

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

TESIS DE GRADO


PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE  
INGENIERO ELECTRICO, ESPECIALIZACION POTENCIA

DIAGRAMAS P-Q PARA GENERADORES SINCRONOS

CARLOS TOBAR LANDETA

QUITO, MARZO DE 1981

Certifico que el presente trabajo de tesis, fue realizado en su totalidad por el Sr. Carlos Tobar Landeta.



Ing. Alfredo Mena P.

## PROLOGO

El tema desarrollado en este trabajo fué propuesto por el Ing. Alfredo Mena P., con la finalidad de obtener curvas de potencia activa y reactiva (Diagramas P-Q) para los generadores que opera la Empresa Eléctrica Quito.

El proyecto tuvo auspicio de la E.E.Q., especialmente de orden técnico, por intermedio del Ing. Raúl Palacios y el personal del Dpto. de Asesoría y Planificación, con valiosa información que gentilmente me fué proporcionada.

En la elaboración de este trabajo debo mencionar la ayuda recibida del Ing. Alfredo Mena P., con su asesoramiento en la dirección de la tesis y del Ing. Efraín Del Pino, en la elaboración del programa digital; para quienes hago expreso mi reconocimiento y gratitud.

Quito, Marzo de 1981

## CONTENIDO

- PROLOGO	i
- INTRODUCCION	ii
Objeto y alcance	ii
Importancia	iii
Hipotesis planteadas para el estudio	iv
CAPITULO I .- FUNDAMENTOS TEORICOS DE LOS GENERADORES SINCRONOS	1
1.1.    El alternador sincrónico	1
1.1.1.  Características principales	1
1.1.2.  Tipos	3
1.1.3.  Diagramas fasoriales	5
1.2.    Errores al aplicar la teoría de rotor cilíndrico a un alternador con rotor de polos salientes	11
1.3.    Artificio geométrico en la construcción de diagramas fasoriales, asociando ambas teorías para evitar errores	16
CAPITULO II .- DESARROLLO DE LOS DIAGRAMAS DE POTENCIA PARA GENERADORES	21
2.1.    Factores limitantes en la operación de generadores	21
2.2.    Límites por estabilidad	22
2.2.1.  Descripción introductoria del problema de la estabilidad en la operación de generadores	22
2.2.2.  Determinación matemática e interpretación geométrica de los puntos críticos de operación estable, de un generador de polos salientes conectado a una barra infinita a través de una reactancia externa	25

2.2.3.	Construcción del límite teórico y del límite práctico de estabilidad, su validez para generadores de rotor cilíndrico	31
2.2.4.	Influencia del sistema de excitación sobre los límites de estabilidad de los generadores	34
2.3.	Límites por condiciones térmicas en los devanados	35
2.3.1.	Clases de aislamiento	36
2.3.2.	Límites de temperatura y elevación de temperatura permisibles	38
2.3.3.	Construcción del límite térmico del campo	39
2.3.4.	Construcción del límite térmico de la armadura	41
2.4.	Límite por corriente mínima de excitación	42
2.5.	Límite por potencia efectiva	42
2.6.	Construcción de un diagrama práctico para la operación de generadores	43

CAPITULO III .- PROGRAMA DIGITAL PARA LA EJECUCION DE  
DIAGRAMAS Y APLICACION DE LOS MISMOS 47

3.1.	Deducción de las expresiones matemáticas que definen cada límite	47
3.1.1.	Límite por estabilidad	48
3.1.2.	Curvas para corriente de excitación	50
3.1.3.	Curvas por corriente de carga	52
3.1.4.	Límite de potencia efectiva	52
3.2.	Características y forma de uso del programa	53
3.3.	Ejemplos de aplicación	57
3.3.1.	Análisis de los diagramas obtenidos	59
3.3.2	Efecto de la reactancia externa	60

-	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	62
---	--------------------------------	----

- APENDICE A .-	Fórmulas prácticas de los parámetros de la máquina sincrona	63
- APENDICE B .-	Definiciones importantes	65
- BIBLIOGRAFIA		68

## I N T R O D U C C I O N

### - OBJETO Y ALCANCE

El objeto del presente estudio, es la obtención de un diagrama que presente en forma clara y precisa la situación en que se encuentra operando un generador sincrónico, así como los límites dentro de los cuales su funcionamiento será confiable y seguro, garantizando el buen estado de condiciones de todas las partes de la máquina.

El diagrama a obtenerse, pretende ser una guía de carácter general para la operación de un generador, especialmente en lo que a su capacidad de carga se refiere cuando sus condiciones de operación son diferentes a las nominales, para evitar condiciones peligrosas de funcionamiento, que provoquen -- pérdidas de sincronismo, o deterioren el aislamiento de los devanados.

En ningún momento los diagramas obtenidos en este trabajo pueden ser utilizados suplantando instrucciones generales o específicas emanadas del constructor, y su aplicabilidad cae fuera de arreglos contractuales que se hubieren hecho al respecto, entre compradores y constructores de una determinada máquina.

Este trabajo cubre además, la elaboración de un programa digital que ejecute los diagramas de acuerdo a los parámetros de cada generador; así como su aplicación a dos centrales

de la Empresa Eléctrica Quito, la hidráulica de Cumbayá y la de gas de Guangopolo.

- IMPORTANCIA

En un sistema de potencia la carga está continuamente variando en forma errática, esto hace imposible operar un generador en condiciones preestablecidas respecto a sus variables de control, corriente de excitación y torque de la máquina impulsora, especialmente en los generadores de las centrales destinadas a cubrir los picos de carga; en este tipo de centrales los requerimientos de potencia activa y reactiva, hacen que se tenga que maniobrar continuamente con los controles ya mencionados, en vista de lo cual es importante definir los límites dentro de los cuales deben ser variados, a fin de dar un servicio confiable al sistema.

Por otra parte, cuando un generador es operado dentro de los valores correspondientes a su capacidad nominal, normalmente se puede esperar de éste una vida máxima y confiable; -- mientras que cuando sus condiciones de operación difieren a -- las nominales, su funcionamiento está expuesto a determinados riesgos, que deben ser tomados en cuenta el momento de operarlo. Generalmente los datos de placa de los generadores, en su concepción usual tienen el papel de identificar a la máquina, indicando sus capacidades básicas, por lo que tales datos no garantizan que los generadores sean capaces de operar en forma



segura, indiscriminadamente de las posibles condiciones que -- pueden presentarse en el sistema, ya sea por concepto de estabilidad o por límites térmicos prevalecientes en las diversas condiciones.

En vista de las razones expuestas, es importante dotar le al operador de una central, de los diagramas de operación -- que caracterizan a cada una de las máquinas, que le permitan -- de acuerdo con los valores que arrojan los instrumentos, visualizar claramente el punto de operación de un generador, a la -- vez que sepa en forma precisa los parámetros que debe variar -- cuando se producen cambios en la carga, a fin de tener un buen funcionamiento del sistema.

#### - HIPOTESIS PLANTEADAS PARA EL ESTUDIO

En el presente trabajo a fin de simplificar el análisis, evitando la introducción de términos no lineales, así como efectos y parámetros de poca significación en el comportamiento de la máquina sincrónica, se han planteado algunas hipótesis, en consideración de las cuales se desarrolla el estudio; estas premisas son las siguientes:

- Se asume una máquina sincrónica ideal, sin saturación y con -- pérdidas despreciables.
  
- El análisis está restringido a condiciones de estado estable

es decir, todos los cambios de carga tienen lugar en intervalos de tiempo más largos que la constante de tiempo transitoria de cortocircuito de la máquina.

- Los generadores están operando en paralelo con un sistema de gran capacidad, es decir conectados a una barra infinita, -- voltaje y frecuencia constantes.
- Se considera la potencia mecánica de la máquina impulsora -- constante.
- Los cambios de velocidad son despreciados.
- la resistencia del devanado estatórico como de la línea que une al generador con el resto del sistema se la desprecia.
- Para el análisis de estabilidad no se toma en cuenta el efecto del regulador de voltaje y del sistema de excitación, ni el de los devanados de damping.
- El voltaje terminal del generador se supone constante e --- igual al voltaje nominal.

## CAPITULO I

### FUNDAMENTOS TEORICOS DE LOS ALTERNADORES SINCRONOS

#### 1.1. EL ALTERNADOR SINCRONO

Es una máquina de corriente alterna, puede funcionar-- como generador o como motor dependiendo del tipo de energía -- que se le suministre al eje mecánico o a los devanados eléctricos estatóricos respectivamente; funcionando como generador es considerado una fuente de tensión.

Su velocidad en régimen permanente es proporcional a-- la frecuencia de la corriente que circula por su devanado inducido.

##### 1.1.1. CARACTERISTICAS MAS IMPORTANTES

Los generadores sincronos son trifásicos salvo raras-- excepciones, por las ventajas que el sistema trifásico presenta en el manejo de grandes potencias.

En el alternador sincrónico como en otros tipos de máquinas rotativas, las tensiones se inducen por el movimiento relativo de un campo magnético respecto a un devanado, y el par nace de la interacción de los campos magnéticos de los devanados del estator y del rotor.

Más específicamente en los generadores sincronos, las tensiones se obtienen por el giro mecánico del campo magnético

que atraviesa y barre los grupos de bobinas del devanado estático, induciendo en éstas, tensiones que cuantitativamente responden a la ley de Faraday:

$$e = \frac{d\lambda}{dt}$$

e = voltaje inducido  
 $\lambda$  = flujo concatenado  
t = tiempo

El devanado inductor que por razones prácticas de construcción se encuentra localizado en el rotor, se lo excita con corriente continua desde un pequeño generador llamado excitatriz; éste puede ser de continua o de alterna con rectificadores estáticos, accionado por el mismo eje de generador; la potencia en corriente continua requerida para un generador es de al rededor del 1% de la potencia nominal del mismo.

Cuando un generador sincrónico suministra potencia a una carga, la corriente inducida crea un campo en el entrehierro, que gira a velocidad de sincronismo, éste flujo reacciona con el creado por la corriente de excitación, naciendo así un par electromagnético debido a la tendencia que muestran ambos campos a alinearse entre sí. En el generador este par se opone al movimiento, por lo que para mantener la rotación, deberá aplicarse un par mecánico mediante una máquina motriz o motor primario.

Así el par electromagnético, es el elemento en virtud del cual, una mayor demanda de potencia eléctrica de salida --

exige una mayor potencia mecánica de entrada.

El campo creado en el rotor viene determinado por la corriente de excitación, y es aproximadamente constante en condiciones normales de operación; en cambio el campo creado en el estator es función de la carga eléctrica aplicada al generador, y es también constante para una carga constante.

Las variaciones de carga se manifiestan por variaciones en un pequeño desalineamiento de los ejes de los campos del estator y del rotor, éste desalineamiento es cuantificado en grados eléctricos por el ángulo  $\delta$ , éste ángulo es directamente proporcional a la carga aplicada, existiendo un ángulo crítico correspondiente a la máxima carga aplicable; los reajustes para los diferentes ángulos constituyen un proceso dinámico acompañado de una serie de oscilaciones mecánicas amortiguadas!

#### 1.1.2. TIPOS

Existen dos tipos de generadores por el tipo de rotor que son construidas: los de rotor con polos salientes, y los de rotor cilíndrico; las razones por las que existen estos dos tipos son las siguientes:

La mayor parte de los sistemas eléctricos de potencia trabajan con frecuencias de 50 y 60 Hz. las mismas que responden a la siguiente relación en una máquina sincrónica:

$$f = \frac{Pn}{120}$$

donde:

$f$  = frecuencia eléctrica

$P$  = número de polos

$n$  = velocidad en rpm de la máquina impulsora

Por otra parte las máquinas impulsoras utilizadas son esencialmente de 2 tipos: las hidráulicas de baja velocidad y las turbinas de gas o vapor de alta velocidad, por lo que se hace necesario para cumplir con las frecuencias establecidas dotarles de gran número de polos a las primeras, y de uno o dos pares de polos a las de alta velocidad.

Los factores antes mencionados hacen que los alternadores hidráulicos, con bajas velocidades y considerable número de polos, debido a las pocas exigencias en la resistencia mecánica del rotor y su más simple construcción, se los haga con rotor de polos salientes y devanados concentrados.

Mientras tanto en turboalternadores con altas velocidades, uno o dos pares de polos y considerables potencias, las velocidades que alcanza la circunferencia del rotor son muy grandes, (125 - 185 m/s) creando fuerzas centrífugas en determinadas partes del rotor bastante grandes, que exigen grandes resistencias mecánicas del mismo, esto hace que para tener una mejor fijación y disposición del devanado, éste se lo deba construir distribuido sobre la superficie del rotor, en ranuras y dispuesto de tal forma que el campo engendrado sea a proximadamente senoidal.<sup>2</sup>

### 1.1.3. DIAGRAMAS FASORIALES

Estos se refieren a los diagramas que representan las tensiones engendradas en una máquina sincrónica, para su estudio es necesario resaltar un importante efecto que se opera en ésta, es aquel conocido como "reacción del inducido".

Este efecto consiste en una onda fundamental de f.m.m. creada por la corriente que circula por su inducido, que reacciona con el campo creado en el rotor y que gira sincrónicamente con éste; El campo creado en el inducido al reaccionar con el del inductor amplifica o debilita el campo de excitación de la máquina.

El efecto de reacción del inducido depende entre otros factores, del tipo de rotor de la máquina: cilíndrico o de polos salientes, por lo que es necesario analizar independientemente sus diagramas.

Para los diagramas de tensiones de los alternadores -- sincrónicos sin profundizar en un estudio analítico, se puede -- considerar separadamente cada f.m.m. creando su propio flujo y f.e.m. en forma independiente, partiendo de esta consideración resulta más simple hacer el análisis primero para rotor cilíndrico, puesto que por ser su entrehierro uniforme, el flujo engendrado por la onda de f.m.m. es independiente de la posición espacial de la onda respecto al campo inductor.<sup>1</sup>

En un alternador de rotor cilíndrico la tensión en sus bornes V, tiene lugar como resultado de los siguientes factores:<sup>2</sup>

- a) La f.m.m. fundamental de los polos inductores crea el flujo que induce la f.e.m. fundamental  $E$ .
- b) La f.m.m. de reacción del inducido que crea su correspondiente f.e.m.  $E_{ar}$ , proporcional a la corriente de carga.
- c) El flujo de dispersión con su correspondiente f.e.m., que también es proporcional a la corriente de carga.
- d) La caída de tensión en la resistencia óhmica del devanado del estator, que por ser menor al 1% del voltaje nominal con carga nominal, con frecuencia se la desprecia.

La tensión  $V$  en bornes del alternador puede considerarse como la suma fasorial de las tensiones:  $E_f$  inducida por el campo del rotor,  $E_{ar}$  inducida por el campo de reacción del estator, proporcionales a las intensidades en sus respectivos devanados y retrazadas en  $90^\circ$  respecto a los flujos que las inducen; como se las representa en el siguiente diagrama:

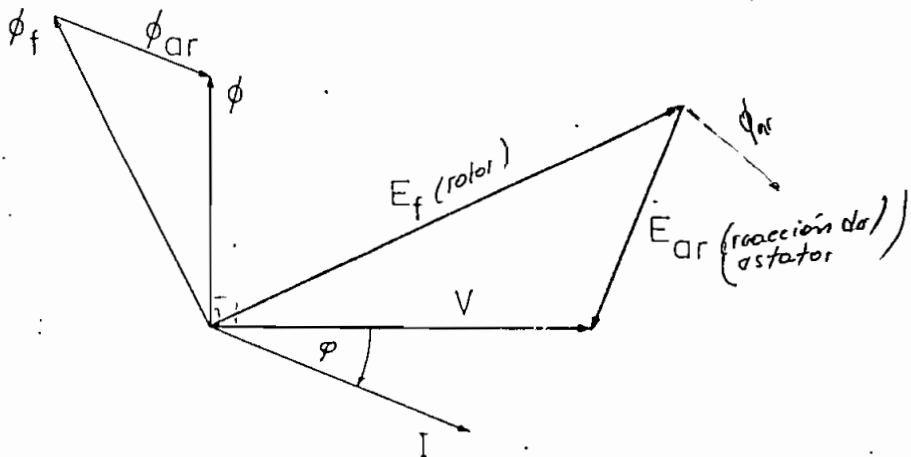


Fig. 1



El flujo de reacción está en fase con la intensidad  $I$  en el inducido, en consecuencia la f.e.m.  $E_{ar}$ , retrasa  $90^\circ$  respecto a dicha intensidad, por lo tanto puede escribirse:

$$V = E_f - jIX_\varphi$$

Donde  $X_\varphi$  es una constante de proporcionalidad que relaciona  $E_{ar}$  con  $I$ , puesto que  $E_{ar} \propto I$ .

De lo anterior se puede apreciar que el efecto de "reacción del inducido" equivale a una reactancia inductiva  $X_\varphi$ , denominada "reactancia de reacción", que justifica la componente de tensión inducida por la onda fundamental del flujo de reacción.

Hasta aquí no se ha tomado en cuenta ni en el diagrama ni en la relación planteados anteriormente, al flujo de dispersión y a la caída de tensión en la resistencia óhmica del devanado inducido, ésta última por una razón ya mencionada se la puede omitir; mientras la anterior se la integra al análisis mediante una reactancia  $X_1$ , teniendo en cuenta que el flujo de dispersión al igual que la reacción del inducido es proporcional a la corriente de carga, se puede unificarlos en una sola reactancia total o "sincrona"  $X_s$ , que toma en cuenta todos los flujos creados por las corrientes polifásicas del estator, de manera que:

$$X_s = X_\varphi + X_1$$

con estos antecedentes se puede establecer ya un diagrama de tensiones práctico, para un alternador sincrónico de rotor cilíndrico, funcionando como generador.<sup>1</sup>

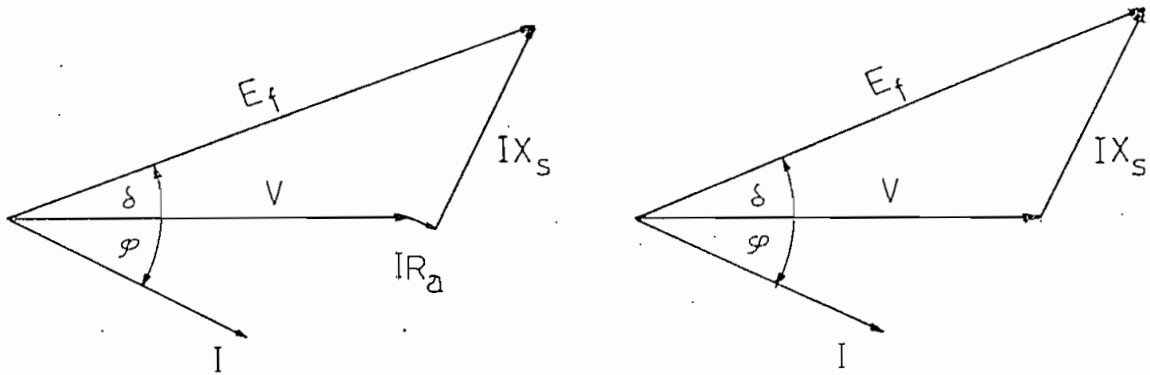


Fig. 2

Considerando la resistencia  
estatórica  $R_a$ .

Sin considerarse la resistencia  
estatórica  $R_a$ .

En el caso de las máquinas con rotor de polos salientes, existe una dirección preferente de magnetización, determinada por las saliencias polares, ya que la reluctancia del entrehierro es apreciablemente menor en el sentido longitudinal de los polos; es decir del eje polar o eje "d"; que en el del eje del espacio entre los polos, eje transversal o eje en cuadratura "q".

Para analizar el diagrama de tensiones de un alternador con rotor de polos salientes, contemplando el efecto de lo mencionado en el párrafo anterior es necesario recurrir a una descomposición hipotética de la corriente inducida en el esta-

tor, en las siguientes 2 componentes:

Una componente  $I_d$  en cuadratura con el vector  $E_f$  de la tensión inducida por el campo de excitación, que a su vez crea un flujo de reacción fundamental  $\phi_{ad}$  en la dirección del eje--polar o eje "d"; y la componente  $I_q$ , en fase con la tensión inducida por el campo de excitación  $E_f$ , creando un flujo de reacción fundamental  $\phi_{aq}$  en la dirección del eje interpolar o eje--"q".

En una máquina con rotor de polos salientes y circuito magnético no saturado, el flujo de reacción del inducido total  $\phi_{ar}$  es la suma de las dos componentes anteriores  $\phi_{ad}$  y  $\phi_{aq}$ , además el flujo resultante es la suma vectorial del flujo de --reacción del inducido  $\phi_{ar}$ , con el del campo inductor  $\phi_f$ .

Cada una de las componentes  $I_d$  e  $I_q$  de la corriente es --tatórica inducida  $I$ , llevan aparejadas una componente de la --caída de tensión en la reactancia sincrónica, de valores  $jIX_d$  y-- $jIX_q$  respectivamente; donde  $X_d$  y  $X_q$  son las reactancias sincro--nas según sus respectivas direcciones, que dan cuenta de los --efectos inductivos de los flujos de frecuencia fundamental, --creados por la corriente en el inducido, incluyendo los de re--acción y de dispersión, de manera que estas reactancias se las puede expresar de la siguiente forma: 1

$$X_d = X_{\phi d} + X_l$$

$$X_q = X_{\phi q} + X_l$$

Donde:

$X_{\varphi d}$  ,  $X_{\varphi q}$  = reactancias debido al efecto de reacción del inducido en los ejes "d" y "q" respectivamente.

$X_l$  = reactancia de dispersión igual para ambos ejes.

En forma resumida, los factores que dan lugar a la tensión en bornes de un alternador de rotor con polos salientes--  
son los siguientes:

- a) El flujo de excitación y la f.e.m. fundamental  $E_0$ .
- b) El flujo y la f.e.m. de la reacción longitudinal del inducido, representado por su correspondiente caída de tensión --  
 $jI_d X_d$ , en la reactancia de eje directo.
- c) El flujo y la f.e.m. de reacción transversal del inducido--  
representado por su correspondiente caída de tensión  $jI_q X_q$ ,  
en la reactancia de eje en cuadratura.
- d) La caída de tensión en la resistencia óhmica del devanado--  
estatórico.

Hay que notar que en los numerales b) y c) se encuentra incluido el efecto del flujo de dispersión.

Para el alternador con rotor de polos salientes, funcionando como generador, la tensión  $E_0$ , inducida por el campo de excitación, es igual a la suma vectorial de la tensión en bornes  $V$ , más la caída de tensión en la resistencia óhmica del devanado inducido  $IR_a$ , que puede ser omitida, más la caída de tensión en las reactancias sincronicas  $jI_d X_d + jI_q X_q$ ; represen-

tado en los siguientes diagramas:

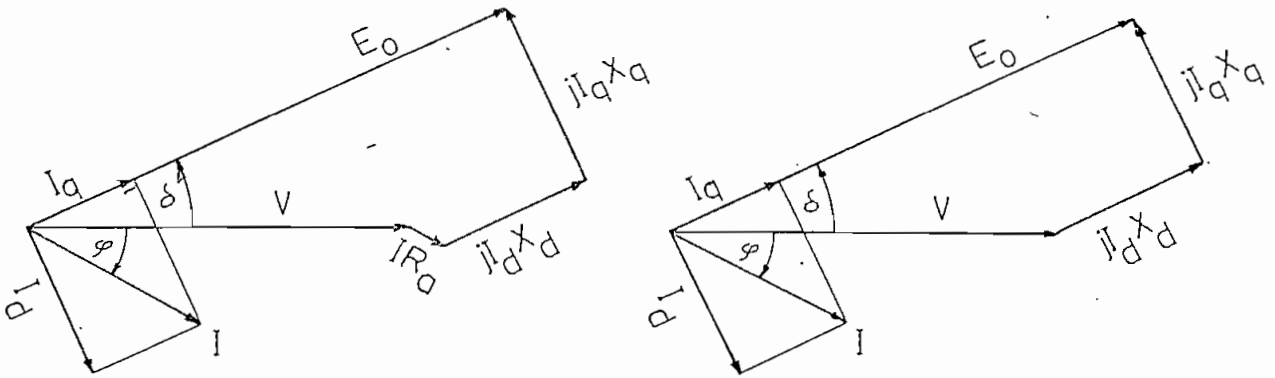


Fig. 3

Considerando la resistencia  
estatórica  $R_a$ .

Omitiendo la resistencia esta  
tórica  $R_a$ .

Hay que anotar que la reactancia  $X_q$  es menor que la reactancia  $X_d$ , puesto que la reluctancia en la región interpolar es mayor que en el sentido del eje longitudinal; corrientemente  $X_q$  está comprendida entre 0.6 y 0.7 de  $X_d$ .<sup>1</sup>

## 2.2. ERRORES AL APLICAR LA TEORIA DE ROTOR CILINDRICO A UN ALTERNADOR CON ROTOR DE POLOS SALIENTES

Cuando se aplica la teoría de rotor cilíndrico a una máquina con rotor de polos salientes, se está despreciando el efecto magnetizante preferencial en el sentido del eje "d", -- que se opera en esta última, llevando a considerar que  $X_d = X_q$  *cilindrico*

consecuentemente se introducen errores que prevalecen bajo determinadas condiciones, y según el uso que quiera hacerse de un determinado cálculo; para el análisis respectivo es necesario realizar la construcción de los diagramas para ambas teorías en forma superpuesta.

Previamente hay que anotar que los valores que normalmente se pueden conocer de un alternador sincrónico son: el voltaje en sus bornes  $V$ , la corriente de carga  $I$ , el ángulo del factor de potencia  $\phi$ , y las reactancias sincrónicas  $X_s$  o  $X_d$  y  $X_q$

La teoría de rotor cilíndrico no trae dificultades en su construcción geométrica, en tanto que la de polos salientes conlleva a fijar las componentes  $I_d$  e  $I_q$  de la corriente  $I$ , lo que a su vez presupone el conocimiento del ángulo  $\phi + \delta$ , cosa que no es posible sin antes hacer algunas demostraciones de orden geométrico.

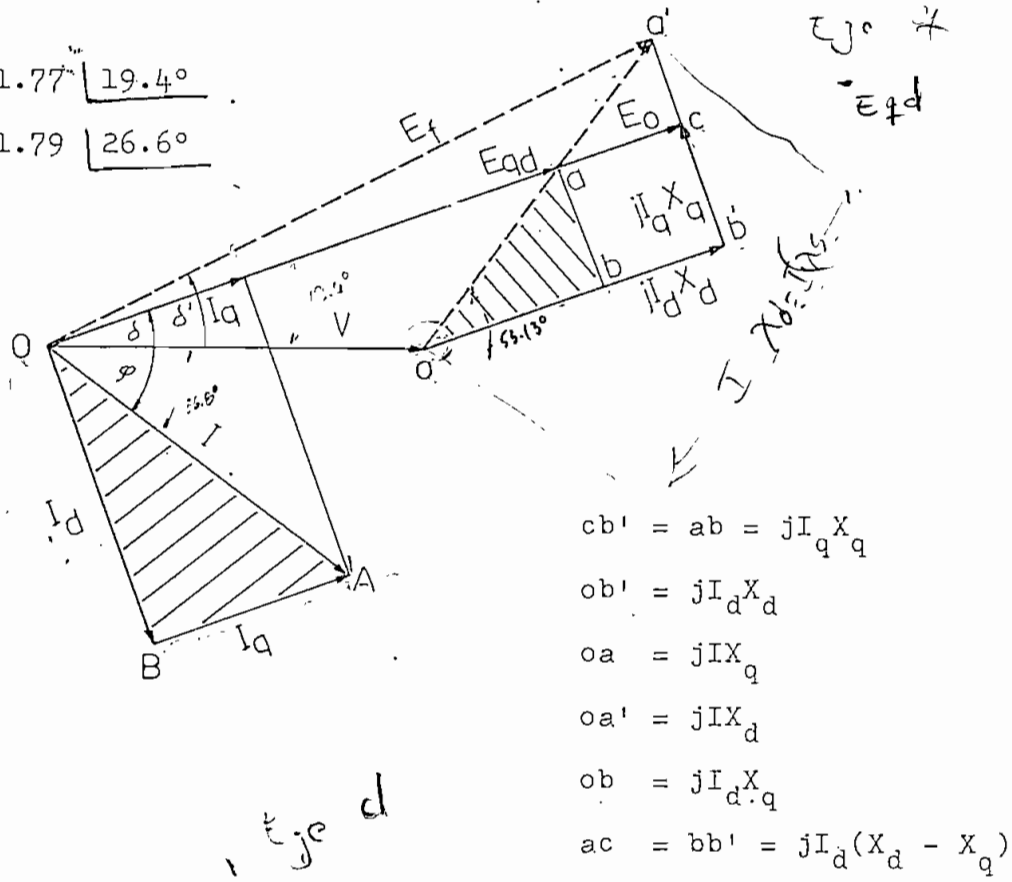
El diagrama de la Fig. 4 corresponde a la superposición de las 2 teorías para un mismo alternador de polos salientes, funcionando como generador; sus magnitudes se han adoptado en forma arbitraria, tratando que guarden relación con la práctica, además se ha asumido para  $X_s$  en la teoría de rotor cilíndrico igual a  $X_d$  y  $X_q$ , despreciándose la resistencia del devanado inducido.

Las magnitudes adoptadas son las siguientes:

$V = 1.0$ pu.	$X_s = 1.0$ pu.	$R_a = 0.$
$I = 1.0$ pu.	$X_d = 1.0$ pu.	
$\cos \phi = 0.8$ atrasado	$X_q = 0.6$ pu.	

$$E_o = 1.77 \angle 19.4^\circ$$

$$E_f = 1.79 \angle 26.6^\circ$$



$$cb' = ab = jI_q X_q$$

$$ob' = jI_d X_d$$

$$oa = jIX_q$$

$$oa' = jIX_d$$

$$ob = jI_d X_q$$

$$ac = bb' = jI_d (X_d - X_q)$$

Fig. 4

Del diagrama anterior se puede observar que los triángulos OAB y oab son semejantes por tener sus respectivos lados perpendiculares, pudiendo establecerse la siguiente relación:

$$\frac{oa}{OA} = \frac{ba}{BA} \Rightarrow oa = \frac{ba}{BA} OA \Rightarrow oa = \frac{jI_q X_q}{I_q} I \therefore oa = jIX_q$$

Con ésta demostración se puede fijar ya la posición angular del fasor  $E_o$ , mediante la suma vectorial de  $V$  y  $jIX_q$ , y determinar además las componentes  $I_d$  e  $I_q$  de la corriente  $I$ , y consecuentemente el resto de parámetros del diagrama.

Con el fin de observar las condiciones en que tiene mayor repercusión la aplicación de la teoría de rotor cilíndrico es preciso realizar el análisis de los diagramas en función -- de  $\cos \varphi$ , es decir observando la variación del fasor  $E_o$  en -- magnitud y ángulo para factores de potencia 0.9 en atraso y en adelante, suponiendo el voltaje terminal constante, en un supuesto generador con rotor de polos salientes, con los parámetros restantes iguales a los del diagrama anterior.

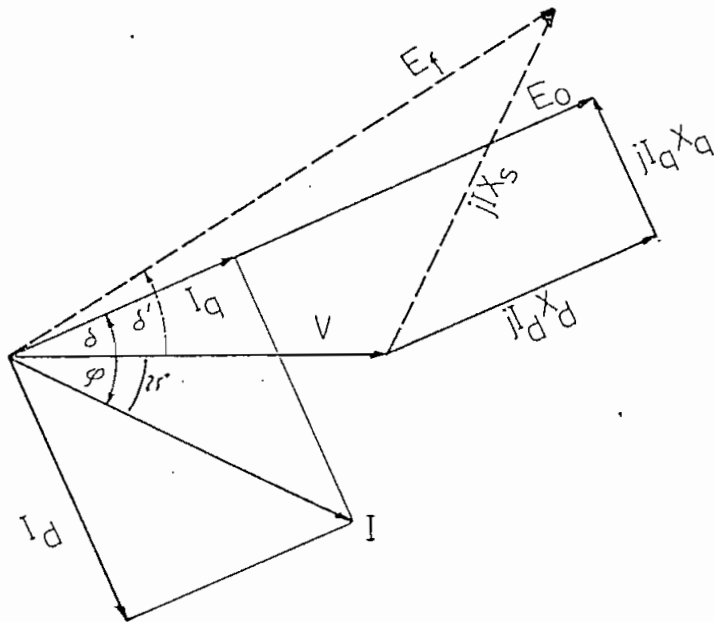


Fig. 5

Diagramas de tensiones para ambas teorías con  $\cos \varphi = 0.9$  atras.

Valores calculados:

T. R. de polos salientes	$E_o = 1.6741$	$\delta = 23.17^\circ$
T. R. cilíndrico	$E_f = 1.6946$	$\delta' = 32.08^\circ$
diferencia	0.0205	8.91°



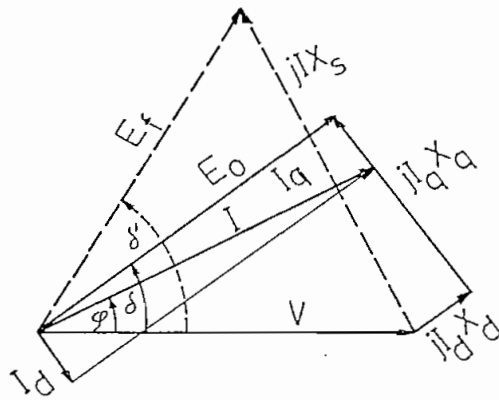


Fig. 6

Diagramas de tensiones para ambas teorías con  $\cos \varphi = 0.9$  adel.

Valores calculados:

T. R. de polos salientes	$E_0 = 0.9866$	$\delta = 36.17^\circ$
T. R. cilíndrico	$E_f = 1.0622$	$\delta = 57.92^\circ$
diferencia	0.0756	21.75°

Del diagrama de la Fig. 5 se puede comprobar que la magnitud de  $E_0$  casi no tiene diferencia para las 2 teorías, observándose sí diferencia en cuanto a sus desplazamientos angulares  $\delta$ ; teniendo en cuenta que para condiciones normales de operación de un generador, los valores de  $\cos \varphi$  son cercanos al asumido, se puede establecer que para condiciones normales de operación la aplicación indiscriminada de la teoría de rotor cilíndrico no traería errores significativos, en cuanto a regulación de voltaje, requerimientos de excitación, eficiencia; en cambio no prestaría precisión razonable en cálculos del par y ángulo de potencia para una máquina de polos salientes.<sup>3</sup>

Ahora poniendo atención en el segundo caso, es decir - para  $\cos \delta = 0.9$  en adelanto, se nota que las diferencias se acentúan más, aunque en la magnitud de  $E_o$  y  $E_f$  la diferencia es poco significativa en relación a la diferencia de sus posiciones angulares; esto supone establecer que la aplicación de la teoría de rotor cilíndrico a una máquina con rotor de polos -- salientes, actuando como generador a factores de potencia en -- adelanto, es decir en condiciones de subexcitación, no es recomendable, especialmente en cálculos que involucran el ángulo -- de potencia  $\delta$ , por ejemplo de estabilidad.<sup>3</sup>

### 1.3. ARTIFICIO GEOMETRICO EN LA CONSTRUCCION DE DIAGRAMAS FASORIALES ASOCIANDO AMBAS TEORIAS, PARA EVITAR ERRORES<sup>8</sup>

Este subtema tiene como objeto, justificar la construcción de un diagrama fasorial especial para rotor de polos salientes, mediante un artificio geométrico que asocie las dos teorías, y permita en el siguiente capítulo construir con facilidad los lugares geométricos a la estabilidad y al límite térmico del campo, obviando introducir errores en el ángulo de -- carga  $\delta$ , que como se vió en el numeral anterior constituye la parte crítica de la aplicación indiscriminada de la teoría de rotor cilíndrico, especialmente para su aplicación en estabilidad.

Partiendo de la figura 4, y buscando simplicidad en la representación de los diagramas, es deseable que el polígono --

de fasores para la teoría de polos salientes de tal figura, -- sea remplazado por un triángulo de fasores que normalmente corresponde a la teoría de rotor cilíndrico, con tal fin en el --

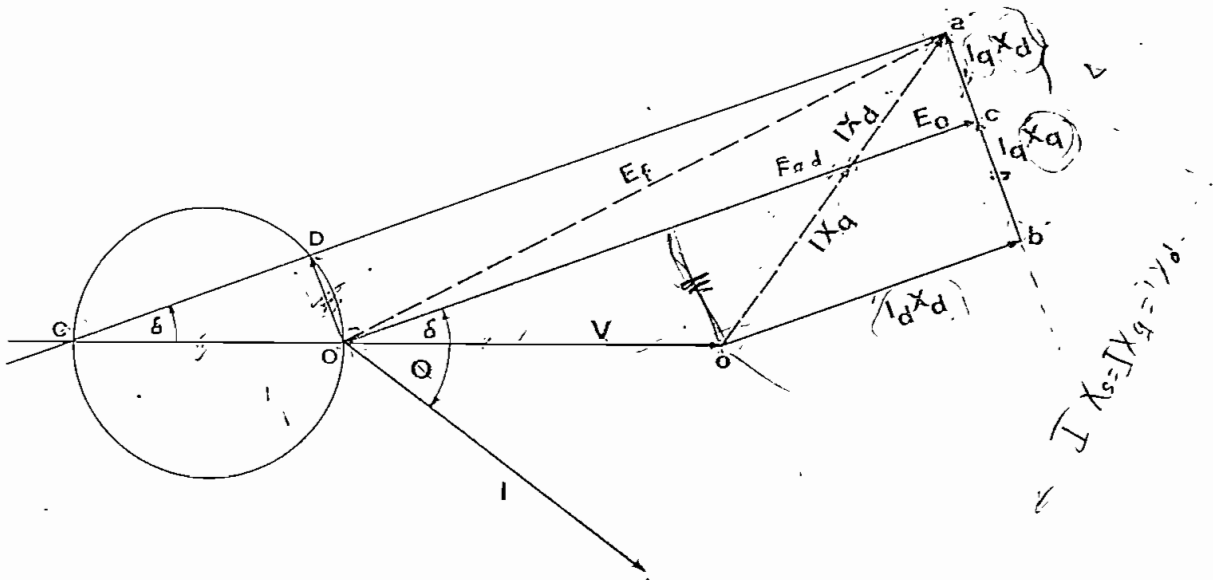


Fig. 7

diagrama de la figura 7, desde la prolongación de  $b'c$  a  $b'a'$  -- se traza una paralela a  $Oc$ , que corte a la prolongación de  $Oo$  en  $C$  y sobre  $OC$  tomándolo como diámetro se traza un semicírculo que corta  $Ca'$  en  $D$ , de manera que  $b'a'$  representa  $I X_d$  y --  $oa'$  representa  $I X_q$ ; por geometría  $Oc = Da' = E_o$ , mientras que el diámetro del semicírculo puede ser determinado de la siguiente manera:



En la figura anterior  $Oo$  representa  $V/X_d$  que es la corriente de cortocircuito del alternador sin excitación;  $Oa'$  representa  $I$ , la corriente de armadura; y si por el punto " $o$ " superponemos un sistema de ejes coordenados de manera que el eje de las abscisas coincida con  $Oo$ , podemos comprobar geométicamente que el ángulo formado por la corriente  $I$  y el eje vertical es igual a  $\phi$ , por lados perpendiculares;  $Da'$  representa el voltaje interno dividido por  $X_d$ , es decir la corriente de cortocircuito con excitación de plena carga, para condiciones de carga nominal;  $DO = a'c$  puede ser considerada como la contribución por el efecto de polos salientes al voltaje interno en la figura 7, y como la contribución por el mismo efecto a la corriente de campo en la figura 8.

El mismo diagrama aplicando un procedimiento similar al del diagrama para corrientes puede ser expresado en función

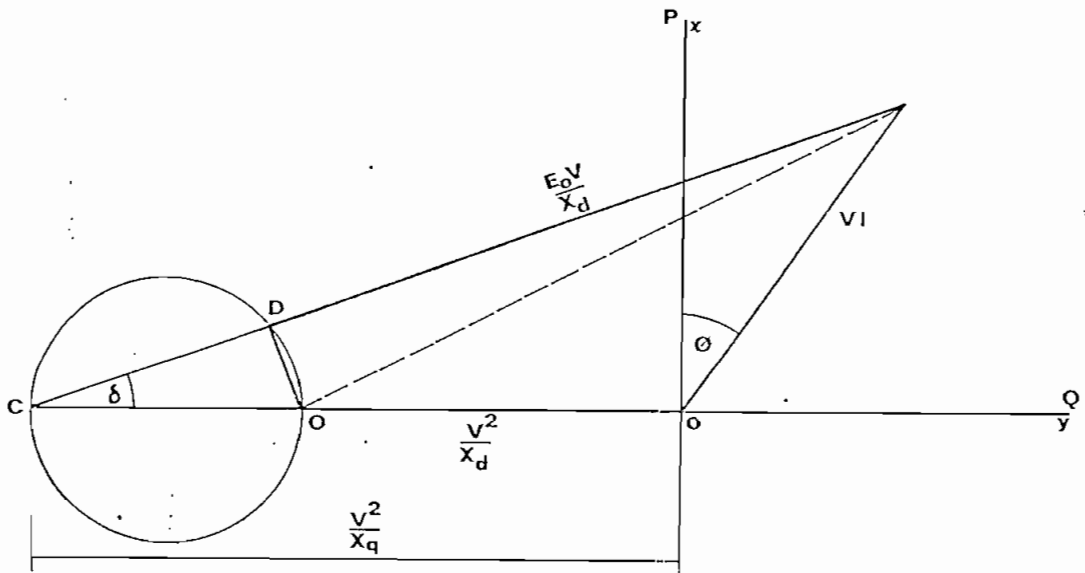


Fig. 9

de potencias, si se lo multiplica por el voltaje terminal que para este estudio será constante, en la figura 9 se puede ver tal representación más algunas simplificaciones que clarifican sus componentes básicas.

Finalmente, como se puede apreciar en los diagramas se debe recalcar que con la construcción especial que se ha realizado, el ángulo de carga  $\delta$  se ha mantenido inalterado del diagrama original, la magnitud de  $E_o$  tampoco ha cambiado, de manera semejante la corriente de armadura y el ángulo  $\phi$  mantienen la misma magnitud y posición a las obtenidas para la teoría de polos salientes, esto garantiza la validéz de estos nuevos diagramas.

## CAPITULO II

### DESARROLLO DE LOS DIAGRAMAS DE POTENCIA PARA GENERADORES

#### \* 2.1. FACTORES LIMITANTES EN LA OPERACION DE GENERADORES

En el campo específicamente eléctrico los factores que gravitan preponderantemente en la operación de un generador -- son los siguientes:

- La estabilidad considerando al generador conectado a una red infinita.
- La elevación de la temperatura en el devanado del campo, sobre los niveles permisibles.
- Elevación de la temperatura en el devanado estátorico
- La potencia mecánica que se dispone en la máquina impulsora.
- La corriente mínima de campo que puede ser proporcionada por la excitatriz.

Estos factores deberán ser tomados en cuenta para las distintas condiciones requeridas de un generador en operación, con el fin de preservar en buenas condiciones el aislamiento de los devanados, como para evitar un funcionamiento inestable del sistema y una pérdida de sincronismo del generador operado. \*

Cada uno de los factores mencionados serán estudiados en los siguientes numerales.

## 2.2. LIMITE POR ESTABILIDAD

### 2.2.1. DESCRIPCION INTRODUCTORIA DEL PROBLEMA DE LA ESTABILIDAD EN LA OPERACION DE GENERADORES

Para iniciar esta parte del estudio es preciso definir algunos términos respecto a la estabilidad, así, se dice que un sistema es estable cuando todas sus máquinas permanecen en sincronismo;<sup>7</sup> para la operación de generadores existe un límite por estabilidad según su condición específica de funcionamiento, de estado estable o de estado transitorio en el sistema; puesto que las cartas de operación se requieren para estado estable, es necesario definir el límite de estabilidad para tal condición:

El límite de estabilidad en estado estable de un circuito particular de un sistema de potencia, se puede definir como la máxima potencia en un puesto de recepción del circuito, que puede ser transmitida sin pérdida de sincronismo, si la carga se incrementa en pasos muy pequeños y si la corriente de campo es cambiada después de cada incremento de carga, tal que se restablezcan las condiciones normales de operación, manteniendo el voltaje terminal constante.<sup>6</sup>

La anterior definición involucra que el control de voltaje de los generadores sea hecho en forma manual por el operador, mientras que para el caso en que la corriente de excita



ción sea incrementada en forma simultanea al incremento de carga, mediante la utilización de un regulador de voltaje, tal definición corresponde al límite de estabilidad en estado estable con equipo automático, también llamado "límite de estabilidad dinámico".<sup>6</sup>

El presente trabajo cubre el límite de estabilidad para el caso en que el voltaje sea controlado manualmente, teniendo en cuenta que tal límite es perfectamente aplicable a generadores con regulador de voltaje, puesto que constituye un límite conservador debido a las ventajas que un generador tiene frente al problema de la estabilidad con la inclusión de este equipo, lo que se hará referencia en la última parte de este numeral.

Para analizar el problema de la estabilidad en la operación de generadores, hay que mencionar algunas características respecto a la toma de carga reactiva por parte de éstos.

Cuando un solo generador suministra potencia a una carga aislada, el factor de potencia y los KVA reactivos son definidos por la carga, mientras que en un sistema en que varios generadores funcionando en paralelo suministran potencia a una carga, la división de los KVA reactivos entre los generadores es determinada por la excitación de cada uno de ellos, en este sistema la variación de la excitación de un generador tendrá como efecto principal variar la corriente reactiva suministrada por la máquina, en tanto que el voltaje del sistema será

mantenido por los otros generadores, puesto que ellos balancearán colectivamente los KVAR variados. Incrementando la corriente de excitación el generador suministra más KVAR en atraso, - mientras que reduciendo la corriente de excitación, suministrará menos KVAR en atraso o inclusive KVAR en adelanto.<sup>12</sup>

El campo magnético de los generadores controla el voltaje del sistema y provee el acople electromagnético que transmite potencia desde la máquina impulsora al sistema eléctrico; a veces hay una área de conflicto entre estas dos funciones, - cuando por razones económicas en el suministro de potencia, -- las unidades más eficientes toman cargas fuertes durante períodos de baja carga en el sistema, en tales condiciones los generadores requieren de campos relativamente fuertes para mantenerse en sincronismo, mientras la demanda de corriente de campo para mantener el voltaje del sistema es menor debido a la permanente conexión de elementos capacitivos, proveyendo reactivos en adelanto a veces en exceso a los demandados por la carga en esos períodos; el regulador de voltaje del generador tiende a mantener el voltaje especificado, reduciendo el campo a valores más bajos de los requeridos para mantener un acoplamiento estable entre la máquina impulsora y el sistema eléctrico.<sup>11</sup>

En un sistema real la gran cantidad de líneas de transmisión, subtransmisión y distribución transportando KVA hacia los centros de consumo, así como la instalación permanente de

bancos de capacitores en los sistemas de distribución, reducen los requerimientos de excitación de los generadores, debilitando los márgenes de estabilidad durante períodos de poca carga.

Es por lo tanto necesario para la operación de generadores bajo tales condiciones proveer al operador de curvas que le permitan suministrar la corriente de excitación adecuada para que el generador se mantenga en sincronismo con el sistema.

2.2.2. DETERMINACION MATEMATICA E INTERPRETACION GEOMETRICA DE LOS PUNTOS CRITICOS DE OPERACION ESTABLE, DE UN GENERADOR DE POLOS SALIENTES CONECTADO A UNA BARRA INFINITA - ATRAVES DE UNA REACTANCIA EXTERNA<sup>10</sup>

El modelo del sistema que será utilizado para el análisis, está conformado por un generador sincrónico de polos salientes, entregando potencia a un gran sistema representado por -- una barra infinita, a través de una reactancia externa  $X_e$ , el voltaje en los terminales del generador es controlado por un regulador de voltaje, activado por señales de voltaje las cuales actúan sobre la excitatriz para mantener el voltaje terminal en un valor determinado, el efecto del regulador sobre la estabilidad no será tomado en cuenta, el modelo está representado en la figura 10.

En la figura 11, está representado el diagrama fasorial para el generador del modelo de sistema planteado, en éste se incluye el efecto de la reactancia externa, suponiendo

Fig. 10

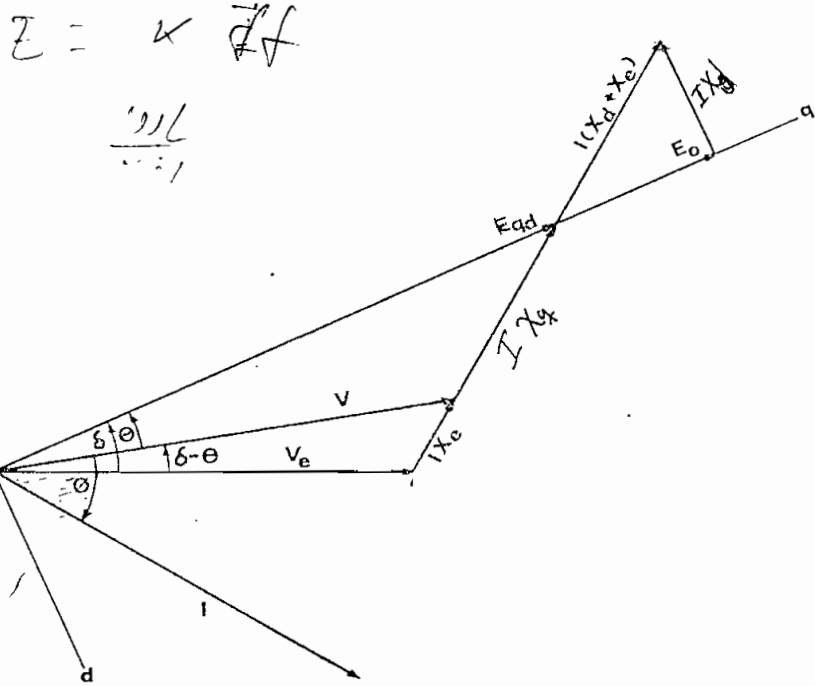
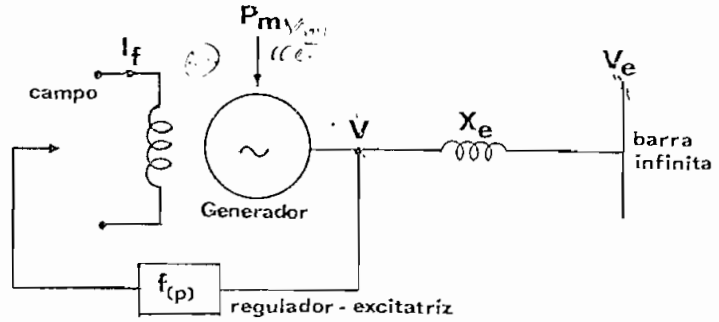


Fig. 11

que el generador entrega potencia a factor de potencia en atraso.

En la figura 12, el diagrama ~~anterior~~ <sup>posterior</sup> se lo construye bajo el procedimiento del numeral 1.3., en función de potencias mediante la multiplicación de cada fasor por  $V_e / (X_d + X_e)$ ; y dimensionado de tal manera los ejes, que en el eje verti-

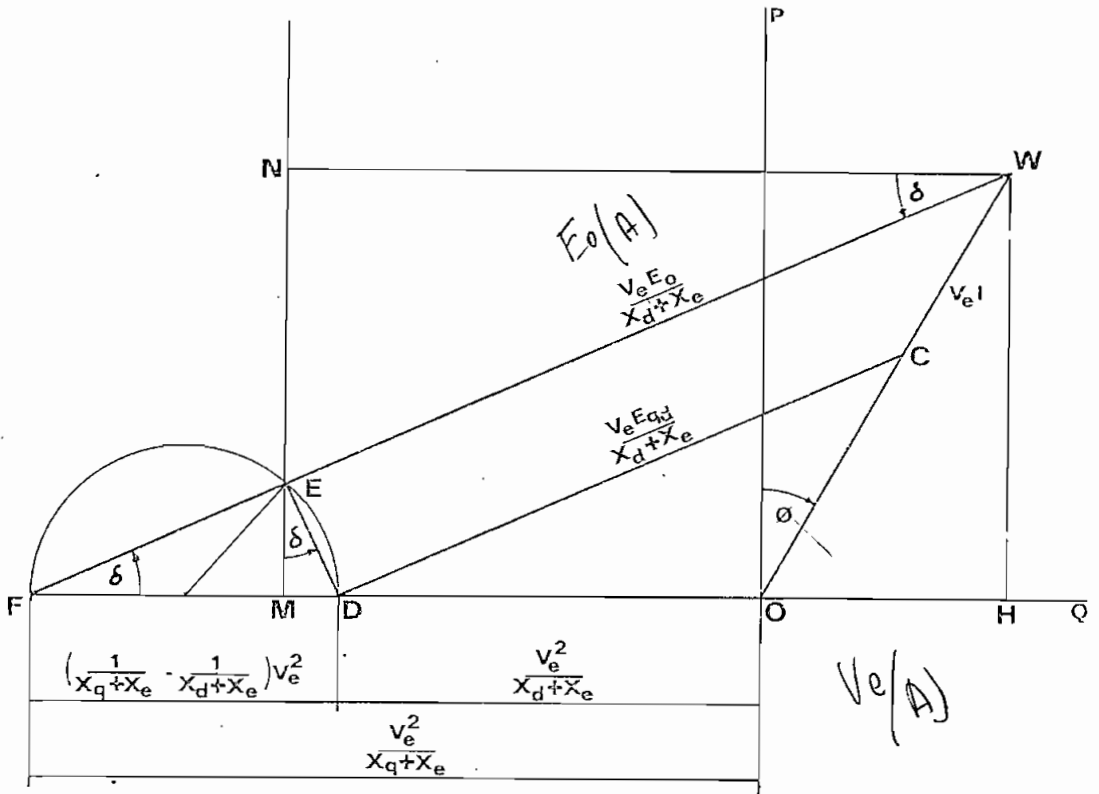


Fig. 12

cal se puede leer la potencia activa entregada, mientras en el eje horizontal la potencia reactiva, a la derecha los KVAR en atraso y a la izquierda los KVAR en adelanto; desde este diagrama se puede encontrar que la potencia activa está determinada por la proyección del punto W sobre el eje vertical. El punto W se lo llama punto de trabajo del generador.

La potencia activa está dada por:

$$P = NE + EM$$

$$= \frac{VeEo}{X_d + X_e} \text{sen } \delta + \frac{Ve^2}{2} \left( \frac{1}{X_q + X_e} - \frac{1}{X_d + X_e} \right) \text{sen } 2\delta \quad (1)$$

Para el límite de operación estable con excitación fija, es decir  $E_o$  constante, debe cumplirse que:

$$\frac{dP}{d\delta} = 0 = \frac{VeE_o}{X_d + X_e} \cos \delta + Ve^2 \left( \frac{1}{X_q + X_e} - \frac{1}{X_d + X_e} \right) \cos 2\delta \quad (2)$$

Puesto que los triángulos OFW y ODC son semejantes, puede establecerse la siguiente relación:

$$\frac{FW}{FO} = \frac{DC}{DO}$$

$$\frac{\frac{VeE_o}{X_d + X_e} + Ve^2 \left( \frac{1}{X_q + X_e} - \frac{1}{X_d + X_e} \right) \cos \delta}{\frac{Ve^2}{X_q + X_e}} = \frac{\frac{VeE_{qd}}{X_d + X_e}}{\frac{Ve^2}{X_d + X_e}}$$

Simplificando la expresión anterior:

$$\frac{VeE_o}{X_d + X_e} = \frac{VeE_{qd}}{X_q + X_e} - Ve^2 \left( \frac{1}{X_q + X_e} - \frac{1}{X_d + X_e} \right) \cos \delta$$

Multiplicando la expresión anterior por  $\cos \delta$ :

$$\frac{VeE_o}{X_d + X_e} \cos \delta = \frac{VeE_{qd}}{X_q + X_e} \cos \delta - Ve^2 \left( \frac{1}{X_q + X_e} - \frac{1}{X_d + X_e} \right) \cos^2 \delta \quad (3)$$

Remplazando (3) en (2):

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{VeE_{qd}}{X_q + X_e} \cos \delta + Ve^2 \left( \frac{1}{X_q + X_e} - \frac{1}{X_d + X_e} \right) (\cos 2\delta - \cos^2 \delta)$$

Resolviendo  $\cos 2\delta$  en la expresión anterior:

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{VeEqd}{X_q + X_e} \cos \delta - Ve^2 \left( \frac{1}{X_q + X_e} - \frac{1}{X_d + X_e} \right) \sin^2 \delta = 0 \quad (4)$$

Por la semejanza de los triángulos OFW y ODC tenemos

$$\frac{FW}{FO} = \frac{DC}{DO} = \frac{FW}{\frac{VeEqd}{X_d + X_e}} = \frac{\frac{Ve^2}{X_q + X_e}}{\frac{Ve^2}{X_d + X_e}} = FW = \frac{VeEqd}{X_q + X_e}$$

Por lo tanto:

$$FH = \frac{VeEqd}{X_q + X_e} \cos \delta \quad (5)$$

Por otro lado dentro del semicírculo tenemos que:

$$MD = Ve^2 \left( \frac{1}{X_q + X_e} - \frac{1}{X_d + X_e} \right) \sin^2 \delta \quad (6)$$

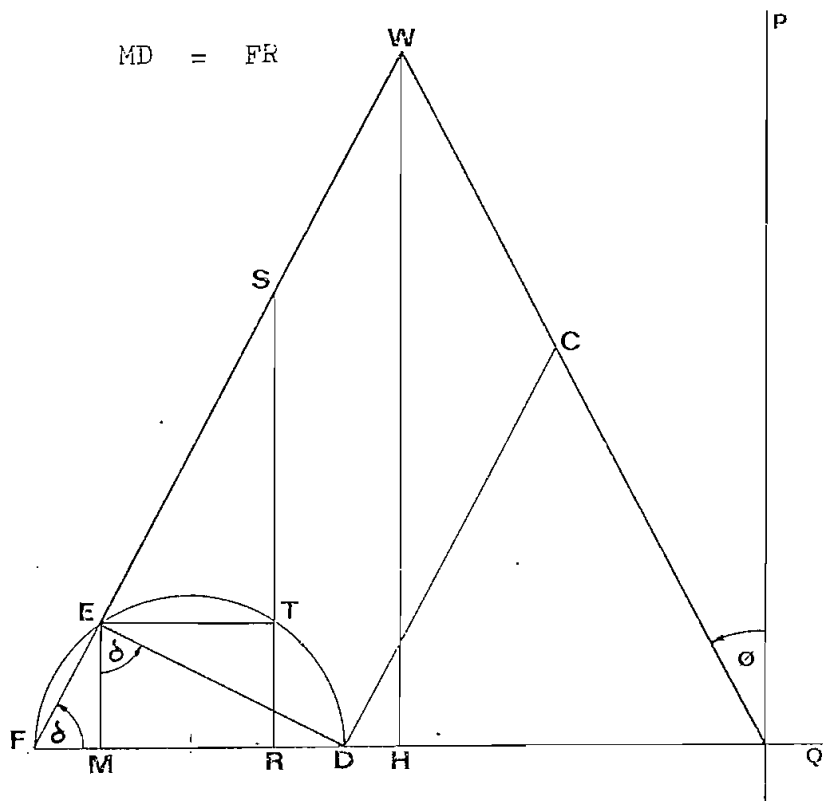
Reemplazando las expresiones (5) y (6) en la ecuación (4), obtenemos que:

$$\frac{dP}{d\delta} = FH - MD \quad (7)$$

Ahora haciendo el análisis para operación del genera -

dor correspondiente a factor de potencia en adelanto (Fig. 13) en una región severamente subexcitada, cuyo punto de trabajo  $W$  se encuentra cercano al límite de estabilidad, es evidente geométricamente que:

Fig. 13



Por lo tanto la expresión (7) quedaría:

$$\frac{dP}{d\delta} = FH - FR = RH = 0$$

Interpretando geométricamente este resultado, el punto crítico de operación estable ocurre cuando la proyección  $RH$  se hace cero, es decir cuando la excitación se reduce de tal manera que el punto de trabajo  $W$  coincide con  $S$ .

En conclusión el punto crítico de operación estable para excitación fija es el punto  $S$ .



2.2.3. CONSTRUCCION DEL LIMITE TEORICO Y DEL LIMITE PRACTICO-  
DE ESTABILIDAD, SU VALIDEZ PARA GENERADORES DE ROTOR -  
CILINDRICO<sup>10</sup>

En virtud del resultado obtenido en el numeral ente --  
rior, es posible ahora construir una curva límite de estabili-  
dad para estado estable, que corresponda al lugar geométrico -  
de los puntos  $S$  para distintos valores del ángulo de carga , -  
como se muestra en la figura 14.

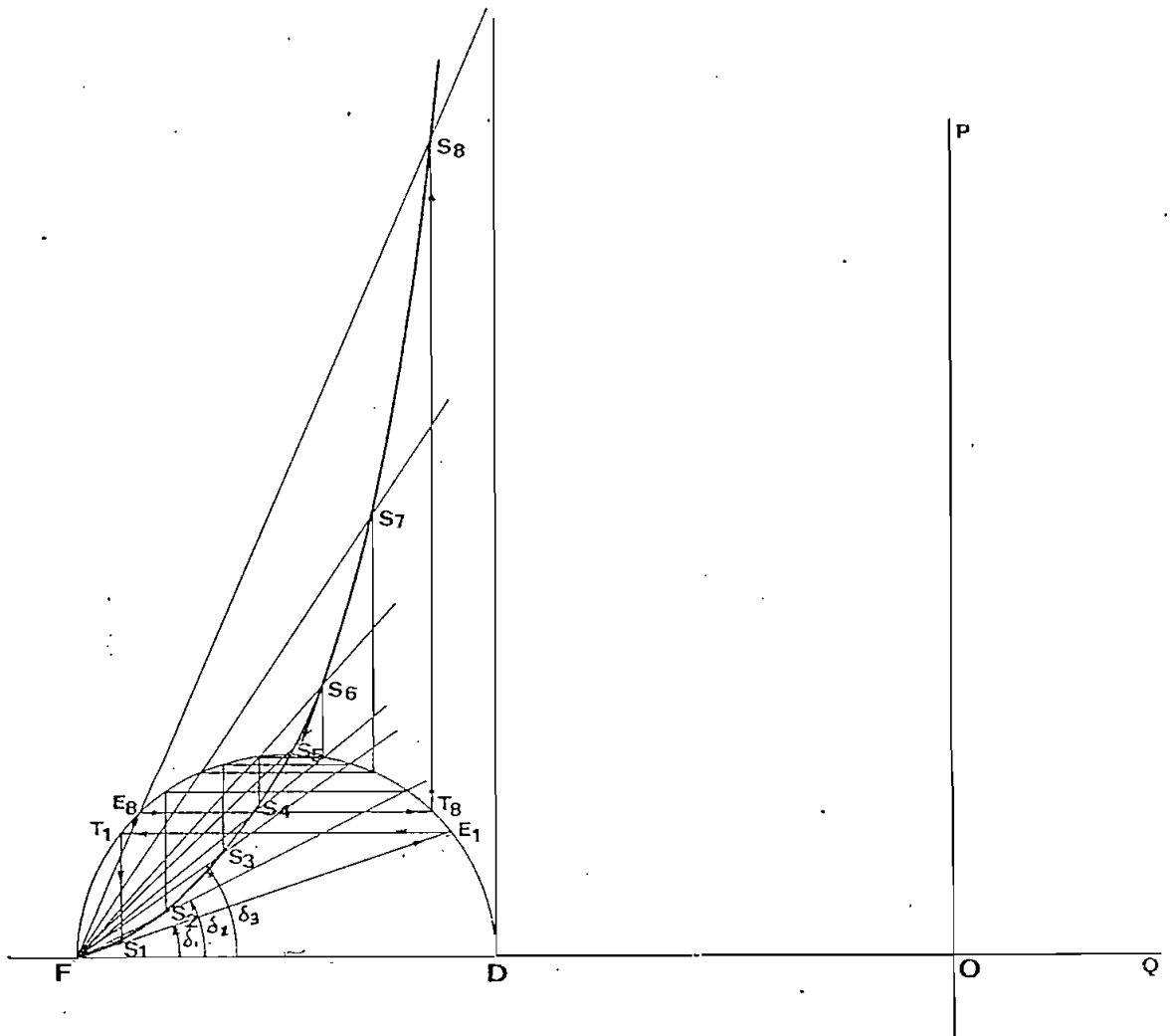


Fig. 14

La construcción anterior corresponde a un límite teórico, pero en la práctica es inadmisibles operar un generador en valores cercanos a este límite, por esta razón es necesario implementar un límite de estabilidad práctico reduciendo al límite teórico, para permitir un incremento adicional de carga de un 10 % o 20 %, antes que se presente inestabilidad; este margen de seguridad cubre también contra: falta de precisión en las constantes de la máquina y del sistema, que afectan los cálculos teóricos; variaciones en el sistema en estado estable, incrementos en las reactancias debido a pérdidas en las líneas de transmisión, etc. La curva se la construye del modo siguiente

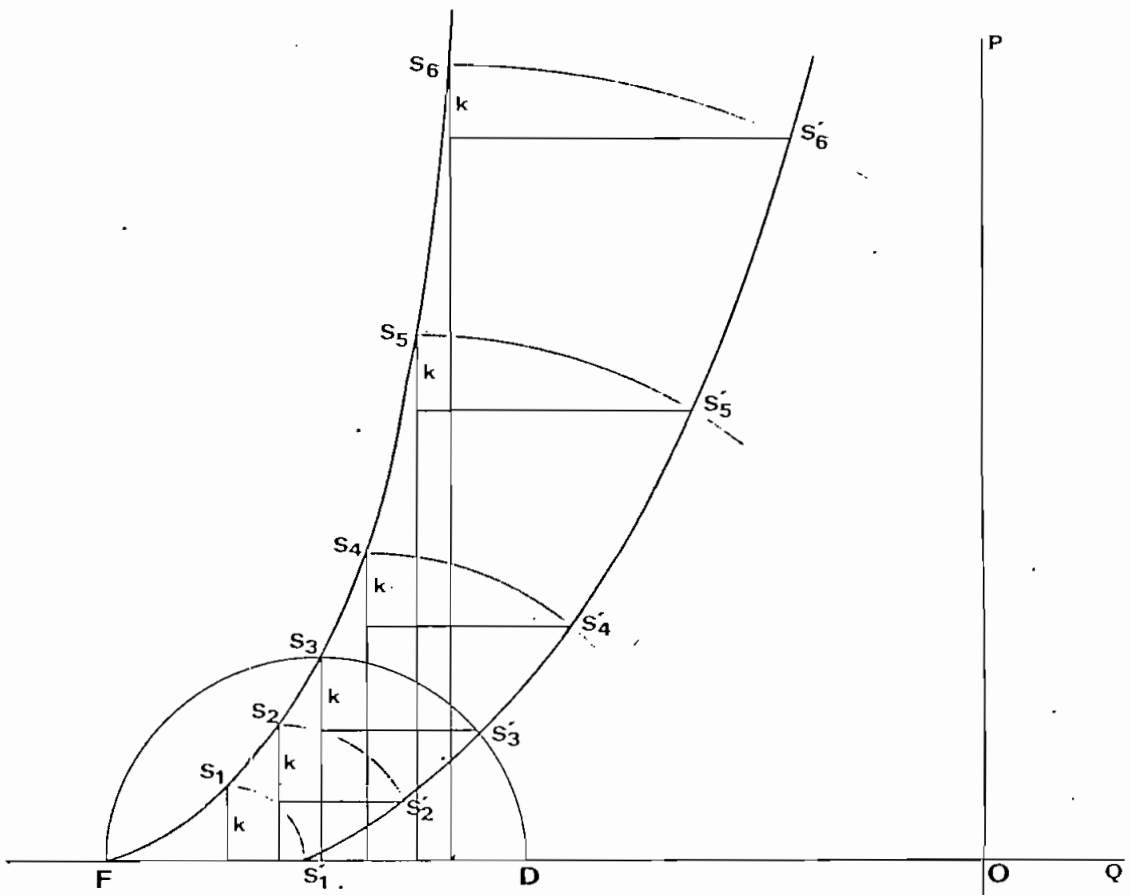


Fig. 15

te ( Fig. 15 ):

Sobre los puntos  $S$  del límite teórico se trazan arcos de circunferencia con centro en el punto de proyección de tales puntos sobre el eje de las abscisas, luego se reduce el 10% o 20% de la potencia activa a la ordenada de los puntos  $S$ , y para este nuevo valor de la ordenada se traza paralelas al eje de las abscisas, hasta cortar con los arcos de circunferencia en los puntos  $S'$ , de esta manera los puntos  $S'$  constituyen el nuevo límite de estabilidad práctico.

Los resultados y procedimientos obtenidos hasta el momento en los numerales 2.2.2. y 2.2.3., son perfectamente va

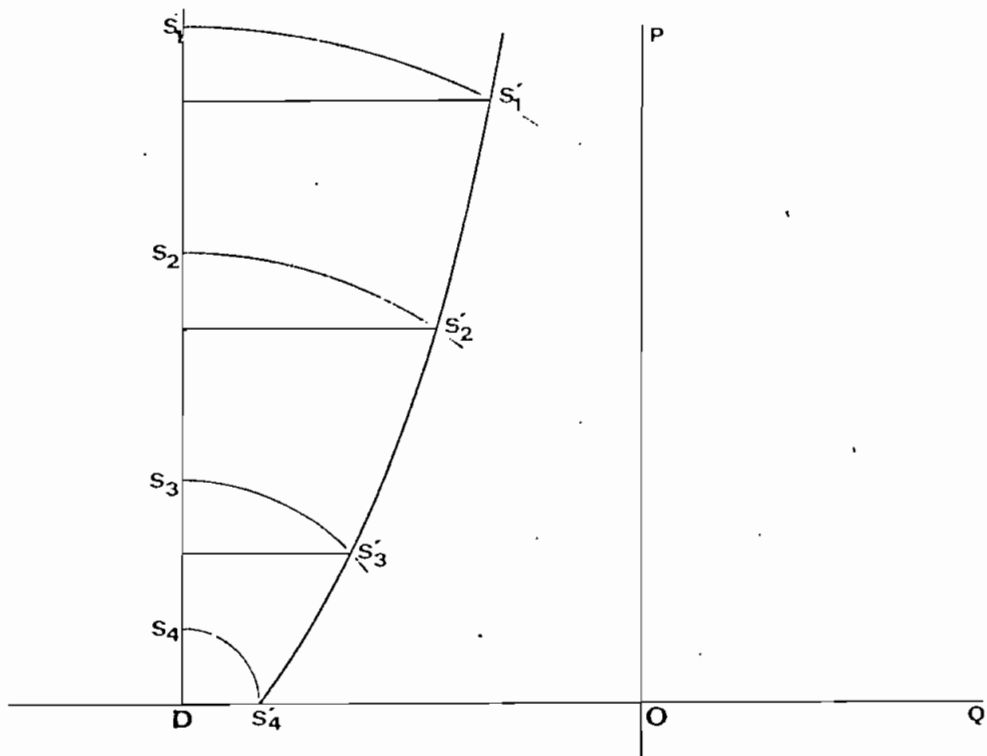


Fig. 16

lidos y aplicables a generadores de rotor cilíndrico, puesto - que para este tipo de generadores,  $X_d = X_q$ , el diámetro formado para polos salientes se hace cero, y el límite teórico de - estabilidad pasa a ser la recta vertical sobre el punto D, pa-  
 ra conseguir el límite práctico se aplica el mismo procedimiento ya mencionado, como se presenta en la figura 16.

Poniendo atención a los diagramas anteriores se confirma que el ángulo crítico para estabilidad en estado estable en una máquina con rotor de polos salientes, se produce para valores menores de  $90^\circ$ , mientras que para éste valor se cumple en-  
 la de rotor cilíndrico. Otra cosa que se puede advertir grafi-  
 camente es como las saliencias polares en el rotor, extienden el límite con relación al rotor cilíndrico, comprobándose la -  
 ventaja de polos salientes en tales generadores.

#### 2.2.4. INFLUENCIA DEL SISTEMA DE EXCITACION SOBRE EL LIMITE DE ESTABILIDAD DE LOS GENERADORES <sup>6</sup>

*conclusión*

\* Entre los factores que influyen sobre el límite de estabilidad, está el sistema de excitación y regulación de voltaje que tengan los generadores, de manera general la inclusión de-  
 un equipo de regulación automática de voltaje, eleva los lími-  
 tes de estabilidad en proporción directa a la velocidad de respuesta que tengan los mismos. ✓

Simplificadamente la forma en que actúa la regulación -  
 de voltaje sobre la estabilidad es la siguiente: si uno o más

generadores están suministrando potencia a un sistema, en un punto de trabajo cercano al límite de estabilidad, y se produce una mayor demanda de potencia del sistema, el punto de trabajo del generador se desplaza a otro superior, para cumplir con los requerimientos de la carga, si la excitación no se incrementa, el ángulo de carga se incrementará de una manera peligrosa hasta que la máquina pierda sincronismo, entonces, el papel ideal del regulador de voltaje y del sistema de excitación consiste, en que para incrementos de carga el regulador, incremente automáticamente la excitación a fin de impedir un incremento del ángulo de carga, permitiendo así que el generador continúe en sincronismo y elevando el límite de estabilidad a valores próximos al teórico, naturalmente que para tal caso la respuesta del sistema de excitación debería ser instantánea, cosa que en la práctica no es posible, sin embargo con la utilización de equipos bastante rápidos se logra elevar en algún porcentaje el límite práctico de estabilidad.

### 2.3. LIMITES POR CONDICIONES TERMICAS EN LOS DEVANADOS

En las máquinas eléctricas las pérdidas de energía eléctrica y mecánica, tienen lugar como resultado de la transformación de estos tipos de energía en calor, que eleva la temperatura de ciertas partes de la máquina. Para el funcionamiento confiable de una máquina, el calentamiento de cualquiera de sus partes debe estar reducido a límites determinados.

La vida que se puede esperar de una máquina, está íntimamente ligada con la temperatura de servicio, debido a que la degradación de los materiales aislantes es función del tiempo durante el cual están sujetos a altas temperaturas, como de la magnitud de las mismas; la degradación es causada principalmente por un fenómeno químico de oxidación lenta, que endurece -- los aislamientos volviendolos frágiles y quebradizos, en detrimento de su duración mecánica y de su rigidez dieléctrica.<sup>1</sup>

Por estas razones la carga admisible de una máquina, -- en este caso los generadores sincrónicos, se determina ante todo por la temperatura admisible de los materiales aislantes que -- se utilizan para su construcción.

### 2.3.1. CLASES DE AISLAMIENTO

La resistencia de los materiales usados para el aislamiento eléctrico de las máquinas es afectada por muchos factores, tales como los esfuerzos mecánicos y eléctricos que provocan expansiones y contracciones de los devanados y sus partes-circundantes, con los cambios de carga y temperatura; vibraciones; exposición a deterioros atmosféricos, como la humedad, -- elementos químicos, polvo, etc.<sup>13</sup> Por lo tanto además de la requerida resistencia al calor, los materiales aislantes deben -- satisfacer varios requerimientos suplementarios, como:<sup>2</sup>

- Alta rigidez dieléctrica de los materiales, tanto en condi--

ciones de temperatura ambiente normal, como en las de funcionamiento de la máquina.

- Resistencia a las sollicitaciones mecánicas, con un grado adecuado de elasticidad.
- Mínimas pérdidas dieléctricas tanto en frío como en caliente
- Alta resistividad en caliente.

Los materiales aislantes utilizados en la construcción de máquinas eléctricas, se clasifican por su resistencia al calor en las siguientes clases: Y u O, A, E, B, F, H, y C. identificándose cada una por su máxima temperatura permisible en servicio continuo, como se muestra en la tabla 1.<sup>13</sup>

Clase	Máxima temperatura continua permisible	Máxima elevación de temperatura permisible
Y u O	90 °C	50 °C
A	105	65
E	120	80
B	130	90
F	155	110
H	180	135
C	sobre 180	-

La tabla anterior es dada por las normas VDE 0530 de junio de 1967; Esta tabla no tiene el carácter de definitiva, puesto que continuamente se mejoran las características de los

materiales.

### 2.3.2. LIMITES DE TEMPERATURA Y ELEVACION DE TEMPERATURA PERMISIBLES<sup>13</sup>

Los límites permisibles de temperatura están dados por la máxima temperatura en condiciones de servicio continuo que puede resistir el aislamiento de las máquinas; cada clase de aislamiento, tiene su respectivo límite de temperatura como se indica en la tabla del numeral anterior.

La temperatura que alcanzan los devanados o una pieza de una máquina, no depende únicamente del calor engendrado por las pérdidas eléctricas y mecánicas, sino también de la temperatura del medio refrigerante; por esta razón las normas establecen un límite para la elevación de temperatura, dada por la diferencia entre la temperatura final de una determinada pieza y la del medio refrigerante, en la que esta última no deberá sobrepasar los 40 °C., los límites de elevación de temperatura para las distintas clases de aislamiento, también están dadas en la tabla anterior.

Las máquinas eléctricas deben estar diseñadas y fabricadas de tal modo que para carga nominal, las elevaciones de temperatura estén dentro de los límites indicados. Si en condiciones reales la temperatura del medio refrigerante es mayor de 40 °C, se deberá reducir la carga; si por el contrario la temperatura del medio refrigerante es menor que 40 °C, esto no



debe ser motivo para sobrecargar la máquina de su potencia nominal.

Cuando las máquinas son diseñadas y probados sus límites de elevación de temperatura en alturas menores a 1000 m. - sobre el nivel del mar, y puestas a funcionar en alturas superiores, como la de Quito ( 2800 m.), las máximas temperaturas de elevación y del medio refrigerante deberán ser reducidas en el 1 %, por cada 100 m. sobre los 1000 m.; esto sería la máxima temperatura del medio refrigerante para la ciudad de Quito de 32.8 °C.

La corrección anterior no es necesaria cuando la disminución en la capacidad de enfriamiento del aire es compensada por el sistema de ventilación.

- NOTA .- Al final de este trabajo, en el apendice "B", se exponen algunas definiciones de términos que se utilizan en esta parte del trabajo.

### 2.3.3. CONSTRUCCION DEL LIMITE TERMICO DEL CAMPO<sup>s</sup>

Teniendo en cuenta que las máquinas están diseñadas para un funcionamiento confiable en su capacidad nominal, el límite que se establece para condiciones térmicas del campo, es el correspondiente a la corriente del campo necesaria para sustentar condiciones nominales de operación; para generadores -- con enfriamiento de hidrogeno, el límite constituye la máxima

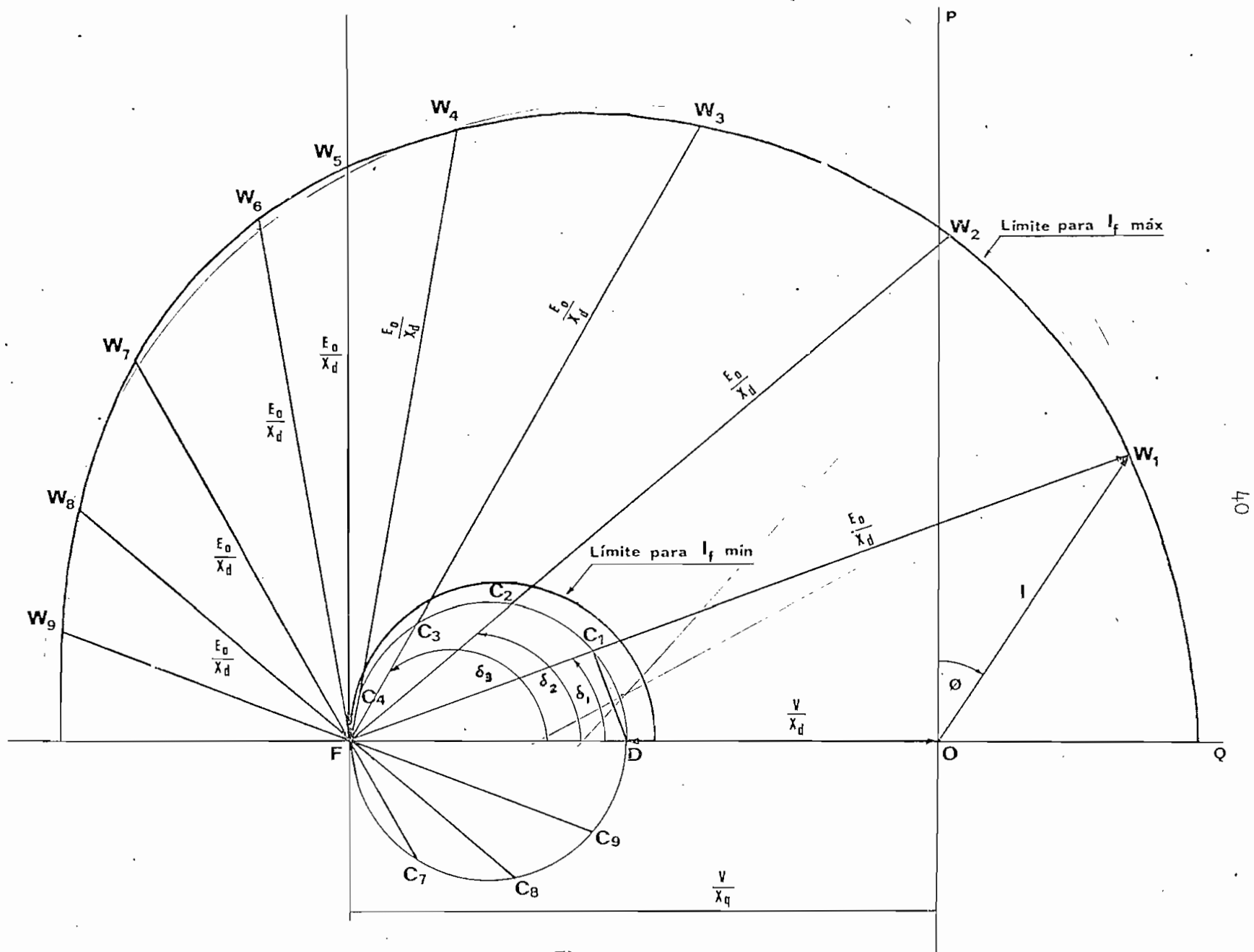


Fig. 17

corriente de campo permisible bajo las distintas presiones de hidrógeno.

Puesto que el voltaje interno de una máquina síncrona es directamente proporcional a la corriente de excitación, entonces partiendo del diagrama de corrientes de la figura 8, se puede trazar el límite térmico del campo, como el lugar geométrico de los puntos de trabajo para  $E_o$  nominal constante, cuando varía el ángulo de carga  $\delta$  entre  $0$  y  $180^\circ$ , su construcción se muestra en la figura 17 de la página anterior.

#### 2.3.4. CONSTRUCCION DEL LIMITE TERMICO DE LA ARMADURA<sup>9</sup>

Como límite térmico de la armadura se establece la corriente nominal que puede fluir por el devanado estático, su

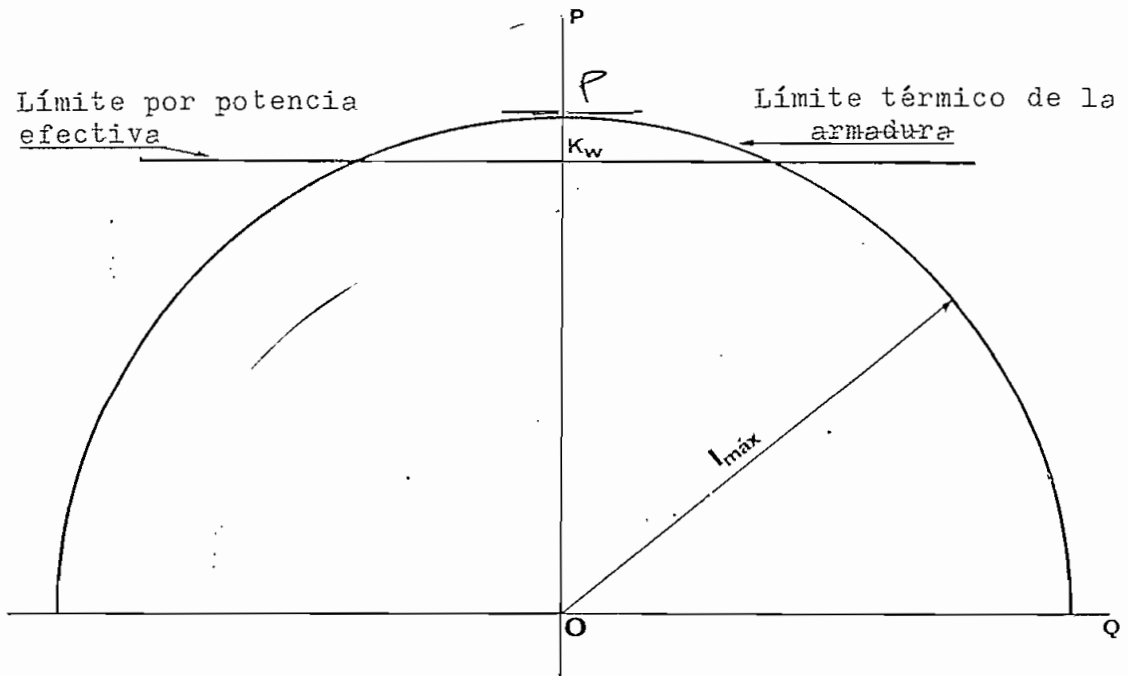


Fig 18

construcción corresponde desde la figura 8, al lugar geométrico para  $I_n$ , cuando el ángulo de factor de potencia  $\phi$  varía entre 0 y 180°, como se muestra en la figura 18.

#### 2.4. LIMITE POR CORRIENTE MINIMA DE EXCITACION

En los diagramas de operación de generadores es necesario definir, un límite para mínima corriente de excitación, a fin de evitar la pérdida de sincronismo del generador debido a insuficiente excitación, a menudo inclusive los sistemas de excitación de los grandes alternadores, están diseñados para que la corriente de excitación no se reduzca de ciertos valores.<sup>9</sup>

En este trabajo se ha dispuesto arbitrariamente un límite mínimo para el 5 % de la corriente de excitación nominal, éste se puede notar en la figura 17, y su construcción es la misma que para el límite térmico del campo.

#### 2.5. LIMITE POR POTENCIA EFECTIVA

Es conocido que la potencia activa que se puede obtener de un generador sincrónico, está determinada por la potencia efectiva de la máquina impulsora, para la mayoría de los casos la potencia nominal de las turbinas o motores que mueven los generadores, es igual a la potencia activa nominal del generador, desde luego que esta no es la potencia máxima, pero si la potencia garantizada que se puede obtener de la máquina impulsora, puesto que existe un margen de reserva para requerimien-

tos emergentes.

Para este trabajo se tomará como límite la potencia activa nominal del generador. Sin embargo si por desgaste, deterioro u otras razones, la potencia que pueden normalmente delivering las máquinas impulsoras se reduce, el límite de potencia efectiva tendrá que tomarse en un valor menor; la construcción de este límite se muestra en la figura 18.

## 2.6. CONSTRUCCION DE UN DIAGRAMA PRACTICO PARA LA OPERACION DE GENERADORES<sup>9</sup>

Los límites definidos anteriormente, son imprácticos - en la operación de generadores, si se los toma individualmente por lo tanto se los debe superponer a fin de obtener un solo - límite conjunto, tomando en cuenta las situaciones en que prevelecen cada uno de ellos, este límite lo constituyen un conjunto de curvas que encierra el área donde la operación será - confiable.

Sin embargo con esta simple delimitación el diagrama no prestaría la suficiente claridad para operar un generador, ya que además es necesario conocer el punto de trabajo dentro del diagrama, esto se consigue dimensionando ambos ejes coordenados para valores reales de potencia activa y reactiva en los ejes vertical y horizontal respectivamente; trazando las líneas que representan los distintos ángulos de factor de potencia; y lo más importante, trazando los lugares geométricos pa-

DIAGRAMA P-Q PARA GENERADORES SINCRONOS

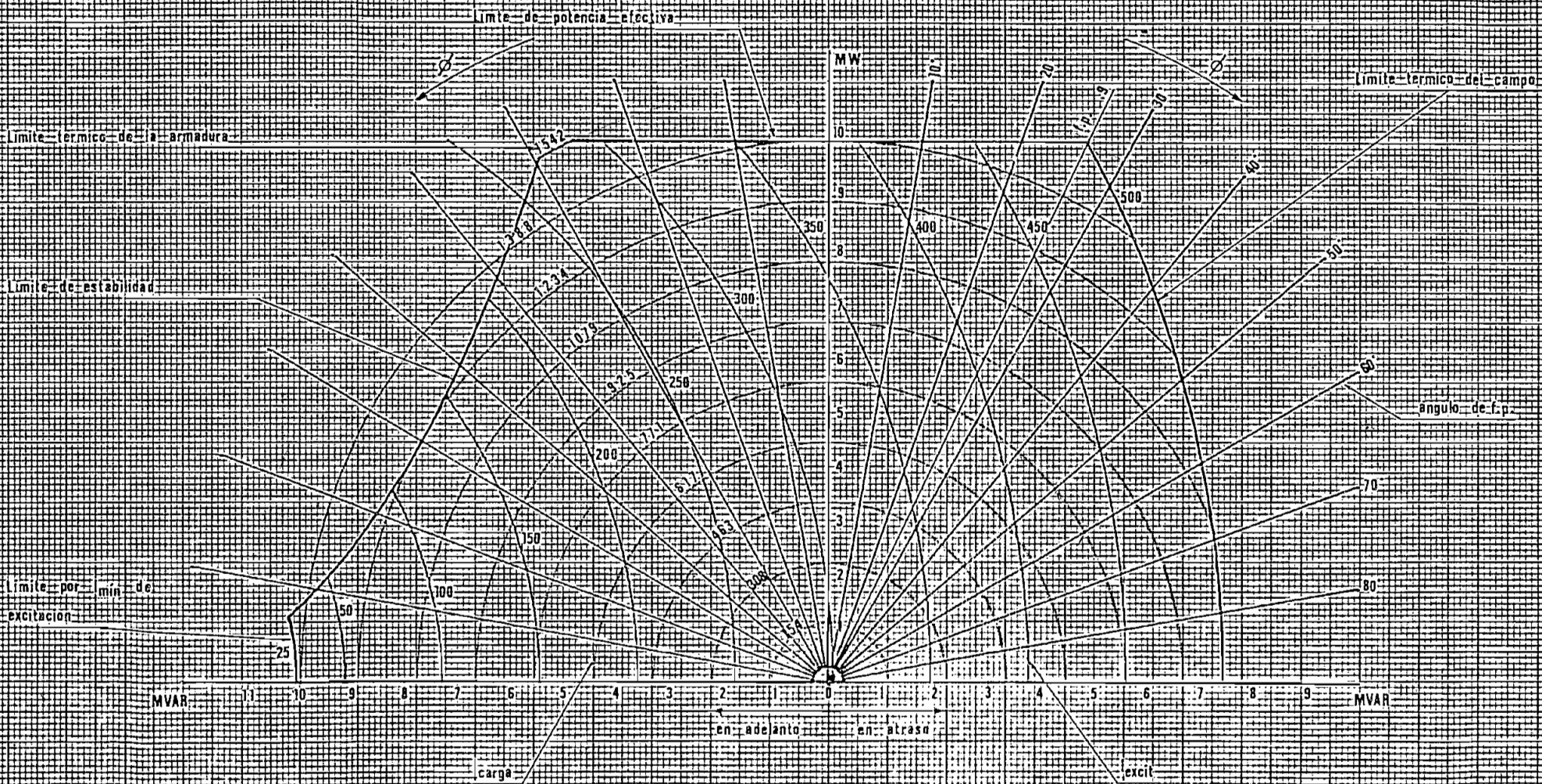


Fig. 19

ra distintos valores de la corriente de carga y de campo, de esta manera el operador que cuenta además en su panel de trabajo con instrumentos tales como medidores de: Kw, KVAR,  $\cos \phi$  I de carga, I de excitación, puede con valores de 2 cualesquiera de los instrumentos anteriores, situar fácilmente el punto de trabajo, y dirigir en base a esa posición sus maniobras en la operación del generador.<sup>9</sup>

En la figura 19 de la página anterior se puede apreciar el diagrama completo ejecutado por el computador con la ayuda de un grafizador en diferentes colores, que corresponden mediante el siguiente código a los distintos tipos de curvas límites:

Rojo .... perfil limitante

Azul .... corriente de carga ( A. )

Verde ... corriente de excitación ( A. )

Negro ... ángulos de factor de potencia

Para el anterior diagrama se han utilizado los siguientes valores:

$$V = 1.0 \text{ p.u.} \quad (4160 \text{ V.})$$

$$P_n = 0.9 \text{ p.u.} \quad (10 \text{ Mw.})$$

$$X_d = 1.012 \text{ p.u.}$$

$$X_q = 0.567 \text{ p.u.}$$

$$X_e = 0.2 \text{ p.u.}$$

$$I_m = 1.0 \text{ p.u.} \quad (1542 \text{ A.})$$

$$I_{fn} = 1.0 \text{ p.u.} \quad (500 \text{ A.})$$

En el presente ejemplo se puede observar que el perfil limitante está conformado por los segmentos de curvas más interiores, para su construcción todas las curvas están referidas a un mismo centro, (al punto F de las figuras anteriores), el ángulo de factor de potencia tiene como referencia el eje vertical, a partir del cual se desplaza a izquierda y derecha a intervalos de  $10^\circ$ .



### CAPITULO III

#### PROGRAMA DIGITAL PARA LA EJECUCION DE LOS DIAGRAMAS Y APLICACION DE LOS MISMOS

Si bien la construcción manual de las curvas para los diagramas de operación de generadores, no demandan complejidad en su ejecución, puesto que requiere únicamente de un elemental equipo de instrumentos de geometría, en cambio si requieren de tiempo para la obtención de los diferentes puntos que conforman el lugar geométrico de cada curva, por esta razón en este trabajo se ha implementado un programa digital, que mediante la ayuda de un grafizador, trace los diagramas en menor tiempo y con mayor precisión; Algunos detalles del programa se exponen en los siguientes numerales.

#### 3.1. DEDUCCION DE LAS EXPRESIONES MATEMATICAS QUE DEFINEN CADA LIMITE

Para efectos del programa a continuación se deducen las expresiones matemáticas que definen cada una de las curvas que conforman los diagramas de operación; todos ellos referidos a un mismo eje de coordenadas, y en función de los parámetros propios de la máquina.

3.1.1. LIMITE DE ESTABILIDAD

La siguiente figura corresponde a la obtención de un punto de la curva para el límite práctico de estabilidad, de

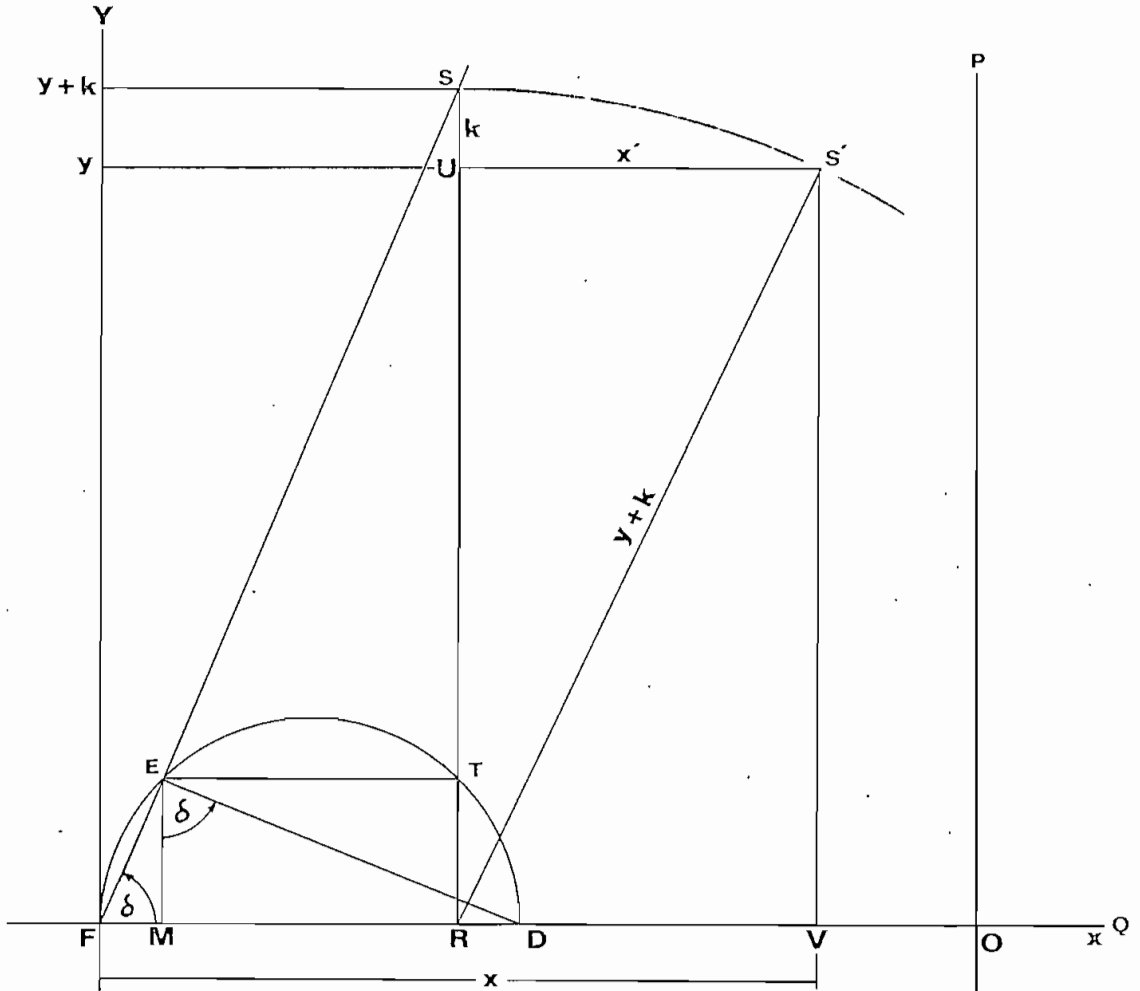


Fig. 20

esta figura se puede establecer el radio del semicírculo FETD, que está dado por:

$$r = \frac{V_e^2}{2} \left( \frac{1}{X_q + X_e} - \frac{i}{X_d + X_e} \right)$$

Para el punto S' el valor de la abscisa será:

$$x = FR + RV \quad (1)$$

Por otro lado:

$$RV = x' \quad y \quad FR = MD$$

$$MD = ED \operatorname{sen} \delta \quad y \quad ED = FD \operatorname{sen} \delta = 2r \operatorname{sen} \delta$$

Entonces:

$$MD = 2r \operatorname{sen}^2 \delta$$

Remplazando las expresiones anteriores (1):

$$x = 2r \operatorname{sen}^2 \delta + x' \quad (2)$$

Desde el triángulo FSR se puede establecer que:

$$\operatorname{sen} \delta = \frac{y + k}{\sqrt{(x - x')^2 + (y + k)^2}} \quad (3)$$

y en el triángulo RUS'

$$\begin{aligned} x' &= \sqrt{(y + k)^2 - y^2} \\ x' &= \sqrt{k^2 + 2ky} \end{aligned} \quad (4)$$

Remplazando (3) y (4) en (2):

$$x = \frac{2r(y + k)^2}{(x - x')^2 + (y + k)^2} + \sqrt{k^2 + 2ky} \quad (5)$$

La expresión (5) entonces es la que define la curva del límite de estabilidad práctico para generadores de rotor de polos salientes.

En la expresión (5) se puede advertir que cuando:

$$X_d = X_q \quad \text{entonces} \quad r = 0$$

y la expresión quedaría únicamente con el segundo término, es decir la curva que define el procedimiento para obtener el margin de seguridad y que es el único que interviene para el caso de rotor cilíndrico; por lo tanto la expresión (5) es aplicable a ambos tipos de rotores.

Sin embargo debido a su forma y complejidad la expresión (5) es conveniente para los fines de programación ponerla como se expresa en (6):

$$x^3 - 3x'x^2 + (3x'^2 + (y + k)^2)x - ((y + k)^2(2r + x') + x'^3) = 0 \quad (6)$$

A esta ecuación se la ha evaluado para algunos valores a fin de obtener pares coordenados, que luego mediante una regresión polinómica cúbica, permitan obtener un polinomio de tercer grado más simple, que defina la curva.

### 3.1.2. CURVAS PARA CORRIENTE DE EXCITACION

La expresión matemática que define las curvas de máxima y mínima corriente de excitación, como de los distintos porcentajes de excitación es fácil deducir a partir de la figura 17, donde se puede ver que:

$$FB = FC + CB$$

$$FB = V \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos \delta + \frac{E_o}{X_d}$$

Si se toma como centro F, cada punto de esta curva ---  
obedece a las siguientes : cordenadas:

$$x = V \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos^2 \delta + \frac{E_o}{X_d} \cos \delta$$

$$y = \frac{V}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sen 2\delta + \frac{E_o}{X_d} \sen \delta$$

En las anteriores cordenadas se puede notar que para -  
rotor cilíndrico  $X_d = X_q$ , los primeros términos se hacen cero  
y lo que queda son las cordenadas que definen una circunferen-  
cia de radio  $E_o / X_d$ .

Para estas expresiones el valor de  $E_o$  límite, se calcu  
la mediante las siguientes fórmulas, para los valores nomina -  
les dados por la placa:

$$E_o = V \cos \delta + IX_d \sen(\delta + \phi)$$

Donde:

$$\delta = \text{tg}^{-1} \left( \frac{\cos \phi}{\frac{V}{IX_d} + \sen \phi} \right)$$

Estas expresiones son parte de algunas fórmulas prácti  
cas para los parámetros de la máquina sincrona, que se deducen  
en el Apéndice 1, al final del trabajo.

Para las distintas curvas entre máxima y mínima excitación se varía el valor de  $E_0 = I_f$  en por unidad.

### 3.1.3. CURVAS PARA CORRIENTE DE CARGA

Los lugares geométricos para las curvas de corriente de carga son semicircunferencias con centro en O y cuyo radio vale I, es decir:

$$x^2 + y^2 = I^2$$

Refiriendola al mismo centro del resto de curvas:

$$(x - V/X_q)^2 + y^2 = I^2$$

Puesto que la parte requerida es la superior:

$$y = + \sqrt{I^2 - (x - V/X_q)^2}$$

Las distintas curvas se consiguen variando I.

### 3.1.4. LIMITE DE POTENCIA EFECTIVA

Esta es la curva más sencilla, consiste en una recta paralela al eje de las abscisas, para el valor de los kilovatios nominales en la ordenada, es decir:

$$y = kw$$

### 3.2. CARACTERISTICAS Y FORMA DE USO DEL PROGRAMA

El programa se ha desarrollado para el sistema de computación TEKTRONIX 4051 de la Facultad de Ingeniería Eléctrica bajo la dirección del Sr. Ing. Efraín Del Pino.

La razón para haber escogido este sistema radica en -- las bondades que el mismo presenta en la ejecución de diagramas, así: los trazos se obtienen aparentemente en línea llena, en el mismo diagrama se obtienen líneas en diferentes colores, se puede utilizar cualquier tipo de papel, por ejemplo papel -- milimetrado, además da la opción de hacer coincidir las divisiones del papel a voluntad con los requerimientos del gráfico.

El programa está escrito en lenguaje BASIC, en 536 instrucciones, bajo el nombre OCTOBRAR/PROGRAMA y almacenado en un DISQUETTE, que se encuentra a cargo del Ing. Efraín Del Pino.

El programa ha sido diseñado para ser ejecutado en forma "interactiva", es decir el computador va haciendo preguntas que deben ser contestadas para continuar con la ejecución.

Para la utilización del programa se procede primeramente a cargarlo en el computador, para luego comenzar su ejecución con el comando RUN.

Los datos que el computador requiere para la ejecución del diagrama P-Q de un generador son los siguientes:

$$V$$

$$\cos \varphi$$

$$X_q$$

$X_d$  $X_e$  $I_m$ 

Estos valores deben ser ingresados en p.u., en las pro  
pias bases de cada máquina.

Luego de ingresados los datos se procede a la obten --  
ción del diagrama, mediante la ejecución individual de los dis  
tintos tipos de curvas que lo conforman, para esto cada tipo  
de curva responde a una tecla de acuerdo al siguiente detalle  
que aparecerá en la pantalla del computador:

Tecla 5 -- GRAFICOS .- Ejecuta el perfil limitante del diagra  
ma, en los ejemplos realizados en este trabajo, éste tiene co  
lor rojo, para dar significación a una zona que no debe ser so  
brepasada en la operación de un generador.

Tecla 7 -- GRAFICO DE CURVAS PARALELAS A CURVA (2) .- Ejecuta  
las curvas que representan los lugares geométricos para distin  
tos valores de corriente de excitación, antes de su ejecución  
el computador solicita el valor del porcentaje de la corriente  
de excitación nominal que debe darse al intervalo entre los  
distintos L.G.; en este trabajo este tipo de curvas tienen co  
lor verde, e intervalos del 10 %.

Tecla 9 -- GRAFICO DE CIRCUNFERENCIAS .- Bajo el control de es  
ta tecla se encuentra la ejecución de las curvas que represen  
tan los lugares geométricos para distintos valores de corrien  
te de carga, también para estas curvas el computador solicita



el porcentaje de la corriente nominal como intervalo entre los distintos lugares geométricos, estas curvas están en color azul y a intervalos del 10 %.

Tecla 10 -- GRAFICO DE RECTAS RADIALES .- Ejecuta las rectas para los distintos ángulos de factor de potencia, a intervalos de 10°.

Con el fin de que los gráficos que se ejecutan en papel salgan centrados y que las unidades que se encuentra el diagrama coincidan con las divisiones del papel milimetrado, el computador solicita dos datos de la siguiente manera:

VALORES DE MARGENES HORIZONTALES :  $C_1 - X$  ;

" " " " :  $C_1 + X$  ;

Para el suministro de estos datos se debe tomar algunas precauciones:

En vista que es impredecible para algún conjunto de datos, establecer en forma precisa el número de unidades en sentido horizontal que va a ocupar el diagrama, así como su distribución a izquierda y derecha del eje vertical, se debe seguir el siguiente procedimiento; primeramente establecer el número de divisiones que se dispone en el papel, en sentido vertical y horizontal para realizar una correspondencia entre divisiones y unidades del diagrama; así por ejemplo para el papel utilizado en los ejemplos de este trabajo, éste dispone de 25 por 38 divisiones, mientras los diagramas requieren de 1 unidad de alto por aproximadamente 1.7 unidades de ancho, lo que lleva a

establecer una correspondencia de 20 divisiones por unidad con formando una ventana de utilización de 20 por 38 divisiones en el papel para el diagrama.

Para realizar el centrado del diagrama en el papel debe procederse a dar valores tentativos a los datos solicitados por el computador, para obtener el diagrama en la pantalla y luego con sucesivos "tanteos" aproximar un centrado adecuado.

Para el ejemplo que habíamos tomado podríamos dar los siguientes valores:

$$C_1 - X ; 1.0$$

$$C_1 + X ; 0.9$$

De esta manera estamos adjudicando 1 unidad para el lado izquierdo del diagrama y 0.9 unidades para el derecho, teniendo en cuenta que la suma es 1.9 unidades correspondientes a las 38 divisiones disponibles en el papel; de esta manera se obtendrá el diagrama en la pantalla y permitirá modificar en forma adecuada éstos valores para obtener un buen centrado.

En sentido vertical no va a existir problema en el centrado, en razón de que el diagrama siempre va a requerir un máximo de una unidad en este sentido, por lo que resulta fácil para la correspondencia de unidades escogida centrar el diagrama en el papel.

Para el dimensionamiento de los diagramas se requieren

los siguientes datos en unidades reales:

$$P_n$$
$$I_n$$
$$I_{fn}$$

Puesto que el diagrama está ejecutado en el sistema - p.u. se debe transformar a valores reales con los datos anteriores, para aplicarlos al diagrama.

### 3.3. EJEMPLOS DE APLICACION

Como ejemplos en la aplicación del presente estudio se ha tomado la ejecución de los diagramas P-Q para los generadores de tres centrales de la E.E.Q.; estas son las hidráulicas de Cumbayá I y II, que disponen de generadores con rotor de po los salientes y la central a gas de Guangopolo cuyo generador dispone de rotor cilíndrico, considerandose que son lo más representativo que se dispone.

Los datos y los diagramas obtenidos se encuentran a - continuación.

D A T O S

Central	CUMBAYA I	CUMBAYA II	GUANGOPOLO
Tipo de central	Hidráulica	Hidráulica	Gas
Grupos	TOSHIBA	AEG	WESTINGHOUSE
Año	1959	1964	1977
Número	2	2	1
R.P.M.	514	514	3600
Vn (V.)	4160	4160	13 800
Sn (KVA)	11 111	11 111	24 100
f.p.	0.9	0.9	0.85
I <sub>f</sub> nominal (A.)	500	425	760
X <sub>d</sub> (p.u.)	1.012	0.861	2.23
X <sub>q</sub> (p.u.)	0.567	0.641	2.17
X <sub>e</sub> (p.u.)	0.0	0.0	0.0
R.C.C.	1.103	1.183	---
Clase aislam.	B	B	B

## EXCITACION:

Tipo	Indep.	Indep.	Brushless
Vn (V.)	125	200	181.5
In (A.)	600	640	810
Refrigeración	aire	aire	aire
# de polos	14	14	2

### 3.3.1. ANÁLISIS DE LOS DIAGRAMAS OBTENIDOS

Para iniciar este análisis es importante advertir que los tres diagramas anteriores han sido ejecutados para valores de  $X_e = 0$ , esto supone decir que los generadores están conectados a una barra infinita a través de una reactancia externa nula, posteriormente el numeral 3.4. permitirá situar el efecto de tal adopción.

Un primer aspecto que se puede observar en los tres diagramas es la diferencia en la conformación del perfil limitante en el sector izquierdo con ángulos de factor de potencia en adelanto, así:

- Para Cumbayá I, el límite térmico de la armadura prevalece sobre el límite por estabilidad, por tal razón éste no aparece en el perfil limitante de tal sector.
- Para Cumbayá II, el límite térmico de la armadura prevalece sobre los límites por mínima corriente de excitación y de estabilidad, suplantándolos en sus respectivos sectores a ambos.
- Para el generador de la central a gas Guangopolo, en cambio el límite por concepto de estabilidad es el que prevalece sobre los límites por corriente mínima de excitación y térmico de la armadura.

De otra parte se puede notar el efecto que tienen los polos salientes en el diagrama P-Q, notándose que los generadores con rotor de polos salientes permiten una área más extensa de operación con relación a los de rotor cilíndrico, especial-

mente con ángulos de factor de potencia en adelanto.

Con respecto a la estabilidad se puede notar que el límite por tal concepto, prevalece fuertemente en el generador - con rotor cilíndrico, no así en los de rotor con polos salientes.

Otro aspecto de mencionarse, es que para el punto nominal de operación coinciden en su corte el límite térmico del - campo, el límite por potencia efectiva, el factor de potencia nominal y el límite térmico de la armadura, aún cuando este - último no aparece.

#### 3.4. EFEECTO DE LA REACTANCIA EXTERNA

La influencia de la reactancia externa sobre el perfil limitante del diagrama P-Q, se puede observar a través de la figura 24, donde se ha graficado una superposición de tales perfiles para un mismo conjunto de datos con diferentes valores de  $X_e$ , 0, 0.15, 0.35 p.u., pudiendo apreciarse que a medida que - aumenta  $X_e$ , el límite por estabilidad se hace más prevaleciente que los límites térmico de la armadura y por corriente mínima de excitación; es decir el aumento de la reactancia externa reduce el área de operación para un generador conectado a una red infinita por el lado de factor de potencia en adelanto.

EFEECTO DE LA REACTANCIA EXTERNA EN EL

DIAGRAMA P-Q

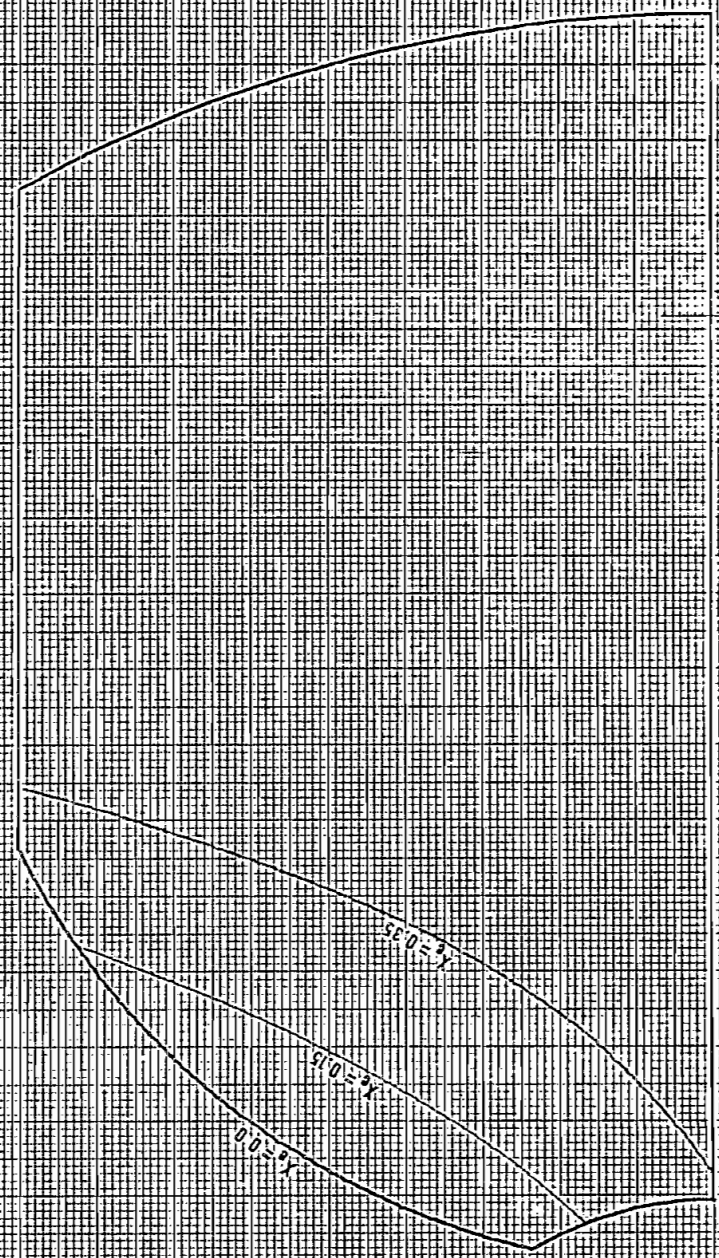


Fig. 24

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al finalizar este trabajo y como resultado del mismo, puedo afirmar que sus objetivos han sido logrados a cabalidad, en virtud de que los diagramas que se han obtenido presentan la claridad y precisión suficientes respecto de las características que de ellos se requiere para la finalidad deseada, esto es para la guía que se va a tener en ellos en la operación de generadores sincrónicos de centrales eléctricas.

Si bien la teoría aplicada para esta tesis no requiere de un alto grado de complejidad, ni tampoco ésta constituye una innovación en la materia, en cambio si creo que el trabajo viene a llenar un vacío en el campo de la operación de generadores, por el hecho de que por lo menos en algunas centrales de la E.E.Q., no se hace uso de los diagramas P-Q.

Por otra parte es de desearse que a nivel de operadores de las empresas eléctricas que operan en el país, estos diagramas fueran mejor difundidos, a fin de optimizar la operación de tales centrales.

Como recomendación sobre el tema, yo propondría la elaboración de los diagramas de potencia (P-Q), con aplicación general a la máquina síncrona y condensadores sincrónicos, que tengan en cuenta el efecto del regulador de voltaje y del sistema de excitación para el límite por concepto de estabilidad.



APENDICE A

FORMULAS PRACTICAS DE LOS PARAMETROS DE LA MAQUINA SINCRONA<sup>9</sup>

En este apéndice se desarrollan algunas fórmulas de interés para el cálculo de parámetros importantes de la máquina sincrónica de polos salientes, a partir de sus diagramas fasoriales; estas pueden aplicarse a la máquina de rotor cilíndrico, -teniendo en cuenta que  $X_d = X_q$ .

Desde el diagrama de la figura A-1, puede deducirse lo siguiente para el ángulo de carga  $\delta$ , suponiendo conocidos:  $V$ ,  $I$ ,  $X_q$ ,  $\phi$ .

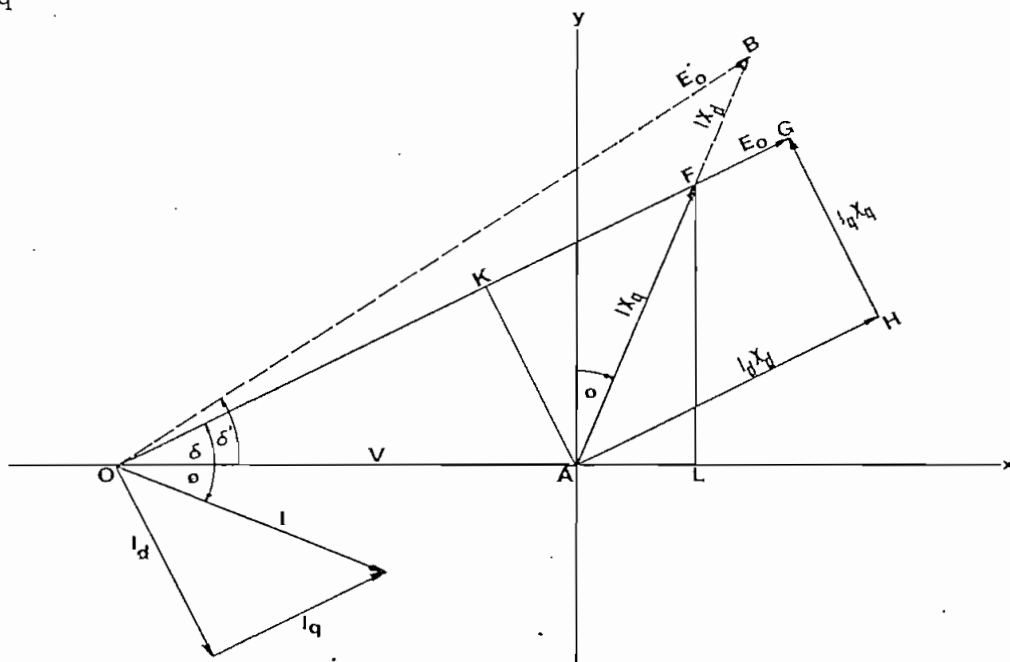


Fig. A-1

Tomando el triángulo OFL :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{IX_q \cos \phi}{V + IX_q \operatorname{sen} \phi}$$

$$\delta = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{\cos \phi}{\frac{V}{IX_q} + \operatorname{sen} \phi} \right) \quad (\text{A-1})$$

De manera similar el voltaje interno  $E_o$ , puede ser calculado conocidos:  $V$ ,  $I$ ,  $X_d$ ,  $\phi$ ,  $\delta$ . Desde la figura A-1, mediante la siguiente expresión:

Geoméricamente:

$$\begin{aligned} E_o &= OK + KG \\ &= OK + AH \\ &= V \cos \delta + I_d X_d \\ E_o &= V \cos \delta + IX_d \operatorname{sen}(\delta + \phi) \quad (\text{A-2}) \end{aligned}$$

De la expresión (A-1), se puede despejar  $I$ , suponiendo conocidos el resto de parámetros:

$$I = \frac{V}{X_q (\cos \phi / \operatorname{tg} \delta + \operatorname{sen} \phi)} \quad (\text{A-3})$$

Nota: Para la aplicación de estas fórmulas se considera  $\phi$  positivo cuando  $I$  atraza a  $V$ , y negativo cuando  $I$  adelanta a  $V$ .

APENDICE BDEFINICIONES IMPORTANTES<sup>13</sup>

En este apendice se encuentra la transcripción de algunas definiciones dadas por las normas VDE - 0530 de 1967, titulada "STANDARD SPECIFICATION FOR ROTATING ELECTRICAL MACHINES" referentes especialmente a términos térmicos.

- ESTADO DE OPERACION .- Bajo el término estado de operación se entiende el estado de una máquina en un instante dado, de finido por la totalidad de las magnitudes eléctricas, mecánicas y térmicas.
- SERVICIO .- El servicio de una máquina es definido por una secuencia de estados de operación, los cuales pueden diferir en naturaleza y tiempo.
- TIPO DE SERVICIO .- Tipo de servicio es el servicio convenido, el cual abarca uno o más estados de operación durante intervalos de tiempo fijados.
- SERVICIO NOMINAL .- Servicio nominal es el tipo de servicio asignado a la máquina por el constructor el cual es indicado en la placa, y definido por: carga nominal, voltaje nominal, corriente nominal, velocidad de régimen, factor de potencia-

- nominal, duración del ciclo de servicio nominal, factor de servicio, servicio de operación nominal.
- ESTADO DE OPERACION NOMINAL .- Estado de operación nominal es tal estado de operación el cual define el servicio nominal.
  - CARGA NOMINAL .- Carga nominal es tal carga a la cual corresponde el estado de operación nominal, para generadores de corriente alterna es la potencia eléctrica aparente en los terminales, expresada en VA, KVA, MVA.
  - EFICIENCIA .- Es la relación de la potencia efectiva de salida a la potencia efectiva de entrada.
  - FACTOR DE POTENCIA .- Factor de potencia es la relación de la potencia activa a la potencia aparente; para el caso de voltajes y corrientes sinusoidales.
  - EQUILIBRIO TERMICO .- Equilibrio térmico es tal estado alcanzado al cual la temperatura de las partes individuales de la máquina permanecen constantes, o varían en no más de 2 grados centígrados por hora.
  - LÍMITE DE TEMPERATURA .- O máxima temperatura continua permisible de un material aislante, es la temperatura a la cual el material aislante resistirá por un apreciable período de tiempo sin sufrir señal alguna de deterioración de sus propiedades eléctricas y mecánicas.
  - TEMPERATURA DEL MEDIO REFRIGERANTE .- La temperatura del medio refrigerante es la temperatura del medio refrigerante en el punto de su entrada a la máquina.

- ELEVACION DE TEMPERATURA .- Elevación de temperatura es la diferencia entre la temperatura de una parte de la máquina y la del medio refrigerante.
- ELEVACION DE TEMPERATURA FINAL .- Elevación de temperatura final es la elevación de temperatura al final de un proceso de calentamiento.
- MAXIMA TEMPERATURA .- Máxima temperatura es la más alta temperatura permisible de una parte de la máquina medible por medios prácticos.
- LIMITE DE ELEVACION DE TEMPERATURA .- Límite de elevación de temperatura es la más alta diferencia de temperatura permisible entre la máxima temperatura y la más alta temperatura convenida del medio de enfriamiento.
- EN VACIO .- O sin carga es la operación de la máquina bajo voltaje, como regla el voltaje nominal, sin aplicación de ninguna carga.

B I B L I O G R A F I A

- 1.- Fitzgerald, A.E., Kingsley, Jr. C. y Kusko, A. "Electric Machinery", 3.<sup>a</sup> ed., Nueva York: McGraw-Hill Book Company, 1971.
- 2.- Kostenko, M.P. y Piotrovski, L.M., "Máquinas Eléctricas", 2.<sup>a</sup> ed., Editorial MIR Moscú, Tomo II, Apartado 1º y 2º, - 1979.
- 3.- Thaler, G.J. y Wilcox, M.L., "Máquinas Eléctricas", 1.<sup>a</sup> ed. Editorial Limusa, S.A. México, caps. 6 y 10, 1974.
- 4.- Kosow, I.L., "Máquinas Eléctricas y Transformadores", 1.<sup>a</sup> ed., Editorial Reverté, S.A., Barcelona, 1975.
- 5.- Poveda, M., "Copiados de Máquinas Eléctricas III", Facultad de Ingeniería Eléctrica, E.P.N., 1979.
- 6.- Kimbark, E.W., "Power System Stability", Vol. III, J.Wiley 1958.
- 7.- Enríquez Harper, "Análisis Moderno De Sistemas Eléctricos De Potencia", 1.<sup>a</sup> ed., Editorial Limusa, S.A., México, 1977.
- 8.- Weedy, B.M., "Electric Power Systems", 1.<sup>a</sup> ed., J. Wiley & Sons, Inc., London, 1970.
- 9.- Walker, J.H., "Operating Characteristics Of Salient-Pole Machines", Proc. IEE, 1953, 100, Pt II, p. 13.

- 10.- Gove, R.M., "Geometric Construction of the Stability Limits of synchronous Machines", Proc. IEE, May 1965, Vol. 112, No. 5, p. 977.
- 11.- Cawson, W.F. y Brown, H.E., "Digital Computation of Synchronous Generator Pullout Characteristics", AIEE Transactions, Feb. 1959, p. 1315-18.
- 12.- Jones, J.W. y Noest, J.G., "Guide For Operation and Maintenance of Turbine-Generators", IEEE, No. 67, Nov. 1963.
- 13.- "Standard Specification For Rotating Electrical Machines" Part. 1, General, VDE 0530 1/1.66 (ENGL), Junio 1967.