

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA**



**“ANÁLISIS DEL REPARTO DE CARGA DE
GRUPOS ELECTRÓGENOS CATERPILLAR
OPERANDO EN PARALELO”**

INFORME DE SUFICIENCIA

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

HUGO GUERRA VARGAS

PROMOCIÓN 2003-I

LIMA-PERÚ

2007

DEDICATORIA

El presente trabajo quiero dedicarlo en especial a mi familia por su apoyo total durante mis años de estudio dentro de la universidad en especial a mi madre Teodora por su incondicional apoyo y cariño, por estar siempre conmigo, por todas sus enseñanzas, valores y buenas costumbres que ha inculcado y me han formado. A mis hermanos por que con su ejemplo de perseverancia en la vida sembraron en mí, hábitos que me condujeron siempre a mis objetivos. A toda la plana docente de la facultad porque a pesar de las adversidades dejaron siempre lo mejor de ellos en las aulas de la facultad, a mis compañeros de estudios de la facultad de mecánica, en especial mis compañeros de promoción con los que compartí varias horas de estudio.

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	i
PRÓLOGO.....	1
CAPÍTULO I.....	3
INTRODUCCIÓN	3
1.1 Escenario.....	3
1.2 Objetivos.....	4
1.2 Alcance y limitaciones del estudio	5
CAPÍTULO II.....	6
PRINCIPIOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA TRIFÁSICA	6
2.1 Generación de voltaje y corriente en un devanado trifásico	6
2.1.1 Voltaje inducido en un grupo de bobinas trifásico	6
2.1.2 Velocidad de rotación de un generador síncrono	8
2.1.3 Circuito equivalente de un generador síncrono	9
2.2 Clasificación de los grupos electrógenos.....	12
2.2.1 Factor de carga de un generador	12
2.2.2 Clasificación Stand by	13
2.2.3 Clasificación Prime	13
2.2.4 Clasificación Continuo	14
2.3 Curva de capacidad de un generador.....	14
2.4 Protección de generadores sincrónicos.....	16
2.4.1 Protección de falla de fases del estator del generador.....	17
2.4.2 Protección de tierra en el campo	17
2.4.3 Protección de falla a tierra en el devanado del estator.....	18
2.4.4 Protección de sobre excitación y sobre tensión.....	19
2.4.5 Protección por pérdida de campo.....	19
2.4.6 Protección por pérdida de sincronismo	20
2.4.7 Protección de desbalance de corriente (Secuencia negativa)	20
2.4.8 Numero de dispositivo de re relés	22

CAPÍTULO III.....	24
COMPONENTES PRINCIPALES DE UN GRUPO ELECTRÓGENO	24
3.1 Componentes, sistema de excitación del generador síncrono	24
3.1.1 Descripción de componentes	24
3.1.2 El rotor.....	25
3.1.3 El estator	25
3.1.4 Devanados del inducido	26
3.1.5 Tipos y procesos de devanados	27
3.1.6 Estilos de devanados	28
3.1.7 Clasificación NEMA del Aislamiento.....	29
3.1.8 Curvas de resistencia térmica	30
3.1.9 Sistema de excitación.....	31
3.2 Sistema Regulador de voltaje Digital - CDVR.....	38
3.2.1 Información General	38
3.2.2 Curva de arranque del regulador de voltaje	39
3.2.3 Curva de carga y parada del regulador	40
3.2.4 Regulación de voltaje	41
3.2.5 Regulación de la caída de voltaje.....	41
3.2.6 Regulación de la potencia reactiva (kVAR)	42
3.2.7 Regulación del factor de potencia	42
3.2.8 Comunicación remota.....	43
3.2.9 Diagrama de conexión.....	44
3.3 Tarjeta electrónica – Regulador de Velocidad	44
3.3.1 Respuesta transitoria.....	44
3.3.2 Descripción.....	46
3.4 Repartidores de Carga “Load Sharing”	47
3.4.1 Información General	47
3.4.2 Teoría de Operación.....	48
CAPÍTULO IV	54
FUNDAMENTOS DE GRUPOS ELECTRÓGENOS EN PARALELO	54
4.1 Generador Síncrono Operando Solo	54
4.1.1 Efecto de los cambios en la carga en un generador sincrono que opera solo	54
4.2 Operación en paralelo de generadores de CA	56
4.3 Condiciones Requeridas para Operar en Paralelo	58
4.4 Procedimiento general para conectar generadores en paralelo	59

4.5	Características de frecuencia – Potencia y de Voltaje-Potencia reactiva en un generador síncrono.....	60
4.6	Operación de generadores en paralelo con otros generadores del mismo tamaño.....	63
CAPÍTULO V		67
ANÁLISIS DE REPARTO DE CARGA ACTIVA DE DOS GRUPOS ELECTRÓGENOS 3412C OPERANDO EN PARALELO		67
5.1	Características Técnicas de los grupos Electrógenos	67
5.2	Características Técnicas de la Carga.....	70
5.3	Protocolo de pruebas.....	71
5.3.1	Diagrama de flujo para puesta en paralelo de G1 y G2.....	73
5.4	Datos experimentales, elaboración de curvas de reparto de carga.....	74
5.4.1	Primera toma de carga operando en paralelo	74
5.4.2	Segunda toma de carga operando en paralelo	77
5.5	Calculo teórico del reparto de potencia reactiva (kVAR)	80
CAPÍTULO VI		82
ANÁLISIS ECONÓMICO.....		82
6.1	Resumen económico del proyecto	82
6.2	Variables económicas del proyecto	83
6.2.1	Ingresos económicos del proyecto	83
6.2.2	Valor Actual Neto (VAN).....	84
6.2.3	Cálculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR).....	84
6.2.4	Cálculo de la relación B/C	85
CONCLUSIONES.....		86
RECOMENDACIONES.....		88
BIBLIOGRAFÍA.....		89
ANEXOS.....		91

PRÓLOGO

El presente informe suficiencia de ingeniería desarrolla de manera clara y resumida, integrado por seis capítulos con alcances respaldados en 11 referencias bibliográficas brindados por textos especializados y literatura Caterpillar de actualidad tecnológica. Por medio de estas referencias quiero presentar el análisis de reparto de carga en dos Grupos Electrónicos Caterpillar operando en paralelo conectados a una carga resistiva de factor de potencia unitario así como también una idea de la inversión económica para la implementación de un programa de capacitación en la operación mantenimiento de grupos electrónicos.

En el Primer Capítulo que corresponde a la introducción se presenta de manera amplia y el objetivo de presente informe de suficiencia....

En el Segundo Capítulo se describen como se produce el voltaje y corriente muestra las ecuaciones matemáticas que rigen a los generadores síncronos. Seguidamente la clasificación que Caterpillar asigna a sus grupos electrónicos según el factor de carga tipo de carga a conectarse. Además muestra la curva de capacidad del grupo electrónico y las protecciones básicas que este debe tener.

En el Tercer Capítulo se describe los principales componentes de un generador síncrono Caterpillar, los dos tipos de sistema de excitación que estos generadores presentan. El regulador de voltaje digital CDVR así como

la descripción del gobernador de velocidad y repartidores de carga electrónica usados en los generadores.

En el cuarto capítulo describe los fundamentos técnicos y las consideraciones que se deben tener para operar dos grupos electrógenos en paralelo. Así como las curvas características de potencia activa, potencia reactiva versus frecuencia.

En el Quinto Capítulo tiene como objetivo analizar la toma de carga de dos grupos electrógenos operando en paralelo conectados a una carga de factor de potencia unitario luego de haber configurado apropiado el regulador de voltaje y el gobernador electrónico de velocidad.

En el Sexto Capítulo se realiza el análisis económico para la implementación de un programa de capacitación en operación, seguridad y mantenimiento de grupos electrógenos que proyectan vender a lo largo de 10 años, así mismo, se muestran los respectivos indicadores económicos que le dan viabilidad económica del proyecto.

De la misma manera, al final del informe se presentan las Conclusiones, Recomendaciones y la Bibliografía utilizada para la elaboración del presente informe de suficiencia.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Escenario

El crecimiento económico que está logrando el país en estos últimos años, se refleja con el crecimiento del Producto Bruto Interno el cual ha crecido numéricamente en los últimos años en el país. Esto se ve también reflejado en las industrias quienes están aumentando su producción de bienes y servicios, aumentan su consumo de energía.

El sector minero, hidrocarburos, industrial para continuar atendiendo su demanda y la confiabilidad de su producción necesita de equipos que suministren energía eléctrica para eventuales cortes de energía eléctrica que pueden tener origen en la empresa que suministra, en una falla eléctrica en la línea, etc. Estos equipos binen a ser los grupos electrógenos Stand By o de grupos de emergencia.

También existen en nuestro mercado empresas que no tienen acceso al sistema interconectado nacional para compra de energía que necesitan, es aquí en donde los grupos electrógenos cumplen un rol fundamental, debido a que estos son los únicos suministros de energía eléctrica que se encuentran trabajando de manera continua durante todo el año.

La otra aplicación que tenemos para los grupos electrógenos es para industrias que compran energía del sistema interconectado nacional, las cuales requieren cubrir su demanda de energía para horas punta u horas de máxima demanda, en esta situación la aplicación de grupos electrógenos es para la operación en paralelo con la red de energía.

1.2 Objetivos

El presente informe de suficiencia tienen como objetivo principal analizar el reparto de carga de energía eléctrica de dos grupos electrógenos de diferentes potencias de placa 681KVA (545kW) y 906KVA (725kW) operando en paralelo con caída de velocidad (speed droop). Para ello se describen los criterios técnicos y fundamentos necesarios para realizar los ajustes en los gobernadores de velocidad.

La importancia de operar correctamente generadores en paralelo es debido a que el diagrama de carga diario de una empresa no es constante en todo momento, hay intervalos de tiempo en el cual la demanda aumenta, es aquí en donde entran a trabajar un segundo, tercero o cuarto grupo electrógeno. Es más económico operar varios grupos electrógenos en diferentes intervalos de tiempo que tener un grupo de una potencia equivalente a los otros cuatro el cual solo operará a su plena carga durante la máxima demanda, el resto de tiempo lo hará a menos de la mitad de su potencia. La consecuencia que se tendrá, es un elevado consumo de combustible y un

desgaste de sus componentes internos lo cual también se ve reflejado en un costo elevado por mantenimiento motor diesel. Además si no se asigna un valor adecuado de la caída de velocidad, la consecuencia será una desproporcionado reparto de carga de los generadores, ciertos generadores pueden estar operando más allá de su potencia nominal.

1.2 Alcance y limitaciones del estudio

Para el estudio del reparto de carga se ha considerado grupos electrógenos operando con caída de velocidad, no se ha estudiado el caso de generadores trabajando de manera isócrona, es decir reparto de carga sin caída de velocidad. Tampoco se está tomando en cuenta grupos electrógenos trabajando en paralelo con la red de suministro de energía.

CAPÍTULO II

PRINCIPIOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA TRIFÁSICA

2.1 Generación de voltaje y corriente en un devanado trifásico

2.1.1 Voltaje inducido en un grupo de bobinas trifásico

Un conjunto de corrientes trifásicas en un estator puede producir un campo magnético giratorio, un campo magnético giratorio puede producir un conjunto de voltajes trifásicos en las bobinas del estator.

Si se colocan tres bobinas, cada una con N_c vueltas, alrededor del campo magnético del rotor, como se muestra en la figura 2.1, entonces los voltajes inducidos en cada una de ellas será igual en magnitud pero la diferencia de fase será de 120° . los voltajes resultantes en cada una de estas tres bobinas son:

$$e_{aa'} = N_c \cdot \phi \cdot \omega \cdot \text{sen}(\omega t)$$

$$e_{bb'} = N_c \cdot \phi \cdot \omega \cdot \text{sen}(\omega t - 120^\circ)$$

$$e_{cc'} = N_c \cdot \phi \cdot \omega \cdot \text{sen}(\omega t - 240^\circ)$$

Por lo tanto, un conjunto de bobinas trifásicos puede generar un campo magnético giratorio uniforme en el estator de una máquina y un campo magnético giratorio uniforme puede generar un conjunto de voltaje trifásicos en el estator de un generador.

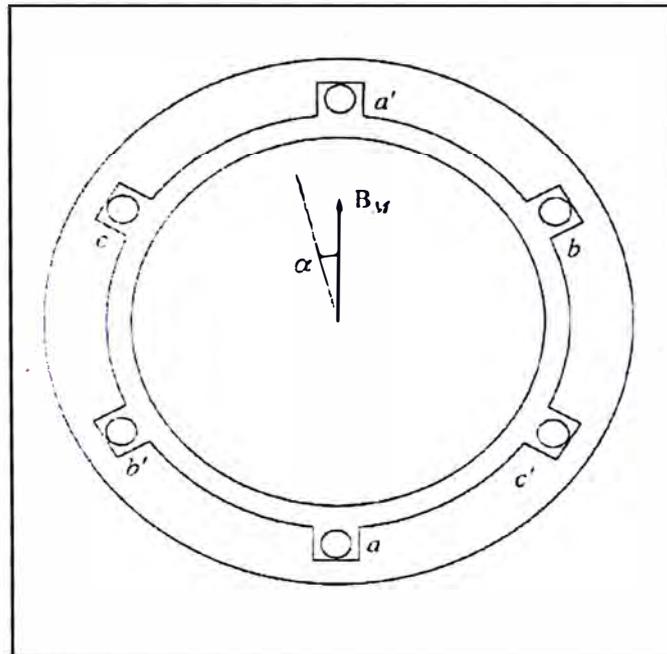


Fig. 2.1 La producción de voltaje trifásico con tres bobinas separadas 120°

El voltaje pico en cualquier fase de un estator trifásico de este tipo es

$$E_{\max} = Nc \phi \omega$$

Debido a que $\omega = 2\pi f$, el voltaje rms en cualquier fase de este estator trifásico es:

$$E_A = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot Nc \cdot \phi \cdot f$$

El voltaje rms en los terminales depende de si el estator tiene una conexión en estrella (Y), entonces el voltaje del terminal será $\sqrt{3}$ veces E_A ; si la máquina tiene conexión delta (Δ), entonces el voltaje Terminal será igual a E_A . Este voltaje depende del flujo ϕ en la máquina, de la frecuencia o velocidad de rotación y de la construcción de la máquina. La forma más

simplificada que enfatiza las cantidades que varían durante la operación de la máquina es:

$$E_A = K \cdot \phi \cdot \omega$$

En donde K es un factor que representa la construcción de la máquina.

2.1.2 Velocidad de rotación de un generador síncrono

El rotor de un generador síncrono consta de un electroimán al que se le suministra corriente directa. El campo magnético del rotor apunta en la dirección que gira el rotor. La frecuencia eléctrica del estator esta dado por la siguiente ecuación.

$$f_e = \frac{n_m \cdot P}{120}$$

Donde f_e = Frecuencia eléctrico en Hz

n_m = Velocidad mecánica del campo magnético en r/min (igual a la velocidad del rotor de una máquina síncrona)

p = Número de polos

Debido a que el rotor gira a la misma velocidad que el campo magnético, esta ecuación relaciona la velocidad de rotación del rotor con la frecuencia eléctrica resultante.

2.1.3 Circuito equivalente de un generador síncrono

El voltaje E_A es el voltaje interno generador producido en una fase de un generador síncrono. Sin embargo, el voltaje E_A no es normalmente el voltaje que se presente en los terminales del generador. El único momento en que el voltaje interno E_A es igual al voltaje de salida V_ϕ de una fase es cuando no fluye corriente de armadura en la maquina

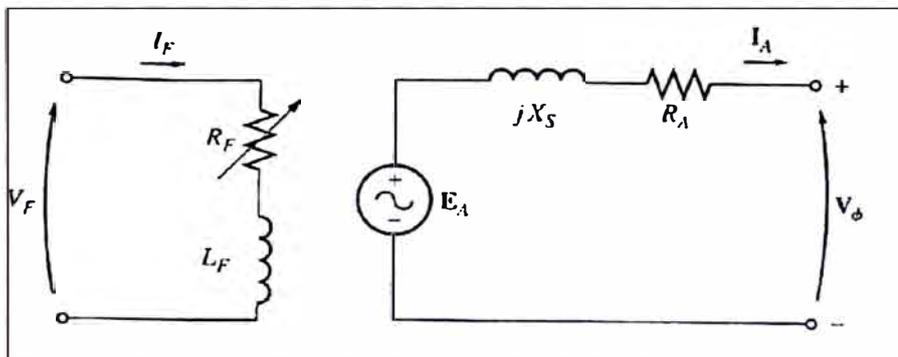


Fig. 2.2 Circuito equivalente por fase de un generador síncrono

En un generador síncrono con rotor de polo saliente los efectos provocados por las protuberancias (polos) de los rotores no son los mismos que en un generador de polo cilíndrico. Sin embargo en la realidad en el estado estacionario estas diferencias se pueden despreciar, pero cuando se trabaja en estado estacionario los efectos difieren bastante de cada tipo de rotor.

Hay cuatro elementos en el circuito equivalente de un generador síncrono de polo saliente:

- 1.- El voltaje interno del generador E_A .
- 2.- La reacción del inducido del generador síncrono.

3.- La auto inductancia del devanado del estator.

4.- La resistencia del devanado del estator.

En la figura 2.3 se muestra un rotor de polo saliente con dos polos que gira en sentido anti horario. El flujo del rotor se llama B_R y apunta hacia arriba.

Entonces el voltaje inducido es:

$$e_{ind} = (V \times B) \cdot L$$

Si ahora se conecta una carga en retraso a los terminales del generador, entonces fluirá una corriente cuyo valor máximo estará retrasado en relación con el voltaje máximo.

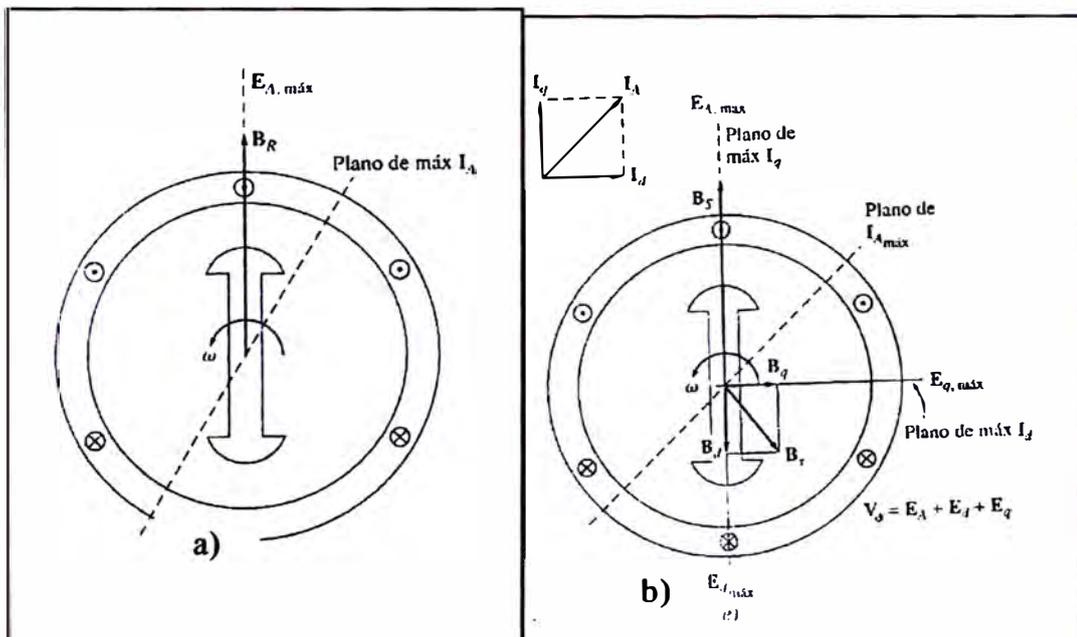


Fig. 2.3 a) Campo magnético del rotor induce voltaje en el estator b) Flujos del estator del eje directo y cuadratura producen voltajes de reacción del inducido en el estator del generador.

El flujo de corriente del estator produce una fuerza magneto motriz que está retrasada 90° con respecto al plano de la corriente máxima del estator. Por lo tanto la fuerza magneto motriz tiene dos componentes paralelo y perpendiculares al eje del rotor que producen su campo magnético el cual produce su propio voltaje de devanado del estator por la reacción del inducido. Entonces el voltaje del estator será:

$$V_\theta = E_A + E_d + E_q$$

$$V_\theta = E_A - jX_d I_d - jX_q I_q - R_A I_A$$

En donde "Xd" es la reactancia síncrona directa y "Xq" es la reactancia síncrona en cuadratura del generador

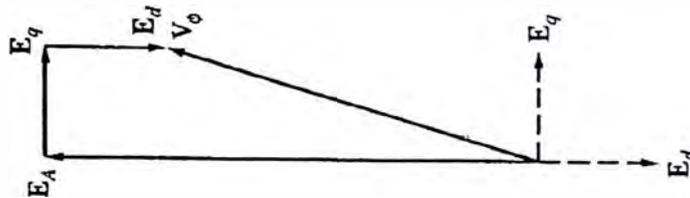


Fig. 2.4 Voltaje de fase del generador es igual a la suma de su voltaje interno generado más los voltajes de la reacción del inducido

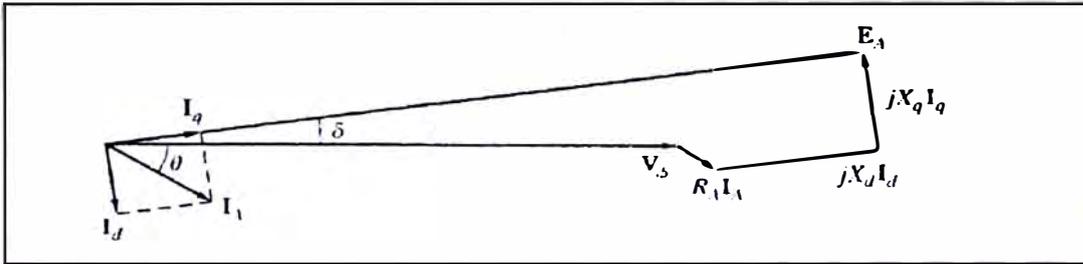


Fig. 2.5 Diagrama fasorial de un generador con polo saliente

Las ecuaciones de par y potencia para las máquinas con polo saliente difieren de la de un rotor de polo cilíndrico debido a los efectos de la reactancia directa y de cuadratura.

$$P = \frac{3V_{\theta}E_A}{X_s} \text{sen}\delta + \frac{3V_{\phi}^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) \text{sen}2\delta$$

2.2 Clasificación de los grupos electrógenos

2.2.1 Factor de carga de un generador

El factor de carga de un generador se define de la siguiente manera:

$$\text{Factor de Carga} = (\% \text{ tiempo})(\% \text{ carga})$$

$\% \text{Tiempo} = (\text{Tiempo a una carga especificada}) / (\text{Tiempo total de Operación})$

$$\% \text{ Carga} = (\text{Carga específica}) / (\text{Carga Nominal})$$

Para el cálculo de esta fórmula no se considera el tiempo que el grupo electrógeno estuvo trabajando en vacío. Tampoco se considera el tiempo que el grupo estuvo parado.

2.2.2 Clasificación Stand by

La potencia de salida disponible para una carga variable por el tiempo que dure la interrupción del suministro principal de energía.

Factor de Carga Típico = 60% o menos

Hora de trabajo para un año = 500 hrs.

Demanda Pico = 80% ó menos de la potencia activa (eKW), con una disponibilidad del 100% durante la duración de un corte de energía.

Aplicación: Edificios residenciales, oficinas, hospitales etc.

2.2.3 Clasificación Prime

La potencia de salida disponible para una carga variable por un tiempo ilimitado

Factor de Carga Típico = 60% a 70%

Hora de trabajo para un año = Sin límite de horas

Demanda Pico = 100 % de la potencia nominal ocasionalmente

Aplicaciones: industrias, plantas de bombeo, cogeneración

2.2.4 Clasificación Continuo

La potencia de salida disponible para una carga variable por un tiempo ilimitado

Factor de Carga = 70% a 100%

Horas de trabajo al año = Sin límites

Demanda Pico = 100% de su potencia nominal durante el 100% del tiempo

Aplicación = Carga Base, cogeneración, Operación en paralelo

2.3 Curva de capacidad de un generador

Los límites de carga del estator y rotor, junto con cualquier otro límite de un generador síncrono, se pueden expresar se expresan en forma gráfica por medio del *diagrama de capacidad del generador* el cual es una grafica de la potencia compleja $S = P + jQ$ toda vez que el voltaje de fase del generador permanece constante debido a que es el voltaje nominal de la máquina.

En la figura 2.6 se observa la curva de operación de un generador para un generador de polo saliente.

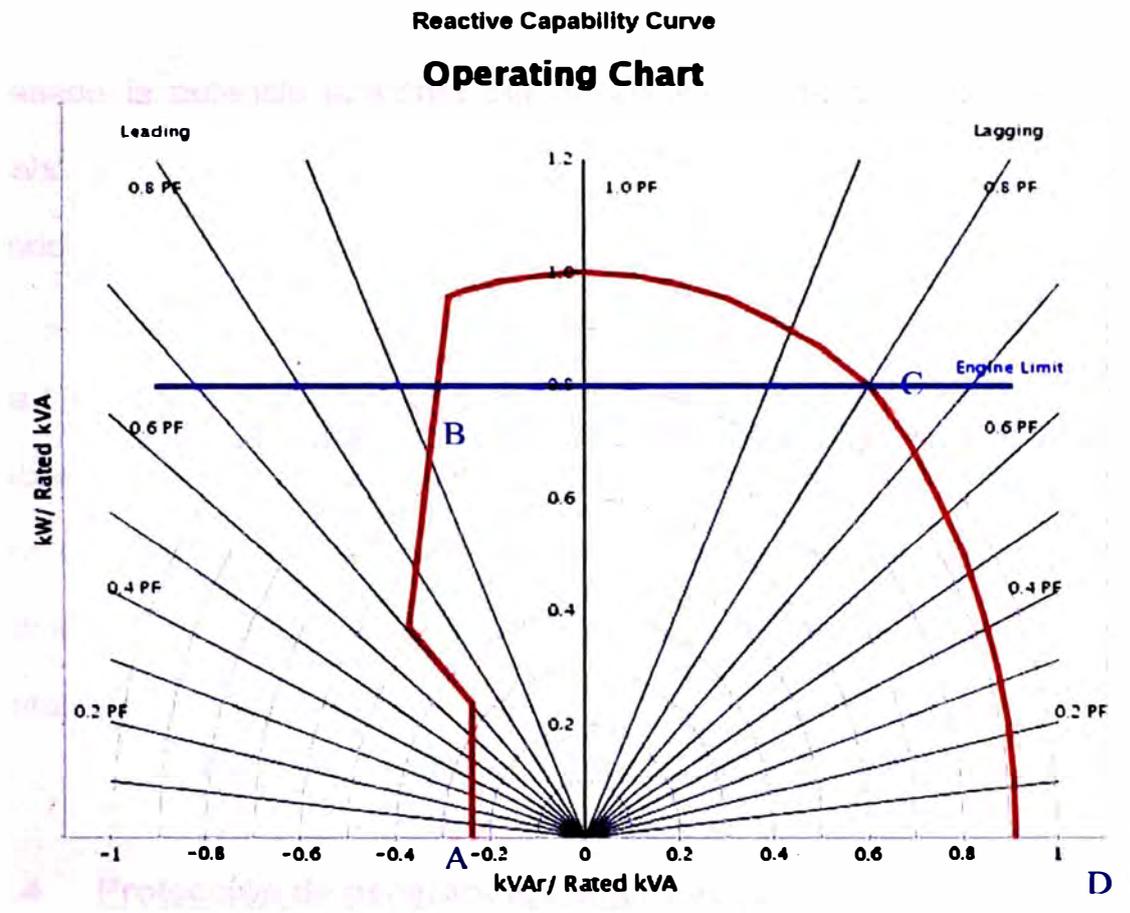


Fig. 2.6 Curva de operación para un motor 3412. 725 kW

Un punto en el interior de esta curva define la potencia activa, reactiva, potencia aparente, factor de potencia y excitación.

La línea CD nos da el límite de corriente del rotor, al operar el generador fuera de esta región se está sobreexcitando con consecuencias de recalentamiento en el devanado de rotor.

La línea en azul BC es el límite de potencia activa máxima que puede entregar nuestro motor primario, es este caso estamos hablando de un motor Diesel. En el caso que un generador opere con su potencia aparente nominal pero con un factor de potencia mayor 0.8, ubicándonos en la curva

el generador estaría trabajando por encima de la línea BC, aunque no se ha pasado la potencia aparente del generador, el motor primo (Diesel) está trabajando en la región de sobrecarga con consecuencia que pueden conducir a una pronta falla del motor.

La Línea AB es la que nos da el fabricante que ha obtenido en pruebas de laboratorio, es el límite de estabilidad del generador en caso que se trabaje con factor de potencia en adelanto. Toda vez que se opere el generador en adelanto se tiene que realizar dentro de la curva AB. Es la región de estabilidad de regulador de voltaje.

2.4 Protección de generadores sincrónicos

La protección de generadores síncronos incluye la consideración de las condiciones de operación anormal más dañinas que la protección de cualquier otro elemento del sistema de potencia. Un generador protegido adecuadamente requiere, la protección automática contra condiciones anormales dañinas. El inconveniente al proporcionar algunas de las protecciones no es tanto que puedan operar inadecuadamente o remover el generador de servicio innecesariamente, sino de que fallen al operar cuando deben. Un disparo innecesario del generador es indeseable, pero las consecuencias de no dispararlo y dañar la maquina son terrible.

2.4.1 Protección de falla de fases del estator del generador

Una falla de fase en el devanado del estator del generador es siempre considerada como sería debido a las altas corrientes encontradas y el daño potencial a los devanados de las máquinas, así como el eje y el acoplamiento. Los largos tiempos de reparación para máquinas severamente dañadas pueden ser costosos. Por lo tanto es muy importante minimizar el daño debido a fallas del estator. Para agravar esta situación, la corriente de falla en un generador no se interrumpe cuando el campo del generador es disparado y el generador es separado del sistema. La energía almacenada en el campo continuará alimentando corriente de falla por varios segundos.

2.4.2 Protección de tierra en el campo

El circuito de campo de un generador es un sistema de C.D. no puesto a tierra. Una sola falla a tierra generalmente no afectará la operación de un generador ni producirá efectos de daño inmediato. Sin embargo, la probabilidad de que una segunda falla a tierra ocurra es mayor después de que la primera falla a tierra ha ocurrido. Cuando se tiene una segunda falla a tierra, una parte del devanado de campo estará en corto circuito, produciendo por lo tanto flujos desbalanceados en el entrehierro de la máquina. Los flujos desbalanceados los cuales dan como resultados vibración y daño de la máquina. Una tierra en el campo también produce calentamiento del hierro del rotor debido a las corrientes desbalanceadas, las que dan como resultado temperaturas desbalanceadas que pueden causar vibraciones dañinas.

2.4.3 Protección de falla a tierra en el devanado del estator

EL método usado de puesta a tierra del neutro del estator del generador en una instalación de generador determina el comportamiento del generador durante condiciones de falla a tierra. Si el generador está sólidamente puesto a tierra, aportará una muy alta magnitud de corriente a una falla de línea a tierra (SLG) en sus terminales, acompañada de una reducción del 58% en las tensiones fase-fase que involucra la fase fallada y de un modesto desplazamiento de la tensión del neutro. Si el generador no está puesto a tierra, aportará una cantidad de corriente despreciable a una falla SLG en sus terminales y un completo desplazamiento de la tensión del neutro.

Las altas magnitudes de corriente de falla que resultan de un generador sólidamente puesto a tierra son inaceptables debido al daño que la falla puede causar. La desconexión al generador a través del disparo del interruptor principal, de campo y el impulsor no hará que la corriente de falla se reduzca inmediatamente a cero. El flujo atrapado en el campo causará una corriente de falla que disminuye lentamente en algunos segundos después de que el generador es disparado, lo que magnifica significativamente el daño. Por otro lado, el operar un generador sin aterrizar provoca una corriente de falla despreciable, pero las tensiones de línea a tierra en las fases no falladas pueden elevarse durante las fallas con arqueo a niveles altamente peligrosos los cuales podrían causar la falla del aislamiento del generador. Como resultado, los devanados del estator de generadores grandes son puestos a tierra de tal forma que reduzcan las corrientes las corrientes de falla y las sobre tensiones proporcionen un

medio de detectar la condición de falla a tierra lo suficientemente rápido para prevenir el calentamiento del hierro. Dos tipos de puesta a tierra son ampliamente usados en la industria, los denominados como puesta a tierra de alta y de baja impedancia.

2.4.4 Protección de sobre excitación y sobre tensión

La norma ANSI/IEEE establece que los generadores deben operar exitosamente a kVA nominales para niveles de tensión fuera de estos límites pueden causar esfuerzos térmicos y dieléctricos que pueden causar daño en segundos. La sobreexcitación y la sobre tensión son desviaciones para las cuales se necesita proporcionar esquemas de monitoreo y protección.

2.4.5 Protección por pérdida de campo

La pérdida total o parcial del campo del generador sincrónico es perjudicial tanto al generador y como al sistema de potencia al cual está conectado. La condición debe ser detectada rápidamente y el generador debe ser aislado al sistema para evitarle daños. Una condición de pérdida de campo no detectada puede tener también un impacto devastador sobre el sistema de potencia, causándole una pérdida de soporte de potencia reactiva y creando una toma sustancial de potencia reactiva.

Cuando el generador pierde su campo, opera como un generador de inducción, causando que la temperatura en la superficie del rotor se incremente debido a las corrientes inducidas por el deslizamiento en el devanado de campo, en el cuerpo del rotor, en las cuñas y anillos de

retención. La alta corriente reactiva tomada por el generador del sistema puede sobrecargar el devanado del estator, causando que se incremente su temperatura. El tiempo de daño a la máquina debido a las causas anteriores puede ser tan corto como 10 segundos, o hasta de varios minutos.

2.4.6 Protección por pérdida de sincronismo

Existen muchas combinaciones de condiciones de operación, fallas y otros disturbios que podrían causar una condición de pérdida de sincronismo entre dos partes de un sistema o entre dos sistemas interconectados. La condición de pérdida de sincronismo causa altas corrientes y esfuerzos en los devanados del generador y altos niveles de pares transitorios en la flecha. Los pares pueden ser tan grandes que pueden llegar a romper la flecha. Por lo tanto es deseable disparar inmediatamente.

2.4.7 Protección de desbalance de corriente (Secuencia negativa)

Existen numerosas condiciones que pueden causar corrientes trifásicas desbalanceadas en un generador. Estas condiciones del sistema producen componentes de corriente de secuencia de fase negativa la cual induce una frecuencia de doble frecuencia en la superficie del rotor. Estas corrientes en el rotor pueden causar altas y dañinas temperaturas en muy corto tiempo. Es práctica común proporcionar al generador protección para condiciones de desbalance externo que podrían dañar a la máquina. Esta protección consiste en un relé de corriente de tiempo el cual responde a la corriente de secuencia negativa.

Para condiciones de sistema balanceado con flujo de corriente de secuencia positiva únicamente, un flujo en el aire gira en la misma dirección y en sincronismo con el devanado de campo sobre el rotor. Durante condiciones desbalanceadas, se produce la corriente de secuencia negativa. La corriente de secuencia negativa gira en la dirección opuesta al rotor. El flujo producido por esta corriente visto por el rotor tiene una frecuencia de dos veces la velocidad síncrona como resultado de la rotación inversa combinada con la rotación positiva del rotor.

El efecto piel de la corriente de doble frecuencia en el rotor causa esfuerzos en los elementos superficiales del rotor.

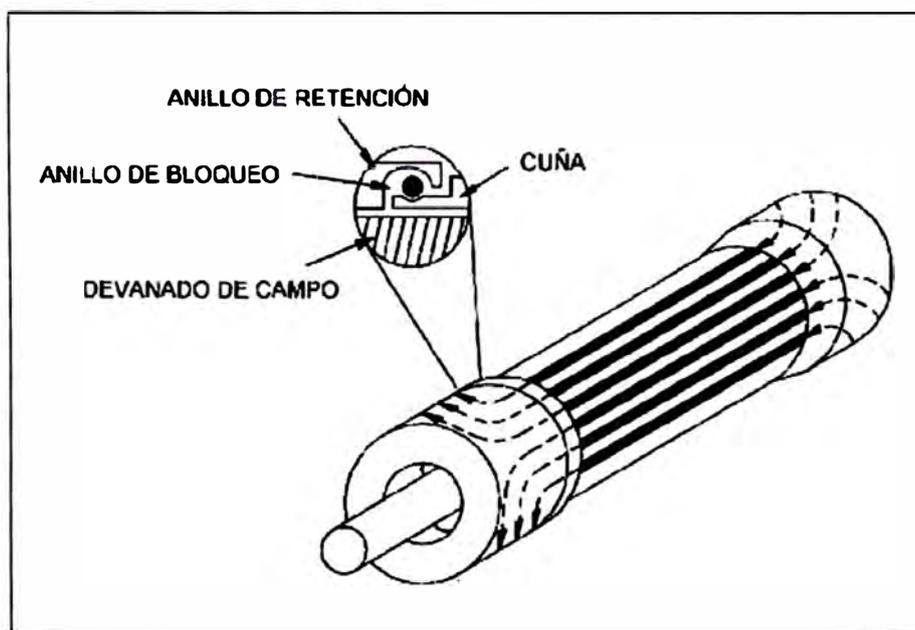


Fig. 2.7 Corrientes en la superficie del rotor

2.4.8 Numero de dispositivo de re relés

Dispositivo	Función
24	Protección V/HZ para sobreexcitación del generador.
32	Relé de potencia inversa. Protección de anti motorización.
40	Protección de pérdida de campo.
46	Protección de desbalance de secuencia negativa del generado.
49	Protección térmica del generador.
51 GN	Relé de sobre corriente a tierra con tiempo.
51 TN	Respaldo para fallas a tierra.
51 V	Relé de sobre corriente de tiempo con control de tensión restricción de tensión. Respaldo para fallas de fase en el sistema y en el generador.
59	Protección de sobre tención.
59 GN	Relé de sobretensión. Protección de falla a tierra en el estator para un generador.
60	Relé de balance de tensión. Detección de fusibles fundidos de transformadores de potencial.
63	Relé de presión del transformador.
64 F	Protección de falla a tierra del campo.
78	Protección de pérdida de sincronismo.
81	Relé de frecuencia. Protección de baja o sobre frecuencia
87 G	Relé diferencial. Protección primaria de falla de fase del generador

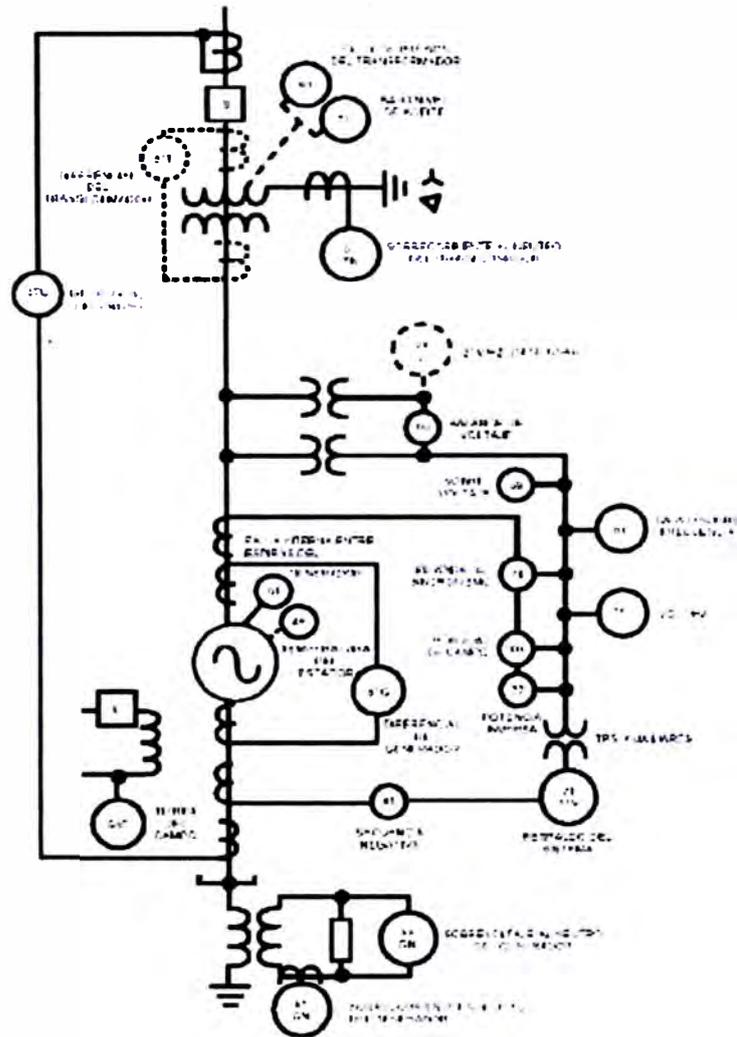


Fig. 2.8 Configuración típica para generador-transformador.

CAPÍTULO III

COMPONENTES PRINCIPALES DE UN GRUPO ELECTRÓGENO

3.1 Componentes, sistema de excitación del generador síncrono

3.1.1 Descripción de componentes

Los generadores se construyen de diferentes maneras para satisfacer las diferentes necesidades de carga. Un generador de clasificación PRIME, está diseñado para trabajar las 24 horas de manera continua. Los generadores con clasificación STANDBY han sido diseñados para trabajar como generadores de respaldo (emergencia). La potencia de los generadores Caterpillar han sido diseñados para trabajar a factor de potencia de 0.8. Los generadores síncronos están compuestos de cuatro componentes principales o sistemas.

- Campo (Rotor)
- Armadura (Estator)
- Excitatriz
- Regulador Automático de Voltaje

En un generador síncrono el proceso de generar voltaje va en el siguiente orden. La excitatriz suministra corriente DC a los devanados del rotor. La corriente DC en estos devanados crea un flujo magnético. Este flujo genera voltaje en el devanado del estator cuando existe movimiento relativo entre el

rotor y el estator. El regulador de voltaje sensa el voltaje de salida y ejerce control en la corriente de excitación.

3.1.2 El rotor

Está compuesto por polos magnéticos con devanados alrededor formando bobinas. Estas bobinas reciben el nombre de bobinas de campo debido a que producen el campo magnético. Puede describirse como un conjunto de láminas delgadas de acero, comprimidas fuertemente y luego remachados, empernados o soldados.

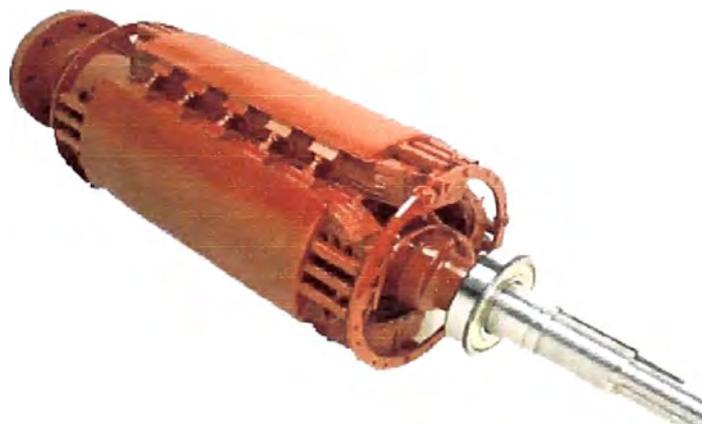


Fig. 3.1 Rotor de polo saliente

3.1.3 El estator

E núcleo del estator está hecho de cientos de láminas de acero delgadas. Las máquinas que las prensan usan soldadura automática para asegurar ángulos de ranuras. Presiones de compresión directa y alineamiento correcto en las ranuras. Las láminas del estator son generalmente de acero siliconado especial.

El núcleo del estator está sujeto a un flujo alterno, que induce pequeñas corrientes internas llamadas corrientes parásitas o de "Foucault". Las corrientes parásitas generan calor y pérdidas de eficiencia.



Fig. 3.2 Construcción del estator

3.1.4 Devanados del inducido

Mientras más amperios puedan acumular los devanados del estator, mayor será la salida del generador. Sin embargo hay límites a la capacidad de corriente como por ejemplo el aumento de la temperatura. El aumento de la temperatura es la limitante del aislamiento de los devanados en el estator para resistir el calor producido por las corrientes que pasan a través de los devanados del estator. La expansión térmica de los cables, al producirse calor, es parte de esta limitante.

3.1.5 Tipos y procesos de devanados

Existen diferentes tipos de devanados del estator y procesos por los cuales se construyen. Cada uno tiene ventajas propias de acuerdo a su uso.

Bobinas devanadas aleatoriamente.

Las bobinas devanadas aleatoriamente son más económicas y se usan en clasificación de potencia baja. La figura 3.3 muestra la sección transversal de una ranura de un generador. Típicamente se necesita dos bobinas por cada ranura.

El estator devanado aleatoriamente pasa por un proceso de baño y horneado. El estator se sumerge completamente en una resina de poliéster, la resina de poliéster se usa para permitir mayor disipación de calor, flexibilidad fuerza de rompimiento por voltaje alto y resistencia a la humedad. La resina penetra en los espacios entre los conductores y deja una capa uniforme. La resina entonces se cura mediante un ciclo de horneado. Al mantener los conductores juntos, la resina minimiza la vibración y la falla prematura de los devanados.

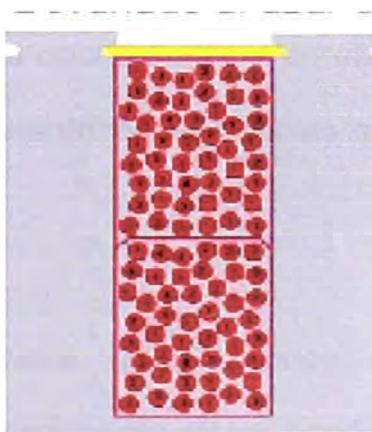


Fig. 3.3 bobinas devanadas aleatoriamente

Bobinas devanadas moldeados.

En los devanados moldeados se utilizan cables cuadrados o rectangulares muy juntos entre sí. Esto permite la máxima cantidad de cobre en una ranura, lo que resulta en una eficiencia y duración superior. Los devanados moldeados generalmente no son prácticos para generadores cuya potencia está por debajo de 1000 kVA, debido a las limitaciones de espacio físico para acomodar este tipo de devanados.



Fig. 3.4 Devanado moldeado

3.1.6 Estilos de devanados

Hay dos estilos de devanados que se usan en la construcción de la mayoría de generadores: imbricado y concéntrico. Los devanados imbricados son bucles distribuidos a través uno del otro y enrollado en forma de diamante doble. Los devanados concéntricos son bucles enrollados dentro de bucles más grandes.

Los devanados concéntricos utiliza menos cantidad de cobre pero proporciona un incremento en los armónicos.

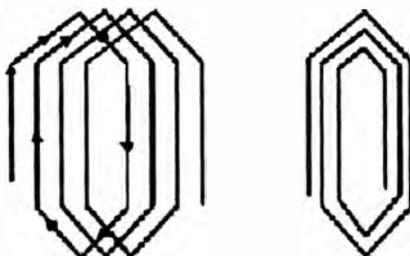


Fig. 3.5 Estilos de devanados

3.1.7 Clasificación NEMA del Aislamiento

En los años sesenta, la clase de aislamiento eléctrico comenzó a preferirse para la clasificación de generadores, debido al límite térmico máximo de temperatura de superficie de diferentes materiales aislante.

Las normas para el aislamiento están dadas por los estándares NEMA (National Electrical Manufacturers Association) según la máxima temperatura permitida durante la operación. Ver tabla 3.1

Clase	Temperatura máxima permitida de operación		Elevación de temperatura permitida a plena carga	Materiales
	°C	°F	°C	
A	105	221	60	Algodón, tela, papel impregnado
B	130	266	80	Vidrio, Mica, asbesto
F	155	311	105	Vidrio, mica, asbesto.
H	180	356	125	Vidrio, mica pegado con materiales que soportan

Tabla 3.1 Clasificación NEMA del aislamiento

3.1.8 Curvas de resistencia térmica

En la figura 3.6 se muestra las curvas de resistencia térmicas de los diferentes tipos de aislamiento. La resistencia térmica es la capacidad del aislamiento de soportar calor. Las curvas representan la vida del aislamiento en horas contra la temperatura de los devanados. Estas curvas no predicen la vida real del diseño de la máquina. Si no muestran la relación entre la vida útil, el tipo de aislamiento y la temperatura de operación.

Por regla práctica se tiene que por cada 10 °C de incremento de la temperatura del devanado, la vida del aislamiento se reduce a la mitad.

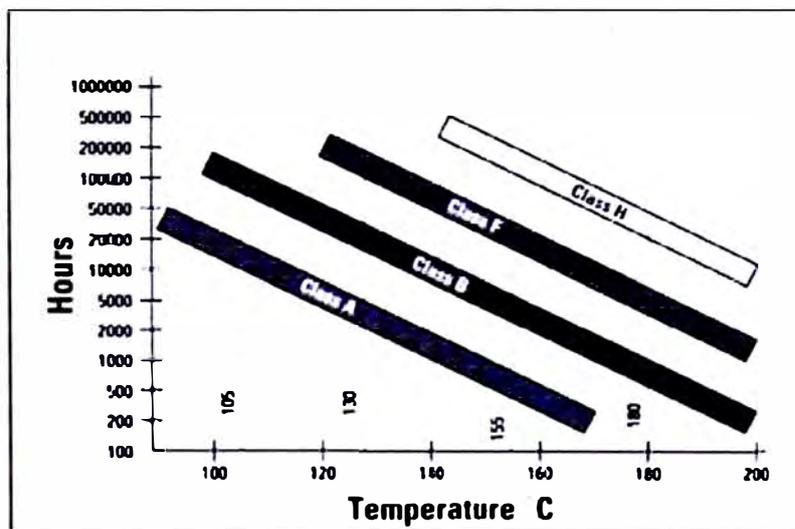


Fig. 3.6 Curva de comparación de las diferentes clases de aislamiento.

Existen muchos indicadores de la presencia de deterioro térmico en el aislamiento de los devanados.

- Pérdida de peso y espesor.

- Incremento de la densidad.
- Aumento de la dureza de las capas poliéster/epoxi o presencia de capas quebradizas.
- Contracción no uniforme con fisuras que penetran desde la superficie.
- Reducción de la fuerza dieléctrica no conductora.
- Reducción considerable del aislamiento de los devanados.

El calor no es la única causa del deterioro del aislamiento de los devanados.

Daños al aislamiento pueden ocurrir durante al rebobinado debido a un manipuleo inapropiado, insuficiente resina, o insuficiente tiempo de cura. Por lo tanto se debe llevar a cabo prueba del aislamiento toda vez que un proceso de rebobinado se ha llevado a cabo.

Las causas adicionales para la falla del aislamiento son:

- Contaminantes conductores como la suciedad, químicos, etc.
- Daño mecánicos producidos por choques, vibración objetos extraños, tensiones, etc.
- Picos de voltajes generados en la carga o la línea.
- Operación a voltaje anormal, corriente o factor de potencia.
- Pasajes de ventilación bloqueadas.

3.1.9 Sistema de excitación

El voltaje del generador es enteramente controlado por el sistema de excitación. La función del sistema de excitación es suministrar corriente DC

al devanado principal de campo del generador, para que este produzca campo magnético. Este campo magnético permite que el devanado del estator produzca voltaje de salida.

El voltaje de salida del generador debe mantenerse en un valor constante para cualquier condición de carga. Nótese que existe una caída en el voltaje debido a la impedancia interna del generador (resistencia y reacción de la armadura).

Hasta la década de los sesenta, la mayoría de los sistemas de excitación eran generadores de corriente DC con armaduras rotatorias, campos estacionarios, conmutadores y escobillas. El control del voltaje de excitación se realizaba con una resistencia variable en el sistema de excitación. Este tipo de excitación es raramente usado hoy en día. El ajuste en este tipo de excitación para un control adecuado es demasiado difícil. Además la corta vida útil de las escobillas y mantenimiento del conmutador en este sistema de excitación es inaceptable para los actuales estándares.

En el sistema de excitación shunt, tanto el sensado de la salida de voltaje y el suministro de potencia son tomados de las líneas de salida del generador, como se muestra en la figura 3.7. El excitador estático convierte el suministro de corriente alterno en corriente continua y alimenta el devanado de campo del generador con corriente continua.

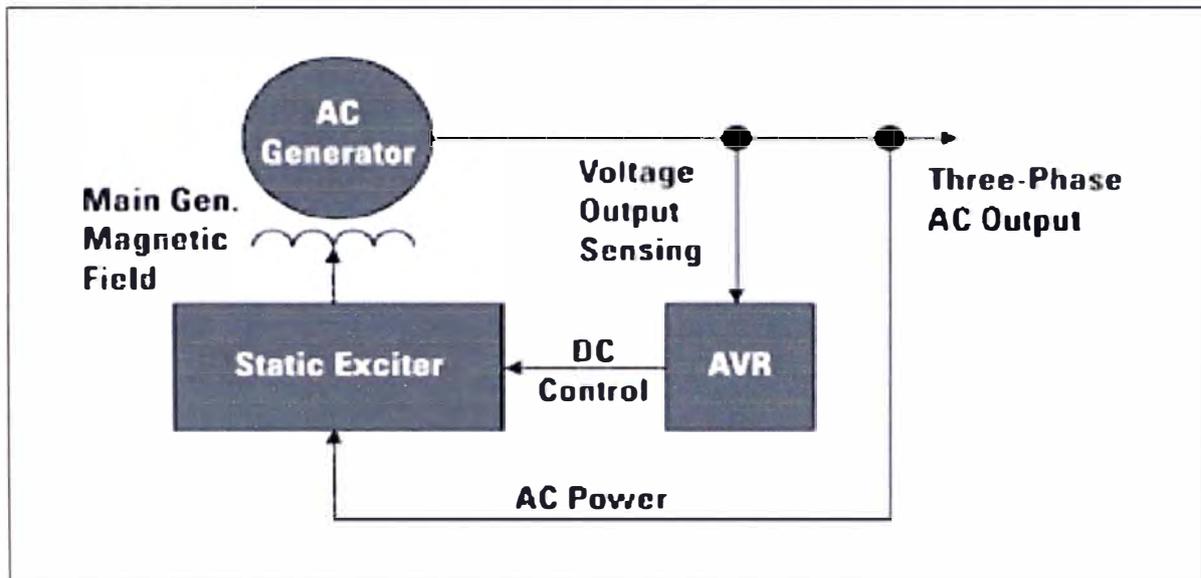


Fig. 3.7 sistema de excitación shunt

Generadores auto-excitados (SE)

El sistema de excitación (SE) se muestra en la figura 3.8. El sistema SE recibe potencia para la excitación de la armadura del generador (voltaje de salida del generador). Cuando el motor primo empieza a girar el conjunto rotatorio de campo (RFA), el magnetismo residual en el campo de la excitatriz L1 (estator de la excitatriz) genera un pequeño valor de voltaje AC en la armadura de la excitatriz L2 (rotor de la excitatriz). Este voltaje inducido provoca un flujo de corriente. Esta corriente está presente en la armadura de la excitatriz. La corriente AC es luego rectificada por el circuito de diodos rectificadores. Este circuito rectificador está compuesto por seis diodos (CR1, CR2, CR4, CR5 y CR6). Entonces corriente continua fluye hacia el campo principal (L3). El flujo de corriente DC a través del campo principal crea un campo magnético, este campo se suma al magnetismo residual del campo principal. A medida que el campo principal (L4) que es el voltaje de salida en

los terminales de salida del generador (T0, T1, T2 y T3). EL regulador de voltaje sensa la salida de los terminales "20" "22" y "24". Durante el arranque la salida de voltaje del regulador que va hacia el campo de la excitatriz es incrementado, de tal forma que la salida de voltaje del generador es incrementado hasta alcanzar el voltaje nominal del generador.

La cantidad de corriente que fluye en la excitatriz afecta el voltaje de salida del generador. El regulador de voltaje mantiene el voltaje de salida constante a medida que hay cambios en la carga. EL regulador de voltaje controla el voltaje y corriente DC que se suministra a la excitatriz el cual produce voltaje de salida del generador. El regulador de voltaje sensa este voltaje a través de los terminales "20" "22" y "24". EL regulador de voltaje entonces suministra un voltaje y corriente DC de control hacia la excitatriz a través de los terminales F1 y F2.

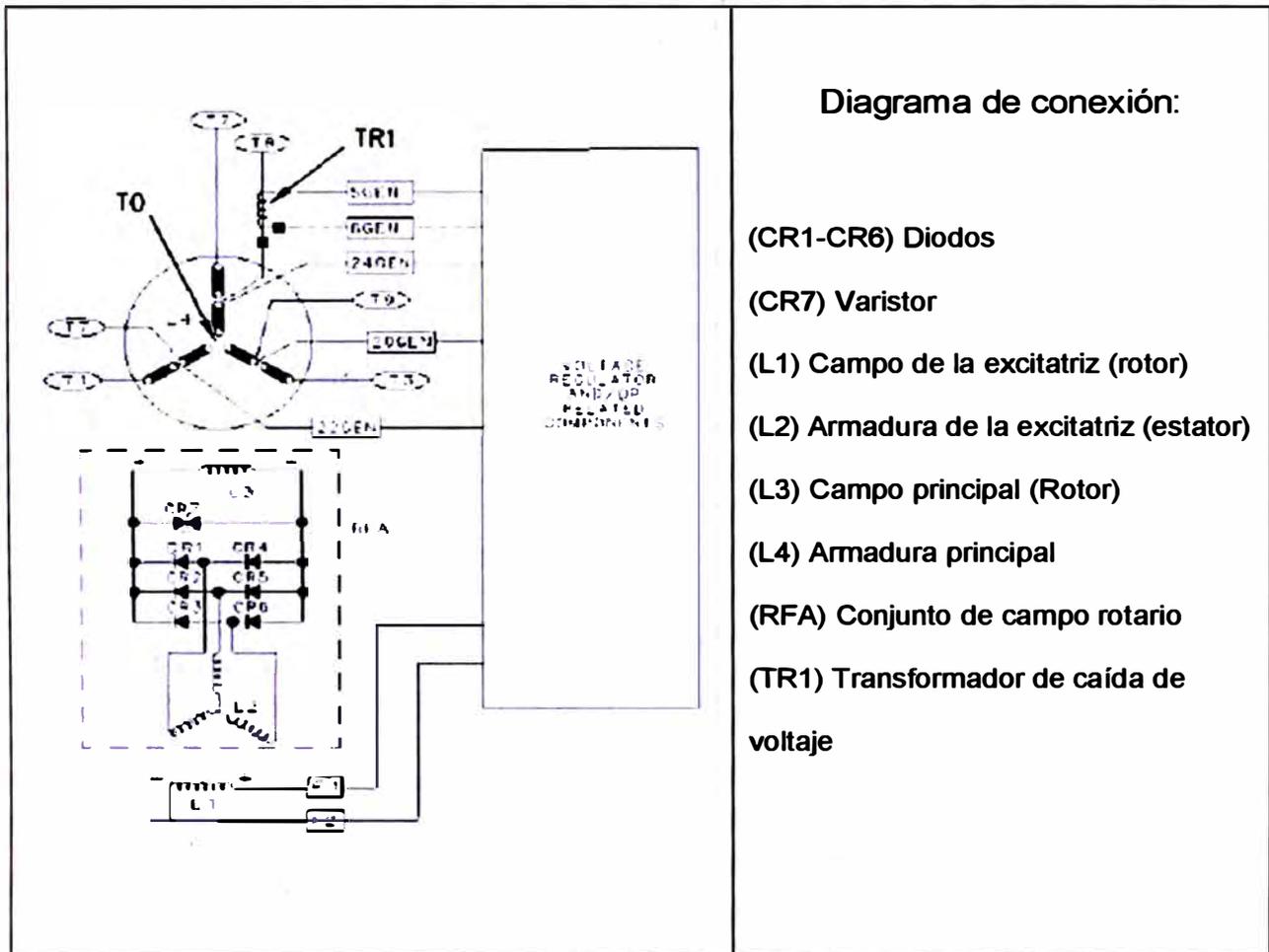


Fig. 3.8 Sistema auto-excitado SE.

Generadores con Excitador piloto de imán permanente (PMEG)

En un generador con excitador piloto de imán permanente, el regulador de voltaje es alimentado desde el excitador piloto, a diferencia de un generador con autoexcitación que la alimentación la toma desde el estator principal. El excitador piloto está compuesto por un imán permanente (PM) y la armadura del excitador piloto (L5). El excitador piloto opera de manera independiente al voltaje de salida del generador. En un generador que cuenta con PMEG mantiene excitación constante durante aplicaciones grandes de carga, esta

excitación constante es posible porque las variaciones de voltaje de salida del generador no es retroalimentado hacia la excitatriz. Las irregularidades de voltaje de salida del generador son causadas por las condiciones de carga que se aplica. Otra característica de este sistema de excitación es que permite mantener una corriente considerable en periodos de cortos de tiempo.

Cuando el motor diesel (motor primo) inicia el giro del grupo rotatorio de campo (RFA), el imán permanente (PM) induce un voltaje AC en la armadura piloto (L5), esta armadura contiene tres bobinas. Debido al giro del PM voltaje alterno trifásico es generado en la bobina (L5) la cual alimenta a través de los terminales "11", "12" y "13" del regulador de voltaje. En el regulador de voltaje esta corriente alterna trifásica es rectificadas a corriente continua (DC). Una corriente controlada de corriente DC (corriente de campo) alimenta el campo de excitatriz (L1) a través de los terminales "F1" y "F2".

Corriente continua fluye hacia el campo de la excitatriz (L1) para crear un campo magnético. La armadura de la excitatriz (L2) se encuentra girando en este campo magnético. El campo y la armadura de la excitatriz generan una corriente alterna trifásica (AC). Esta corriente AC es luego rectificadas por un circuito rectificador de onda completa (bloque de diodos rectificadores) que está compuesto por los diodos: CR1, CR2, CR3 CR4, CR5 y CR6.

La corriente continua DC del circuito rectificador alimenta el campo principal de generador (L3) por dos conductores localizados en el centro del eje del generador. La corriente continua en el campo principal crea el campo magnético del generador, a medida que el campo principal gira, se induce voltaje alterno trifásico en la armadura principal (L4) también conocido como estator principal. Este voltaje es enviado hacia los terminales "T0" "T1" "T2" y "T3" que son los terminales principales del generador.

Para mantener un voltaje de salida constante para diferentes valores de carga; es necesario controlar la corriente de campo hacia la excitatriz, esta función de control la realiza el regulador de voltaje. El regulador de voltaje sensa el voltaje de salida del generador a través de los terminales "20", "22" y "24" y este alimenta con corriente de campo a la excitatriz a través de los terminales "F1" y "F2", la cantidad de voltaje depende del valor de voltaje de salida sensado por el regulador.

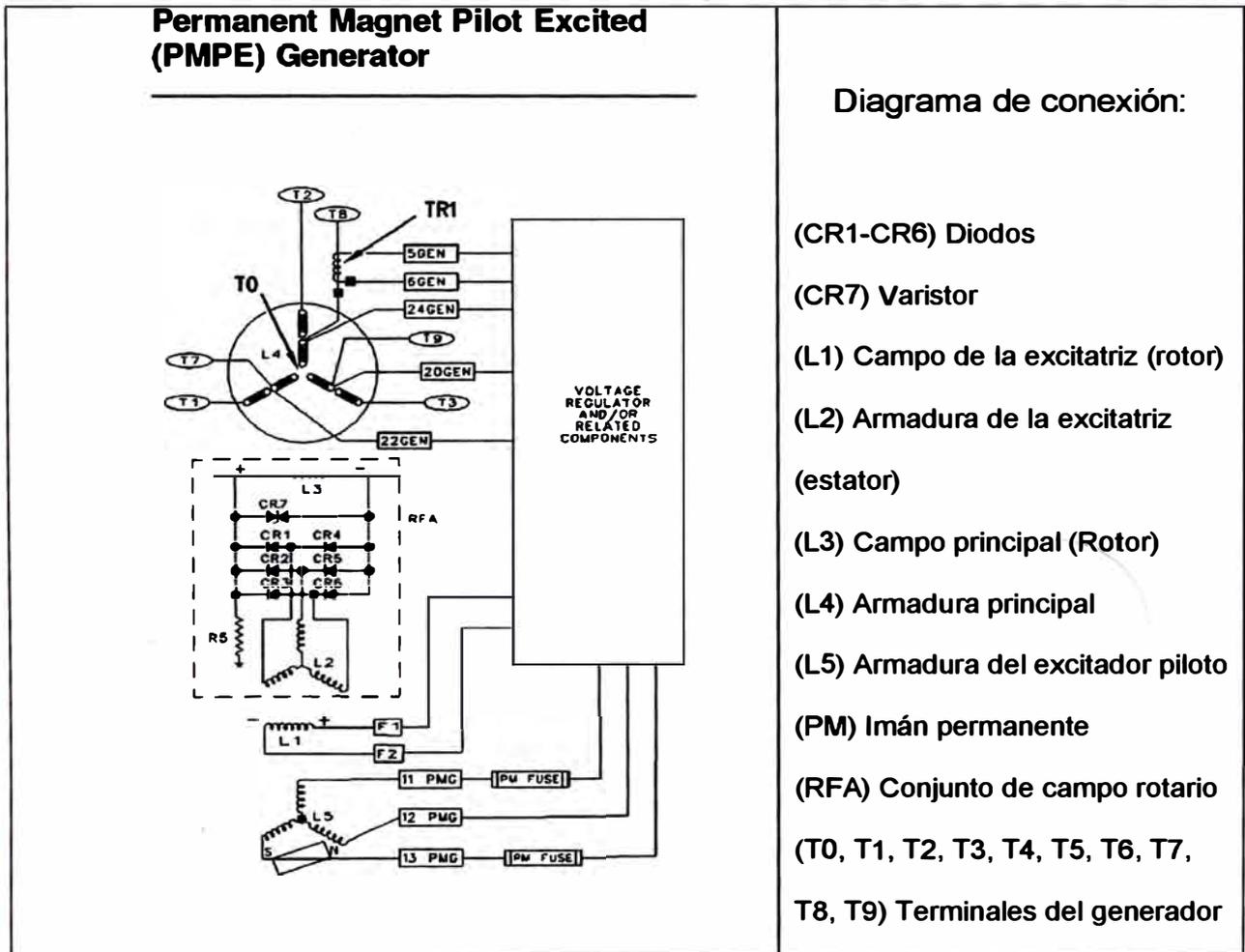
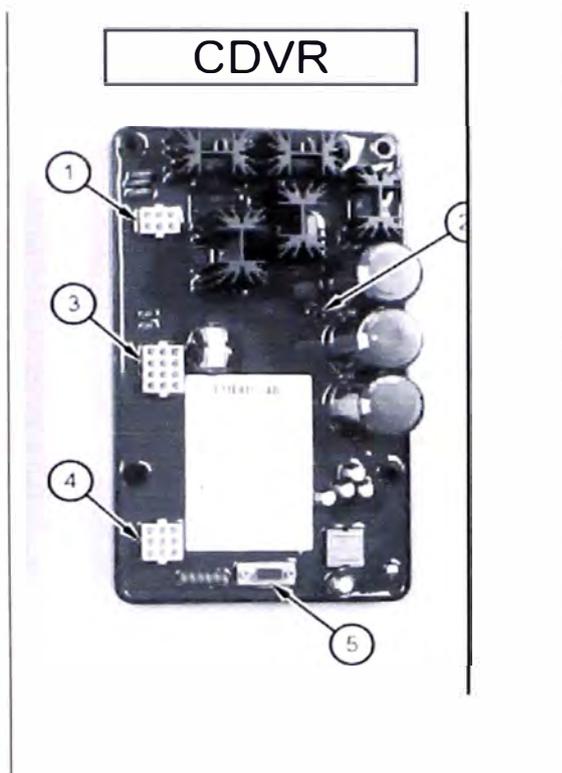


Fig. 3.9 Generador con excitador piloto de imán permanente.

3.2 Sistema Regulador de voltaje Digital - CDVR

3.2.1 Información General

EL regulador de voltaje CDVR tiene como función regular el voltaje de salida del regulador. La fuente de alimentación del regulador es suministrado por una batería de 24VDC. La potencia suministra al regulador durante el funcionamiento proviene de el generador de imán permanente (PMG), de los devanados del estator (excitación shunt) o de algún devanado auxiliar que están presentes en ciertos generadores.



Componentes del regulador de voltaje:

- (1) Conector P6
- (2) Led Indicador
- (3) Conector P12
- (4) Conector P9
- (5) Conector J4

Fig. 3.10 Componentes del regulador de voltaje CDVR

3.2.2 Curva de arranque del regulador de voltaje

Los parámetros que están relacionados con el arranque son:

- Voltaje Nominal del generador
- Frecuencia de inflexión
- Punto de caída de frecuencia (Underfrequency point)

EL regulador de voltaje digital CDVR empezará a generar voltaje siguiendo la siguiente recta con pendiente $1V/Hz$ hasta alcanzar la frecuencia de inflexión (Knee Frequency). Cuando el generador alcanza la frecuencia de inflexión entonces el regulador de voltaje trabaja con la curva de "carga y parada"

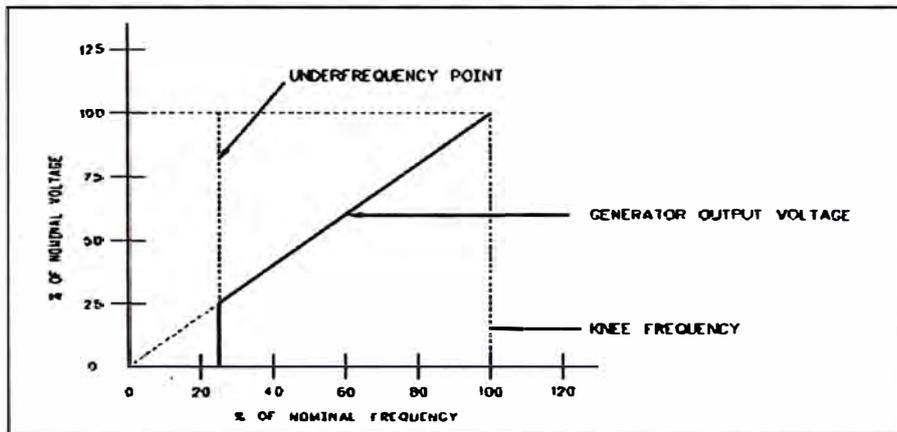


Fig. 3.11 Curva de arranque del regulador CDVR

3.2.3 Curva de carga y parada del regulador

El regulador de voltaje puede ser del tipo de regulador de voltaje constante o regulador del tipo voltios / Hertz, según la configuración del usuario. Los reguladores del tipo Voltios / Hertz son usados cuando el motor primo es un motor de combustión interna, debido a que pueden tolerar bloques grandes de carga sin salir de servicio. Cuando un generador se encuentra operando en vacío y se aplica una carga grande entonces tanto el voltaje como la frecuencia generador disminuirán.

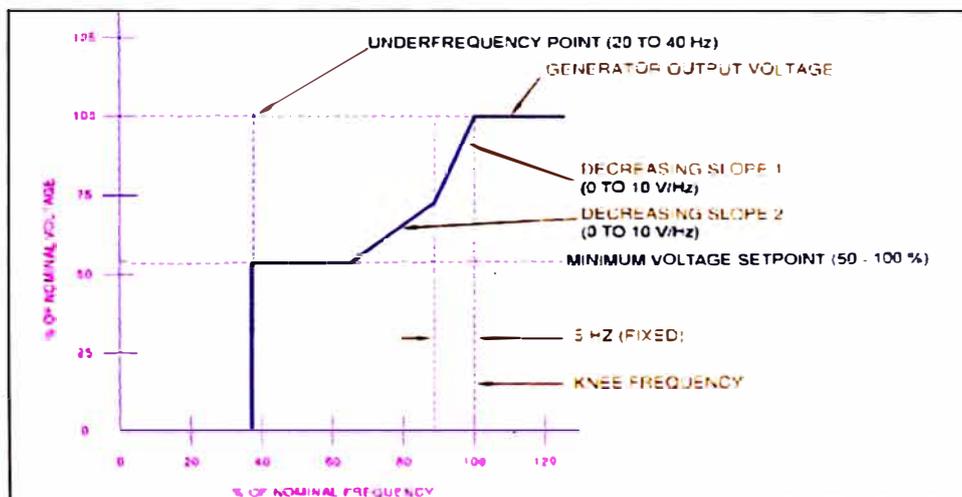


Fig. 3.11 Curva de carga y parada del regulador CDVR

Los parámetros relacionados a la curva de carga y parada del regulador son:

- Voltaje de salida del generador
- Frecuencia de inflexión
- Curva 1 con pendiente V/HZ
- Curva 2 con pendiente V/HZ
- Punto de caída de frecuencia

3.2.4 Regulación de voltaje

Una vez que se ha logrado el arranque y generador de voltaje está trabajando a frecuencia nominal, el regulador de voltaje tiene como función principal mantener el voltaje de salida constante. Toda vez que exista un cambio en la carga del generador, el voltaje de salida tiende a aumentar y disminuir según sea el caso, el regulador ajustará de manera automática. La corriente de excitación para mantener constante el voltaje nominal del generador. Si la carga es demasiado grande y frecuencia decrece por debajo de la frecuencia de inflexión, entonces el regulador trabaja según la curva de la figura 3.x "curva de carga y parada del regulador"

3.2.5 Regulación del la caída de voltaje

Cuando los generadores están operando en paralelo tienen dos objetivos principales, compartir la potencia activa (kW) y la potencia reactiva (kVAR) de la carga eléctrica del sistema. Si el voltaje de salida de un generador es ligeramente mayor que el otro generador, suministrará potencia reactiva al otro generador conectado en paralelo. Esta corriente circulará entre ambos

generadores, posiblemente causando amperios de sobrecarga. Un método de minimizar este efecto es asignar la misma caída de voltaje en ambos reguladores de voltaje.

3.2.6 Regulación de la potencia reactiva (kVAR)

Cuando un generador está conectado en paralelo en paralelo con un bus infinito, el voltaje del generador es controlado por el bus infinito. El voltaje del generador cambiará si el voltaje del bus infinito también cambia. No es posible controlar el voltaje de salida del generador. En esta situación el regulador de voltaje puede trabajar a potencia reactiva constante, sin importar cuánto es la potencia de salida del generador, la potencia reactiva permanece constante.

3.2.7 Regulación del factor de potencia

Cuando un generador está conectado en paralelo en paralelo con un bus infinito, el voltaje del generador es controlado por el bus infinito. El voltaje del generador cambiará si el voltaje del bus infinito también cambia. No es posible controlar el voltaje de salida del generador. En esta situación el regulador de voltaje trabaja en el modo de factor de potencia constante. Sin importar el valor de la potencia entregada, el generador trabaja a factor de potencia constante.

3.2.8 Comunicación remota

EL regulador de voltaje digital **CDVR** tiene la capacidad de comunicarse con una computadora remota a través de la comunicación serial RS-232. Se dispone de un software para la comunicación con el regulador de voltaje (**CDVR**). El software denominado "Caterpillar PC software" permite realizar las siguientes operaciones:

- Visualización y modificación de los parámetros en un entorno Windows
- Envío de parámetros hacia el regulador de voltaje digital
- Guardar los parámetros de configurados en el regulador de voltaje digital
- Visualización y lectura de información de códigos de falla

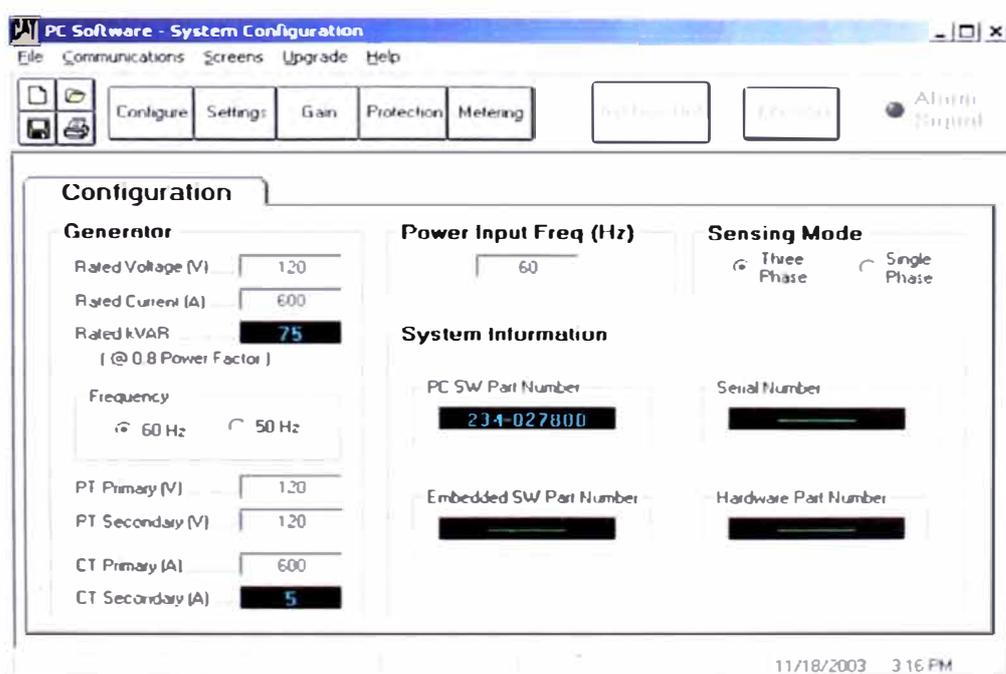


Fig. 3.12 Caterpillar PC Software

3.2.9 Diagrama de conexión

En la figura 3.13 se muestra un diagrama típico de conexión en un generador con un sistema de excitación de imán permanente (PMG), con sensado trifásico

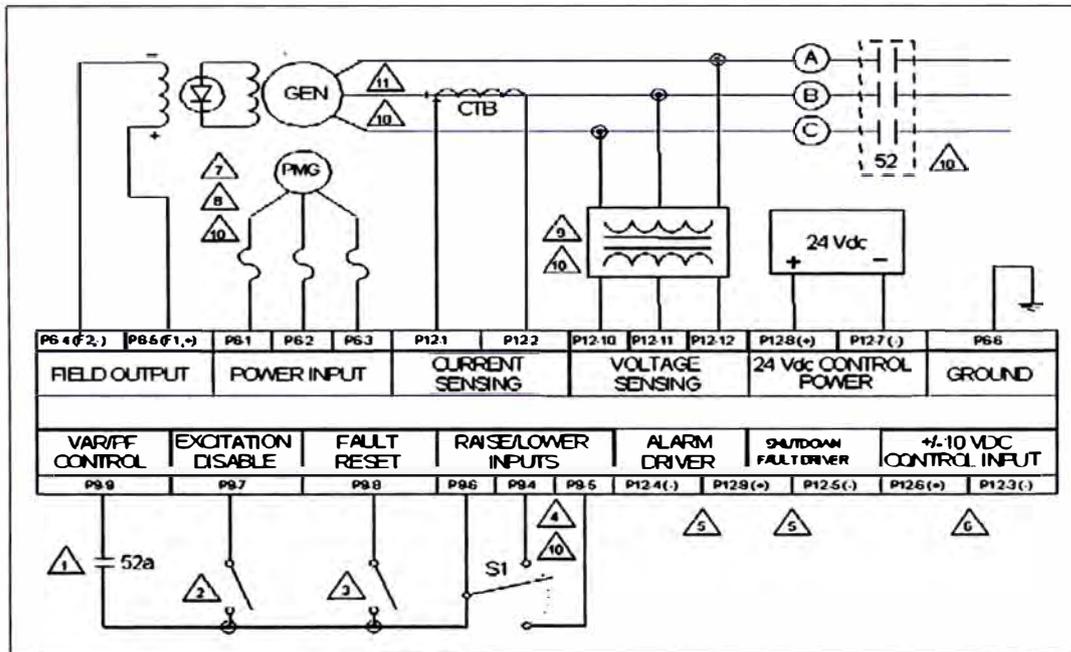


Fig. 3.13 Diagrama de conexión del CDVR.

3.3 Tarjeta electrónica – Regulador de Velocidad

3.3.1 Respuesta transitoria.

Toda vez que se aplique o se retire una carga al generador, la velocidad del motor, frecuencia y voltaje cambian de su valor de estado constante. Este cambio se le denomina respuesta transitoria. Cuando al generador se le aplica una carga de valor considerable, la velocidad del motor se reduce temporalmente, y luego retorna a su estado estacionario, el grado de esta caída de velocidad depende de la cantidad de potencia activa que se le

aplica al generador, caso contrario ocurre cuando se retira una carga considerable del grupo electrógeno, la velocidad del motor se incrementa para luego regresar a su valor estacionario. El dispositivo que se encarga de mantener la velocidad del motor y por consiguiente la frecuencia es el regulador de velocidad o también conocido como gobernador de velocidad.

El regulador de velocidad monitorea constantemente la velocidad de motor y realiza las correcciones necesarias en el sistema de combustible del motor a través del actuador (5). El sensado de la velocidad lo realiza el sensor magnético tipo Pickup, el cual envía una señal de voltaje alterno al regulador de velocidad, luego que esta señal es comparada y con un valor de referencia en el regulador de velocidad, este envía un voltaje continuo al actuador. El actuador cambia la señal de voltaje en una salida mecánica, es decir, el actuador controlara el sistema de combustible motor, aumentando o disminuyendo la cantidad de combustible, para de esta manera aumentar o disminuir la velocidad del generador.

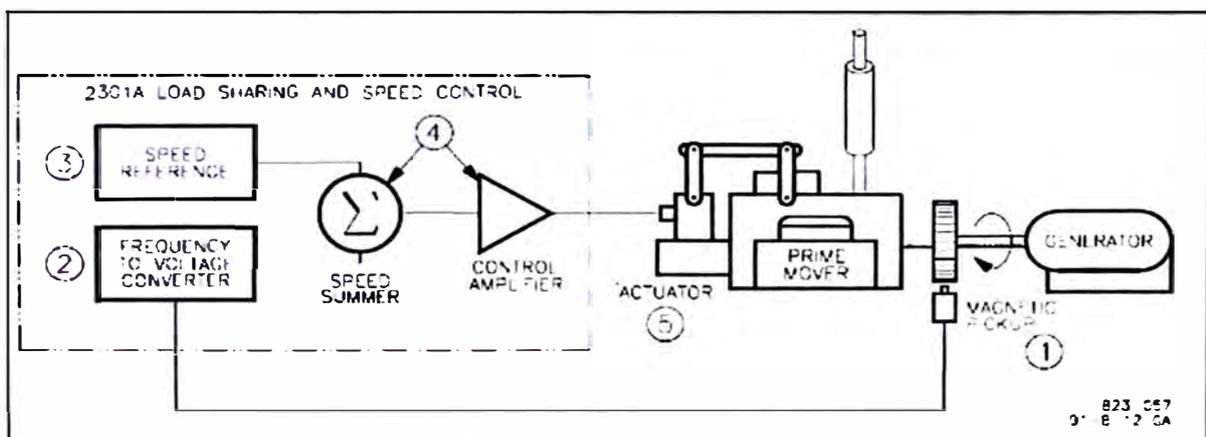


Fig. 3.14 Sistema de control de velocidad

3.3.2 Descripción

Este regulador controla la velocidad del motor, y en ciertas aplicaciones de generadores controla la potencia activa del generador. Para la selección los reguladores correctos para ciertas aplicaciones, se debe entender las capacidades del regulador. Los términos siguientes se utilizan con frecuencia en la descripción de reguladores.

Caída de velocidad (DROOP) se utiliza para describir la relación entre el cambio de velocidad del motor al pasar de no tener carga (Velocidad en vacío) a plena carga en operación constante. La siguiente expresión matemática define la caída de velocidad.

$$Droop = \frac{N_{vacio} - N_{nominal}}{N_{nominal}}$$

En donde: N_{vacio} , Es la velocidad del generador en vacío

$N_{nominal}$, Es la velocidad de placa del generador, o la frecuencia a plena carga.

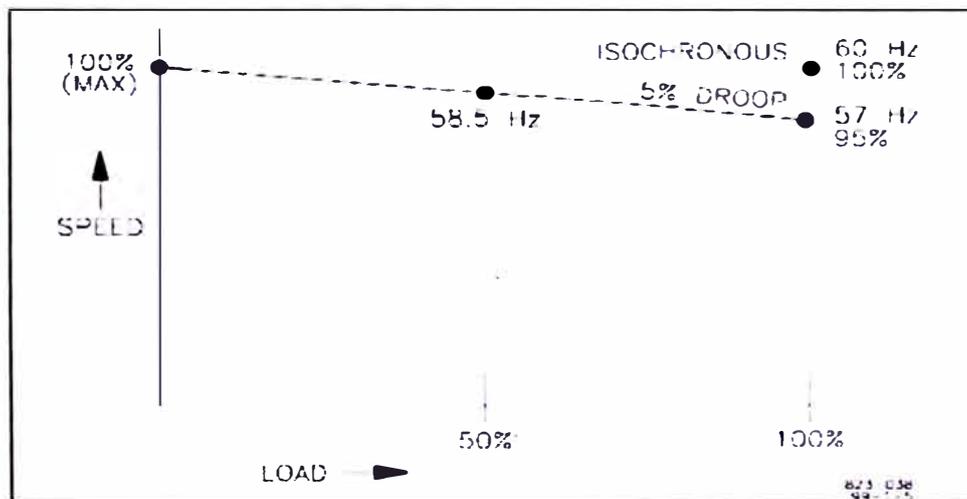


Fig. 3.15 Ajuste de la caída de velocidad

La figura 3.15 muestra los diversos grados de caída de velocidad (DROOP). El porcentaje de caída permanece constante y es independiente del cambio de velocidad del operador.

Isócrono: Caída de un 0%, es decir la velocidad del motor es constante al pasar de un estado sin carga a plena carga. Esta capacidad es necesaria a menudo en grupos electrógenos con ciertas cargas que exigen un control de frecuencia preciso.

3.4 Repartidores de Carga “Load Sharing”

3.4.1 Información General

El módulo repartidor de carga ha sido fabricado para usarse con motores que aceptan señal de voltaje entre 0V y 5V para el control de velocidad. El modulo repartidor de carga tiene la capacidad para trabajar con grupos electrógenos de manera isócrona y con caída de frecuencia. En la figura 3.16 se muestra una aplicación típica del repartidor de carga

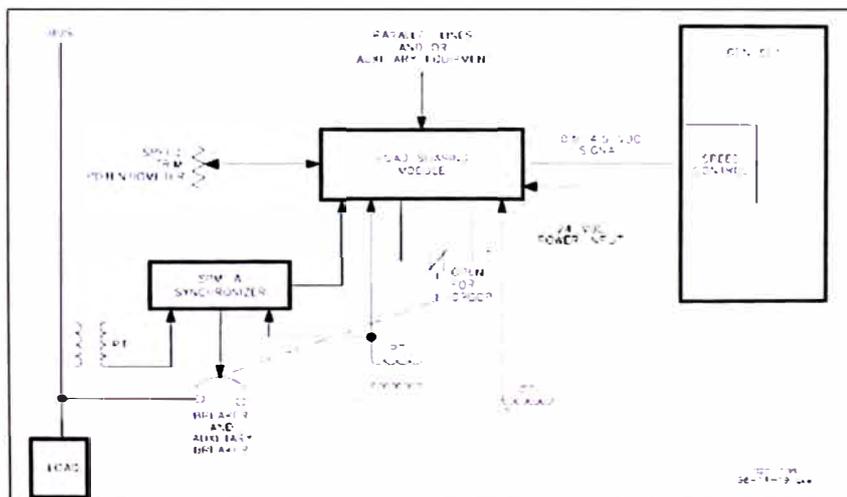


Fig. 3.16 Aplicación típica de un repartidor de carga

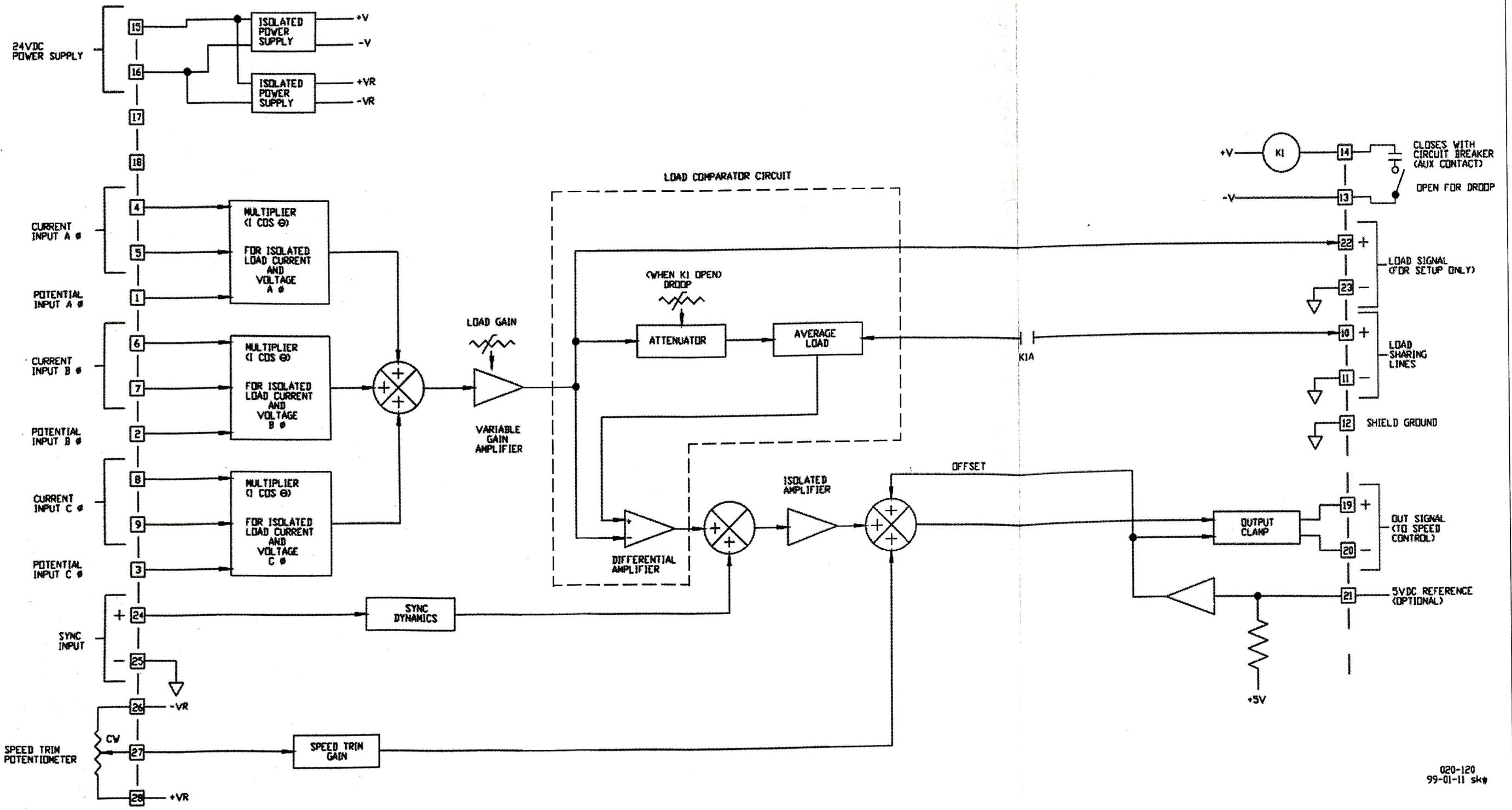
3.4.2 Teoría de Operación

3.4.2.1 Introducción.

Este capítulo describe la operación del Modulo Repartidor de Carga y su circuito interno en la figura 3.17 se muestra el módulo de bloques del circuito

El módulo repartidor de carga sensa la potencia de salida de un generador y provee una señal de salida de 0.5 a 4.5 Vdc al módulo de control de velocidad para regular la potencia de salida del Motor-Generador de tal forma que alcance el nivel de potencia deseado por el grupo electrógeno. El módulo repartidor de carga puede producir una condición de caída durante el reparto de carga (DROOP), en lugar de realizar el reparto de carga trabajando de manera isócrona (La velocidad y frecuencia del grupo electrógeno se mantiene constante).

Fig. 3.17 Diagrama de bloques del repartidor de carga.



3.4.2.2 Suministro de potencia (Power Supply). La fuente interna de potencia genera voltaje DC regulado para la operación del circuito en el módulo repartidor de carga. Este suministro de potencia proviene de la batería del grupo electrógeno (24V)

3.4.2.3 Sensado de Potencia (Power Sensor). La potencia de salida del generador es sensada a través del circuito del sensado de potencia. El circuito de sensado de carga sensa la corriente y produce una señal de carga proporcional a corriente multiplicado por el factor de potencia. La señal de voltaje proviene de los transformadores de potencial (PTs) y la señal de corriente proviene de los transformadores de corriente (CTs). El circuito del repartidor de carga utiliza estas dos entradas para generar la señal de carga (load signal) para luego ser filtrada y enviada al circuito controlador. La señal de carga de cada generador será proporcional al porcentaje de carga entregado por cada generador. Las señales de de circuito de sensado también pueden usarse para instalar amperímetros y voltímetros.

3.4.2.4 Circuito Comparador de Carga (Load comparator circuit) En el circuito comparador de carga, la señal de carga (load signal) es comparada señales de carga de otros grupos electrógenos en el sistema mediante las líneas de reparto de carga (load sharing lines). El circuito comparador de cada módulo incluye un potenciómetro para el ajuste de la señal de carga de tal forma que el voltaje de señal de carga (load signal) de cada generador es el mismo a plena carga.

3.4.2.5 Potenciómetro Para el Control de Velocidad (Speed Trim control)

Se puede añadir un potenciómetro de control de velocidad al circuito para permitir un ajuste remoto de velocidad y de frecuencia, este potenciómetro se usa principalmente cuando se va a realizar una sincronización manual con un bus existente o para cambiar la demanda de carga cuando trabaja en modo de caída (DROOP).

3.4.2.6 Reparto de Carga Isócrono

Cada circuito comparador, compara el voltaje de señal de carga (load signal) del su generador con dos veces la señal de las líneas de reparto de carga (load sharing lines) y produce un error proporcional a la diferencia. Este error es utilizado para generar una señal de pulso modulado (PWM) que es la salida para el controlador de velocidad que controla la entrega de potencia del generador. En este modo de operación la frecuencia del grupo electrógeno se mantiene constante y es independiente de la carga entregada por el grupo.

3.4.2.7 Operación con Caída (Droop Operation)

Cuando un grupo electrógeno trabaja en operación con caída (droop) con otros grupos electrógenos las líneas de reparto de carga (load sharing lines) no son utilizadas. Por lo tanto la frecuencia del generador varía según la carga entregada por este. El droop y la velocidad del motor determinan la cantidad de carga de carga entregada por el grupo electrógeno.

3.4.2.8 Ajuste del la caída (Droop) La caída (droop) es expresada en porcentaje, el porcentaje de caída es calculado dividiendo la diferencia entre velocidad si carga y la velocidad a plena carga entre la velocidad nominal del grupo electrógeno.

$$DROOP = \frac{N_{vacio} - N_{pc}}{N_n}$$

Donde: N_{vacio} : Velocidad del motor en vacio (rpm)

N_{pc} : Velocidad a plena carga (rpm)

N_n : Velocidad nominal motor (rpm)

Para establecer la caída de velocidad en el repartidor de carga se debe proceder de la siguiente manera:

- 1.- Arranque el grupo electrógeno y llévelo a velocidad nominal sin carga
- 2.- Aplique toda la carga al grupo
- 3.- Ajuste el potenciómetro de caída (droop) hasta la velocidad deseada.

Ejemplo un generador que opera a 60 HZ en vacio, cuando se aplica la plena carga frecuencia cae a 57 HZ entonces decimos que el generador tiene 5% de caída (DROOP).

Si solo aplicamos un 50% de carga al generador entonces la velocidad caerá hasta un valor de 58.5 HZ lo cual indicaría también una caída (DROOP) de 5% como se muestra en la figura 3.18.

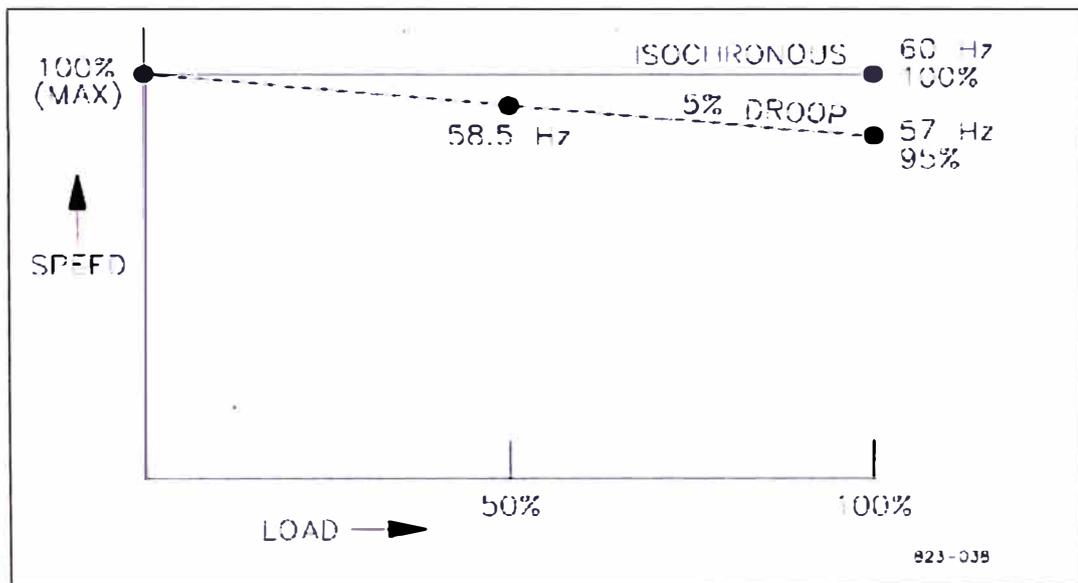


Fig. 3.18 Ajuste del la caída de velocidad (droop)

CAPÍTULO IV

FUNDAMENTOS DE GRUPOS ELECTRÓGENOS EN PARALELO

4.1 Generador Síncrono Operando Solo

El comportamiento de un generador síncrono con una carga varía mucho dependiendo del factor de potencia de la carga y de si el generador opera solo o en paralelo con otros generadores síncronos.

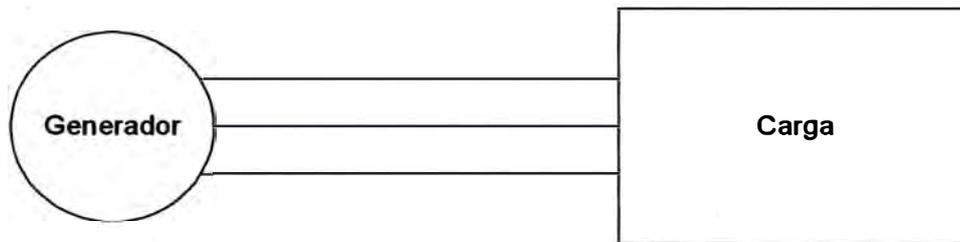


Fig. 4.1 Generador trabajando con una carga aislada

4.1.1 Efecto de los cambios en la carga en un generador síncrono que opera solo

Analizando el generador de la figura 4.1. Un incremento en la carga aumenta la corriente de la carga que se obtiene del generador.

Primero, examinaremos un generador que opera con un factor de potencia en retraso. Si se añade mas carga con el mismo factor de potencia, entonces $|I_A|$ se incrementa pero mantiene el mismo ángulo θ con respecto a V_ϕ . Por lo tanto, el voltaje de reacción del inducido $jX_S I_A$ es mayor que antes, pero tiene el mismo ángulo, ahora puesto que

$$E_A = V_\phi + jX_S I_A$$

$jX_S I_A$ debe entenderse entre V_ϕ aun ángulo de 90° y E_A que tiene la restricción de mantener la misma magnitud que antes del incremento de carga. Si se dibujan estas restricciones en el diagrama fasorial, hay un solo punto en el que el voltaje de reacción del inducido es paralelo a su posición original mientras se incrementa su tamaño. En la figura 4.2a se muestra la grafica resultante. En el caso que se carga al generador con factores de potencia unitarios entonces V_ϕ decrece ligeramente. (Véase figura 4.2b).

EL último caso en cuando se carga al generador con cargas con factores de potencia en adelanto. Si ahora se añade nuevas cargas con el mismo factor de potencia, el valor de del voltaje de reacción del inducido es mayor a su valor previo y V_ϕ aumenta (Véase figura 4-2c). En este caso un incremento en la carga en el generador produjo un incremento en el voltaje en los terminales.

En la figura 4.2 se muestra el efecto del incremento de carga sobre un generador manteniendo constante el voltaje en sus terminales.

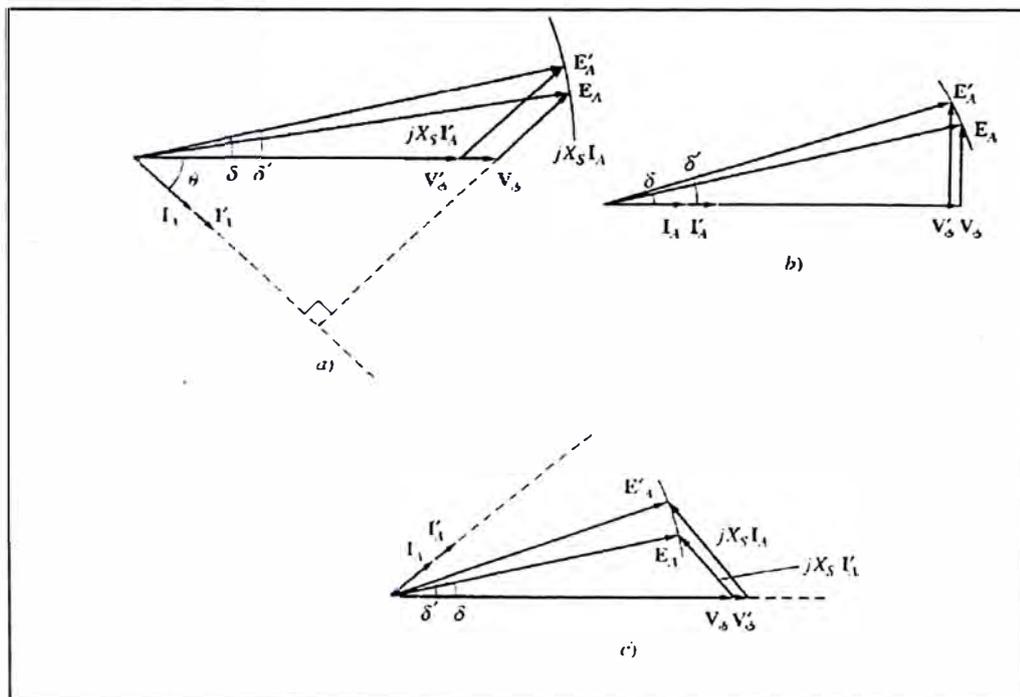


Fig. 4.2 a) Factor de potencia en retraso; b) Factor de potencia unitario; c) factor de potencia en adelanto

4.2 Operación en paralelo de generadores de CA

Actualmente es muy raro encontrar que un generador síncrono suministre independientemente su propia carga. Esta situación se aplica en algunas aplicaciones tales como los generadores de emergencia. En todas las demás aplicaciones de generadores hay más de un generador que opera en paralelo para suministrar la potencia que requieren las cargas. La situación de la sistema interconectado nacional es un ejemplo extremo de esta situación, en la que literalmente miles de generadores comparten la carga del sistema. Existen muchas ventajas para más de un generador síncrono opere en paralelo con otros:

- 1.- Varios generadores pueden alimentar una carga más grande que una sola más grande que una sola máquina.
- 2.- Tener varios generadores aumenta 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 y mantenimiento 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 trabajando en paralelo, es posible operar solamente una fracción de ellas. Las que están operando lo hacen casi a plena carga y por lo tanto de manera más eficiente.

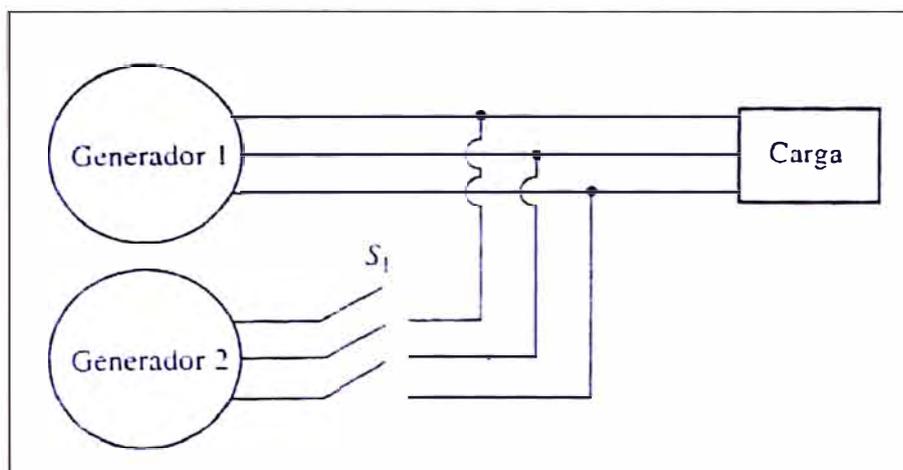


Fig. 4.3 Generador que se conecta en paralelo con un sistema de potencia en operación

4.3 Condiciones Requeridas para Operar en Paralelo

La figura 4.3 muestra un generador síncrono G_1 que suministra potencia a una carga con otro generador G_2 a punto de conectarse en paralelo con G_1 por medio de cierre del interruptor S_1 las condiciones necesarias que se debe cumplir antes de poder cerrar el interruptor son las siguientes.

- 1.- Deben ser iguales los voltajes de línea rms de los dos generadores.
- 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 ligeramente mayor, que la frecuencia del sistema de operación

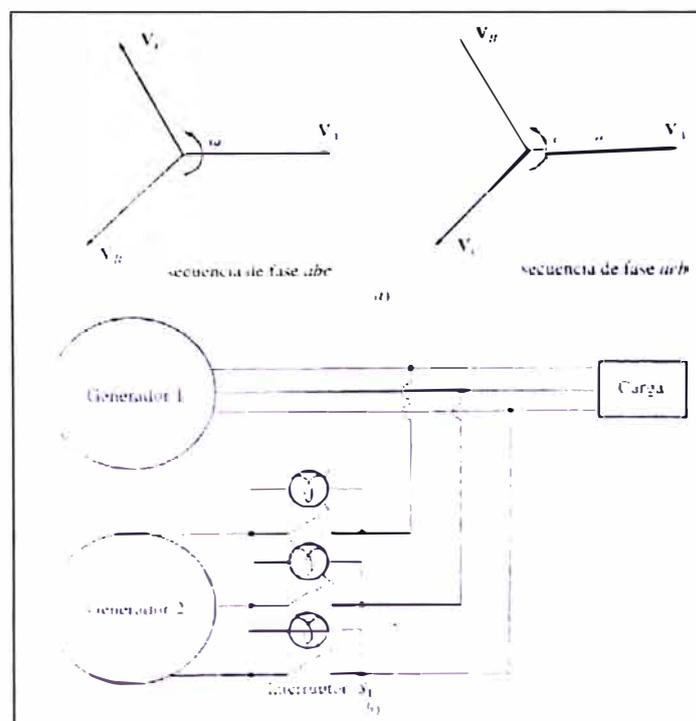


Fig. 4.4 a) las dos secuencias de fases posibles en un sistema trifásico. b) método de las tres lámparas para encontrar las tres fases.

4.4 Procedimiento general para conectar generadores en paralelo

Para conectar el generador G_2 al sistema en operación que se muestra en la figura 4.4 se deben seguir los siguientes pasos para conectarlos en paralelo.

Primero, utilizando un voltímetro aproximar el voltaje hasta que su valor sea igual al voltaje en línea del sistema en operación.

Segundo, la secuencia de fase del generador se debe comparar con la secuencia de fase del sistema en operación. La comprobación de la secuencia de fase se puede verificar de diferentes maneras. Una de ellas es mediante el uso de un motor pequeño de inducción en los terminales de los dos generadores. Si el motor gira en la misma dirección en ambas ocasiones entonces los dos generadores tienen la misma secuencia de fase. Si el motor gira en direcciones opuestas, entonces la secuencia de fase son diferentes y se deben invertir dos de los conductores del generador en aproximación.

La frecuencia del generador que va a entrar al sistema debe ser ligeramente mayor a la frecuencia del sistema en operación, para que cuando se incorpore al sistema lo haga suministrando potencia como un generador en lugar de consumir potencia como motor.

Se debe verificar que los dos sistemas este en fase. Un método sencillo es mediante el uso del sincronoscopio. Un sincronoscopio tiene como función medir la diferencia de ángulo de fase α de los dos sistemas. En la figura 4.5 se muestra la vista frontal de un sincronoscopio



Fig. 4.5 Un Sincronoscopio

4.5 Características de frecuencia – Potencia y de Voltaje-Potencia reactiva en un generador síncrono

Todos los generadores son accionados por un motor primario, que es la fuente de potencia mecánica del generador. En nuestro caso el tipo de motor primo que se utiliza es un motor Diesel de inyección directa.

Los motores primos se comportan de la siguiente manera, a medida que la potencia que toma el motor primo aumenta, su velocidad de giro disminuye, esta variación de potencia con la velocidad de giro tiene un comportamiento lineal. La siguiente ecuación define la caída de velocidad en un motor primario y se le conoce como SPEED DROOP (SD).

$$SD = \frac{n_{sc} - n_{pc}}{n_{pc}}$$

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%. Cabe mencionar también que la velocidad del eje del motor primario está relacionada con la frecuencia eléctrica resultante según la siguiente ecuación.

$$f_e = \frac{n_m P}{120}$$

La potencia de salida de un generador síncrono está relacionada con su frecuencia como se muestra en la figura 4.6. La característica Potencia – Frecuencia desempeñan un papel esencial en la operación en paralelo de los generadores síncronos. La relación frecuencia potencia se puede describir cuantitativamente por medio de la siguiente ecuación.

$$P = S_P (f_{sc} - f_{sis})$$

Donde P = Potencia de salida del generador

f_{sc} = Frecuencia en vacío del generador

f_{sis} = Frecuencia del sistema

S_P = Pendiente de la curva

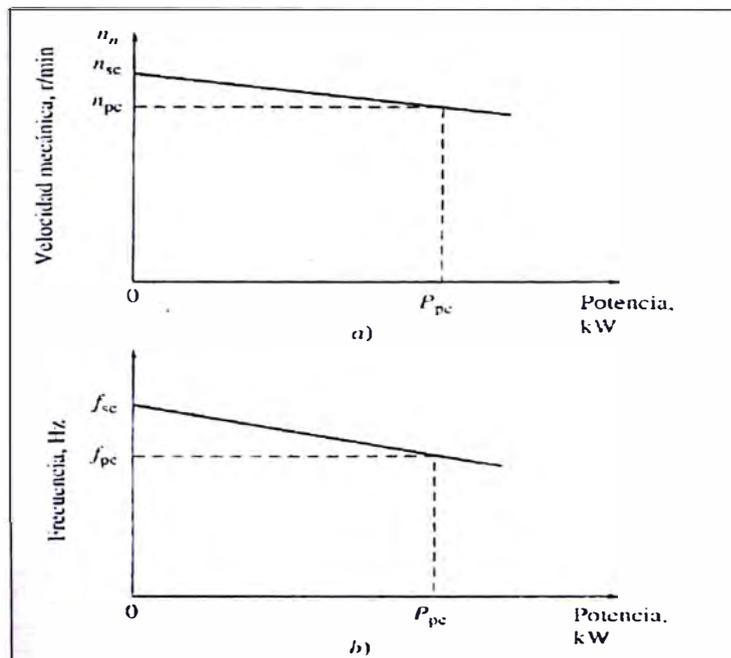


Fig. 4.6 a) Curva de velocidad contra potencia de un motor primario típico.

b) Curva de frecuencia contra potencia resultante del generador

Se puede deducir una relación similar para la potencia reactiva Q y el voltaje en los terminales V_t . Cuando se añade una carga en retraso a un generador síncrono, su voltaje en los terminales disminuye. De manera similar cuando se añade una carga en adelanto a un generador síncrono, se incrementa su voltaje en los terminales.

En la figura 4.7 se muestra la grafica voltaje en los terminales y la potencia reactiva, que tiene una característica lineal. La curva puede moverse hacia arriba o hacia abajo dependiendo del punto de ajuste de los terminales en vacío en el regulador de voltaje. Así como la característica de frecuencia –

potencia, esta curva juega un papel importante en la operación en paralelo de generadores síncrono.

Cuan 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)

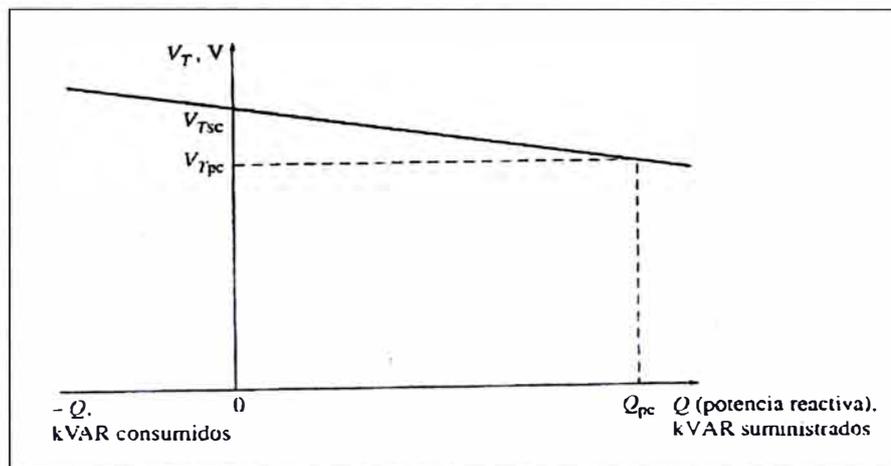
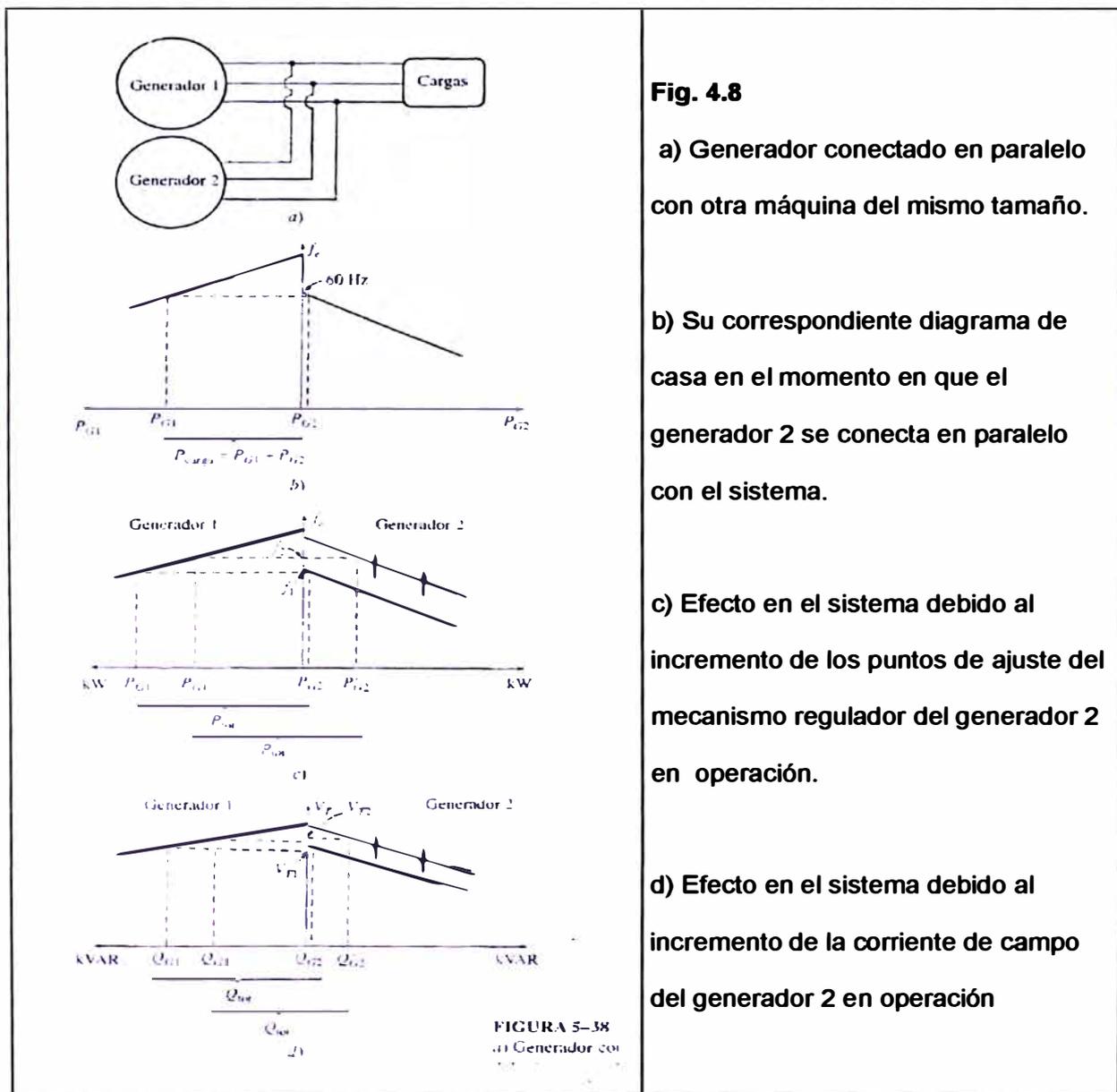


Fig. 4.7 Curva de voltaje en los terminales (V_t) contra la potencia reactiva (Q) de un generador síncrono.

4.6 Operación de generadores en paralelo con otros generadores del mismo tamaño.

Cuando un generador opera solo, las potencias real y reactiva (P y Q) suministradas por el generador son fijas, están restringidas a ser iguales a la potencia demandada por el sistema y por los puntos de ajuste del regulador de velocidad y la corriente de campo varían la frecuencia y el voltaje en los

terminales. Cuando un generador opera con un bus infinito, el bus infinito restringe la frecuencia y el voltaje en los terminales a ser constantes y los puntos de ajuste del mecanismo regulador de velocidad y corriente de campo varían las potencias real y reactiva. Esto no ocurre cuando se conectan dos grupos electrógenos de igual tamaño en paralelo.



En la figura 4.8a se puede ver el sistema resultante si se conecta un generador en paralelo con otro del mismo tamaño. En este sistema la restricción básica es que la suma de potencias real y reactiva suministrada por los dos generadores debe ser igual a la P y Q que demanda el sistema. La frecuencia del sistema no está restringida a ser constante ni tampoco la potencia de un generador lo está. En la figura 4.8b se muestra el diagrama frecuencia – potencia de un sistema de este tipo inmediatamente de que G2 se conecta en paralelo con la línea, en este caso la potencia total P_{tot} que es igual a la potencia P_{carga} está dada por:

$$P_{tot} = P_{carga} = P_{G1} + P_{G2}$$

y la potencia reactiva esta dado por:

$$Q_{tot} = Q_{carga} = Q_{G1} + Q_{G2}$$

Cuando se incrementan los puntos de ajuste del regulador de velocidad G2, su curva de frecuencia se desplaza hacia arriba, como se muestra en la figura 4.8c. Recuérdese que la potencia suministrada no debe cambiar. A la frecuencia f_1 el generador G1 está suministrando más potencia que el generador G2. A la frecuencia f_2 el generador G2 suministra mayor potencia que antes y el generador G1 suministra menos potencia.

Por lo tanto un incremento en los puntos de ajuste de mecanismo regulador de uno de ellos:

- 1.- Incrementa la frecuencia del sistema
- 2.- Incrementa la potencia suministrada por ese generador, a la vez que reduce la potencia suministrada por el otro.

En la figura 4.8.d se muestra el comportamiento resultante, que es análogo a la situación de potencia real. Cuando dos generadores trabajan juntos y se incrementa la corriente de campo de G2:

- 1.- Se incrementa el voltaje en los terminales del sistema
- 2.- Se incrementa la potencia reactiva suministrada por ese generador, a la vez que disminuye la potencia reactiva suministrada por el otro generador.

Si se conocen las pendientes y frecuencia en vacío de las curvas de caída de velocidad (frecuencia - Potencia) del generador, entonces se pueden determinar cuantitativamente las potencias suministradas por cada generador y la frecuencia del sistema resultante.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE REPARTO DE CARGA ACTIVA DE DOS GRUPOS ELECTRÓGENOS 3412C OPERANDO EN PARALELO

5.1 Características Técnicas de los grupos Electrógenos

Para la ejecución de la prueba, se ha utilizado dos grupos electrógenos modelo 3412C. Ambos generadores se encuentran conectados en paralelo una carga activa que esta dado por un pozo salino (carga) cuyo factor de potencia es la unidad (carga resistiva).

El motor primo de ambos grupos electrógenos es un motor Diesel que para su funcionamiento utiliza combustible diesel D2, es un motor de cuatro tiempos, con una cilindrada de 27.02 litros. La relación de compresión es de 14.5 a 1, el sistema de admisión es turboalimentado y post enfriado con refrigerante proveniente de las camisas del motor. El sistema de combustible esta compuesto por una bomba de inyección en "V" y líneas de alta presión que conducen el combustible hacia cada tobera ubicada en los 12 cilindros del motor. El gobernador electrónico de la bomba de inyección es modelo PEEC (Programable Electronic Engine Control)

El modelo del generador es SRB4 con sistema de excitación PMEG. Con paso de bobina de 0.8, cuenta además con un regulador de voltaje digital automático del tipo CDVR. El sensado de voltaje de salida del generador es trifásico.

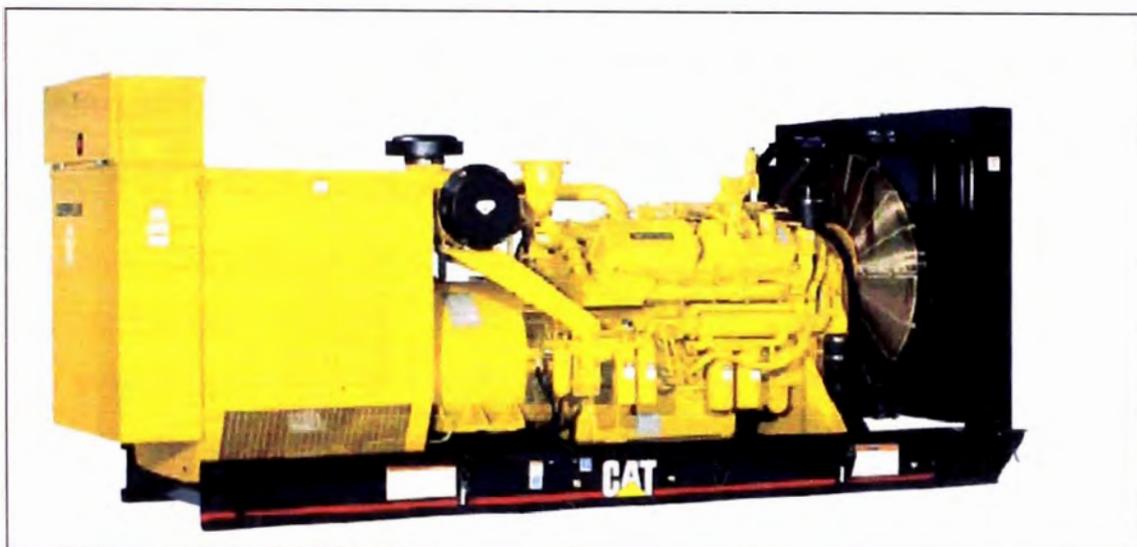


Fig. 5.1 Grupo electrógeno 3412C

Grupo Electrónico 1 (G1)

Modelo del motor:	3412 (896 hp)
Número de Serie:	AGE01318
Número de Arreglo:	9E-5528
Tipo de conexión:	Estrella serie
Año de fabricación:	2005
Potencia Aparente:	681KVA
Potencia Activa:	545 kW
Voltaje de Línea	480V
Clasificación:	Prime
Conexión de devanados:	Estrella Serie
Velocidad de rotación del motor Primo:	1800RPM
Frecuencia eléctrica:	60 Hz
Máxima altura sin derrateo del motor primo:	1000 msnm.

Clasificación del aislamiento: Clasificación H

Gobernador de velocidad: 2301 LS/SC

Cálculo de la corriente nominal del generador:

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L}{1000} \text{ (kVA)} \quad I_L = 819.1 \text{ (A)}$$

Cálculo de potencia Reactiva.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \text{ (kVA)}; \quad Q = 408 \text{ (kVA)}$$

Calculo del número de Polos.

$$P = \frac{120 \cdot f}{RPM} \text{ Se tendrá: } P = 4$$

Grupo Electrónico 2 (G2)

Modelo del motor: 3412 (1180 hp)

Número de serie: AFN01141

Número de arreglo: 136-6589

Tipo de conexión: Estrella serie

Año de fabricación: 2005

Potencia Aparente: 906kVA

Potencia Activa: 725 kW

Voltaje de Línea: 480V

Clasificación: Prime

Conexión de devanados: Estrella Serie

Velocidad de rotación del motor Primo:	1800RPM
Frecuencia eléctrica:	60 Hz
Máxima altura sin derrateo del motor primo:	1000 msnm
Clasificación del aislamiento:	Clasificación H
Gobernador de velocidad:	PEEC

Cálculo de la corriente nominal del generador:

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L}{1000} \text{ (kVA)} \quad I_L = 1089.7 \text{ (A)}$$

Cálculo de potencia Reactiva.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \text{ (kVA)}; \quad Q = 543.3 \text{ (kVA)}$$

Calculo del número de Polos.

$$P = \frac{120 \cdot f}{RPM} \text{ Se tendrá: } P = 4$$

5.2 Características Técnicas de la Carga

La carga a aplicarse en los grupos electrógenos G1 y G2 es el tipo resistiva con un factor de potencia unitario con una potencia máxima de 1500kW.

Está compuesto por un pozo de agua salmuera. La disposición física de los dos grupos electrógenos y de la carga (Pozo salino) se muestra en la figura

5.2.

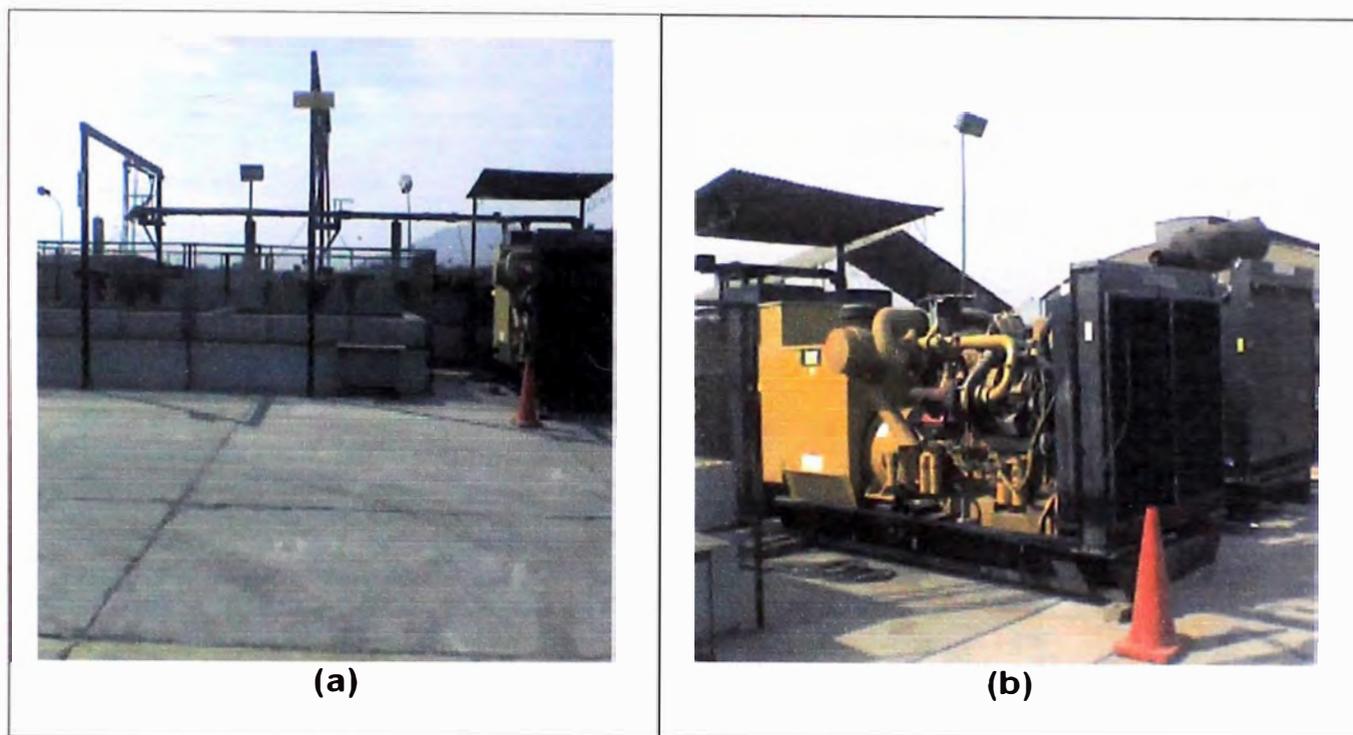


Fig. 5.2 (a) Pozo salino – carga 1500kW (b) Grupos 3412C Conectados en paralelo con la carga

5.3 Protocolo de pruebas

Antes del arranque de cada grupo electrógeno se debe verificar los siguientes sistemas.

1.- Sistema de Lubricación

Nivel de aceite tiene que ser el adecuado

Inspección por fugas: No debe presentar fugas

2.- Sistema de refrigeración:

Temperatura del refrigerante debe tener un valor de 32°

3.- Sistema de Arranque

Baterías cargadas	Correcto
Cargador de baterías	operativo

4.- Sistema de Escape

Verificación de seguridad (Tuberías/ Silenciador)

Verificación de fugas

5.- Sistema eléctrico

Verificación del tablero electrónico del grupo electrógeno

Verificación de controles remotos (Arranque)

Controles del sistema de grupo electrógeno, verificados

Verificación de las alarmas de grupo

Secuencia de fases comprobadas

6.- Arranque Inicial

Comprobación del arranque manual, baja velocidad

Tensión y frecuencia del grupo, correctas

Secuencia de fases, verificadas

Correspondencia de fases de los grupos en paralelo

Operación correcta del equipo de maniobra eléctrica

Apagado local/emergencia del grupo verificado

5.3.1 Diagrama de flujo para puesta en paralelo de G1 y G2

En la figura 5.3 se muestra de diagrama de procesos para poder conectar los grupos electrógenos G1 y G2 al pozo salino

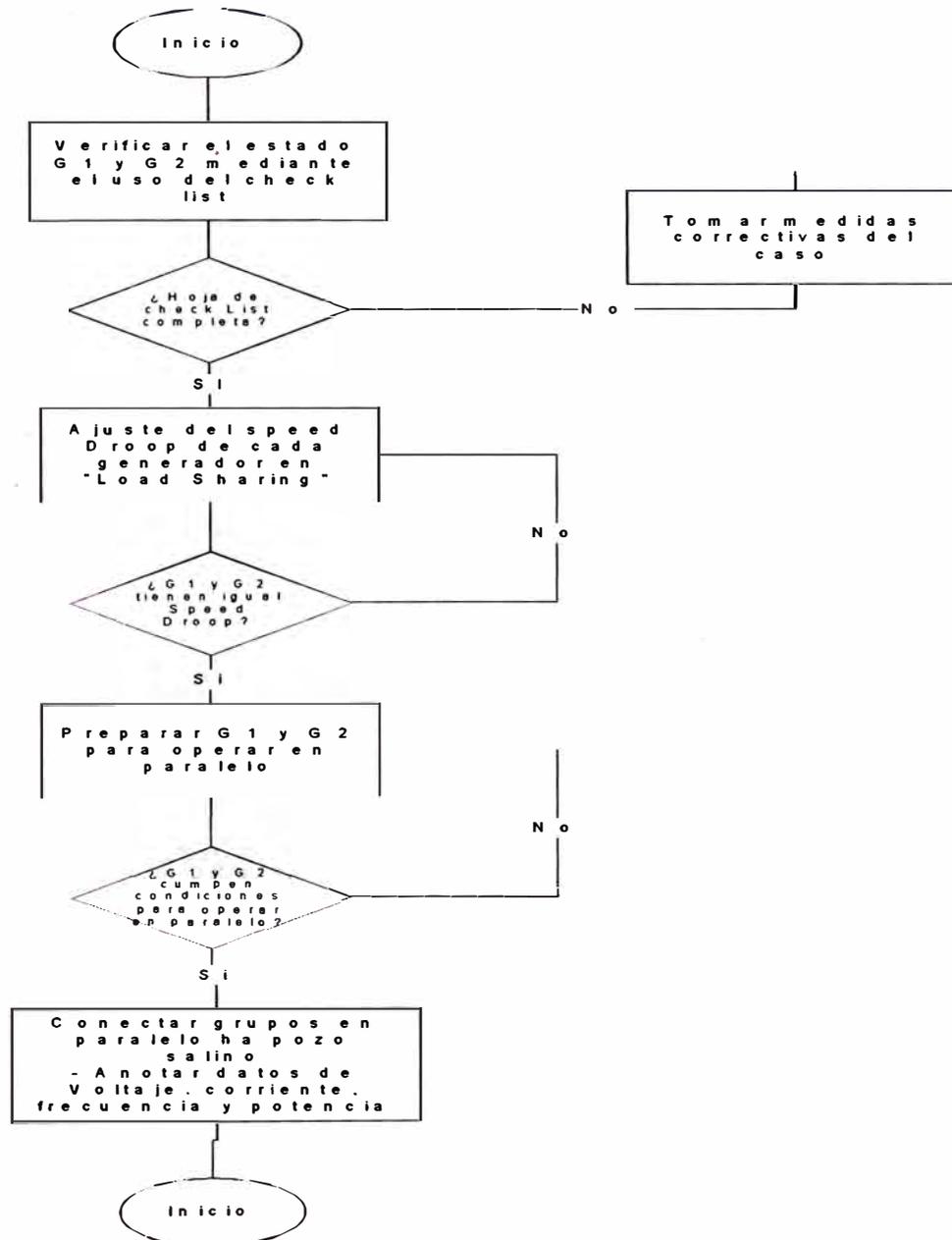


Fig. 5.3 Diagrama de flujo para la puesta en paralelo de G1 y G2

5.4 Datos experimentales, elaboración de curvas de reparto de carga

5.4.1 Primera toma de carga operando en paralelo

La prueba se ha realizado en las instalaciones de Ferreyros. Se reguló la caída de velocidad (Speed Droop) en grupo electrógeno G1 a un valor de 3%, esta regulación se lleva a cabo en el repartidor de carga (Load Sharing). Para el seteo de Speed droop, cada generador se conecto de manera independiente al pozo salino haciéndolo trabajar desde vacío hasta plena carga observando como varia la frecuencia a medida que el generador toma carga. La lectura de los datos de frecuencia, velocidad del motor y potencia activa se realizó mediante lectura directa en el tablero con modelo EMCPII+ (Electronic Module Control Panel) de control del equipo.

Se realizó el calculo de frecuencia en vacío para un 3% de caída de velocidad, la frecuencia en vacío para cada grupo es de 61.8 HZ y a plena carga la frecuencia toma el valor de 60 HZ.

Los resultados obtenidos para la primera prueba se muestran en la Tabla 5.1

Tabla 5.1 grupo electrógeno G1

Potencia Activa (kW)	Corriente De Línea (A)	Frecuencia (HZ)
156	152	61.4
250	261	61.1
389	418	60.6
535	596	60.2

De igual manera se reguló la caída de velocidad en grupo G2 a un valor de 3% en el gobernador de velocidad y se obtuvieron los datos de la Tabla 5.2

Tabla 5.2 grupo electrógeno G2

Potencia Activa (kW)	Corriente De Linea (A)	Frecuencia (HZ)
208	228	61.4
340	390	61.1
510	597	60.6
726	844	60.1

Con los datos de la Tabla 5.1 se obtuvo el siguiente la curva de la figura 5.3

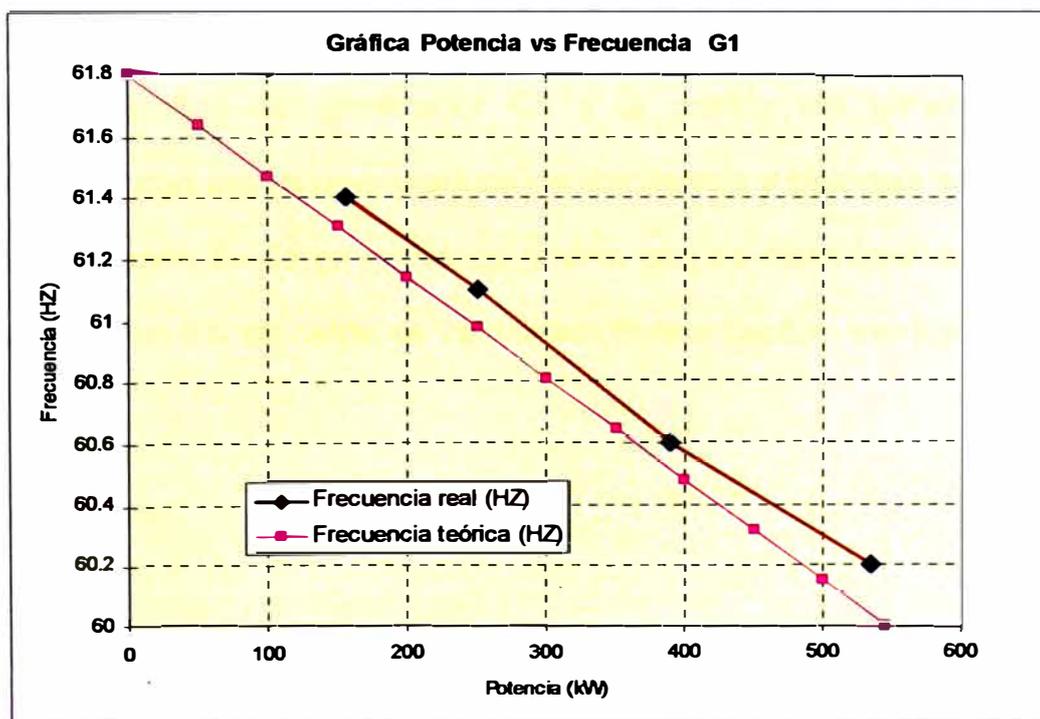
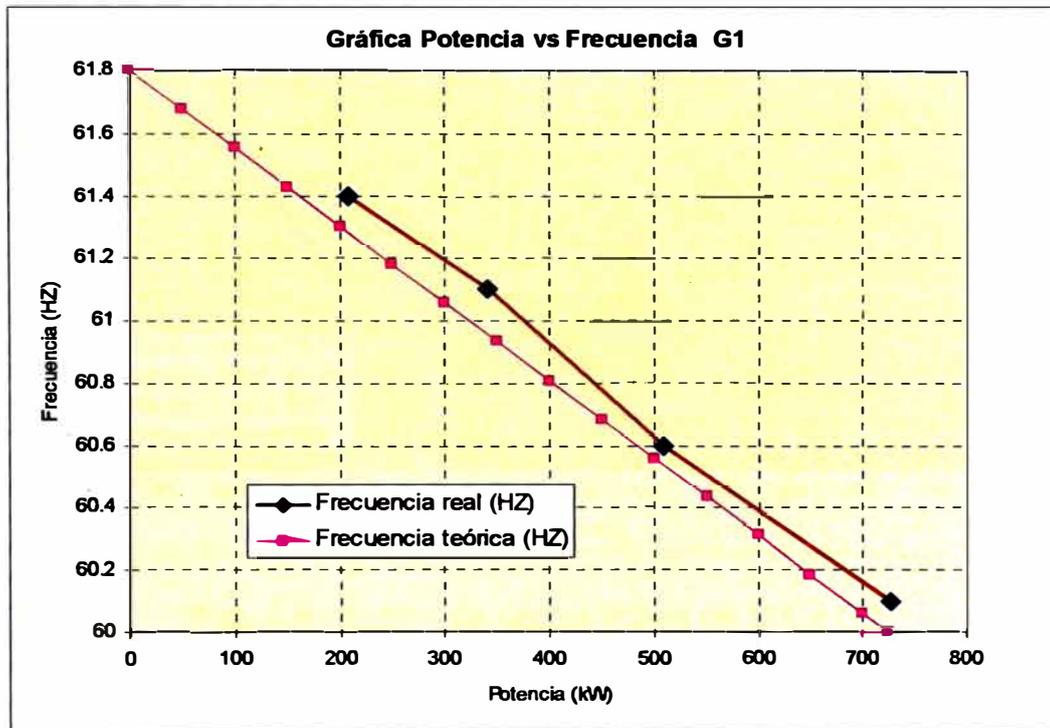


Fig. 5.3 Potencia activa del grupo electrógeno G1

Con los datos de la Tabla 5.2 se obtuvo el siguiente la curva de la figura 5.4

**Fig. 5.4** Potencia activa del grupo electrógeno G1

Agrupando grafica del generador G1 y la grafica del generador G2 y comparando con los valores teóricos de frecuencia y potencia se obtiene la curva del reparto de carga activa de ambos grupos electrógenos trabajando en paralelo con 3% de caída de velocidad (Speed Droop). Ver figura 5.5

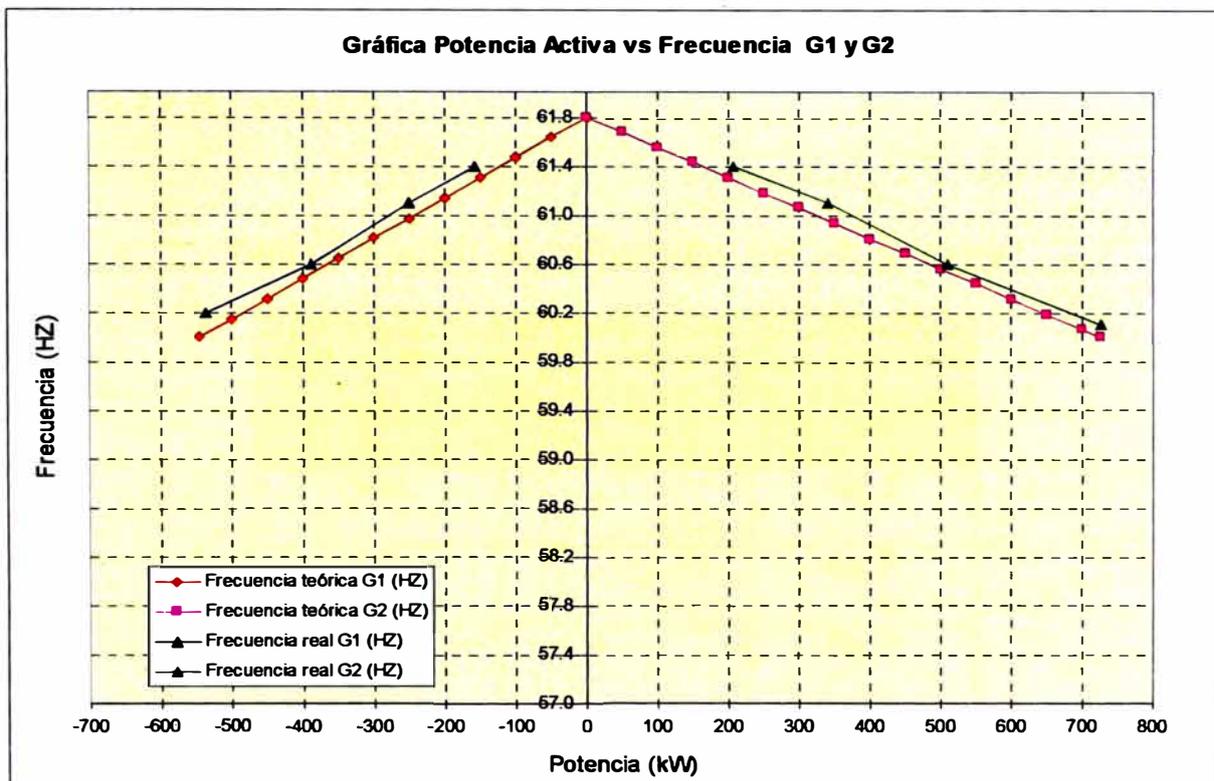


Fig. 5.5 reparto de carga activa de G1 y G2

De la figura 5.3 se está comparando la distribución de potencia activa de ambos grupo con la curva teórica que se debería obtener, existe una ligera variación en la potencia, sin embargo todos los puntos tomados en durante la prueba siguen la misma tendencia de la curva teórica para ambos generadores. A medida que ambos grupos toman carga el reparto de carga se hace de manera proporcional a sus potencias activas nominales de placa.

5.4.2 Segunda toma de carga operando en paralelo

Para esta segunda experiencia se regulado la caída de velocidad en el grupo electrógeno G1 en 4% y el grupo electrógeno G2 con 3% en sus

respectivos gobernadores de velocidad, de la lectura de datos se obtiene la Tabla 5.3 y la Tabla 6.4

Tabla 5.3 grupo electrógeno G1 con 4% de caída

Potencia Activa (kW)	Corriente De Linea (A)	Frecuencia (HZ)
104		62.1
190		61.7
298		61.2
395		60.8

Tabla 5.4 grupo electrógeno G1 con 3% de caída

Potencia Activa (kW)	Corriente De Linea (A)	Frecuencia (HZ)
162		62.1
316		61.7
510		61.2
679		60.8

Realizado la toma de datos y graficándola se obtiene la curva de la figura 5.6 de reparto de carga para ambos grupos electrógenos.

Nótese en la figura 5.6 que el grupo electrógeno G2 asume menos carga activa que el grupo electrógeno G1. A medida que ambos grupos asumen

carga la frecuencia va disminuyendo de manera lineal con respecto a la carga que van asumiendo, cuando la frecuencia del grupo G2 ha caído a 60 HZ está soportando el cien por ciento de su carga activa nominal; por otra parte a esta frecuencia el grupo G1 ha tomado una potencia menor a su valor nominal de valor 400 KW, este valor está en 145 kW por debajo de la potencia nominal de placa.

No podemos seguir aumentando la carga en el sistema debido a que el grupo G2 se sobrecargará a pesar de que G1 todavía puede seguir entregando potencia.

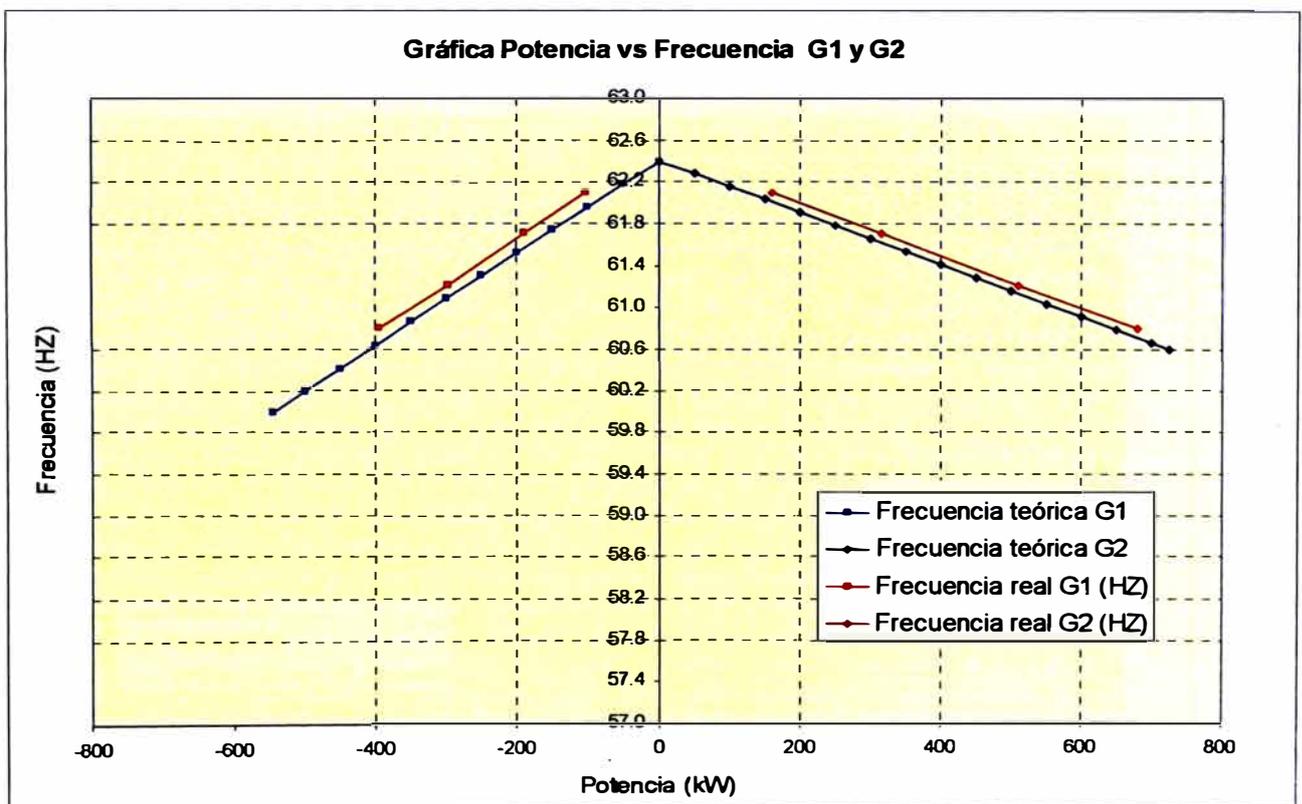


Fig. 5.6 reparto de carga activa de G1 y G2

5.5 Calculo teórico del reparto de potencia reactiva (kVAR)

De igual manera para el reparto de carga reactiva de los grupos electrógenos G1 y G2 trabajando en paralelo si se realiza un ajuste de caída de voltaje en un 3%. El ajuste de la caída de voltaje se ha realizado en el regulador de voltaje CDVR.

De la figura 5.7 se aprecia la distribución de potencia reactiva para ambos grupos cuando. La carga asumida por cada grupo es proporcional a sus potencia reactivas nominales toda vez que ambos generadores tengan la misma caída de voltaje.

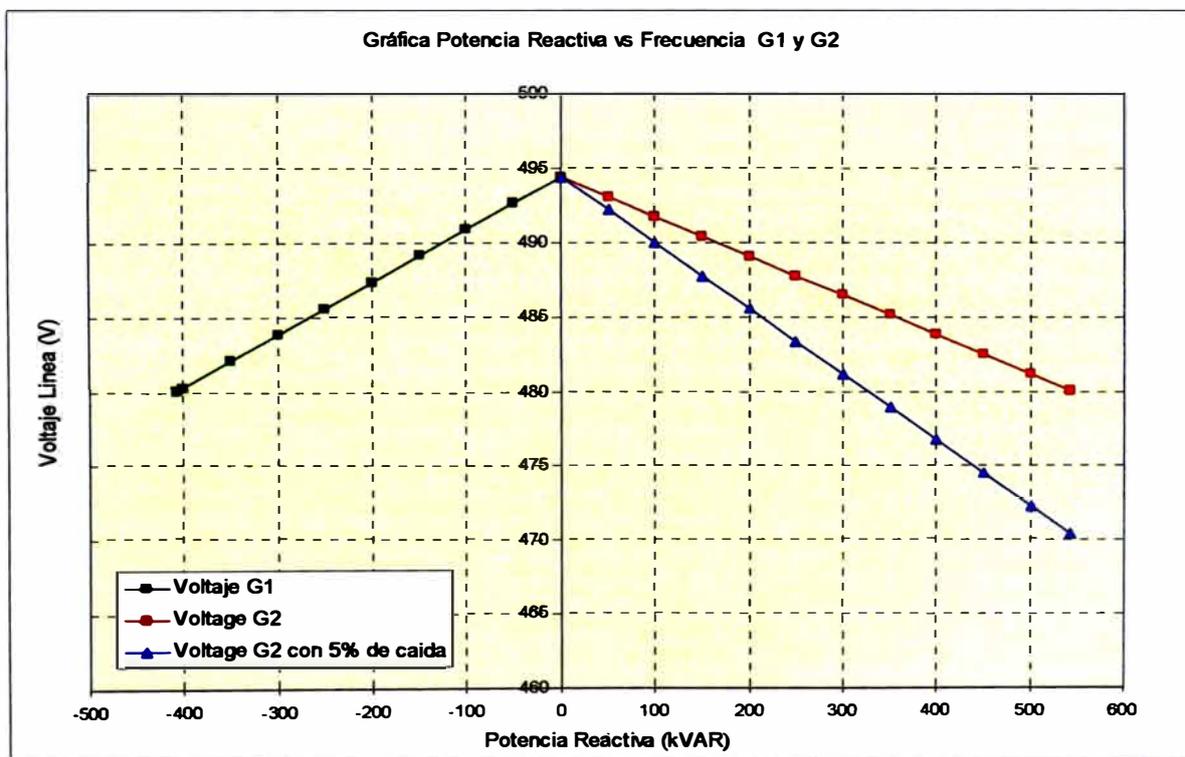


Fig. 5.7 reparto de carga reactiva de G1 y G2

La curva "Voltaje G2 con 5% de caída" tiene una mayor pendiente que la curva "Voltaje G2". En la figura 6.4 puede verse que mientras más pendiente tenga la curva el grupo electrógeno asume menos potencia reactiva (kVAR). A medida que va tomando carga el voltaje de ambos generadores va disminuyendo. El generador 1 asume el 100% de su potencia cuando su voltaje ha llegado a 480V - que es el voltaje de vacío - .Nótese que para este voltaje el generador G2 – quien tiene una caída de 5% - ha tomado una potencia reactiva de 320kVAR, que representa 220KVAR menos que si se hubiera regulado la caída de voltaje en un 3%.

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS ECONÓMICO

6.1 Resumen económico del proyecto

Se pretende implementar un programa de capacitación en operación, seguridad y mantenimiento en los grupos electrógenos 3412C. Con el objetivo de minimizar costos de operación, mantenimiento y seguridad ocupacional, para los clientes externos de la empresa Ferreyros S.A.A. Para lo cual se realizará la siguiente inversión:

Tabla 6.1: Resumen económico del proyecto

1	Implementación de poza	\$30 000.00
2	Horas hombre mecánicos de apoyo	\$10 000.00
3	Instructor capacitado	\$43 000.00
4	Alquiler de local de capacitación	\$4 600.00
6	Herramientas y equipos de seguridad	\$20 000.00
7	Programa de capacitación en operación	\$8 000.00
8	Programa de seguridad	\$4 000.00
9	Programa de mantenimiento	\$4 000.00
Total de Inversión		\$123 600.00

6.2 Variables económicas del proyecto

Este proyecto está destinado a capacitar en la operación, seguridad y mantenimiento de en los grupos electrógenos. El periodo de análisis del proyecto es de 10 años.

6.2.1 Ingresos económicos del proyecto

Al reducirse la probabilidad en la ocurrencia de fallas por operación y mantenimiento, se procede a calcular el ahorro en servicios por garantías.

Tabla 6.2: Reducción en la ocurrencia de fallas

		Reducción	Costo Anual (US\$)	Sub Total Anual (US\$)
1	Quejas de operación	50%	24 000.00	12 000.00
2	Quejas de mantenimiento	80%	12 000.00	9 600.00
			TOTAL	21 600.00

Nota: La probabilidad se calculo en base a datos estadísticos de la empresa en el periodo de un año.

Tabla 6.3: Beneficios totales del proyecto

AHORROS	US(\$)
Beneficio por ahorro en la reducción de fallas	21 600.00
Curso de capacitación por equipos nuevos	105 000.00
Curso de capacitación por clientes libres	49 000.00
Beneficio Total	175 600.00

Tabla 6.4 Flujo de Caja en 10 años tiempo de vida del proyecto

Desembolso	- \$123 600.00
Ingreso Año 1	\$175 600.00
Ingreso Año 2	\$175 600.00
Ingreso Año 3	\$175 600.00
Ingreso Año 4	\$175 600.00
Ingreso Año 5	\$175 600.00
...	...
Ingreso Año 10	\$175 600.00

6.2.2 Valor Actual Neto (VAN)

Con el flujo de caja de la tabla 6.4, evaluamos nuestro proyecto con la tasa del 12% de descuento, para analizar el proyecto, y procedemos a obtener el VAN.

$$VAN(25\%) = -123,600.00 + \frac{175,600.00}{1.25} + \frac{175,600.00}{1.25^2} + \frac{175,600.00}{1.25^3} + \dots + \frac{175,600.00}{1.25^{10}}$$

$$VAN(25\%)(US\$) = \$503,380.37$$

En este análisis, obtenemos nuestro primer indicador, el cual se encuentra en el rango de aceptación para proyectos de inversión.

6.2.3 Cálculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR)

Con el flujo de caja de la tabla 7.4, procedemos a obtener el TIR.

$$0 = -123,600.00 + \frac{175,600.00}{(1+i)} + \frac{175,600.00}{(1+i)^2} + \frac{175,600.00}{(1+i)^3} + \dots + \frac{175,600.00}{(1+i)^{20}}$$

$$i = 142.1\%$$

Este resultado es demasiado alto, lo cual garantiza la viabilidad de nuestro proyecto, y nos da una idea sobre los proyectos de entrenamiento y consultoría en empresas del sector industrial energético.

6.2.4 Cálculo de la relación B/C

Para este cálculo, hacemos el respectivo análisis:

$$VAN(25\%) = -inversión + Beneficios \rightarrow Beneficios = VAN(12\%) + inversión$$

$$B/C = \frac{VAN(25\%) + inversión}{inversión} \rightarrow 1 + \frac{VAN(25\%)}{inversión} \rightarrow B/C = 1 + \frac{561,980.37}{65,000.00}$$

$$B/C = 9.64$$

Este resultado se encuentra dentro de los estándares de rentabilidad.

CONCLUSIONES

- 1.- Toda vez que se tenga dos grupos en paralelo con caída, es necesario que ambos sean regulados con la misma caída de velocidad con el propósito de repartir la carga en ambos grupos de manera proporcional a sus datos de placa como se muestran los gráficos del ítem 5.4.1. y en la figura 5.5

- 2.- Cuando dos grupos electrógenos operan en paralelo con diferente caída de velocidad, el grupo que tenga menor pendiente (mayor caída de velocidad) es aquel que mas rápido llegara su potencia nominal como se muestra en la figura 5.6, mientras que el segundo grupo todavía tiene potencia disponible para asumir más carga.

- 3.- De la misma manera sucede para el reparto de carga reactiva, en este caso es necesario ajustar ambos reguladores de voltaje con igual caída de voltaje para asegurar el reparto por esta potencia de manera proporcional a su potencia reactiva nominal.

- 4.- Los indicadores económicos que se detallan en el Capítulo IV son óptimos para la implementación de un programa de capacitación en operación seguridad y mantenimiento en grupos electrógenos, se obtienen valores elevados del VAN, TIR y la relación beneficio costo (B/C).

5.- Toda vez que se opere un grupo electrógeno es importante que este lo haga dentro de su curva de capacidad para evitar daños en el motor diesel, regulador de voltaje, aislamiento de devanado rotórico y del estator

6.- Para evitar corrientes circulantes en dos generadores que se encuentren conectados en paralelo, es importante que ambos tengan igual voltaje interno y frecuencias para minimizar o eliminar las corrientes circulantes.

RECOMENDACIONES

1.- Para la instalación de grupos electrógenos se recomienda tener en cuenta las condiciones del sitio, es decir a qué altura estará operando, así como también el valor de la temperatura ambiente, ya que estos parámetros influyen en el desempeño del motor diesel.

2.- Para la selección adecuada de grupos electrógenos es necesario tener en consideración el valor del factor de carga, cuantas horas al año está operando y cuál es el tipo de carga a conectarse

3.- La puesta en paralelo debe ser de manera automática, es recomendable la implementación de un sistema SCADA para la puesta en paralelo y operación de grupos electrógenos

4.- Para generadores de emergencia (Stand By) el tiempo para el arranque en caso que exista un corte de energía eléctrica de la empresa que suministra es debe ser 10 segundos, para ello la temperatura mínima del refrigerante debe estar en 90 °F (32 °C).

BIBLIOGRAFÍA

1.- Electric Machinery Fundamentals (4th Edition)

AUTOR. Stephen J. Chapman

Año: 2003

2.- Máquinas Eléctricas y Transformadores (2da Edición)

AUTOR. I. Kosow

Año: 1993

3.- Electric Machinery (Six Edition)

AUTOR. A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley

Año: 2003

4.- Análisis de los Efectos de la Forma del Desbalance de Voltaje en Motores de Inducción Trifásico

AUTOR. Neyra Escobar Escobar

TESIS FIM

Año: 2004

5.- System Operation Testing and Adjusting Disassembly and Assembly Generator SRB4

AUTOR. Caterpillar

Año: 2002

6.- Electric Power Application Instalación Guide

AUTOR. Caterpillar

Año: 2002

**7.- Specifications System Operation Testing and Adjusting Caterpillar Digital
Voltage regulator (CDVR)**

AUTOR. Caterpillar

Año: 2005

8.- System Operation Testing and Adjusting Generator Set Load Sharing

AUTOR. Caterpillar

Año: 1999

**9.- Impacto de las Corrientes de Secuencia Negativa en lo Generadores
Síncronos Instalados en Sistemas Industriales**

AUTOR. Edgar Robles, Oscar Reyes

Año: 2001

10.- Protección de Generadores Síncronos

AUTOR. IEEE Power engineering Education Committe.

11.- Generator Protection Aplicación Guide

AUTOR. Basler Electric

Año. 2001

ANEXOS

DIESEL GENERATOR SET

CATERPILLAR®



Image shown may not reflect actual package.

PRIME

**725 kW 906 kVA
60 Hz 1800 rpm 480 Volts**

Caterpillar is leading the power generation marketplace with Power Solutions engineered to deliver unmatched flexibility, expandability, reliability, and cost-effectiveness.

FEATURES

FUEL/EMISSIONS STRATEGY

- Low fuel consumption

DESIGN CRITERIA

- The generator set accepts 100% rated load in one step.

UL 2200

- UL 2200 listed packages available. Certain restrictions may apply. Consult with your Caterpillar Dealer.

FULL RANGE OF ATTACHMENTS

- Wide range of bolt-on system expansion attachments, factory designed and tested

SINGLE-SOURCE SUPPLIER

- Fully prototype tested with certified torsional vibration analysis available

WORLDWIDE PRODUCT SUPPORT

- Caterpillar® dealers provide extensive post sale support including maintenance and repair agreements
- Caterpillar dealers fill 99.7% of parts orders within 24 hours
- Caterpillar dealers have over 1,600 dealer branch stores operating in 200 countries
- The Cat® S•O•SSM program cost effectively detects internal engine component condition, even the presence of unwanted fluids and combustion by-products

CAT® 3412C TA DIESEL ENGINE

- Reliable, rugged, durable design
- Field-proven in thousands of applications worldwide
- Four-stroke-cycle diesel engine combines consistent performance and excellent fuel economy with minimum weight

CAT SR4B GENERATOR

- Designed to match the performance and output characteristics of Caterpillar diesel engines
- Optimum winding pitch for minimum total harmonic distortion and maximum efficiency
- Single point access to accessory connections
- UL 1446 recognized Class H insulation

CAT EMCP 3 SERIES CONTROL PANELS

- Controls designed to meet individual customer needs.
- EMCP 3 provides the option for full-featured power metering and protective relaying
- Segregated low voltage, AC/DC accessory box provides single point access to accessory connections
- Options to meet UL/CSA/NFPA
- Power Center provides convenient location for control panel, optional power terminal strips and optional circuit breakers

PRIME 725 kW 906 kVA

60 Hz 1800 rpm 480 Volts



FACTORY INSTALLED STANDARD & OPTIONAL EQUIPMENT

System	Standard	Optional
Air Inlet	<ul style="list-style-type: none"> • Single element canister type air cleaner • Service indicator 	<ul style="list-style-type: none"> • Dual element air cleaner • Heavy-duty air cleaner
Cooling	<ul style="list-style-type: none"> • Radiator with guard • Coolant drain line with valve • Fan and belt guards • Caterpillar® Extended Life Coolant • Low coolant level alarm or shutdown 	<ul style="list-style-type: none"> • Radiator duct flange • Jacket water heater with shutoff valve • Heat exchanger and expansion tank
Exhaust	<ul style="list-style-type: none"> • Stainless steel exhaust flex and ANSI outlet flange 	<ul style="list-style-type: none"> • Mufflers (20, 25, or 30 dBA) • Elbow kit and through-wall installation kit • Manifold and turbocharger guards
Fuel	<ul style="list-style-type: none"> • Primary and secondary fuel filters • Water separator • Fuel priming pump • Flexible fuel lines • Fuel pressure gauge 	<ul style="list-style-type: none"> • Manual transfer pump • Choice of three Automatic Transfer Systems • Low fuel level alarm
Generator	<ul style="list-style-type: none"> • Self excited • Class H insulation • Class F temperature rise (105°C prime/130°C standby) • VR3F Voltage Regulator, 3-phase sensing, 2:1 Volts/Hz • Reactive droop • Extension box • Bus bar connection 	<ul style="list-style-type: none"> • Permanent magnet excited • Digital Voltage Regulator with KVAR/PF control • Anti-condensation space heater • Oversize and premium generators • Circuit breakers, IEC Compliant, 3-pole or 4-pole with shunt trip
Governor	<ul style="list-style-type: none"> • PEEC - Cat Electronic 	<ul style="list-style-type: none"> • Electronic isochronous • Electronic load sharing
Control Panels	<ul style="list-style-type: none"> • EMCP 3.1 (mounted inside power center) • Rear facing • Speed adjust • Emergency stop pushbutton • Voltage adjustment 	<ul style="list-style-type: none"> • EMCP 3.2 & EMCP 3.3 • Right-hand mounting of control panel • Local annunciator modules (NFPA 99/110) • Remote annunciator modules (NFPA 99/110) • Discrete I/O module
Lube	<ul style="list-style-type: none"> • Lubricating oil and filter • Oil drain line with valves • Fumes disposal 	<ul style="list-style-type: none"> • Manual sump pump
Mounting	<ul style="list-style-type: none"> • Formed steel base • Linear vibration isolators between base and engine-generator 	<ul style="list-style-type: none"> • Skid base • Fuel tank base • Extended capacity fuel tank base
Starting/Charging	<ul style="list-style-type: none"> • 45 amp charging alternator • Energized to Run (ETR) fuel shutoff solenoid • 24 volt starting motor • Batteries with rack and cables 	<ul style="list-style-type: none"> • Heavy-duty starting system • 5 or 10 amp battery charger • Oversize batteries • Ether starting aid • Battery disconnect switch
General		<ul style="list-style-type: none"> • Enclosures - sound attenuated, weather protective • Automatic transfer switches (ATS) • Floor standing circuit breakers • EU Certificate of Conformance (CE)

SPECIFICATIONS

CAT SR4B GENERATOR

Frame Size.....	597
Excitation.....	Self Excited
Pitch.....	0.8000
Number of poles.....	4
Number of bearings.....	Single Bearing
Insulation.....	UL 1446 Recognized Class H with tropicalization and antiabrasion
IP Rating.....	Drip Proof IP22
Alignment.....	Pilot Shaft
Overspeed capability - % of rated.....	150
Wave form.....	Less than 5% deviation
Paralleling kit/Droop transformer.....	Standard
Voltage regulator.3 Phase sensing with selectable volts/Hz	
Voltage regulation.....	Less than +/- 1/2% (steady state) Less than +/- 1% (no load to full load)
Telephone Influence Factor.....	Less than 50
Harmonic distortion.....	Less than 5%

CAT DIESEL ENGINE

3412C TA V-12, 4-stroke-cycle watercooled diesel

Bore - mm.....	137.20 mm (5.4 in)
Stroke - mm.....	152.40 mm (6.0 in)
Displacement - L.....	27.02 L (1648.86 in ³)
Compression Ratio.....	14.5:1
Aspiration.....	TA
Fuel system.....	Pump and Lines
Governor type.....	PEEC - Cat Electronic

CAT CONTROL PANELS

- EMCP III
- 24 Volt CD Control
- NEMA 1, IP22 enclosure
- Terminal box mounted
- Single location customer connection point
- UL/CSA/CE/UL508A
- Panel illuminating lights
- Auto start/stop control
- Voltage adjust potentiometer
- True RMS AC metering
- Digital indications for:
 - RPM
 - Operating hours
 - Oil pressure
 - Coolant Temperature
 - System DC volts
 - AC volts, phase amps, Hz
- Shutdowns with indicating lights for:
 - Low oil pressure
 - High coolant temperature
 - Overspeed
 - Emergency Stop
 - Failure to start (overcrank)
- Programmable protective relaying functions*:
 - Under and over voltage
 - Under and over frequency
 - Reverse power
 - Overcurrent
 - Low coolant level
- 4 spare alarm/shutdown inputs
- ModBus isolated data link (RS -485 half-duplex)
 supports serial communication at data rate up to 115.2 kbaud (*)

* (Available on EMCP 3.2 & EMCP3.3)

PRIME 725 ekW 906 kVA

60 Hz 1800 rpm 480 Volts



TECHNICAL DATA

Open Generator Set - - 1800 rpm/60 Hz/480 Volts	DM0633	
Package Performance Genset Power rating with fan Genset Power rating @ 0.8 pf	725 ekW 906.25 kVA	
Fuel Consumption 100% load with fan 75% load with fan 50% load with fan	198.8 L/hr 150.6 L/hr 106.5 L/hr	52.5 Gal/hr 39.8 Gal/hr 28.1 Gal/hr
Cooling System¹ Ambient air temperature Air flow restriction (system) Air flow (max @ rated speed for radiator arrangement) Engine coolant capacity Radiator coolant capacity Engine Coolant capacity with radiator/exp. tank	49 ° C 0.12 kPa 1464 m ³ /min 59.0 L 90.0 L 149.0 L	120 ° F 0.48 in. water 51701 cfm 15.6 gal 23.8 gal 39.4 gal
Exhaust System Combustion air inlet flow rate Exhaust stack gas temperature Exhaust gas flow rate Exhaust flange size (internal diameter) Exhaust system backpressure (maximum allowable)	63.0 m ³ /min 511.8 ° C 175.2 m ³ /min 203.2 mm 6.7 kPa	2224.8 cfm 953.2 ° F 6187.1 cfm 8.0 in 26.9 in. water
Heat rejection Heat rejection to coolant (total) Heat rejection to exhaust (total) Heat rejection to atmosphere from engine Heat rejection to atmosphere from generator	457 kW 764 kW 108 kW 32.6 kW	25990 Btu/min 43449 Btu/min 6142 Btu/min 1854.0 Btu/min
Alternator² Motor starting capability @ 30% voltage dip Frame Temperature Rise	2131 skVA 597 105 ° C	189 ° F
Lube System Sump refill with filter	68.0 L	18.0 gal
Emissions NOx g/hp-hr CO g/hp-hr HC g/hp-hr PM g/hp-hr	5.96 g/hp-hr .67 g/hp-hr .13 g/hp-hr .102 g/hp-hr	

¹ Ambient capability at 200 m (660 ft) above sea level. For ambient capability at other altitudes, consult your Caterpillar dealer.

² Generator temperature rise is based on a 40° C (104° F) ambient per NEMA MG1-32.

PRIME 725 ekW 906 kVA

60 Hz 1800 rpm 480 Volts



RATING DEFINITIONS AND CONDITIONS

Meets or Exceeds International Specifications: AS1359, AS2789, CSA, EGSA101P, IEC60034, ISO3046, ISO8528, NEMA MG 1-32, UL508, 72/23/EEC, 89/336/EEC, 98/37/EEC.

Prime - Output available with varying load for an unlimited time. Prime power in accordance with ISO8528. 10% overload power in accordance with ISO3046, AS2789, and BS5514. Prime ambient temperatures shown indicate a coolant top tank temperature just below shutdown at 100 percent load.

Ratings are based on SAE J1995 standard conditions. These ratings also apply at ISO3046 standard conditions. **Fuel Rates** are based on fuel oil of 35° API (16° C or 60° F) gravity having an LHV of 42 780 kJ/kg (18,390 Btu/lb) when used at 29° C (85° F) and weighing 838.9 g/liter (7.001 lbs/U.S. gal).

Additional Ratings may be available for specific customer requirements. Consult your Caterpillar representative for details.

PRIME 725 eKW 906 kVA

60 Hz 1800 rpm 480 Volts



DIMENSIONS

Package Dimensions		
Length	4485.0 mm	176.57 in
Width	1741.6 mm	68.57 in
Height	1986.7 mm	78.22 in
Weight	7103 kg	15,659 lb

Note: Do not use for installation design.
See general dimension drawings for detail (Drawing #2905816).

Performance No.: DM0633

Feature Code:: 412DEN6

Source:: European Sourced

21 November 2006

8788786

www.CAT-ElectricPower.com

© 2006 Caterpillar
All rights reserved.

Materials and specifications are subject to change without notice.
The International System of Units (SI) is used in this publication.

CAT, CATERPILLAR, their respective logos, "Caterpillar Yellow," and the POWER EDGE trade dress, as well as corporate and product identity used herein, are trademarks of Caterpillar and may not be used without permission.