) apropiados en la Central Eléctrica *fuel oil* de Moa para el: 80%, 85%, 90% y 100% de la carga nominal, con el objetivo de mejorar el nivel de voltaje (v ; kV) y la potencia reactiva (Q ; MVar) requerida a la salida de los grupos electrógenos que conforman esta planta. Para ello, se determinaron las características y los beneficios de la Generación Distribuida y su desarrollo en nuestro país; se abordaron los fundamentos para operar en paralelo los grupos electrógenos y se hizo una caracterización de las variables eléctricas necesarias para este estudio. Se realizó la descripción general de la central y de los principales equipos que intervienen en la calidad de la generación de energía eléctrica de la misma. Por medio de un estudio experimental se manipularon los FP : 0,94; 0,95; 0,97 y 0,98 para cada porciento de carga durante 2 horas cada uno respectivamente, obteniéndose el comportamiento de la potencia activa (P ; MW), la Q , y v en las 8 horas que duró el experimento, los datos obtenidos fueron procesados en el *software* Matlab, se construyeron las curvas: de P vs Q ; de FP vs v ; de Q vs v ; y de FP , de las cuales se analizaron las regularidades. Con este resultado se evaluó la caída de la característica de generación (Kg ; %) para cada FP en cada porciento de carga y su dependencia con v y Q a la salida de los grupos electrógenos.

Abstract

In the present work the estimation of the appropriate power factors (PF ; p.u) in the Moa Power Plant is performed for: 80%, 85%, 90% and 100% of the nominal load, with the objective of to improve the voltage level (v ; kV) and the reactive power (Q ; MVar) required at the output of the generating sets that make up this plant. For this, the characteristics and benefits of the Distributed Generation and its development in our country were determined; the fundamentals were approached to operate the generator sets in parallel and a characterization of the electrical variables was made necessary for this study. The general description of the plant and the main equipment involved in the quality of the electric power generation of the plant was carried out. By means of an experimental study the PF were manipulated: 0,94; 0,95; 0,97 and 0,98 for each percentage of charge for 2 hours each, respectively, obtaining the behavior of the active power (P ; MW), the Q , and v in the 8 hours of the experiment, the obtained data were processed In the Matlab software, curves were constructed: from P vs Q ; of FP vs v ; of Q vs v ; and PF , from which the regularities were analyzed. With this result we evaluated the drop of the generation characteristic (K_g ;%) for each PF in each percentage of load and its dependence with v and Q at the output of the generating sets.

Tabla de contenido.

Declaración de Autoridad.....	I
Frase:.....	IV
Resumen	V
Abstract.....	VI
Tabla de contenido.	VII
Introducción General	1
Capítulo 1: Marco Teórico-Conceptual	5
1.1 Introducción.....	5
1.2 Trabajos precedentes.....	5
1.3 Generación Distribuida.....	7
1.3.1 Características de la Generación Distribuida.....	7
1.3.2 Beneficios de la Generación Distribuida	8
1.3.3 Generación Distribuida en Cuba	9
1.4 Grupos Electrógenos Fuel Oil	10
1.4.1 Principales equipos que conforman los grupos electrógenos fuel oil	10
1.5 Fundamentos para la operación en paralelo de GEFO.....	12
1.5.1 Operación en paralelo de generadores de corriente alterna	12
1.5.2 Condiciones requeridas para operar en paralelo	13
1.5.3 Características de frecuencia-potencia y de voltaje-potencia reactiva de un generador síncrono.....	14
1.5.4 Característica de generación de potencia reactiva	17
1.6 Descripción de las variables eléctricas fundamentales en los grupos electrógenos fuel oil.....	19
1.7 Fundamentos para la compensación del Factor de Potencia	22
1.8 Conclusiones	23
Capítulo 2: Materiales y Métodos	24
2.1 Introducción.....	24
2.2 Descripción general de la Central Eléctrica fuel oil de Moa	24
2.2.1 Flujo Tecnológico	24
2.3 Regulador automático de voltaje AVR ET-SZ6.....	33
2.3.1 Principio de funcionamiento del ET-SZ6.....	33
2.3.2 Control autónomo del Regulador	34
2.3.3 Característica del regulador PID	35
2.4 Sistema de Supervisión y Adquisición de Datos (SCADA).....	37
2.4.1 Descripción y funcionamiento del software SCADA.....	38
2.5 Conclusiones	41
Capítulo 3: Análisis de los Resultados	42
3.1 Introducción.....	42
3.2 Estrategia de la investigación.....	42
3.2.1 Condiciones iniciales para el diseño del experimento	42
3.2.2 Descripción del diseño del experimento en el GEFO	43
3.3 Estimación de la característica de generación	49

3.4 Impactos tecnológico y social en la operación eficaz del sistema de grupos electrógenos fuel oil en el municipio de Moa	50
3.5 Conclusiones.....	52
Conclusiones Generales	53
Recomendaciones.....	54
Bibliografía	55
Anexos	I

Introducción General

Desde los comienzos del desarrollo de la energía eléctrica en el siglo XIX la humanidad se ha visto en la necesidad de contar con fuentes de energía que permitan suplir las necesidades energéticas para la producción de bienes y servicios. En la actualidad, suplir esta necesidad implica llevar a cabo un complejo proceso, que inicia con la generación de electricidad a partir de diversas fuentes (mediante la transformación de energía mecánica, química, térmica, entre otras, en energía eléctrica), y continúa con la transmisión y distribución de esta energía a los consumidores.

A lo largo de la historia, se han planteado dos filosofías para suministrar energía a los usuarios: la generación centralizada y la generación distribuida. La primera se caracteriza por tener grandes centrales generadoras, ubicadas lejos de los centros de consumo, que generan grandes bloques de potencia, que debe ser transportada a niveles de tensión muy elevados para disminuir las pérdidas por efecto Joule para luego ser distribuida entre los consumidores finales; mientras que la generación distribuida cuenta con un gran desarrollo en la actualidad; debido a que las centrales generadoras se encuentran ubicadas cerca de los centros de carga y se conectan directamente a la red de distribución, de esta forma el usuario puede interactuar con las redes de interconexión eléctrica sin incurrir en los costos de transmisión; esta representa un cambio en la generación de energía eléctrica y puede también ahorrar un gran por ciento de dinero y combustible; de ahí la vital importancia de su desarrollo próspero.

En nuestro país a raíz de la crisis energética ocurrida en el 2004 y en el marco de la Revolución Energética se toma como una de las nuevas alternativas un nuevo esquema de generación eléctrica mediante la instalación de baterías de grupos electrógenos, que operan con diésel o *fuel oil*, sincronizados al Sistema Electroenergético Nacional (SEN), lo cual constituye uno de los más profundos cambios conceptuales en la esfera de la generación eléctrica. Es decir, equipos con alta disponibilidad, facilidad para su instalación y niveles de potencia utilitaria

inferiores a las termoeléctricas y ante situaciones excepcionales que conlleven a la operación aislada, garanticen el suministro eléctrico.

Hoy se cuenta con un gran número de fuentes de energías renovables y un mayor empleo de los sistemas de grupos electrógenos con tecnologías diésel y *fuel oil*. En nuestra provincia se encuentran instalados grupos electrógenos MTU de la serie 2000 y 4000 de consumo de combustible diésel, 31 en subestaciones de distribución aisladas para 37,4 MW y 88 baterías ubicadas en subestaciones de 220 y 110 kV para 155,2 MW, distribuidos por sus municipios, los que unidos al emplazamiento de *fuel oil* de Moa suman una potencia de 252,6 MW. Además de que se cuenta con un sistema de aerogeneradores en el municipio de Gibara para aprovechar la energía del viento.

En los municipios de Sagua de Tánamo (El Carmen), Frank País (Barredera) se encuentra instalados grupos electrógenos de la firma MTU, de la serie 2000 y 4000. Estos emplazamientos comienzan a funcionar como un microsistema, el cual puede operar sincronizado con el SEN o en régimen isla en situaciones excepcionales.

En el municipio de Moa, se explota la Central Eléctrica *fuel oil* (CEFOM), la cual es de gran utilidad para aprovechar el crudo nacional y representa una ventaja ante los grupos diésel. Empleando la tecnología MAN & W (fabricación alemana) con una potencia de 18,4 MW por unidades y con un total de 10 unidades instaladas, logrando así una potencia total instalada de 184 MW a régimen de generación constante. Disponer de este valor de potencia en el municipio y teniendo en cuenta las características de consumo de energía del mismo implica una disminución significativa de la potencia a transmitir por líneas aéreas de larga distancia, aprovechando aún más la potencia instalada y disminuyendo así las pérdidas eléctricas por efecto Joule en dichas líneas.

Esta Central es actualmente la de mayor capacidad de generación en Cuba, durante el proceso de instalación se concibió para que pudiera satisfacer la demanda energética de la Empresa Ferroníquel, la cual tendrá una demanda máxima de 120 MW ya que operará dos hornos que consumirán 45 MW cada uno, necesitando de un suministro estable de energía, con una confiabilidad de

98,5 %[1], además la Central contribuye con la regulación de la tensión en la región oriental, ya que está interconectada al SEN en forma sincronizada, siendo el control de frecuencia ajustado a 60 Hz impuesta por el SEN, asegurando una confiabilidad de un 98,8 % de servicio ininterrumpido y con la posibilidad de generar por sí misma en isla para el municipio y/u otros.

El pasado año se desarrolló una tesis de grado en la Central para investigar el comportamiento de la regulación de tensión en los transformadores de salida de la central, debido a que solo es posible realizar esta regulación por medio de los cambia *tap* mecánicos de los transformadores, constituyendo una operación peligrosa para la vida de los técnicos. Este estudio se hizo en una sola máquina para el 85% de carga y con un factor de potencia inicial de 0,99, con el *tap* fijo en la posición 6 y la variación de tensión de $\pm 10\%$, bajo estas condiciones se movió el FP con un tiempo de espera de aproximadamente 30 minutos entre un punto de potencia y otro, y se terminó la prueba con un FP de 0,94, luego de transcurridas 3 horas. Como resultado se determinaron las posibles causas de las variaciones de tensión durante la operación de los grupos electrógenos *fuel oil* de Moa, y se enunciaron algunas medidas técnico-organizativas. Como consecuencia no se pudo constatar en este estudio para los porcentos de carga nominales cuales son los factores de potencia adecuados para el nivel de voltaje a la salida de los grupos electrógenos *fuel oil*, siendo esta nuestra **situación problemática**.

Problema de investigación

Insuficiente conocimiento sobre los factores de potencia adecuados para cada porcentaje de carga nominal que garantizan el nivel de voltaje requerido a la salida de los grupos electrógenos *fuel oil* para la operación eficaz de la Central.

Hipótesis del trabajo

Si se estiman los factores de potencia apropiados para cada porcentaje de carga nominal, entonces se garantizará el nivel de voltaje requerido a la salida de los grupos electrógenos *fuel oil* y por tanto se requerirá de generar menos potencia reactiva logrando de esta manera la operación eficaz de la Central.

Autor: Wilfredo Almaguer Guerra

Objeto de estudio

Sistema de grupos electrógenos *fuel oil* de Moa.

Campo de acción

El comportamiento del factor de potencia en los sistemas de grupos electrógenos *fuel oil* de Moa.

Objetivo general del trabajo

Estimar los factores de potencia apropiados para cada porcentaje de carga nominal de manera que se mejore el nivel de voltaje requerido a la salida de los grupos electrógenos *fuel oil* y se requiera de generar menos potencia reactiva.

Objetivos Específicos

1. Identificar los elementos que inciden en el comportamiento del factor de potencia y las variables eléctricas fundamentales en el sistema de grupos electrógenos *fuel oil*.
2. Caracterizar y estimar el comportamiento del factor de potencia para cada porcentaje de carga nominal en el sistema de grupos electrógenos *fuel oil* de Moa.
3. Analizar el impacto tecnológico en la operación eficaz de la Central Eléctrica *fuel oil* de Moa.

Capítulo 1: Marco Teórico-Conceptual

1.1 Introducción

Este capítulo propone como objetivo un análisis y revisión con respecto a otros trabajos encaminados hacia el modelo de la generación distribuida. Además, en el mismo, se realiza un resumen sobre las variables eléctricas y parámetros fundamentales para una correcta comprensión sobre el estudio investigativo. Así como las características a tener en cuenta en una central de grupos electrógenos para su correcto funcionamiento y una mejor eficacia.

1.2 Trabajos precedentes

Las investigaciones desarrolladas anteriormente que analizan los grupos electrógenos como objeto de estudio, abordan las tendencias y particularidades de estos sistemas que pertenecen al área de conocimiento definida como Generación Distribuida (GD). Este es un paradigma a tener en cuenta para disminuir las pérdidas por efecto Joule, aumentar la capacidad de generación y el ahorro de combustible debido a la utilización de nuevas tecnologías renovables y no renovables. Dentro de esta última se encuentran los grupos electrógenos, los cuales conectados a un sistema electroenergético contribuyen a aumentar la confiabilidad del mismo y ante situaciones excepcionales que conlleven a la operación aislada, garantizan el suministro eléctrico.

Los últimos estudios desarrollados en el municipio de Moa sobre grupos electrógenos se analizan a continuación:

La investigación de Dilsania Maresma Laurencio y Ailen Sergio Reyes Almaguer en el 2007[2] hace referencia a las causas por las cuales se comenzó a utilizar en Cuba la Generación Distribuida después de la crisis energética ocurrida en el 2004. Se expone el crecimiento ascendiente de la potencia instalada de esta tecnología en su primer año de explotación, aparece la estructura de los emplazamientos diésel así como las variantes para realizar su mantenimiento capital. Tomando como caso de estudio el emplazamiento de Moa, determinaron los índices de consumo de diésel para los regímenes de carga del 75, 80, 90 y

100% comparándolos con el comportamiento de las variables de presión y temperatura en el aceite, el aire, el diésel y líquido refrigerante. A partir de esas mediciones se identificaron modelos matemáticos multivariantes para los distintos niveles de cargas de un grupo electrógeno y se caracterizó el ciclo de vida útil de los filtros de diésel.

En el trabajo investigativo de Dionnys[3] (2008) se realiza un análisis estadístico sobre los distintos valores obtenidos de consumo de combustible con el principal objetivo de establecer un rango de variación del índice de consumo de combustible que caracterice el trabajo de la Batería de Grupos Electrógenos de Moa. Además aborda aspectos sobre la GD y explica la importancia del desarrollo de esta y el compromiso de nuestra Revolución a aumentar estas nuevas tecnologías. Desarrolla una descripción general de la Batería de Moa y una valoración técnico-económica del proceso, así como las afectaciones provocadas al medio ambiente; sin embargo, no hace ninguna referencia sobre el comportamiento de las variables eléctricas a la salida del generador, ni de fundamentos importantes como son la compensación de la Potencia Reactiva (Q) y el control del Factor de Potencia (FP) para una mejor eficiencia.

Iván Santiago (2016)[4] realiza un estudio sobre las variaciones de tensión durante la operación de los Grupos Electrógenos *fuel oil* de Moa; en el mismo, caracteriza los elementos principales que contribuyen a una adecuada regulación de tensión en la central, evalúa el comportamiento de la variación de tensión en los transformadores de salida y propone el uso adecuado de los reguladores de tensión en estos. Además hace mención a las principales variables eléctricas a tener en cuenta para el correcto funcionamiento de los grupos electrógenos; realiza una descripción general del emplazamiento y sus principales materiales y métodos. Concluye proponiendo que la regulación de tensión mediante los cambia *taps* de los transformadores sea de forma automática y no mecánica para el cuidado de la vida de los técnicos encargados, de esta forma se demuestra que la respuesta ante las variaciones de tensión sería más rápidas y eficiente; sin embargo, no determinó la eficacia de las

máquinas a distintos por cientos de explotación, ni el comportamiento de las principales variables eléctricas para distintos factores de potencia, pues en esta investigación todas las pruebas realizadas al generador fueron hechas en condiciones normales de operación, lo cual impidió la realización de un estudio más profundo en el emplazamiento, relacionado con el comportamiento de estas máquinas a distintos por cientos de explotación y con una variación del factor de potencia.

1.3 Generación Distribuida

Uno de los cambios conceptuales inherentes a la Revolución Energética radica en el establecimiento de un nuevo esquema de generación eléctrica (La Generación Distribuida por todo el país). Esta se basa en la instalación de baterías, dispersas a lo largo de todo el territorio nacional, y sincronizados al SEN. Los niveles de generación son inferiores a los de las termoeléctricas, por lo que, la salida de funcionamiento de alguno de ellos no crearía nunca una crisis como la ocurrida en el 2004 cuando se averiaron las centrales, Lidio Fernández Pérez y Antonio Guiteras[3].

1.3.1 Características de la Generación Distribuida

- Reduce las pérdidas en la red eléctrica: Estar más cerca del consumidor supone que las redes de transporte sean más cortas. Por lo tanto, la generación distribuida supone menos pérdidas de energía en el transporte de la electricidad desde la generación hasta el consumidor. Esto también influye en el ahorro a la hora de elevar la tensión eléctrica para su transporte.
- Mejorar la fiabilidad y la calidad del sistema eléctrico: Como hay pequeñas fuentes de generación (micro-generación), repartidas por el territorio, el fallo de una de las fuentes no supone un grave problema para el sistema eléctrico.

- Potencias reducidas: Las unidades de microgeneración suelen tener potencias inferiores a 3 kW aunque en general se suele decir que no sobrepasan 10 kW de potencia instalada[5].
- Energías renovables: En la generación distribuida está muy presente las energías renovables, ya que al estar tan cerca del consumo, son las más adecuadas.

1.3.2 Beneficios de la Generación Distribuida

El auge de los sistemas de GD se debe a los beneficios inherentes a la aplicación de esta tecnología, tanto para el usuario como para la red eléctrica. A continuación se listan algunos de los beneficios[5]:

a) Beneficios para el usuario

- Incremento en la confiabilidad.
- Aumento en la calidad de la energía.
- Reducción del número de interrupciones.
- Uso eficiente de la energía.
- Menor costo de la energía (en ambos casos, es decir, cuando se utilizan los vapores de desecho, o por el costo de la energía eléctrica en horas pico).
- Uso de energías renovables.
- Facilidad de adaptación a las condiciones del sitio.
- Disminución de emisiones contaminantes.

b) Beneficios para el suministrador

- Reducción de pérdidas en transmisión y distribución.
- Abasto en zonas remotas.
- Libera capacidad del sistema.
- Proporciona mayor control de energía reactiva.
- Mayor regulación de tensión.
- Disminución de inversión.
- Menor saturación.

- Reducción del índice de fallas.

1.3.3 Generación Distribuida en Cuba

Más del 40 por ciento de la capacidad de generación eléctrica en Cuba está basada en plantas generadoras distribuidas de pequeña escala. Este es uno de los más altos índices a nivel mundial. Estas plantas generan en base a diésel y *fuel oil*. El país progresa en su objetivo de desarrollar un nuevo paradigma energético.

La denominación de la Generación Distribuida en Cuba ha sido un concepto basado en el acercamiento de la generación a los consumidores. Surgió con motivos de la crisis energética que tuvo lugar en el año 2004.

Durante el período 2004-2005, las centrales termoeléctricas a base de petróleo Lidio Ramón Pérez y Antonio Guiteras, con tecnologías de más de 25 años de explotación, y que sólo garantizaban una disponibilidad promedio del 60%, ocurren frecuentes interrupciones incluyendo la avería de una de ellas que se extendió por 6 meses y causó severas afectaciones a la economía nacional al tener que parar su producción, más de 120 industrias, unidos a prolongados apagones sufridos en el sector residencial, esta situación se agravó aún más con el impacto del huracán Charlie en las líneas de transmisión de alta tensión. Todos los problemas antes mencionados afectaron a la economía cubana y dieron lugar a una crisis energética.

La introducción del modelo de Generación Distribuida resolvió la situación a corto plazo. La mayoría de las nuevas instalaciones de GD en el país son sistemas motogeneradores (grupos electrógenos) que queman combustibles fósiles (diésel y *fuel oil*), así como pequeños motogeneradores de emergencia. Estas tecnologías han tenido un impacto positivo en el medio ambiente, ya que tienen menores tasas de consumo específico (234 g/kWh), frente a las plantas termoeléctricas basadas en la quema de petróleo crudo (284 g/kWh en promedio). Además, debido a la dispersión de las centrales eléctricas, había un alto porcentaje de pérdidas técnicas en la transmisión de la electricidad. Un

Autor: Wilfredo Almaguer Guerra

aspecto adicional que pudiera señalarse como ventajoso de este nuevo modelo es que facilita una mayor penetración de las tecnologías energéticas renovables en el Sistema Electroenergético Nacional[4].

1.4 Grupos electrógenos fuel oil

La existencia de tecnologías que permiten el aprovechamiento del crudo nacional en la generación de electricidad para la generación distribuida, ha sido un aspecto de importantes análisis. Partiendo de las deficiencias de la generación con grupos electrógenos de consumo de combustible diésel se tiene como perspectiva lograr más sistemas estables de generación de energía eléctrica a partir de unidades con consumo de combustible *fuel oil* y mantenimientos con cantidad de horas superiores a los grupos electrógenos diésel. Los grupos fuel oil están constituidos por un motor de combustión interna, un generador sincrónico trifásico y un transformador de potencia, además de una serie de dispositivos que son los encargados del suministro de las materias primas necesarias en el proceso de combustión y generación de electricidad, así como una serie de equipos secundarios necesarios para el funcionamiento eficiente del equipamiento y la distribución de la energía. Estas formas de generación de energía surgen a raíz del desarrollo de la GD y las investigaciones realizadas para su desarrollo paulatino, de ahí que sea necesario conocer sus principales aspectos y parámetros a tener en cuenta para la realización de investigaciones en el futuro con el objetivo de lograr una mejor eficacia en la generación de la energía eléctrica[6].

1.4.1 Principales equipos que conforman los grupos electrógenos fuel oil

✓ Motor de combustión interna

El motor de combustión interna (MCI) es una máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química producida por un combustible que arde dentro de una cámara de combustión. La eficiencia del motor depende de parámetros como la calidad del combustible, el tiempo de mantenimiento, la sobreexplotación de las máquinas y la vigilancia constante de los principales parámetros técnicos-productivos además de requerir un sistema de control

Autor: Wilfredo Almaguer Guerra

seguro y robusto que pueda dotar al motor de un sistema de seguridad confiable que responda ante posibles eventualidades[4].

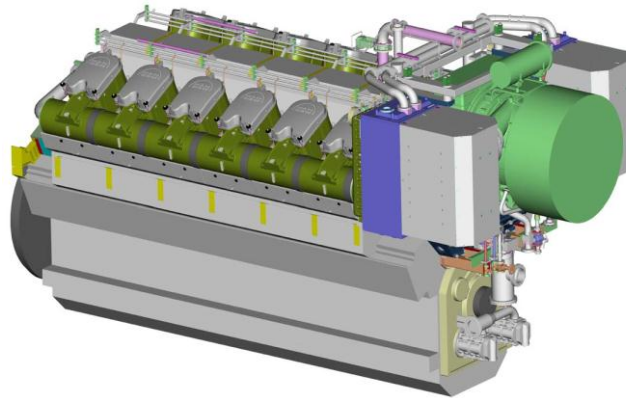


Fig.1.1 Motor de combustión interna de una central eléctrica *fuel oil*.

✓ **Generador Eléctrico**

Un generador eléctrico (GS) es un dispositivo capaz de mantener una diferencia de potencial eléctrica entre dos de sus puntos (llamados polos, terminales o bornes) transformando la energía mecánica en eléctrica. Esta transformación se consigue por la acción de un campo magnético sobre los conductores eléctricos dispuestos sobre una armadura (denominada también estator). Si se produce mecánicamente un movimiento relativo entre los conductores y el campo, se generará una fuerza electromotriz (F.E.M.).

Los generadores sincrónicos, son máquinas sincrónicas utilizadas para convertir potencia mecánica en potencia eléctrica. En un generador sincrónico se aplica una corriente directa al devanado del rotor, el cual produce un campo magnético. Entonces el rotor del generador gira mediante un motor primario y produce un campo magnético rotacional dentro de la máquina. Este campo induce un grupo trifásico de voltajes en los devanados del estator del generador.

Para los Grupos Electrógenos se utilizan GS de más baja velocidad. Estos generadores con un gran número de polos tienen rotores hechos de polos salientes con excitación de corriente directa (CD). Los polos de los rotores se hacen de laminaciones para reducir la pérdida adicional del rotor pero el cuerpo de este y el núcleo están hechos de acero sólido magnético. Con un gran número

Autor: Wilfredo Almaguer Guerra

de polos el devanado del estator se construye para un menor número de acoplamientos de ranura/polo, en muchos casos entre 6 y 12[4].

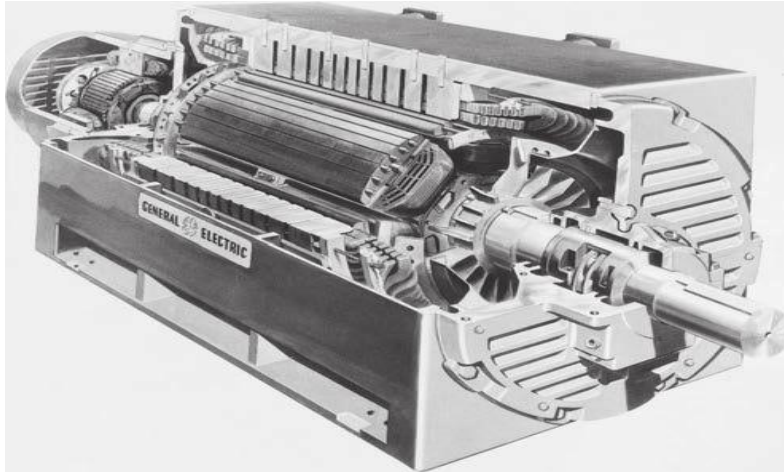


Fig. 1.2 Diagrama en corte de una máquina síncrona grande.

Nótese la construcción de los polos salientes y el excitador en el eje.

1.5 Fundamentos para la operación en paralelo de GEFO

1.5.1 Operación en paralelo de generadores de corriente alterna

En el mundo actual es muy raro encontrar que un generador síncrono suministre independientemente su propia carga. Esta situación sólo se encuentra en algunas aplicaciones que salen de lo normal, tales como los generadores de emergencia. En todas las demás aplicaciones de generadores hay más de uno que opera en paralelo para suministrar la potencia que requieren las cargas.

Los generadores síncronos se emplean en paralelo porque:

1. Varios generadores pueden alimentar una carga más grande que una sola máquina.
2. Tener varios generadores incrementa la confiabilidad del sistema de potencia, debido a que la falla de cualquiera de ellos no causa la pérdida total de potencia en la carga.
3. Tener varios generadores que operan en paralelo permite la remoción de uno o más de ellos para cortes de potencia y mantenimientos preventivos.

4. Si se utiliza un solo generador y éste no opera cerca de plena carga, entonces será relativamente ineficiente. Con varias máquinas más pequeñas que trabajan en paralelo es posible operar sólo una fracción de ellas. Las que operan lo hacen casi a plena carga y por lo tanto de manera más eficiente[7].

1.5.2 Condiciones requeridas para operar en paralelo

1. Los voltajes de línea *rms* de los dos generadores deben ser iguales.
2. Los dos generadores deben tener la misma secuencia de fase.
3. Los ángulos de fase de las dos fases a deben ser iguales.
4. La frecuencia del generador nuevo, llamado generador en aproximación, debe ser un poco mayor que la frecuencia del sistema en operación.

Estas condiciones de puesta en paralelo requieren ciertas explicaciones. La condición 1 es obvia: para que dos grupos de voltajes sean idénticos, deben tener la misma magnitud de voltaje *rms*. Los voltajes en las fases a y a' serán completamente idénticos en todo momento si ambas magnitudes y sus ángulos son iguales, lo que explica la condición 3. La condición 2 asegura que la secuencia en la que el voltaje de fase llegue a su pico en los dos generadores sea la misma. Si la secuencia de fase es diferente (como se observa en la figura 1.3a), entonces aun cuando un par de voltajes (los de fase a) estén en fase, los otros dos pares de voltajes estarán desfasados por 120°. Si se conectan los generadores de esta manera, no habrá problema con la fase a, pero fluirán enormes corrientes en las fases b y c, lo que dañará ambas máquinas. Para corregir el problema de secuencia de fase, simplemente se intercambian las conexiones en dos de las tres fases en una de las máquinas.

Si las frecuencias de los generadores no son muy parecidas cuando se conectan juntos, se presentarán grandes potencias transitorias hasta que se estabilicen los generadores en una frecuencia común. Las frecuencias de las dos máquinas deben ser casi iguales, pero no pueden ser exactamente iguales. Deben diferir por una pequeña cantidad para que los ángulos de fase de la máquina en

aproximación cambien en forma lenta con respecto a los ángulos de fase del sistema en operación.

De esta manera se pueden observar los ángulos entre los voltajes y se puede cerrar el interruptor S 1 cuando los sistemas estén exactamente en fase[7].

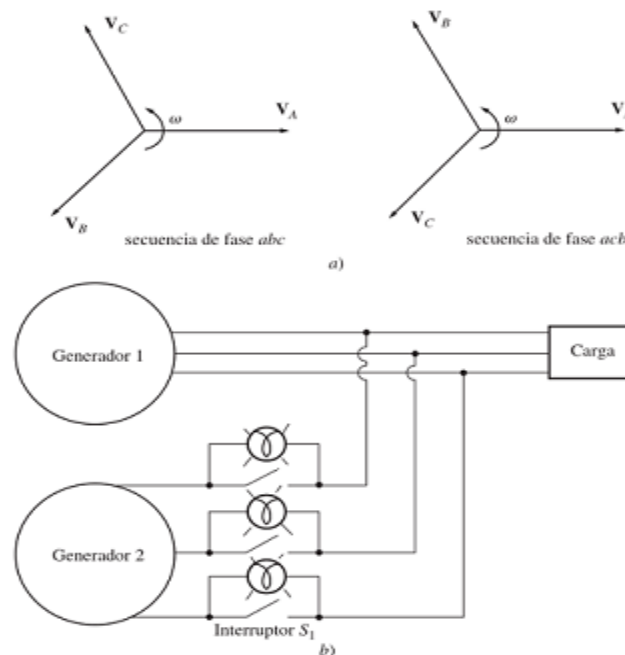


Figura1.3 Generador que se conecta en paralelo con un sistema de potencia en operación. a) Las dos secuencias de fase posibles en un sistema trifásico. b) Método de las tres lámparas para encontrar la secuencia de fase.

1.5.3 Características de frecuencia-potencia y de voltaje-potencia reactiva de un generador síncrono

Sin que importe la fuente original de potencia, todos los motores primarios tienden a comportarse de manera similar; a medida que la potencia que se toma de ellos se incrementa, la velocidad a la que giran disminuye. Por lo general, este decremento de velocidad es no lineal, pero se incluye algún tipo de mecanismo regulador para que la disminución de la velocidad sea lineal con el incremento de la demanda de potencia. Cualquiera que sea el mecanismo regulador presente en el motor primario, siempre se ajusta para suministrar una característica de caída suave con el incremento en la carga. La siguiente

Autor: Wilfredo Almaguer Guerra

ecuación (1.1) define la caída de velocidad (SD, por sus siglas en inglés) en un motor primario.

$$SD = \frac{n_{sc} + n_{pc}}{n_{pc}} \times 100\% \quad (0.1)$$

Donde n_{sc} es la velocidad del motor primario en vacío y n_{pc} es la velocidad del motor primario a plena carga. La mayoría de los motores primarios tienen una caída de velocidad de 2 a 4%, como se define en la ecuación (1.1). Además, la mayoría de los mecanismos reguladores contienen algún tipo de ajuste del punto fijado para permitir que varíe la velocidad de vacío de la turbina o motor.

La velocidad del eje está relacionada con la frecuencia eléctrica resultante por medio de la siguiente ecuación (1.2)

$$f_e = \frac{n_m \cdot P}{120} \quad (0.2)$$

La potencia de salida de un generador síncrono está relacionada con su frecuencia. En la figura 1.4 se puede ver un ejemplo de una gráfica de la frecuencia y la potencia. Las características de frecuencia-potencia de este tipo desempeñan un papel esencial en la operación en paralelo de los generadores síncronos.

La relación entre la frecuencia y la potencia se puede describir cuantitativamente por medio de la ecuación (1.3)

$$P = S_p (f_{sc} - f_{sis}) \quad (0.3)$$

Donde

P = potencia de salida del generador

f_{sc} = frecuencia en vacío del generador

f_{sis} = frecuencia de operación del sistema

S_p = pendiente de la curva, en kW/Hz o MW/Hz

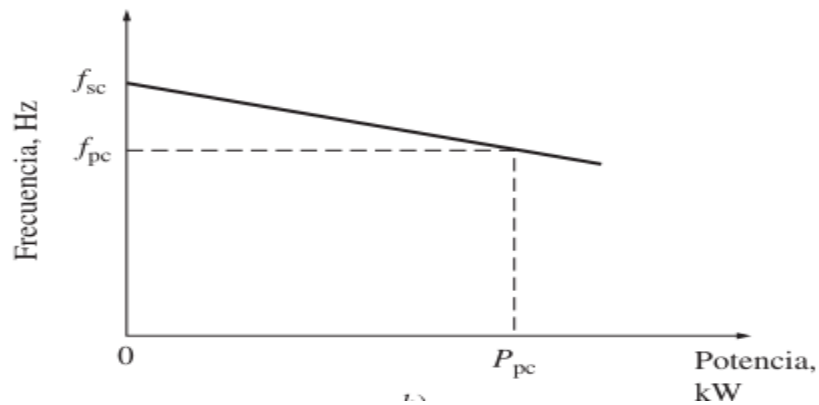


Fig. 1.4 Curva de frecuencia contra potencia resultante del generador.

Se puede deducir una relación similar para la potencia reactiva Q y el voltaje en las terminales V_T . Como ya se explicó, cuando se añade una carga en retraso a un generador síncrono, su voltaje en las terminales disminuye. De manera similar, cuando se añade una carga en adelante a un generador síncrono, se incrementa su voltaje en las terminales. Es posible hacer una gráfica del voltaje en las terminales y la potencia reactiva, y tal gráfica tiene una característica de caída como la que se observa en la figura 1.4. Esta característica no es intrínsecamente lineal, pero muchos generadores de voltaje incluyen un dispositivo para que sea lineal. La curva de la característica se puede mover hacia arriba o hacia abajo por medio del cambio del punto de ajuste del voltaje de las terminales en vacío del regulador de voltaje. Como con la característica de frecuencia-potencia, esta curva juega un papel importante en la operación de generadores síncronos en paralelo.

La relación entre el voltaje en las terminales y la potencia reactiva se puede expresar por medio de una ecuación similar a la relación de frecuencia-potencia [ecuación (1.3)] si el regulador de voltaje produce una salida lineal con cambios en la potencia reactiva.

Es importante darse cuenta de que cuando un generador opera solo, la potencia real P y la potencia reactiva Q suministradas por el generador será la cantidad demandada por la carga conectada al generador (las P y Q suministradas no pueden ser reguladas con los controles del generador). Por lo tanto, para

cualquier potencia real, los puntos de ajuste del mecanismo regulador controlan la frecuencia de operación f_e , del generador y para cualquier potencia reactiva, la corriente de campo controla el voltaje en las terminales V_T del generador[7].

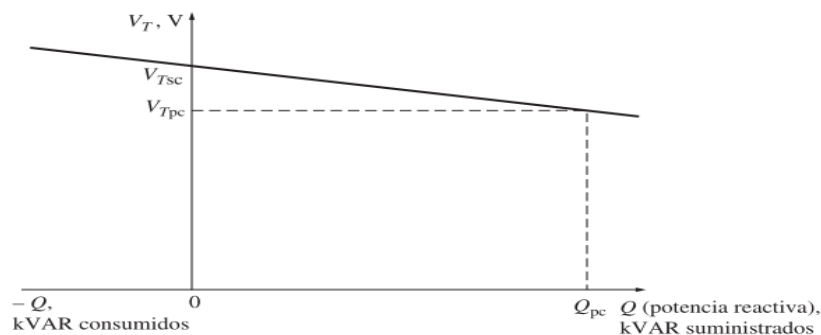


Fig.1.5 Curva de voltaje en las terminales (V_T) contra la potencia reactiva (Q) de un generador síncrono.

1.5.4 Característica de generación de potencia reactiva

El sistema de excitación de un generador síncronico está en general provisto de un regulador que, ante variaciones del voltaje terminal, hará variar la corriente del sistema de excitación del rotor de la máquina generadora; por ende, variará también la potencia reactiva producida.

Las posibilidades de generación de reactivo están relacionadas con la carga activa de la máquina dentro de los límites de la potencia aparente del generador y su $\cos \theta$.

La acción del regulador de voltaje puede, según su influencia, variar la característica de potencia reactiva generada y su inclinación. Cuanto más efectivo y rápido sea un regulador más elevada y pendiente será la característica de generación.

Otro factor que afecta la forma de la característica son las posibilidades o límites de corrientes del rotor y estator, cuando se quiere contrarrestar las disminuciones de voltaje nominal de los generadores.

Autor: Wilfredo Almaguer Guerra

También se puede, suponiendo cierta linealidad en una zona de voltajes relativamente cercanos al nominal, calcular la caída de la característica de generación (K_g):

$$K_g = \frac{\Delta Q_g}{Q_n} : \frac{\Delta V}{V_n} \quad (0.4)$$

Donde

ΔQ_g : Variación de potencia reactiva generada en el sistema.

Q_n : Potencia reactiva nominal.

ΔV : Variación de voltaje.

V_n : Voltaje nominal

El ΔQ_g será positivo y el ΔV será negativo para disminuciones del voltaje, por lo que K_g será un valor negativo. El ΔQ_g será como el incremento de capacidad de generación de potencia reactiva, ante disminución del voltaje en el sistema. El coeficiente K_g debe tomar, por lo tanto, un valor grande[8].

Basándonos en la ecuación de la característica de generación se realizará el estudio correspondiente en el desarrollo del Capítulo 2.

1.6 Descripción de las variables eléctricas fundamentales en los grupos electrógenos fuel oil

Para un buen funcionamiento y la obtención de una mejor eficacia en la energía eléctrica generada por un sistema de grupos electrógenos (sistema motogenerador) se utilizarán para el desarrollo de la investigación los contenidos y/o expresiones de las siguientes variables eléctricas.

La información que se describe sobre las variables que aparece en este acápite se resume en la bibliografía básica de la carrera en el libro Fundamentos de la Teoría de Circuitos Eléctricos, tomo 1 y 2 por Esperanza Aillón Fandiño[9].

✓ Corriente Eléctrica

La corriente eléctrica a la magnitud que define la velocidad con la que se mueven esas partículas. La Ley de Ohm plantea que el valor de la intensidad de la corriente va a ser directamente proporcional a la diferencia de potencial e inversamente proporcional al valor de la resistencia, como se muestra en la ecuación 1.5. Y se define con la letra I y se mide en Ampere (A)

$$I = \frac{U}{R} \quad (0.5)$$

Donde

R: Resistencia de circuito (Ω)

I: Intensidad de la corriente eléctrica (A)

U: Tensión o voltaje (V)

✓ Voltaje o Tensión

La tensión eléctrica o diferencia de potencial (o voltaje) es una magnitud física que cuantifica la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos. También se puede definir como el trabajo por unidad de carga ejercido por el campo eléctrico sobre una

Autor: Wilfredo Almaguer Guerra

partícula cargada para moverla entre dos posiciones determinadas, como se presenta en la ecuación 1.6. Y se designa con la letra U y se mide en volt (v)

$$U = I \cdot R \quad (0.6)$$

✓ **Potencia Aparente**

Es la potencia total consumida por la carga, esta es el producto de los valores eficaces de tensión (U) y la intensidad de la corriente (I), su unidad de medida es voltampere (vA), también se puede expresar en kilovoltampere (KvA) y se calcula por la expresión 1.7.

$$S = U \cdot I \quad (0.7)$$

Al ser la suma vectorial de P y Q, que son los catetos del triángulo rectángulo de potencias donde S es la hipotenusa puede calcularse como:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (0.8)$$

✓ **Potencia Activa**

Es la potencia que representa la capacidad de un circuito para realizar un proceso de transformación de la energía eléctrica en trabajo. Se designa con la letra P y se mide en vatios -watt- (W) o kilovatios -kilowatt- (kW). Y se calcula por la expresión 1.9:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \theta = I \cdot Z \cdot I \cdot \cos \theta = I^2 \cdot Z \cdot \cos \theta = I^2 \cdot R \quad (0.9)$$

Donde:

$\cos \theta$: Factor de potencia.

Z : Impedancia.

Autor: Wilfredo Almaguer Guerra

✓ **Potencia Reactiva**

En las instalaciones eléctricas de corriente alterna, las cargas son esencialmente inductivas, así como las reactancias de los sistemas de distribución y transmisión. Esta energía recibe el nombre de Potencia Reactiva y se puede presentar de dos formas:

- La requerida por los circuitos inductivos, como ser los motores, transformadores, lámparas de descarga, etc.
- La requerida por los circuitos capacitivos, como ser la capacidad de los cables, condensadores, etc.

Se designa con la letra Q y se mide en volampere reactivo (VAr) o kilovolampere reactivo (kVAr). Y se calcula por la expresión 1.10:

$$Q = I \cdot U \cdot \text{sen}\theta = I \cdot X \cdot I \cdot \text{sen}\theta = I^2 \cdot X \cdot \text{sen}\theta \quad (0.10)$$

Donde:

X : Reactancia

$\text{sen}\theta$: Relación entre la Q y la S

Para realizar el cálculo de la potencia reactiva que es necesario compensar en los sistemas eléctricos se debe determinar previamente la potencia activa (P) y el factor de potencia de la instalación (FP o $\cos\theta_1$), como se describe a continuación, y según el factor de potencia que se quiera lograr ($\cos\theta_2$), la potencia reactiva a compensar (Q_c), se determinará dada por la ecuación 1.11:

$$Q_c = P(\tan\theta_1 - \tan\theta_2) \quad (0.11)$$

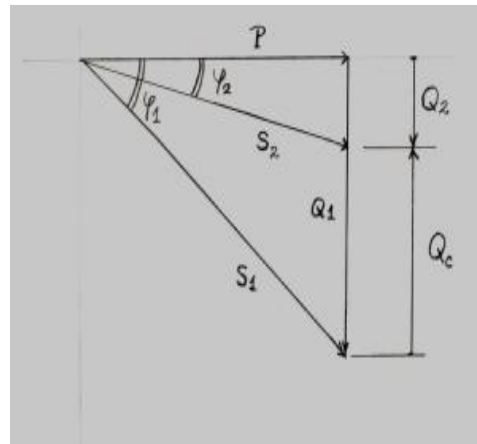


Fig.1.6 Triángulo de potencias.

✓ Factor de Potencia

El factor de potencia se define como el cociente entre la potencia activa y la potencia aparente, es el desfase entre el ángulo de la tensión y la corriente, este está íntimamente relacionado con la calidad de la energía eléctrica debido a que un buen FP contribuye a mantener una mejor eficacia, o sea, representa el trabajo útil de la energía eléctrica. Se designa con la letra (FP o $\cos\theta$) y se expresa en p.u, como se muestra en la expresión 1.12:

$$FP = \frac{P}{S} = \cos\theta \quad (0.12)$$

1.7 Fundamentos para la compensación del Factor de Potencia

Los métodos de compensación del factor de potencia utilizados en las instalaciones eléctricas de baja tensión son[10]:

- Instalar condensadores de potencia en paralelo con la carga inductiva a compensar.
- Instalación de condensadores de potencia
- Utilizar máquinas sincrónicas de gran potencia trabajando como generadores de potencia reactiva.

Este último método es el que se utilizará en la investigación

Autor: Wilfredo Almaguer Guerra

✓ **Beneficios de la compensación del Factor de Potencia**

Beneficios en los equipos:

- Disminución de las pérdidas en conductores.
- Reducción de las caídas de tensión.
- Incremento de la vida útil de las instalaciones.
- Aumento de la disponibilidad de potencia de transformadores, líneas y generadores.

Beneficios económicos:

- Reducción de los costos por facturación eléctrica.
- Eliminación del cargo por bajo factor de potencia.

En el desarrollo de la investigación se tendrán en cuenta los beneficios de la reducción de las caídas de tensión y/o eliminación del cargo por bajo factor de potencia.

1.8 Conclusiones

- Se realiza un análisis crítico de los antecedentes relacionados con el sistema GEFO.
- Se exponen las principales características y beneficios que brinda el modelo de generación distribuida y su desarrollo en nuestro país.
- Se hace una descripción sobre los principales equipos que conforman los GEFO y los fundamentos para la operación de estos en paralelo.
- Se analizan las principales variables tenidas en cuenta durante la investigación.
- Se hace mención de los fundamentos a tener en cuenta para la compensación del *FP*.

Capítulo 2: Materiales y Métodos

2.1 Introducción

En este capítulo se realiza un resumen sobre los principales materiales y métodos utilizados en la investigación, la cual está encaminada al comportamiento de las potencias de salida del generador y el voltaje a distintos regímenes de carga y variando el factor de potencia con el fin de analizar la eficacia de estas máquinas bajo distintas condiciones de trabajo. Además se hace referencia a características específicas de la Central *fuel oil* de Moa y la correcta puesta en práctica de estas para un mejor funcionamiento.

2.2 Descripción general de la Central Eléctrica fuel oil de Moa

2.2.1 Flujo Tecnológico

El combustible a la central se entrega por dos vías: un carro cisterna a través del descargadero o por la línea del oleoducto desde el puerto hasta los tanques de recepción 50-T-059, luego de esta operación comenzamos el proceso de centrifugado con las separadoras centrifugas de HFO, esta recibe el combustible a una temperatura entre 60°C y 70°C que se logra por la existencia de calentadores de boca a vapor en la toma de salida de los tanques de recepción, y lo eleva a temperatura de entre 85°C y 98°C a través de calentadores propio, procesa y envía el combustible para los tanques de servicio de HFO, 50-T-022, estos tanques poseen calentadores de boca en su salida y elevan la temperatura del combustible a valores entre 80°C y 90°C, de los tanque de servicio es succionado a través de las bombas de impulso de HFO 50-P-018 que están en el local de casa de bombas de combustible (CAPP), a la salida de la descarga de las bombas están conectados filtros automáticos de HFO que limpian el combustible de partículas en suspensión superiores a 0,34 mm, a la salida de los filtros el combustible pasa a la nave de motores en donde se distribuye a cada MCI a través de un cabezal común con una presión mínima de trabajo de 4,5 bar, esta línea

Autor: Wilfredo Almaguer Guerra

de combustible tiene retorno hacia los tanques de servicio cerrando, de esta manera el circuito de combustible HFO como único consumidor a los MCI.

Igualmente existe un esquema de alimentación de combustible diésel que primeramente es recepcionado en el tanque de servicio 50-T-003, a diferencia de los tanques de combustible HFO, este no posee calentador de boca por su baja viscosidad y fácil transportación, se succiona del tanque a través de bombas de impulso de diésel 50-P-008, lo pasan por un juego de filtro que descargan a una línea que llega a la nave de motores a través de un cabezal de distribución y de ahí retorna hacia el tanque de servicio nuevamente cerrando el circuito. Este combustible tiene dos consumidores, la caldera auxiliar de vapor y los motores de combustión interna.

En la nave de motor cada conjunto motorgenerador posee un módulo acondicionador del combustible mod.-008 que está conectado a los cabezales de diesel (LFO) y a los de *fuel oil* (HFO), la interconexión del módulo con el tipo de combustible a utilizar se hace a través de una válvula de tres vía, este módulo se encarga de crear las condiciones óptimas de explotación del combustible, elevando la presión de entrada del combustible al motor a valores aproximado a los 9 bar, por medio de bombas de impulso, al igual disminuye la viscosidad del HFO a valores de trabajo de 11 a 14 Cts., para esto utiliza temperatura que se obtiene producto al vapor a presión producido por las calderas.

Estos motores poseen un módulo de filtro automático del aceite mod.006, el cual posee una bomba de pre lubricación de aceite que inicialmente es la encargada de mejorar las condiciones de trabajo exigida por la automática de funcionamiento del motor ante del arranque del mismo. Estos parámetros de funcionamiento son presión de lubricación a valores igual a superior a 0,8 bar y temperatura del aceite mayor e igual a 40°C para velocidad menor de 400 rpm (revoluciones por minuto); una vez en condiciones de funcionamiento normal del motor estos valores son de aproximadamente 5,5 bar de presión de aceite y una temperatura promedio de 55°C. Poseen además dos circuitos de enfriamiento con agua, uno a alta temperatura HT y el otro a baja temperatura LT, al igual que en el circuito de aceite, están para mantener

Autor: Wilfredo Almaguer Guerra

los parámetros de funcionamiento del motor en valores permisibles, estos parámetros son presión y temperatura, que para el circuito de agua de HT el valor mínimo de presión es de 0,9 bar en el momento de arranque del motor, luego superadas las 400 rpm y en las condiciones normales de funcionamiento 514 rpm y potencia nominal del motor, éstos valores aumentan. Los elementos sobre los cuales actúa este esquema de enfriamiento de HT en el motor son: Primera etapa del enfriador de aire de carga del turbocompresor, culata y los anillos de fugas. Para el circuito de baja temperatura (LT), la temperatura baja no constituye una limitante debido a que esta solo actúa sobre la segunda etapa del turbocompresor como elemento asociado al cuerpo del motor y actúa además en el proceso de enfriamiento del aceite, el combustible en el caso del diésel y el propio circuito de agua de HT. Importante decir que el agua de LT se enfría en las torres de enfriamiento.

Posee también un circuito de enfriamiento de tobera que como su nombre lo indica enfría las puntas de tobera de los inyectores de combustible, es un circuito cerrado de pequeño volumen de agua, esta agua tiene además función de limpieza de las puntas de toberas (choque térmico).

Asociado al funcionamiento del motor se encuentra el módulo de tratamiento al aceite mod.007, este se encarga por medio de las separadoras centrifugas, encargadas de mejorar las condiciones de operación y alargar la vida útil del aceite del cárter en el motor, que es un volumen de aproximadamente 18000 litros.

En la nave de motores existen dos módulos de compresores que se encargan de mantener el volumen y presión de aire de arranque para los motores y del aire de trabajo para la herramienta e instrumentación. Estos valores de presión de aire a 30 bar en los circuitos de arranque y parada de emergencia de los motores y 7 bar en el circuito de trabajo para las herramientas e instrumentación y otros como bombas de diafragma.

Como respaldo o garantía para el funcionamiento prolongado del motor existe una planta de tratamiento al agua, donde se procesa agua con calidad diferente según el uso para el cual se destina. Estas aguas se producen como agua clarificada en su

Autor: Wilfredo Almaguer Guerra

primera etapa y la de mayor consumo en la planta en los circuitos de la torres de enfriamiento, a partir de esta agua clarificada se produce agua filtrada usada en el proceso de limpieza de las separadoras centrifugas, en los enfriadores de toma de muestra de las calderas y en los *Blow Down* para enfriamiento y decantación de las extracciones de fondo de las calderas; y por último para producción de agua desmineralizada esta última de mejor calidad por su uso en los circuitos de enfriamientos del motor HT, LT, tobera y proceso de limpieza húmeda del turbocompresor.

Luego de establecidas estas condiciones y a partir de la orden de la orden y autorización del DNC provincial se comienza con el proceso de sincronización de los motores al SEN. El operador de control de unidad (OCU) a través del programa de la computadora acciona la orden de arranque del motor, en ese momento la automática ordena arranque de prelubricación de aceite módulo 006, arranque de bomba acondicionadora del esquema de agua de HT 00-P-070, comienza a chequear parámetros que deben de estar listo para el arranque del sistema motogenerador (ver figura 2.1).

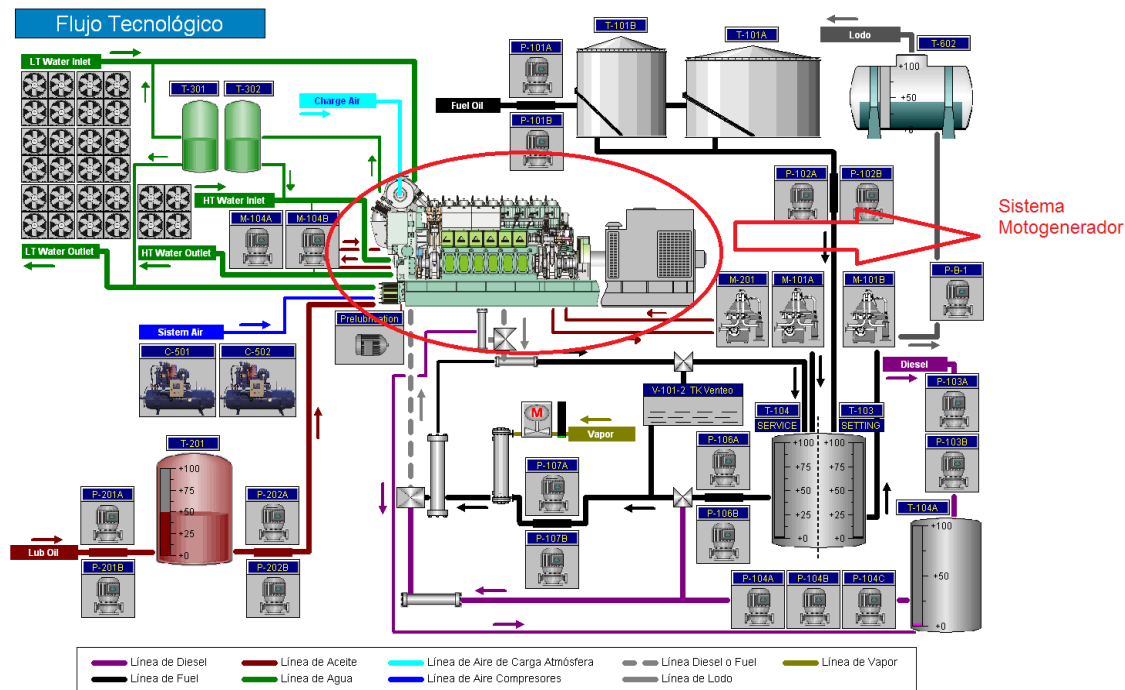


Fig.

Fig.2.1 Imagen del flujo tecnológico de la CEFOM

Hasta este punto en el flujo y con el apoyo de la imagen de la figura 2.1 se analizan los indicadores de los otros sistemas de la CEFOM y se resalta el objeto de estudio de la investigación, del cual se describe y se analiza a continuación sus equipos y la estructura técnica de los mismos.

✓ Sistema de motogenerador fuel oil

El sistema grupos electrógeno *fuel oil* o sistema motogenerador de Moa, está compuesto por diez GS de 18,465 MW de potencia nominal cada uno, a una tensión de 13,8 kV y 60 Hz de frecuencia, distribuidos en dos grupos de generación, compuestos por cinco generadores cada uno.

Los GS están conectados a las cuatro barras de media tensión, en las cuales se sitúan ocho transformadores: cuatro con salida al SEN con una potencia de 70 MVA cada uno (elevan la tensión a 110 kV) y los otros cuatro de uso de planta con una potencia individual de 3,15 MVA (reducen la tensión a 0,48 kV) que alimentan las barras de baja tensión que suplen la carga de la empresa.

Autor: Wilfredo Almaguer Guerra

La barra de media tensión está dividida en cuatro secciones independientes a las cuales van conectadas a los GS, a los transformadores destinados para las mediciones de corriente y tensión (TC y TP), los relés y las cuchillas de protección de los GS y los transformadores de salida al SEN.

Un oncenio generador llamado *Black Start* de una potencia de 250 kVA es el que alimenta la barra de baja tensión, es el encargado del arranque de la CEFOM en modo isla.

En la figura 2.2 se observa el esquema monolineal para una de las secciones de generación del CEFOM, para mejor visualización ver (Anexo 2).

✓ ***Estructura técnica del sistema motogenerador***

Motor de combustión interna

- Tipo DDP 10X18V 48/60B.
- Marca del MCI 18V 48/60B.
- Potencia: 21600 kW.
- Peso: 265 T.
- Distancias: A=11915mm, A₁=14100mm, B=4700mm, H=5355mm.

Generador Sincrónico

- Potencia Nominal: 18,465 MW
- Potencia Reactiva: 3,8 MVar
- Tensión: 13800 V.
- Frecuencia: 60 Hz.
- Corriente Nominal: 965 A.
- Peso: 67000 Kg.
- Velocidad nominal: 514 rpm.
- Velocidad final de 617 rpm a una inercia de 14100 kgm².
- Método de enfriamiento: IC8A1W7.

Autor: Wilfredo Almaguer Guerra

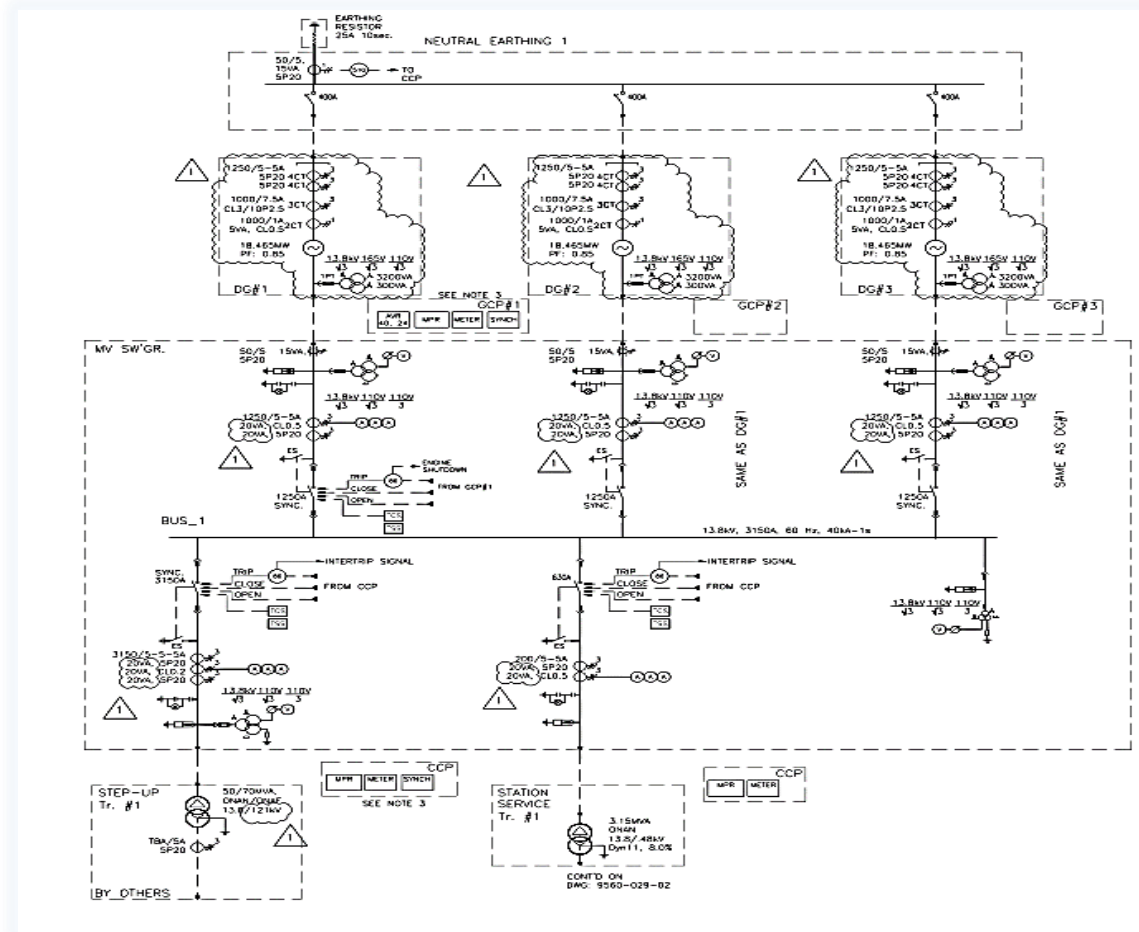


Fig. 2.2 Muestra el esquema monolineal simplificado para una sección de generación del emplazamiento Grupo Electrónico *fuel oil* Moa.

✓ **Proceso de generación de energía de la CEFOM**

Conociendo y entendiendo lo antes descrito en el flujo podemos pasar al proceso de generación de energía. En la CEFOM se cuenta con un conjunto de esquemas y equipos tanto electroautomáticos, como de programa de computación que permite la interconexión de la energía producida por el conjunto motorgenerador con el SEN, para el chequeo y seguimiento siempre con la intervención del hombre entre ellos.

Cuando el Despacho Nacional de Carga (DNC) ordena al operador jefe de brigada de operación tener las condiciones creada para sincronizar los motorgenerador para un

Autor: Wilfredo Almaguer Guerra

horario determinado, por la demanda del sistema y de solo dominio del DNC, se desencadena una serie de órdenes operacionales hacia el resto de los puestos de trabajo en el orden siguiente:

1. Operador de control de unidad: este se comunica con los operadores de los puesto de trabajo de casa de bombas de combustible; motores; periférico y régimen químico para darle a conocer de la orden del DNC y que preparen condiciones para el arranque, esto quiere decir poner en esquema de funcionamiento circulación de combustibles, modulo 008 acondicionador de combustible, esquema de aire, producción de vapor, esquema de agua y verificación de las condiciones de trabajo de todos los equipos en cuanto a niveles, temperatura, presión, existencia de materia de servicio con hora de cobertura para la producción. Una vez revisado todos estos parámetros y condiciones de funcionamiento el operador del área le informa al operador de control de unidad que está listo para el arranque de los motores; además de poder observar a través del programa del SCADA de las computadoras el estado en que se encuentran los equipos, el OCU prepara en el programa instalado en máquina, para control del proceso, que todos sus equipos estén en el modo de funcionamiento deseado (manual o automático).
2. A la orden del despacho de comenzar la sincronización de los motorgenerador al SEN el operador de control de unidad (OCU) a través del programa de la computadora acciona la orden de arranque del motor, en ese momento la automática ordena arranque de prelubricación de aceite módulo 006, arranque de bomba acondicionadora del esquema de agua de HT 00-P-070, comienza a chequear parámetros que deben de estar listo para el arranque del motor diésel.
3. Una vez listos para el arranque la automática libera el proceso de arranque, liberando aire de arranque para el proceso de encendido del motor, las primeras revoluciones del motor se logran a través del aire de arranque a 30 bar de presión para romper la inercia y solo entre las 65 a 110 rpm del motor es que la bomba de inyección propia de cada cilindro del motor comienza a inyectar

combustible para mantener el proceso de arranque y funcionamiento operacional del motor, alcanzada las rpm nominales de 514 rpm la automática realiza chequeo de parámetros como presión y temperatura de agua de HT, LT, LO, viscosidad según el tipo de combustible que está usando en el momento., y otros; estando listos los parámetros de funcionamiento del motor se inicia el proceso de sincronización del conjunto motorgenerador con el SEN, para cumplirse las condiciones de sincronización: ángulo de fase y secuencia de fase entre generador y el SEN sean iguales, estas condiciones ya predeterminada en el montaje de la instalación, pero en el momento de la sincronización se chequea por la automática y a vista del operador que la frecuencia y voltaje del generador sean iguales a la del SEN; una vez sincronizado se informa al DNC la hora de cierre del interruptor que enlaza generador con el SEN, el programa está ajustado para que el motor tome carga, potencia hasta un 30% de su capacidad nominal, llegando a este valor de potencia el proceso de toma de carga se para y es cuando el OCU ordena al operador de motores el cambio de combustible de LFO para HFO, esto se hace en el módulo 008 *Booster* y se inicia un proceso de acondicionamiento del motor en cuanto temperatura, presión y viscosidad del combustible, para la continuación del proceso de toma de carga del SEN, esto transcurre en un tiempo aproximado de 20 minutos para una condición del motor diésel frío, pasado este tiempo empieza a tomar carga hasta el 70% de su potencia nominal e igual hace una parada para chequeo de parámetros con un tiempo aproximado de 10 minutos y luego el programa libera para continuar el proceso de toma de carga hasta el 100 % de la potencia nominal del generador 18,465MW.

Después de alcanzada la potencia deseada el operador jefe de brigada informa al DNC las condiciones de trabajo del motor en cuanto a potencia o si existe alguna limitación técnica del motorgenerador que no le posibilite trabajarlo al 100% de su potencia nominal[11].

Autor: Wilfredo Almaguer Guerra

Para el control del voltaje frente a los cambios de los porcentajes de carga en la CEFOM se dispone de un regulador automático de voltaje.

2.3 Regulador automático de voltaje AVR ET-SZ6

El regulador automático de voltaje ET-SZ6 es recomendado para transformadores que tienen que hacer cambio de tomas bajo carga. Adecuado para transformadores de 10 kV, 35 kV, 110 kV, 220 kV, usa una interconexión de pantalla cristal líquido (LCD) de gran dimensión. Puede realizar el control manual, automático y remoto. Es de gran ventaja ya que las teclas, arriba, abajo y parada de salida del relé no está acoplado a la fuente. Además puede trabajar en paralelo con 3 controladores más, usa un *display* de pasos y acción por *display*. Utiliza una salida analógica de cuatro a 20 MV, con salida del interruptor en código decimal binario. Emplea la función comunicada de RS-485 a RS-232, la sensibilidad junto con la tensión de muestreo puede ajustarse[4].



Fig.2.3 Regulador de Voltaje AVR ET-SZ

2.3.1 Principio de funcionamiento del ET-SZ6

Para el control remoto la señal del *Tap* del transformador de carga se introduce al mainframe desde el conector de 9 pines AVIATIC, esta fue codificada para ser separada e ir al controlador central de la CPU en código decimal binario. Los SCM convierte los datos a través de D/A y la salidas de la señal analógica 0,2V/ eleva a (4*20mV), entonces esta es usada para las medición remota de la señal. El controlador central cuenta la veces que cambia de posición el distribuidor de posiciones, muestra

y transmite remotamente la posición de señal y el tiempo de acción por medio del puerto RS-485 o RS-232. El SCM almacena el tiempo de acción en memoria EEPROM para evitar la pérdida de datos cuando se corta el suministro de la energía. La computadora RTU usa las entradas remotas de las mediciones desde los puertos RS485 o RS232 para el control de subir, bajar, parar, y controlar los ajustes de voltaje con carga. Cuando dos controladores están en paralelo, amo y esclavo, A y B respectivamente, no haga interconectados[12].

2.3.2 Control autónomo del Regulador

El ET-SZ6 se conecta a un transformador de potencial de la subestación que está a 500 m del emplazamiento, el mismo está conectado a la tensión de salida de la subestación y tiene una relación de transformación de 1000. Esa información, en ese nivel de tensión, se hace llegar a la entrada " SIGNAL AC: 110 V" del regulador automático. Una vez acoplada la señal de referencia se programan cada uno de los parámetros del regulador, los cuales para la aplicación específica presentada es configurada de la siguiente forma[4]:

- El modo de control que son los modos de trabajo del regulador, se programa en automático.
- La sensibilidad es la que codifica los límites de tensión para el cual comenzará a operar el ET-SZ6, se programa en 1,5 %.
- La gama determinada de voltaje se auto-programa en dependencia de la configuración de la sensibilidad y partir de la siguiente ecuación:

Límite superior = tensión de referencia $\times$ sensibilidad + tensión de referencia

Límite inferior = tensión de referencia $\times$ sensibilidad - tensión de referencia

Para este caso en particular será:

Límite superior = $110 \times 0,015 + 110 = 111,65 \text{ V}$

Autor: Wilfredo Almaguer Guerra

Límite inferior = $110 \times 0,015 - 110 = 108,35 \text{ V}$

- Tiempo de retraso, es el tiempo que debe esperar después de ejecutada la primera operación de regulación de voltaje, para ejecutar la segunda operación de regulación de voltaje dirigida al electromotor. Este valor siempre debe ser por encima de 60 segundos, en este caso es 120 segundos, esto significa que luego que el ET-SZ6 cambie un *tap* espera dos minutos para que se estabilice la tensión y si pasado este tiempo se mantiene fuera de los límites establecidos cambia otro *tap*.
- Tiempo de acción, se usa para determinar el tiempo antes de usar el regulador, para este caso es 10 segundos, es decir que si el AVR registra por más de 10 segundos una tensión fuera de los límites actúa, si está dentro de este periodo de tiempo lo toma como un pico.
- Cantidad de paralelos, son las cantidades de AVR con que se conectará en paralelo, se programa en cero ya que por la estructura del emplazamiento no se trabaja en paralelo.
- Modo de corrida, se utiliza cuando el regulador está operando en paralelo con otros AVR para definir el amo y es esclavos, en este caso es control simple ya que no se trabajará en paralelo con ningún otro regulador.
- Parámetros de comunicación, es para dar las direcciones de los otros reguladores conectados en paralelos, para este caso se mantiene como esta por defecto.

2.3.3 Característica del regulador PID

En la figura. 2.4 se muestra el esquema del lazo de control en bloques, que está compuesto por un regulador de revoluciones PID (Woodward 723 Plus), el conjunto driver-actuador como el elemento final de control y dos sensores de velocidad redundantes. Su objetivo radica en mantener una velocidad constante de 514 rpm para

Autor: Wilfredo Almaguer Guerra

mantener una frecuencia en la red de 60 Hz ante cualquier variación en la carga del motorgenerador.

Frente a la ocurrencia de una variación en la carga del motorgenerador, varia la velocidad del mismo, esta señal es medida y transmitida al regulador por dos sensores de velocidad (sondas de proximidad-tren de pulsos), este las promedia y luego la compara con el valor prefijado (514 rpm), en dependencia de la diferencia (error) calcula el nuevo valor de posición del actuador a través de una señal de corriente (4 - 20 mA) y la envía al driver EM-300 para compensar esta diferencia y este a su vez garantiza a través del actuador EM-300 la nueva posición calculada que se traduce en un aumento o disminución del flujo de combustible de entrada al motor para así poder asumir la carga demandada[13].

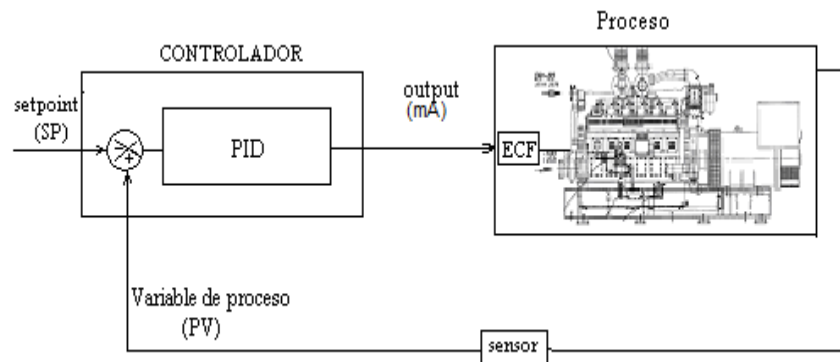


Fig. 2.4 Esquema del lazo de control del regulador PID

Setpoint: 514 rpm.

Variable controlada: velocidad del motor.

Variable manipulada: posición del actuador EM-300 (4-20mA).

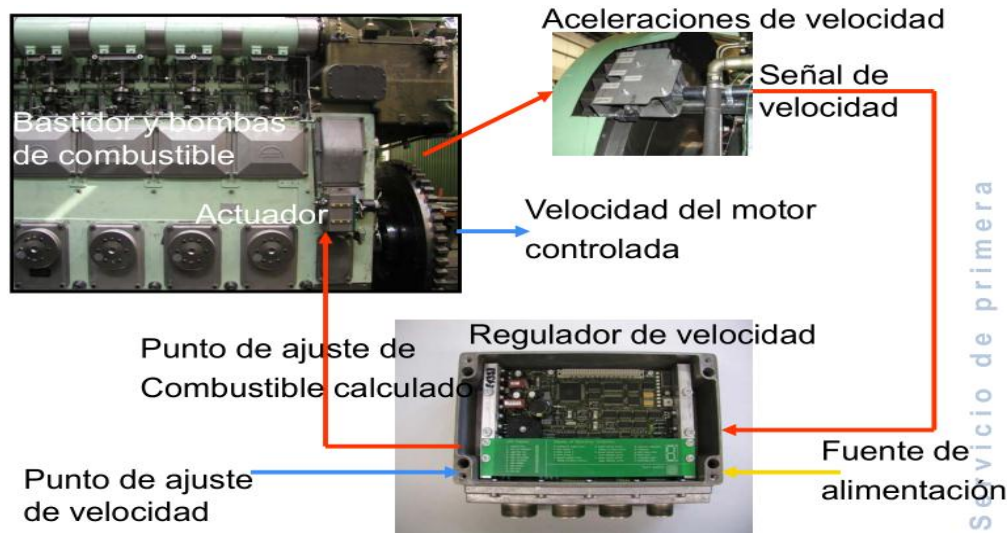


Fig.2.5 Croquis del regulador de velocidad electrónico

2.4 Sistema de Supervisión y Adquisición de Datos (SCADA)

El nombre comercial del SCADA utilizado es *Data Publisher*, el software de control de procesos fue desarrollado una compañía alemana con años de experiencia en el control de procesos llamada Kuhse. El software persigue el cumplimiento de una serie de tareas las cuales se pueden apreciar en el trabajo investigativo de Santiago (2016)[4], de las cuales resalta en la investigación la tarea que procesa el Almacenamiento de Datos, pues mediante esta se obtuvieron todos los valores para el estudio del comportamiento de las variables. Esta registra valores de cada variable cada un minuto durante 24 horas, esta Base de Datos (BD) recibe el nombre técnico de trenes en el despacho de operaciones (ver la figura 2.5) y se registra por fecha y es la que brinda el comportamiento de todas las variables incluidas en el proceso de generación.

	Actual alternator active power 11.01.17 GCP.AV-History,1		Actual alternator reactive power 11.01.17 GCP.AV-History,2		Engine speed (by frequency) 11.01.17 GCP.AV-History,129		Temperature intake air filter model 11.01.17 GCP.AV-History,153		Engine temperature 11.01.17 GCP.AV-History,30	
	MW	MW	MVar	MVar	rpm	rpm	°C	°C	°C	°C
00:00:00	13.709		2.609		515,2		31,2		139,8	
00:01:00	12.950	-0,75	2.724	+0,11	515,0	-0,2	31,2	+0,0	140,2	+0,4
00:02:00	11.781	-1,16	2.490	-0,23	516,5	+1,5	31,2	+0,0	140,1	-0,1
00:03:00	10.359	-1,42	2.160	-0,33	515,2	-1,3	31,2	+0,0	140,4	+0,3
00:04:00	10.274	-0,08	2.231	+0,07	514,6	-0,6	31,2	+0,0	141,3	+0,9
00:05:00	10.882	+0,60	2.297	+0,06	513,4	-1,2	31,2	+0,0	141,7	+0,4
00:06:00	11.905	+1,02	2.226	-0,07	512,4	-1,0	31,2	+0,0	141,7	+0,0
00:07:00	11.858	-0,04	2.279	+0,05	512,2	-0,2	31,2	+0,0	141,6	-0,1
00:08:00	10.857	-1,00	2.094	-0,18	513,2	+1,0	31,2	+0,0	141,5	-0,1
00:09:00	10.642	-0,21	2.094	+0,00	514,6	+1,4	31,2	+0,0	141,8	+0,3
00:10:00	10.092	-0,55	2.147	+0,05	515,8	+1,2	31,2	+0,0	141,9	+0,1
00:11:00	9.944	-0,14	2.130	-0,01	515,2	-0,6	31,2	+0,0	142,2	+0,3
00:12:00	10.038	+0,09	2.015	-0,11	515,2	+0,0	31,2	+0,0	142,5	+0,3
00:13:00	9.826	-0,21	2.020	+0,00	516,1	+0,9	31,2	+0,0	142,8	+0,3
00:14:00	10.043	+0,21	1.914	-0,10	517,0	+0,9	31,2	+0,0	142,9	+0,1
00:15:00	8.899	-1,14	1.822	-0,09	517,4	+0,4	31,3	+0,1	143,2	+0,3
00:16:00	9.972	+1,07	1.918	+0,09	516,4	-1,0	31,2	-0,1	143,4	+0,2
00:17:00	9.713	-0,25	1.896	-0,02	517,2	+0,8	31,2	+0,0	143,3	-0,1
00:18:00	7.480	-2,23	1.580	-0,31	516,0	-1,2	31,2	+0,0	140,9	-2,4
00:19:00	5.198	-2,28	1.052	-0,52	514,0	-2,0	31,2	+0,0	137,9	-3,0
00:20:00	3.091	-2,10	0,752	-0,30	512,2	-1,8	31,1	-0,1	136,0	-1,9
00:21:00	0,022	-3,06	-0,031	-0,78	513,0	+0,8	31,1	+0,0	135,5	-0,5
00:22:00	0,715	+0,69	0,101	+0,13	512,0	-1,0	31,1	+0,0	124,9	-10,6

Fig. 2.6 Visualización de las variables en el software SCADA.

2.4.1 Descripción y funcionamiento del software SCADA

En el Despacho de Operaciones de los GEFO, los especialistas en operación controlan el proceso de generación por medio de los mímicos del *software* en el mismo en la pantalla de “Arrancar motor” se miden los siguientes indicadores:

- velocidad del motor.
- velocidad del turbocargador.
- carga activa del generador.
- la presión y temperatura del aceite.
- presión de combustible.
- presión de aire de arranque y parada.
- temperatura del agua de enfriamiento de HT.

En la parte inferior de esta pantalla aparecen los botones de mando del motor de arranque y parada, apertura y cierre del interruptor de forma manual, velocidad y carga del motor, y las alarmas activas en el *software*. Además se visualizan en la misma las

Autor: Wilfredo Almaguer Guerra

condiciones de arranque del motor (ver la figura 2.6) y se visualizan los sistemas del motor de combustión interna que fueron descritos en el flujo tecnológico (ver acápite 2.2), además de las señales e información para el control y la toma de decisiones[12]:

- Generador: en esta se muestra el estado operacional del generador, potencias, voltajes, factor de potencia, frecuencia y estado de excitación.
- Sistema de agua de refrigeración HT: esta brinda el estado de las válvulas, bombas, temperatura y presión del esquema.
- Sistema de agua de refrigeración LT: esta brinda el estado de las válvulas, bombas, temperatura y presión del esquema.
- Sistema de aceite lubricante: desde esta pantalla puedes dar orden de arranque a la bomba de prelubricación del motor, además de brindarte el estado de las bombas propias del motor, temperatura y presión de aceite.
- Gases de escape: te da la temperatura de los gases de escape en cada cilindro, lo que permite determinar en cierta forma la calidad de la combustión en el motor.
- Combustible: esta brinda la temperatura y presión del combustible de entrada al motor, así como el estado de funcionamiento de las bombas del módulo *Booster*.
- ✓ Lista de señales: esta muestra el estado de operación de cada elemento asociado al funcionamiento del motor.
- ✓ Valores analógicos: muestra todos los valores medidos referentes a la generación, sistemas de lubricación, sistema de agua de enfriamiento y valores de barras.
- ✓ Situación/alarmas: en esta se pueden observar el estado operacional de cada elemento asociado al motor, así como las alarmas activas.
- ✓ Ordenes: desde esta pantalla se dan las ordenes a los módulos asociados al motor como: ventiladores, bombas de lubricación válvulas del sistema de enfriamiento y el control del interruptor del generador.

- ✓ Parámetros: esta muestra los valores analógicos, valores límites, monitorización de temperaturas y salpicaduras de aceite.
- ✓ Controladores: muestra valores del controlador de carga del motor, control de temperatura del agua de enfriamiento y del aceite.
- ✓ Tendencias: en esta se muestra el tren de las variables del proceso.

En la investigación con la información que más interactúa fue con las **tendencias** (ver en la figura 2.7 el círculo rojo), que es donde se observa el comportamiento de todas las variables del sistema y brinda la posibilidad de convertir toda la BD en un documento *Microsoft Excel*, para un mejor tratamiento de los datos en los estudios realizados en el GEFO.

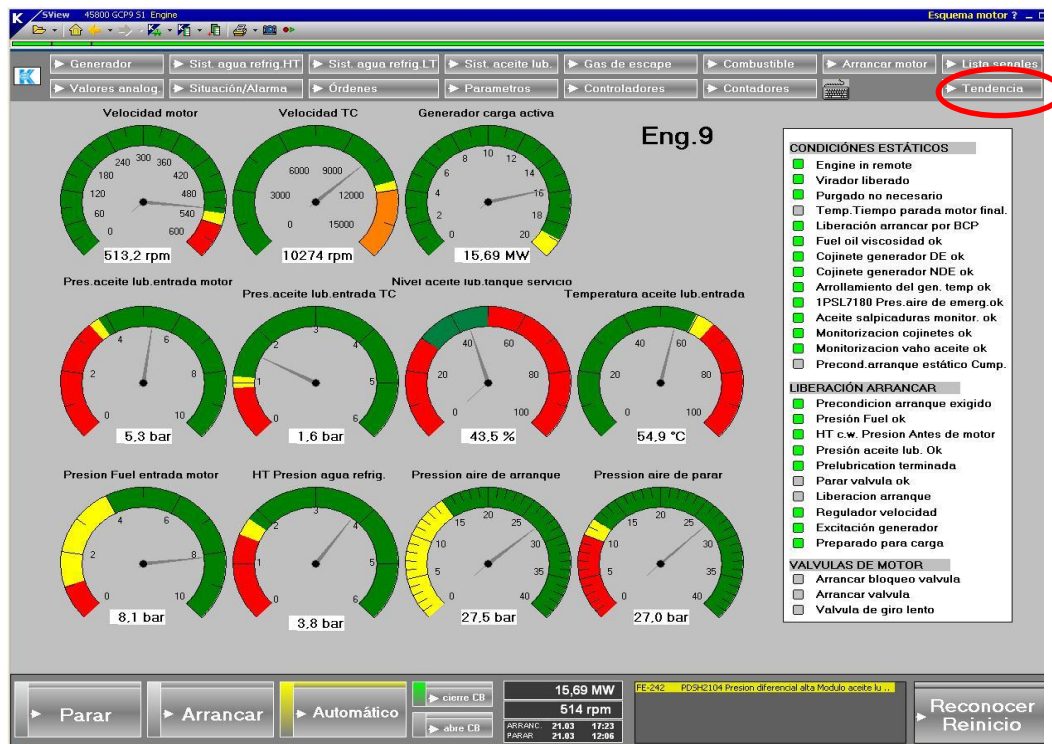


Fig. 2.7 Pantalla principal del software.

2.5 Conclusiones

- Se realizó una descripción general sobre la CEFOM y un resumen detallado sobre el proceso tecnológico para conocer las transformaciones de la energía eléctrica en este tipo de planta.
- Se describen los principales equipos para tener conocimiento de los aspectos teóricos relacionados con la regulación del voltaje y la operación del sistema motogenerador fuel oil de Moa.
- Se analizan las potencialidades del *software* SCADA y se establece la forma de acceder a la información (datos y conocimiento) relacionada con la investigación.

Capítulo 3: Análisis de los Resultados

3.1 Introducción

En este capítulo se comienza con la descripción de la investigación y con la interpretación de sus resultados para lograr una mejor eficacia en la CEFOM y que sirva de biografía para estudios posteriores. Se concluye con los impactos tecnológico y social en la operación eficaz en el sistema de grupos electrógenos fuel oil en el municipio de Moa.

3.2 Estrategia de la investigación

La estrategia de la investigación se centra en analizar y estimar los factores de potencia apropiados para cada porcentaje de carga nominal, para poder conocer el nivel de voltaje requerido a la salida de los grupos electrógenos *fuel oil* e identificar la potencia reactiva requerida para la operación eficaz de la Central. Para ello, se preparó un experimento que consiste en analizar el comportamiento de las variables a la salida del generador escogidas en la investigación y calcular la característica de generación de cada FP para cada porcentaje de carga nominal para lograr una mejor operación de la CEFOM.

3.2.1 Condiciones iniciales para el diseño del experimento

- Se trabaja con la potencia reactiva y el voltaje sin tener en cuenta la frecuencia, pues supone constante (establecida por el SEN 60Hz).
- El experimento se realizó en un motogenerador (Motor #2) que no estuvo regulando frecuencia durante las 8 h que duro las mediciones y además era la máquina que estaba en mejores condicione técnicas, debido a que recientemente había recibido en mantenimiento planificado de las 6000 h.

- La producción de potencia reactiva necesaria para evitar déficit de la misma y disminución del voltaje en algunos nodos de la red no está directamente relacionada con el consumo específico de combustible en la CEFOM, es por ello que no se tendrá en cuenta en la investigación[8].

3.2.2 Descripción del diseño del experimento en el GEFO

Para cumplir con la hipótesis de la investigación (ver la Introducción) se decide realizar una Prueba Experimental. El diseño de experimento de la misma fue el siguiente: bifactorial, con 2 variables y 4 niveles, se realizaron tres repeticiones (réplicas) cada 30 min, cada prueba duro 2 h y se seleccionó el GEFO #2, por ser el de mejor estado técnico de la central eléctrica de GEFO de Moa. Las variables de entrada que se manipularon durante el experimento son: porciento de carga (% Carga) y factor de potencia (FP ; $p.u$) y como variables de salida se analizaron las: potencia activa (P ; MW) y reactiva (Q ; $MVAR$) y el voltaje (v ; kV).

La prueba fue el día 11 de Enero del 2017, la temperatura ambiente de $28,7^{\circ}C$ y presión atmosférica de 136,3 Pascal, se inició a las 12:49 horas y terminó a las 20:39 horas; cada porciento de carga tuvo un período de muestreo de 120 minutos, por lo tanto, la duración de la prueba experimental fue de 8 h (960 minutos).

Inicialmente al poner a trabajar el GEFO #2 a diferentes condiciones de operación, se varió el % Carga: 80, 85, 90 y 100% y a cada % Carga se le varió el FP : 0,94; 0,95; 0,97; y 0,98.

Obteniéndose un total de datos donde se analiza los estadígrafos de las variables de salida como se presenta a continuación:

Análisis estadístico del Experimento

El análisis estadístico se hace en software Microsoft Excel donde se obtiene la tabla estadística que incluye el máximo, mínimo y la media para cada porciento de carga de las variables: P , Q y v (ver anexo 3).

Autor: Wilfredo Almaguer Guerra

A continuación se graficaron las curvas de las variables de la prueba, con el fin de observar el comportamiento de las misma durante todo el periodo de muestreo.

Obtención de las Gráficas

Para la obtención de las gráficas nos apoyamos en el *software* MATLAB, debido a todas las herramientas que este brinda y a su amplio uso en la carrera de Ingeniería Eléctrica. Para la simulación se crea una función para cada tipo de curva mediante comandos y se obtienen los gráficos correspondientes.

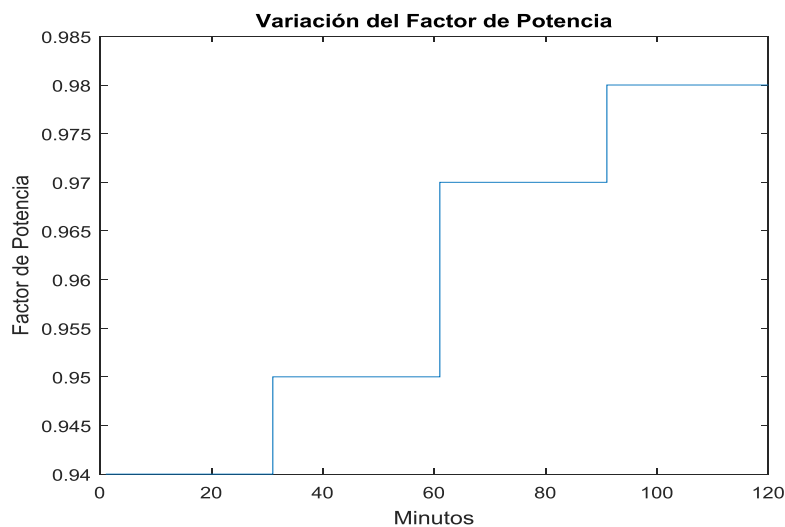


Fig. 3.1 Variación del factor de potencia para cada % de carga.

Se comienza con un *FP* mínimo de 0,94 hasta 0,98 porque las protecciones del generador están reguladas a este valor, lo cual está en correspondencia con el equilibrio entre la *P* que puede entregar. Este se varía cada 30 minutos en 0,94; 0,95; 0,97 y 0,98 respectivamente obteniéndose una variación escalón con el objetivo de apreciar la relación inversamente proporcional entre *Q* y el *FP* a distintos porcentos de carga, los cuales se muestran en las siguientes figuras (3.2; 3.3; 3.4 y 3.5).

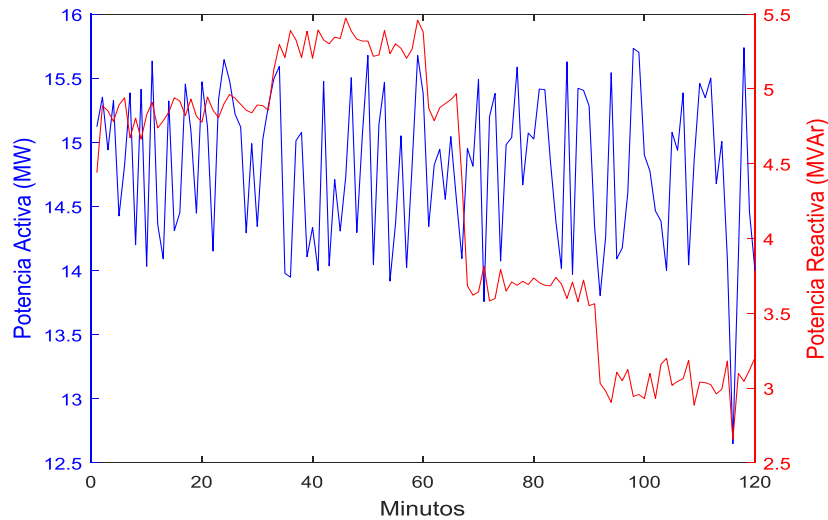


Fig.3.2 Comportamiento de P vs Q para un 80% de carga.

En esta curva se puede observar q para un FP de 0,95 hay un incremento en Q este comportamiento se debe a que hubo una disminución del voltaje como se constató en la curva de la figura 3.5 para el mismo porciento de carga.

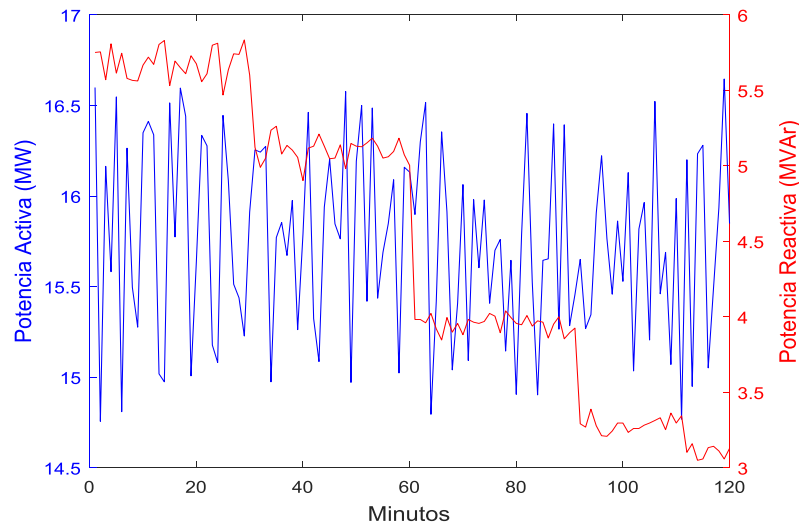


Fig.3.3 Comportamiento de P vs Q para un 85% de carga.

Autor: Wilfredo Almaguer Guerra

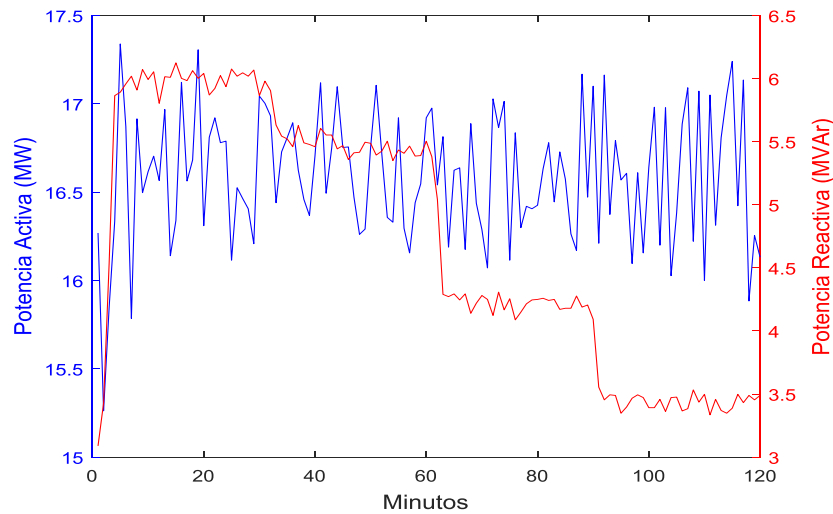


Fig.3.4 Comportamiento de P vs Q para un 90% de carga.

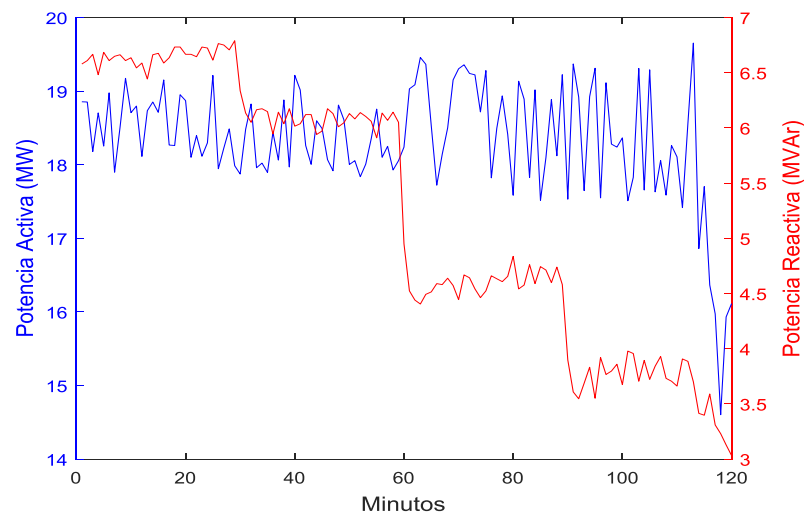


Fig.3.5 Comportamiento de P vs Q para un 100% de carga.

En las curvas se aprecia la relación inversamente proporcional entre el FP y la Q, pues a medida que aumenta el FP disminuye la Q, para cada porciento de carga se mantiene la misma regularidad.

Además se pudo observar que tanto para el 80% y el 100% para un FP de 0,98 al cabo de haber transcurrido 120 minutos (2 h) hubo una disminución considerable de P. Esto sucede debido a que disminuye la viscosidad y aumenta la temperatura del

Autor: Wilfredo Almaguer Guerra

combustible durante ese período de tiempo, fenómeno que afecta el trabajo del MCI provocando una disminución en la P a la salida del GS. Ante esta situación se genera una alarma y consecutivamente las protecciones sacan de funcionamiento a este GEFO.

Para observar el comportamiento del voltaje a la salida del generador se realizan las siguientes curvas, ver figuras 3.6; 3.7; 3.8 y 3.9. Donde el voltaje es de una sola fase, o sea, voltaje de la L1 referido a la fase L12, por ser este sistema balanceado.

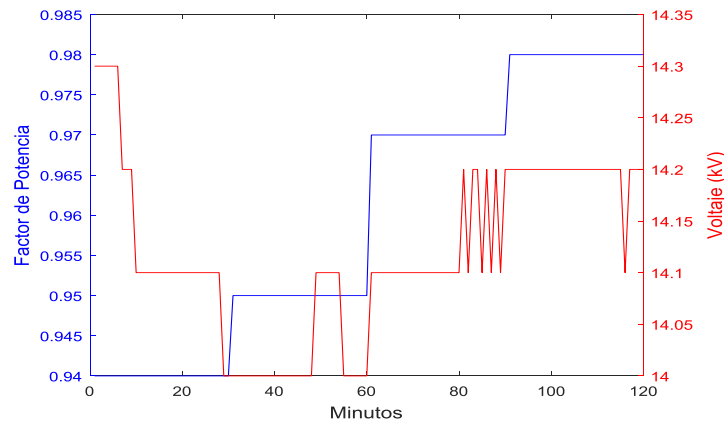


Fig.3.6 Voltaje vs Factor de Potencia para un 80% de carga.

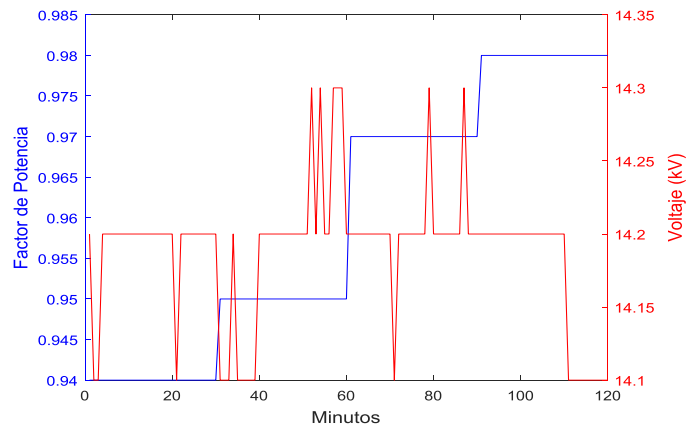


Fig.3.7 Voltaje vs Factor de Potencia para un 85% de carga.

Autor: Wilfredo Almaguer Guerra

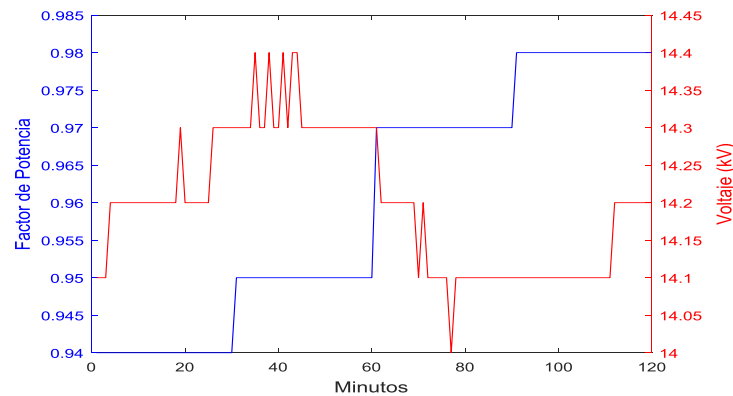


Fig.3.8 Voltaje vs Factor de Potencia para un 90% de carga.

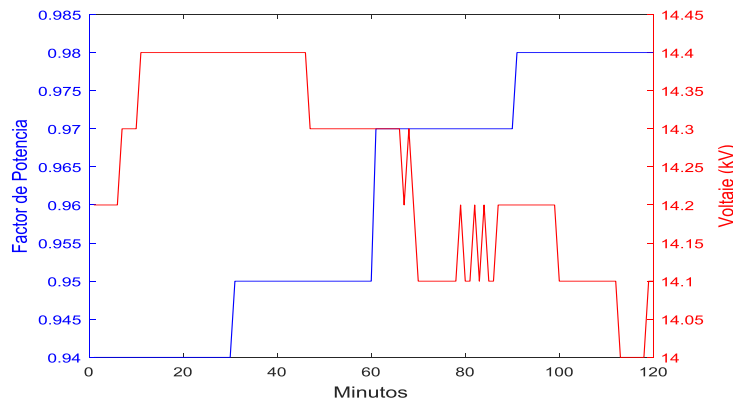


Fig.3.9 Voltaje vs Factor de Potencia para un 100% de carga.

En todas las curvas se mantiene el voltaje por el rango de 14v, a excepción de la primera figura 3.6 para el 80% que hubo una caída de voltaje en las barras de media tensión.

Para todas las curvas se mantiene la regularidad de que el voltaje es más estable para los FP de 0,95 a 0,97 a excepción de la figura 3.6.

Además de este análisis se generaron las curvas en donde se observó el comportamiento de la variación de potencia reactiva generada (ΔQ_g) y de la variación de voltaje (ΔV) las cuales se encuentran en el Anexo 4.

Autor: Wilfredo Almaguer Guerra

Partiendo de todo el estudio realizado hasta este punto y de los resultados obtenidos se continúa con el cálculo de la caída de la característica de generación (Kg).

3.3 Estimación de la característica de generación

Para la estimación de la caída de la característica de generación se parte de los datos del voltaje y la potencia reactiva obtenidos en el experimento como se muestra en los acápite 3.2.1 y 3.2.2.

Tabla 3.1 Valores de la característica de generación (Kg) obtenidos.

Kg	Variación del Factor de Potencia			
	0.94	0.95	0.97	0.98
Kg 80%	6.33	22.37	51.46	32.90
Kg 85%	13.26	20.54	50.51	31.81
Kg 90%	17.13	22.88	15.65	7.99
Kg 100%	8.23	44.41	17.03	17.18

En los resultados obtenidos en la tabla 3.1, se observa las regularidades: que cuando el FP es 0,95 se mantiene una tendencia a incrementarse la Kg para todos los porcentajes de carga y su valor más elevado se obtiene para el 100% de la carga, comportamiento que difiere de los otros FP; que para un 80 y 85% de la carga y hasta un FP de 0,97, la Kg se incrementa en un 45,13 % y 37,25 % respectivamente. En los sistemas motogeneradores al tener el coeficiente de Kg valores grandes le permite a los operadores que toman decisiones conocer que: la ΔQ_g se incrementará positivamente debido la disminución del ΔV en la central, este conocimiento permite a estos operadores contrarrestar las disminuciones de voltaje del sistema[8]. Además se propone que como medida para la operación eficaz del sistema motogenerador que el porcentaje de carga que se deben operar los grupos es al 80% o al 85% para un FP de 0,97, para nuestro caso de estudio debe ser al 80% porque es donde se obtienen mejores resultados de Kg.

Autor: Wilfredo Almaguer Guerra

Si es necesario tomar la decisión de operar a otros porcentajes (90 y 100%) sería conveniente el establecimiento de un FP de 0,95.

3.4 Impactos tecnológico y social en la operación eficaz del sistema de grupos electrógenos fuel oil en el municipio de Moa

Como se aborda en el desarrollo de la tesis consideramos que los sistemas de GD están produciendo impactos positivos y negativos en la sociedad, la economía y en el ambiente[14]. Las repercusiones de los progresos tecnológicos en el campo de la energía son las de más impacto energético, social y ambiental. Hasta este momento en el trabajo quedo explicito que la energía eléctrica posibilita y facilita toda la actividad humana, pero es en el uso final donde se concreta el beneficio de la energía y una correcta compensación de energía reactiva garantiza establecer la calidad del suministro eléctrico; pues una correcta compensación disminuye las pérdidas por efecto Joule en los conductores y transformadores. Además estas pérdidas son contabilizadas como energía activa consumida (kWh) por el Contador de la Compañía Eléctrica, por lo que se traduce también en una reducción en los costos. Disminuye las caídas de tensión en las redes y aumenta la capacidad del SEN[15].

Las diferentes fuentes y sistemas de producción y uso de la energía utilizadas por el hombre han marcado las grandes etapas en el desarrollo de la sociedad humana, dependiendo del curso de éste de las elecciones energéticas realizadas en cada momento. Precisamente la satisfacción de estas necesidades de energía por medio de los sistemas electroenergéticos, sin poner en riesgo la satisfacción futura de dichas necesidades, constituyen el punto de equilibrio que garantiza la seguridad energética del medio social, con el medio ambiente que lo sustenta, y es la mejor alternativa para el desarrollo sostenible de un sistema electroenergético, o sea, la sustitución posible de fuentes convencionales por fuentes renovables[16] y el empleo del conocimiento de la eficiencia energética como alternativa (por su efecto directo) porque contribuye

Autor: Wilfredo Almaguer Guerra

al relevo de las energías renovables, pero su implementación depende de la correcta gestión de la operación de las fuentes de energía, de las demandas de la sociedad y de la incidencia en el medio ambiente.

Este trabajo se ha desarrollado principalmente en el área de la operación eficaz de los GEFO.

Para la solución de las tareas de la operación eficaz de los GEFO, es necesario además de las herramientas computacionales que controle y dirija el proceso de generación de energía; de ingenieros y operadores capacitados que tomen las decisiones para la operación eficaz de los GEFO; y de estudio de los indicadores que permitan facilitar el conocimiento sobre la incidencia del FP, y su relación con Q y v en este sistema.

Por otra parte, la capacitación de los operadores y especialistas es imprescindible debido a que los errores de cálculo y medición afectan la confiabilidad de la estimación de los indicadores de operación eficaz, datos que se pondera e integran en el sistema computacional de control de la generación de todas las provincias del país, sumados directamente o ponderados en proporción a la capacidad instalada o a la generación de cada uno de ellos, situación que actualmente incide y puede limitar, e incluso invalidar la toma de decisiones sobre la operación de los GEFO, ya que, a partir de estos indicadores se garantiza la operación eficaz de los GEFO.

Por la importancia de estos sistemas, se introducen dentro de las asignaturas optativas de la carrera de Eléctrica y Mecánica del ISMM postgrados temas relacionados con esta área del conocimiento, que mejoren la aceptación y explotación de la grupos. Los GEFO además son objetos de estudio de diplomantes, maestrandos y doctorandos del ISMM. El proceso ha permitido que se desarrollen procedimientos, modelos matemáticos y aplicaciones informáticas que mejoran la comprensión sobre la operación de los GE, resultados que se publican en eventos, revistas y se validan por

medio de proyectos de investigación, pero que en los últimos tres años no han sido abordados en una investigación.

3.5 Conclusiones

- Se realizó la descripción general de la investigación y las condiciones que se tuvieron en cuenta para la realización de esta.
- Se obtuvo el comportamiento de las curvas de potencia activa vs potencia reactiva y de factor de potencia vs voltaje.
- Se estimaron los FP para una mejor característica de generación y un mejor nivel de voltaje garantizado por esta.
- Se proponen los impactos tecnológico y social en la operación eficaz del sistema de grupos electrógenos *fuel oil* en el municipio de Moa para concluir con todo el estudio investigativo.

Conclusiones Generales

- I. Se realizó el estudio del motor de combustión interna, generador sincrónico y el regulador automático de voltaje para tener conocimiento sobre los aspectos teóricos relacionados con la regulación de voltaje y la operación eficaz del sistema motogenerador *fuel oil* de Moa.
- II. El porcentaje de carga que se deben operar los grupos es al 80% o al 85% para un factor de potencia de 0,97.
- III. Para un factor de potencia de 0,95 los sistemas motogeneradores se deben operar al 90 y 100% de carga.
- IV. Se realiza una caracterización de los impactos tecnológico y social de la operación eficaz del sistema de grupos electrógenos *fuel oil* en Moa.

Recomendaciones

1. Profundizar en el estudio del comportamiento del factor de potencia en relación con los niveles a través de una simulación en un *software* profesional que permita evaluar el comportamiento de estas variables para favorecer estudios posteriores en la CEFOM.
2. Continuar el estudio de la investigación para analizar las incidencias de la potencia activa y el consumo específico de combustible en relación con el porcentaje de carga y el factor de potencia para la operación de los grupos electrógenos *fuel oil* en el municipio Moa.
3. Realizar el mismo análisis para una mayor cantidad de máquinas con el objetivo de obtener resultados más representativos.

Bibliografía

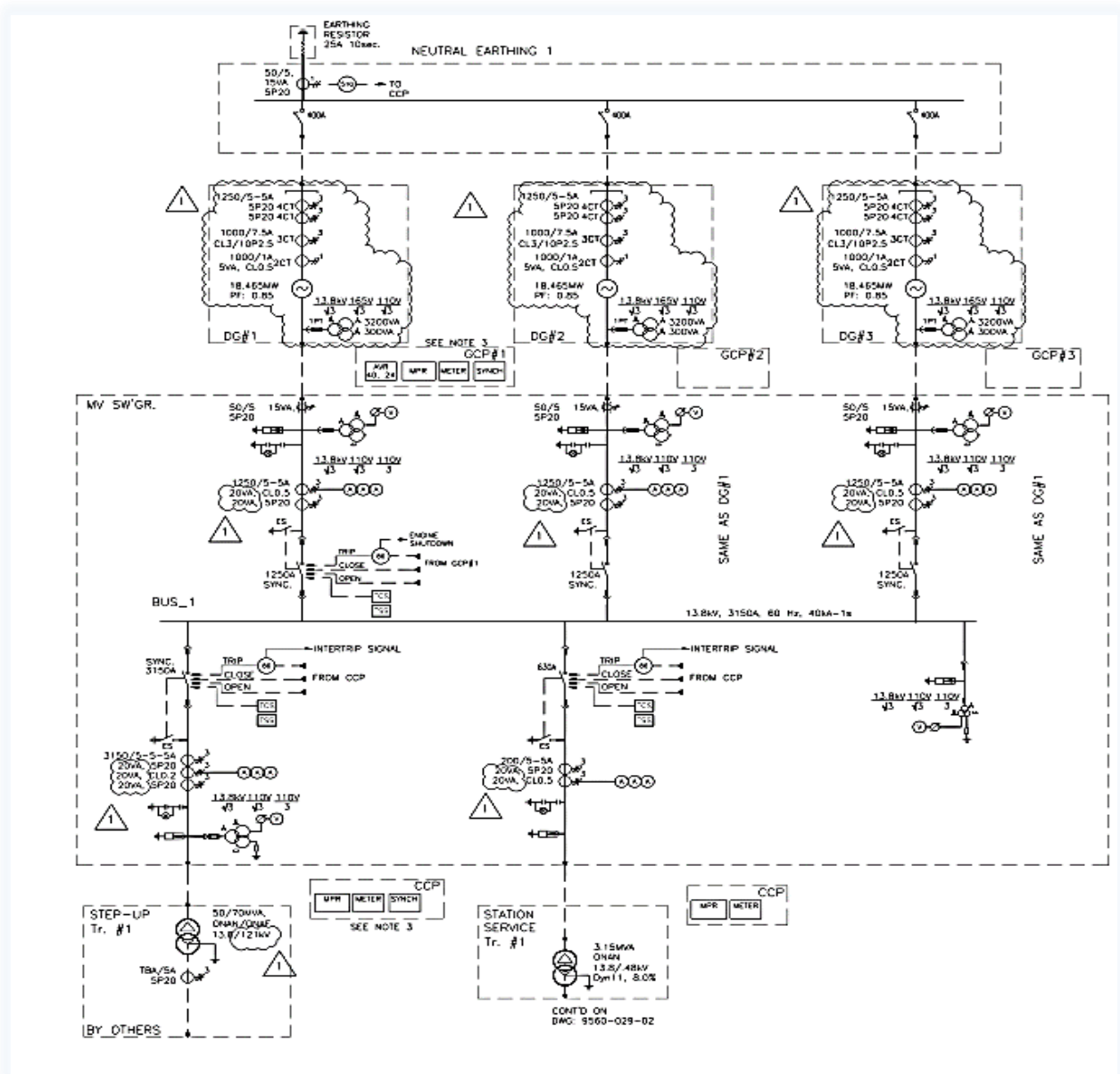
1. Sanamé, A.G., *Cálculo verificativo del sistema de enfriamiento del aceite de los motores MAN 18V48/60B de la Central Diésel Eléctrica Moa*. 2015.
2. Laurencio, D.M. and Reyes Almaguer, *Características operacionales y comportamiento de las principales variables de los grupos electrógenos para la Generación Distribuida en Moa*. 2007.
3. Planche, D.V., *Establecimiento del rango del índice de consumo de combustible en la batería de grupos electrógenos de Moa*. 2008.
4. Matos, I.S., *Estudio de las variaciones de tensión durante la operación de los grupos electrógenos Fuel Oil*. 2016.
5. Álvarez, C.Á. and F.S. Alzate, *Análisis local y mundial de tendencias en generación distribuida*. 2014.
6. Fuentes, Y.A.G., *Impacto de la introducción de la Generación Distribuida en el Sistema Eléctrico de Potencia*. 2008.
7. Chapman, S.J., *Electric Machinery Fundamentals*.
8. Ramírez, C.H., *Redes y Sistemas Eléctricos*. 1987.
9. Fandiño, E.A., *Fundamentos de la Teoría de Circuitos Eléctricos*. 1987.
10. Castaño, S.R., *Redes de Distribución de Energía*. 2000.
11. Caballero, D.H., *Simulador del Flujo Tecnológico de La Central Diesel Eléctrica de Moa 184 MW*. 2016.
12. Suárez, H.L., *Informe de Tarea Sostentabilidad Energética*. 2016.
13. Suárez, H.L., *Control de velocidad de los motores de combustión interna MAN 18V48/60B en la Central Eléctrica de Moa*. 2016.
14. Núñez, J.J., *Filosofía y estudios sociales de la ciencia en Cuba*. . 1999.
15. Stevenson, W.D., *Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia*. 1982.
16. *Ley No. 81 del Medio Ambiente. Asamblea Nacional del Poder Popular. IX Período Ordinario de Sesiones de la Cuarta Legislatura*. 1997.

Anexos

Anexo 1



Anexo 2



Anexo 3

%Exp	P _{máx} (Mw)	P _{mín} (Mw)	P _{media} (Mw)	Q _{máx} (MvAr)	Q _{mín} (MvAr)	Q _{media} (MvAr)	V _{máx} (Kv)	V _{mín} (Kv)	V _{medio} (Kv)
80	15.738	12.650	14.810	5.474	2.658	4.278	14.3	14	14.12
85	16.646	14.756	15.752	5.834	3.049	4.497	14.3	14.1	14.18
90	17.339	15.262	16.589	6.125	3.089	4.747	14.4	14	14.20
100	19.652	14.602	18.335	6.789	3.032	5.230	14.4	14	14.24

Anexo 4

