



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE MECÁNICA ELÉCTRICA**

**DETERMINACIÓN DE CURVAS DE CAPACIDAD DE UNA MÁQUINA  
SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES**

**HAYDN OTTONIEL MAZARIEGOS MORALES**

Asesorado por Ing. Carlos Alberto Quijivix Racancoj

Guatemala, septiembre de 2005

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DETERMINACIÓN DE CURVAS DE CAPACIDAD DE UNA MÁQUINA  
SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES**

TRABAJO DE GRADUCACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**HAYDN OTTONIEL MAZARIEGOS MORALES**

ASESORADO POR ING. CARLOS QUIJIVIX ALBERTO QUIJIVIX RACANCOJ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2005

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Alvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yasmina Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Sidney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Julio César Solares Peñate
EXAMINADOR	Ing. Erwin Efraín Segura Castellanos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Alberto Quijivix Racancoj
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

**HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DETERMINACIÓN DE CURVAS DE CAPACIDAD DE UNA MÁQUINA  
SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 22 de marzo de 2004.

Haydn Ottoniel Mazariegos Morales

## **AGRADECIMIENTOS A:**

### **Dios**

Porque me ha llenado de bendiciones en cada momento de mi vida, principiando con la dicha de los padres que tengo, ellos fueron la base de mi formación brindándome lo principal, consejos y su ejemplo, también, no han faltado los consejos de mis abuelos, tíos, hermanos y ahora el apoyo de mi amada esposa.

Porque ha iluminado mi vida, dándome el conocimiento y la voluntad para aprender de: mi padre, de mis catedráticos, de mis amigos y de quienes se han interesado por enseñarme.

Porque me ha encomendado una nueva misión, la cual acepto con todo mi corazón, así como mi padre la aceptó cuando yo nací.

Por eso y por tu Amor, Gracias.

## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Totto**

Para que a lo largo de su vida recuerde que todo lo que he logrado ha sido para él, y que junto a su dedicada madre lucharemos para un día verlo alcanzando las metas que se proponga.

### **Mi padre**

Para que el orgullo que sentía pensando en un día verme como ingeniero, ahora le sea cedido a mi madre y sea ella quien se sienta doblemente orgullosa de mi. Padre apoyaré a mis hermanos siempre, para que su último deseo sea cumplido.

# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	V
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	VII
<b>GLOSARIO</b>	IX
<b>RESUMEN</b>	XI
<b>OBJETIVOS</b>	XIII
<b>INTRODUCCIÓN</b>	XV
<b>1. MÁQUINA SÍNCRONA</b>	1
1.1 Generador Síncrono de rotor cilíndrico	1
1.2 Generador Síncrono de polos salientes	5
1.3 Pérdidas	6
1.3.1 Pérdidas mecánicas y de ventilación	7
1.3.2 Pérdidas en carga	7
1.3.3 Pérdidas adicionales debidas a la carga	8
1.3.4 Pérdidas en los circuitos de excitación	8
1.3.5 Pérdidas en las escobillas	9
1.3.6 Pérdidas adicionales	9
1.3.7 Métodos para la determinación de las pérdidas	10
1.4 Características nominales y calentamiento	11
1.4.1 Características nominales	11
1.4.1.1 Voltaje, velocidad y frecuencia nominales	12
1.4.1.2 Potencia nominal	13
1.4.1.3 Potencia nominal aparente	13
1.4.1.4 Factor de potencia	14
1.4.1.5 Factor de servicio	16

1.4.2	Calentamiento	16
1.4.2.1	Límites de temperatura	17
1.4.2.2	Determinación de la sobreelevación de temperatura	18
1.4.2.3	Corrección por temperatura	20
<b>2.</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DE LAS MÁQUINAS SÍNCRONAS</b>	<b>21</b>
2.1	Característica en circuito abierto	22
2.2	Característica en cortocircuito	23
2.3	Impedancia sincrónica no saturada	25
2.4	Determinación de $x_d$ y $x_q$ por deslizamiento	26
2.5	Estabilidad.	28
<b>3.</b>	<b>CURVAS DE CAPACIDAD DEL GENERADOR SÍNCRONO</b>	<b>31</b>
3.1	Límites del generador síncrono de polos salientes	31
3.1.1	Potencia asociada con $I_q$	32
3.1.2	Potencia asociada con $I_d$	33
3.1.3	Potencia compleja total	34
3.2	Límites térmicos	37
3.2.1	Límite térmico de la armadura	37
3.2.2	Límite térmico del campo	38
3.2.2.1	Círculo de excitación	39
3.2.2.2	Círculo de reluctancia	39
3.2.2.3	Fasor A	40
3.2.3	Límite de estabilidad permanente	41
3.2.3.1	Excitación positiva	42
3.2.3.2	Excitación negativa	43
3.2.4	Límite del sistema de excitación	43

<b>4. DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE CAPACIDAD DE UNA MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES</b>	<b>45</b>
4.1 Preparación de la máquina.	45
4.2 Determinación de la curva de circuito abierto.	47
4.3 Determinación de la curva de corto circuito.	48
4.4 Obtención de $X_d$ y $X_q$	50
4.5 Determinación de las curvas de capacidad.	52
4.6 Interpretación de las curvas de capacidad de la máquina Universal Hampdem	54
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>57</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>59</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>61</b>
<b>APÉNDICE</b>	<b>63</b>



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1. Diagrama fasorial de un generador síncrono de rotor cilíndrico en vacío	2
2. Circuito Equivalente de un generador síncrono de rotor cilíndrico	3
3. Voltaje en terminales de un motor y un generador síncrono	4
4. Reluctancia en un generador síncrono de polos salientes	5
5. Diagrama fasorial de un generador síncrono con voltaje y corriente nominales	15
6. Circuito equivalente de una fase en condición de corto circuito y circuito abierto	22
7. Curvas características de corto circuito y circuito abierto	23
8. Impedancia síncrona no saturada	24
9. Oscilograma que muestra el deslizamiento de los polos respecto a los ejes	27
10. Diagrama fasorial de un generador síncrono de polos salientes	32
11. Potencia vrs. Ángulo en acción motor y acción generador para una máquina síncrona de polos salientes	35
12. Representación del radio del círculo de armadura	38
13. Representación del límite térmico del campo	40
14. Representación del límite de estabilidad	42
15. Representación del límite del sistema de excitación	43

<b>16.</b> Conexiones correspondientes al ensayo de circuito abierto del alternador	47
<b>17.</b> Conexiones correspondientes a la llave # 9	47
<b>18.</b> Curva de vacío de la máquina Hampden Electric	49
<b>19.</b> Conexiones correspondientes al ensayo de cortocircuito del alternador	49
<b>20.</b> Curva de corto circuito de la máquina Hampden Electric	51
<b>21.</b> Curvas de capacidad de la máquina Hampden Electric	55
<b>22.</b> Fotografía de las máquinas universales Hampden Electric	63
<b>23.</b> Curva de capacidad del generador de la unidad No 1 Jurun Marínala	65
<b>24.</b> Conexiones correspondientes a la llave # 9	68
<b>25.</b> Ensayo de circuito abierto del alternador	70
<b>26.</b> Ensayo de corto circuito del alternador	71
<b>27.</b> Curvas de saturación y de vacío obtenidas de las tablas	72
<b>28.</b> Diagrama de bloques correspondiente al programa Curvas de capacidad de la máquina síncrona de polos salientes	77
<b>29.</b> Figura correspondiente a Datos de entrada	78

## **TABLAS**

<b>I.</b> Clases de aislamientos y sus temperaturas de referencia	8
<b>II.</b> Valores OCC experimentales de la máquina Hampden	48
<b>III.</b> Valores SCC experimentales de la máquina Hampden	50
<b>IV.</b> Datos para confeccionar la OCC del generador	55
<b>V.</b> Datos para confeccionar la SCC del generador	56

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
<b>P</b>	Potencia activa
<b>Q</b>	Potencia reactiva
<b>S</b>	Potencia aparente
<b>V</b>	Voltaje en terminales de armadura
<b>X<sub>d</sub></b>	Reactancia síncrona del eje directo
<b>X<sub>q</sub></b>	Reactancia síncrona del eje de cuadratura
<b>X<sub>s</sub></b>	Reactancia síncrona
<b>E<sub>f</sub></b>	Voltaje de excitación
<b>I<sub>a</sub></b>	Corriente de armadura
<b>I<sub>d</sub></b>	Corriente de eje directo
<b>I<sub>q</sub></b>	Corriente de eje en cuadratura
<b>f.p.</b>	Factor de potencia
<b>fem</b>	Fuerza electromotriz
<b>θ</b>	Ángulo de factor de potencia
<b>δ</b>	Ángulo de par entre bornes y fem
<b>UMF</b>	Reóstato de excitación
<b>S2</b>	Interruptor del circuito de campo
<b>p.u.</b>	Valores por unidad
<b>OCC</b>	Característica de circuito abierto
<b>SCC</b>	Característica de corto circuito



## **GLOSARIO**

<b>Armadura</b>	Está compuesto por el devanado completo en donde se induce la energía eléctrica, en el caso del generador síncrono, se ubica en el estator.
<b>Campo</b>	Está compuesto por el devanado completo del inductor que en el caso del generador síncrono se ubica en el rotor.
<b>Ensayo</b>	Conjunto de pruebas que se realizan a una máquina para determinar de forma experimental, valores característicos que corresponden a dicha máquina.
<b>Excitación</b>	Es proporcionar un campo magnético que logre la inducción en los devanados de un generador.
<b>Generador síncrono</b>	Máquina eléctrica que transforma energía mecánica en energía eléctrica, trabajando a la velocidad de sincronismo.

<b>Límite térmico</b>	Es toda una curva que demarca los puntos en los cuales la temperatura es dañina para los devanados de un generador, si éste es sobrepasado.
<b>Matlab</b>	Potente software que proporciona las herramientas necesarias para desarrollar simulaciones de sistemas complejos.
<b>Pérdidas</b>	Energía que no logra ser transferida desde el eje del primotor hasta los terminales del generador.
<b>Polos salientes</b>	Rotor, cuyo propósito es proporcionar una dirección preferida de magnetización mediante un entrehierro no uniforme.
<b>Potencia activa</b>	Es la potencia real que entrega una máquina eléctrica expresada en Watts.
<b>Potencia reactiva</b>	Potencia en Volt-amperes reactivos (VAR) que entrega o absorbe una máquina eléctrica.
<b>Reluctancia</b>	Parámetro físico que depende de la distancia, el área efectiva y la permeabilidad del entrehierro de una máquina eléctrica.
<b>Rotor cilíndrico</b>	Rotor cuyo propósito es proporcionar un entrehierro uniforme en el generador.

## RESUMEN

La máquina generadora Síncrona constituye la pieza más importante dentro del Sistema Eléctrico de Potencia. El despacho de energía se realiza dentro de un marco, el cual no debe someter a la máquina a sobreesfuerzos que la conduzcan a terminar con su vida útil, mucho más rápido de lo esperado.

El generador no es una supermáquina, en cuanto que no es capaz de entregar potencia en forma ilimitada. Basta recordar cómo sus embobinados de campo y armadura han sido fabricados con alambre de ciertos calibres y que el tipo de aislante usado está especificado para una máxima temperatura de trabajo. Es decir, existen ciertos límites térmicos, los cuales de sobrepasarse, ponen en grave peligro la vida útil de la máquina. Por otro lado, debe recordarse que una máquina síncrona trabaja a una velocidad que le hace permanecer en sincronismo con la frecuencia del sistema. Se menciona esto porque el alternador no está expuesto, únicamente, a peligros por sobretemperaturas, también, está propenso a perder la estabilidad ante ciertos regímenes de operación.

Como se sabe, la máquina generadora síncrona es capaz de entregar tanto potencia real como reactiva. Esto indica que dicha máquina puede “desplazarse en dos dimensiones”, de aquí que pueda definirse una región de operación dentro de la cual pueda “moverse” el alternador. Dicho lugar de operación estará limitado por fronteras que definen los máximos niveles de trabajo permisibles.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Hacer la descripción de las Curvas de Capacidad, mediante un programa, el cual se pueda emplear en las máquinas del laboratorio potencia y, así, ser incluidas en las prácticas del programa del laboratorio de Máquinas Eléctricas.

### **Específicos**

1. Obtener una experiencia real al lado de un Generador Síncrono, funcionando en operación normal sin someterlo a esfuerzos y poder observar, en ese mismo instante, los límites a los cuales puede ser llevado sin que éste sufra daños. Lo cual viene a ser de mucho beneficio para el estudiante quien ahora contara con una herramienta de aprendizaje moderna y eficaz.
2. Lograr una contribución a la Escuela de Mecánica Eléctrica, principalmente, con el Laboratorio de Potencia.
3. Desarrollar las diversas pruebas necesarias para poder obtener la curva de capacidad de un generador síncrono.
4. Proveer los modelos necesarios para poder obtener la curva de capacidad de un generador síncrono de polos salientes.



## INTRODUCCIÓN

A partir del funcionamiento del generador se comprenderá la posibilidad de resumir en forma gráfica dicho funcionamiento; indicando en esta el límite máximo, al cual se pueden trazar las diversas partes o componentes de la máquina, debido a limitaciones térmicas del generador, por restricciones impuestas por el primotor o por aquellos que se imponen, para la operación normal, por interactuar con el sistema.

La Curva de Capacidad total, está definida por la intersección de todos los límites del estator y del rotor, los que serán quienes restrinjan la operación de la máquina en cada uno de sus modos de operación.

Para encontrar los parámetros característicos de las Máquinas Eléctricas, pueden ser desarrollados ciertos ensayos, tales como lo son en circuito abierto o en cortocircuito, partiendo de tales prácticas el análisis matemático determina ciertas curvas que en su unión establecen un margen, en el cual puede ser representada la operación del generador en forma eficiente y sin peligro de daños en sus devanados. Con la ayuda de un software se hará un estudio de estos límites, luego de obtener los parámetros necesarios que describan el comportamiento del generador.

Estos límites se expresan como valores nominales de la máquina. El propósito de los valores nominales es proteger el generador del daño que pudiera ocasionarle una operación inadecuada. Para éste fin, cada máquina tiene un número de valores nominales indicados en la placa de características fijadas en ella.

Los valores nominales típicos de una máquina sincrónica son: el voltaje, la frecuencia, la velocidad, la potencia aparente, el factor de potencia, la corriente de campo y el factor de servicio.

Debido a que los generadores no son máquinas que resistan las inclemencias de una operación sin el control de parámetros como lo son las temperaturas en el rotor y el estator, causadas por excesos de corrientes y, así como, otros parámetros, tales como: la cavitación que tiende a dañar el eje del rotor. Se puede considerar como indispensable el conocimiento en el estudiante que existen límites a los cuales los generadores no deben ser sometidos para evitar daños que puedan representar altos costos de reparación y de oportunidad, por estar parada la máquina.

Ante la necesidad de tal estudio y de una enseñanza mejor desarrollada se determinó que en laboratorio de Máquinas Eléctricas se practique y explique el procedimiento matemático y la elaboración de las curvas que describen los límites de operación. La descripción y visualización de estos límites ha sido determinada de manera instantánea y fácil de entender, por medio del lenguaje de programación construido en Matlab para que, de esta manera, se ahorren muchos procedimientos que se efectúan a mano. Así, como el ahorro de tiempo.

En el caso de la máquina Hampden Eléctric se prevee que la curva de capacidad de esta, esté caracterizada por el daño ocasionado al sufrir muchos sobrecalentamientos, además del tiempo que ésta tiene en uso sin habersele proporcionado un buen mantenimiento, en general.

## 1. MÁQUINA SINCRÓNICA

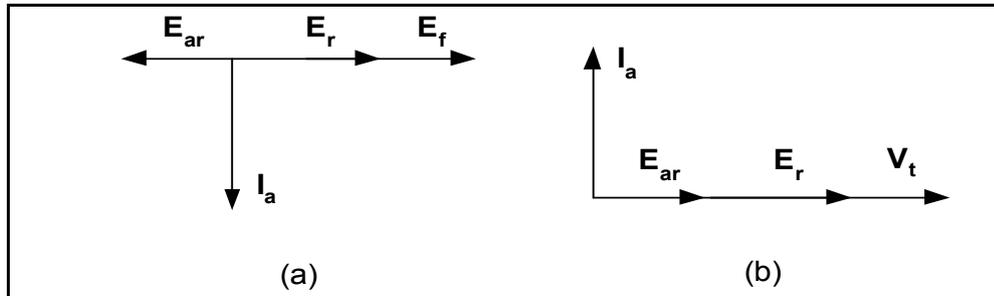
La máquina síncrona es un tipo de máquina eléctrica de corriente alterna; es decir nos encontramos ante un generador de tensión y corriente de evolución senoidal en el tiempo.

Su principal característica, es que gira a velocidad constante. Por lo tanto, se puede suponer que siempre la frecuencia se mantiene constante (en Europa 50 Hz. y en América 60 Hz); ya que la velocidad angular y la frecuencia son proporcionales. Otra característica es que son máquinas muy grandes, de gran potencia, pudiendo estar situadas en centrales de generación eléctrica (centrales hidráulicas, térmicas...).

### 1.1 Generador síncrono de rotor cilíndrico

Ahora tendremos en cuenta el efecto de la fmm de la reacción de armadura. Para un generador con un rotor cilíndrico la brecha de aire entre rotor y estator, que está en el paso del flujo debido a la reacción de armadura, es la misma, sin que importe la posición del rotor relativa a la fmm de la armadura. Si el paso magnético no está saturado, el voltaje resultante  $E_r$  es el vector suma de  $E_f$  y  $E_{ar}$ , que son voltajes proporcionales a la fmm del campo del devanado c.c, y a la fmm de la reacción de armadura, respectivamente. Existe la teoría para el correcto desarrollo, teniendo en cuenta efectos de saturación y polos salientes. La teoría de la máquina muestra que cuando la corriente de estator o armadura atrasa el voltaje generado sin carga en  $90^\circ$ , la fmm de la reacción de armadura se substraee directamente de la fmm sin carga. A la inversa, cuando la corriente de armadura adelanta el voltaje sin carga en  $90^\circ$ , crea una fmm que se agrega a la fmm sin carga.

**Figura 1. Diagrama fasorial de un generador síncrono de rotor cilíndrico en vacío.**



Fuente: Herick Alberto Sazo Cámara. **Método práctico para determinar las Curvas de Capacidad de Generadores Síncronos de máquinas hidráulicas.**

El voltaje sin carga  $E_f$  generado por el flujo producido por el campo c.c y  $E_{ar}$ , debido a la reacción de armadura producida por el atraso en  $90^\circ$  de corriente a  $E_f$ , deben oponerse uno a otro como se muestra en la figura 1.a. La figura 1.b muestra  $I_a$  en adelanto de  $90^\circ$  a  $E_c$  y a  $E_{ar}$  sumándose a  $E_f$ . Por tanto, podemos especificar una reactancia inductiva  $X_{ar}$  tal que

$$E_{ar} = jI_a X_{ar} \quad (1)$$

La ecuación (1) define  $E_{ar}$  con su ángulo de fase adecuado con respecto a  $I_a$ . Así, el voltaje generado en la fase a por el flujo en el entre-hierro es  $E_r$ , donde

$$E_r = E_f + E_{ar} = E_f - jI_a X_{ar} \quad (2)$$

y el voltaje terminal a neutro de la fase A es

$$V_t = \underbrace{E_f}_{\text{Generado a no carga}} - \underbrace{jI_a X_{ar}}_{\text{Debido a reacción de armadura}} - \underbrace{jI_a X_1}_{\text{Debido a la pérdida de la reactancia de armadura}} \quad (3)$$

ó

$$V_t = E_f - jI_a X_s \quad (4)$$

donde  $X_s$  se llama reactancia sincrónica, es igual a  $X_{ar} + X_l$ .

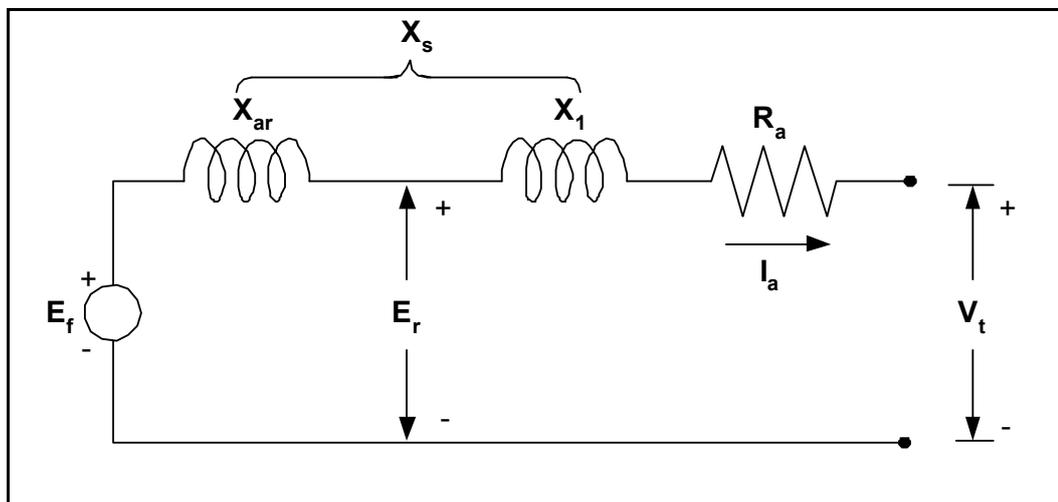
Si se considera la resistencia de armadura  $R_a$  la ecuación (4) se convierte en

$$V_t = E_f - I_a(R_a + X_s) \quad (5)$$

$R_a$  es por lo común mucho más pequeña que  $X_s$  y su omisión no trae graves consecuencias aquí, donde estamos interesados en la aproximación cualitativa.

Hemos llegado a una relación que nos permite representar el generador por medio de un simple pero muy útil circuito equivalente como el que se indica en la figura 2 y que corresponde a la ecuación (5).

**Figura 2. Circuito Equivalente de un generador síncrono de rotor cilíndrico**



Fuente: Leander W. Matsh. Mc Graw Hill. **Máquinas Electromecánicas y Electromagnéticas**

Los principios que hemos estudiado pueden extenderse a un motor síncrono. El circuito equivalente para el motor es idéntico al del generador en la dirección de  $I_a$  invertida.

Los voltajes generados del generador y del motor son a menudo identificados con la anotación  $E_g$  y  $E_m$ , respectivamente, en lugar de  $E_f$ , especialmente cuando ellos están en el mismo circuito, como en la figura 3, para el cual las ecuaciones son

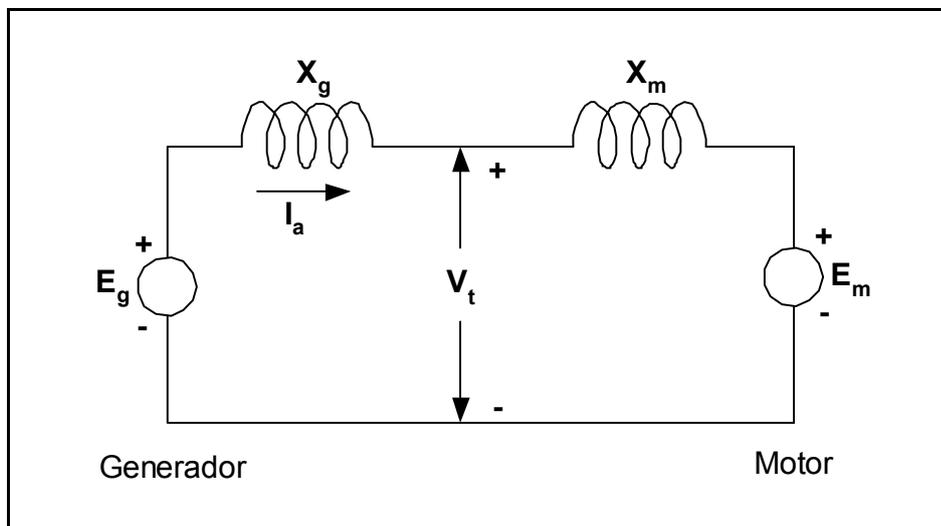
$$V_t = E_g - jI_a X_g \quad (6)$$

Y

$$V_t = E_m + jI_a X_m \quad (7)$$

Las reactancias del generador y motor son  $X_g$  y  $X_m$ , respectivamente; la resistencia de armadura no se considera.

**Figura 3. Voltaje en terminales de un motor y un generador síncrono**



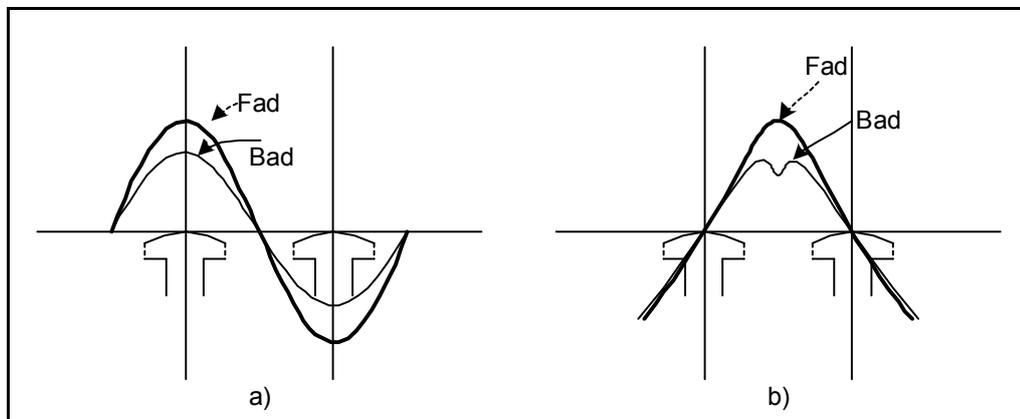
Fuente: Leander W. Matsh. Mc Graw Hill. **Máquinas Electromecánicas y Electromagnéticas**

## 1.2 Generador Síncrono de polos salientes

Mientras que el entrehierro en máquinas síncronas de construcción rotor cilíndrico es prácticamente de longitud uniforme, el de las máquinas de polo saliente es mucho mayor en el eje de cuadratura, el decir, en la región media entre polos que en el eje directo en los centros del polo.

Debido a que el entrehierro es de longitud mínima en el eje directo, una fmm de la armadura dada dirigida a lo largo del eje produce un valor máximo del flujo, y la misma fmm de la armadura dirigida a lo largo del eje de cuadratura donde el eje del entrehierro tiene su mayor longitud produce un valor mínimo del flujo.

**Figura 4. Reluctancia en un generador síncrono de polos salientes**



Fuente: Herick Alberto Sazo Cámara. **Método práctico para determinar las Curvas de Capacidad de Generadores Síncronos de máquinas hidráulicas.**

La reactancia síncrona asociada con el eje directo es por lo tanto un máximo y se le conoce como la reactancia síncrona del eje directo,  $x_d$ . La reactancia síncrona mínima  $x_q$  se denomina la reactancia síncrona del eje de cuadratura.

Además, debido a que la longitud no uniforme del entrehierro una onda de la fmm senoidal con su amplitud en el eje directo produce una onda de la densidad del flujo distorsionada como la que de alguna manera se presenta en la figura 4(a), mientras que la misma fmm senoidal producirá una onda de la densidad del flujo de una forma diferente, aproximadamente se muestra en la figura 4(b) cuando la amplitud está en el eje de cuadratura. Ondas de la densidad del flujo de otras formas se producen cuando la fmm senoidal de la armadura reacciona a lo largo de un eje localizado entre los ejes directo y de cuadratura.

Estas complicaciones de reactancia variable y de forma de onda para diferentes localizaciones del eje magnético de la fmm de la armadura relativa a aquella de los polos del campo hacen que un tratamiento riguroso de la máquina de polo saliente a lo largo de las líneas de la teoría del rotor cilíndrico sea demasiado pesado para ser práctico. El modelo de la reacción de armadura será tratado posteriormente para únicamente para el caso del rotor de polos salientes.

### **1.3 Pérdidas**

El generador permite obtener energía eléctrica a partir de energía mecánica. Sin embargo, no toda la potencia mecánica aplicada a la máquina se transforma en eléctrica.

Éste fenómeno es el resultado de un conjunto de pérdidas que se producen en el alternador. La determinación de las pérdidas totales se obtiene como suma de las siguientes pérdidas, que se garantizan por separado.

### 1.3.1 Pérdidas mecánicas y de ventilación

Las pérdidas de ventilación (rozamiento con el aire) corresponden a la potencia necesaria para obtener una ventilación suficiente para disipar el calor producido por las pérdidas presentes en la máquina, en condiciones normales de funcionamiento.

Estas pérdidas no se pueden calcular por medio de fórmulas generales, debido a la gran variedad de formas constructivas y tipos de ventilación, es decir, debido al gran número de elementos que intervienen para definir su valor. Las pérdidas por rozamiento en los cojinetes se pueden considerar proporcionales a la velocidad, al menos mientras éstas no resulten de valor muy pequeño.

Para evaluar estas pérdidas es conveniente referirse a construcciones similares o bien utilizar una expresión empírica que permita estimarlas en forma aproximada. Las pérdidas mecánicas, es decir, las pérdidas de rozamiento más las de ventilación se pueden determinar con la siguiente expresión:

$$\text{PERVEN} = 0.35 \times 10^{-3} \times \text{POT} \times \sqrt{\text{RPMS}} (\text{kW}).$$

### 1.3.2 Pérdidas en carga

- Pérdidas joule en los devanados del inducido.
- Pérdidas joule en los devanados de arranque o amortiguadores de las máquinas trifásicas. Debe notarse que las pérdidas en los devanados amortiguadores son particularmente significativas solamente en máquinas monofásicas.

Las pérdidas Joule deben ser referidas a determinadas temperaturas según sea la clase de aislante en los devanados. La temperatura de referencia de las pérdidas que las normas fijan puede coincidir o no, con la temperatura que corresponde al límite de sobre elevación (también de norma) de cada clase de aislamiento.

Las temperaturas de referencia para las distintas clases de aislamiento son:

**Tabla I Clases de aislamientos y sus temperaturas de referencia**

<b>CLASE</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>
A, E y B	75
F y H	115

### **1.3.3 Pérdidas adicionales debidas a la carga**

- Son las pérdidas que se producen en carga tanto en el paquete magnético, como en otras partes metálicas de la máquina.
- Pérdidas por corrientes parásitas en los conductores de los devanados del inducido.

### **1.3.4 Pérdidas en los circuitos de excitación**

- Pérdidas joule en los devanados y en los reóstatos de excitación.
- Pérdidas totales de la excitatriz mecánica conducida por el eje principal cuando forma parte de la unidad completa, y que se utiliza solamente para excitar la máquina, conjuntamente con las pérdidas en los reóstatos del circuito de excitación, pero con excepción de las pérdidas de rozamiento y ventilación.

Se deben incluir también las pérdidas en los rectificadores de los sistemas de excitación sin escobillas ("brushless"), en los engranajes, correas o transmisiones similares entre el eje de la máquina y la excitatriz. Se deben tener en cuenta todas las pérdidas en cualquier aparato que se utilice para la autoexcitación y regulación y que esté conectado a los terminales de la máquina sincrónica. Las pérdidas de excitación se calculan con la expresión  $I^2 R$ , teniéndose en cuenta que la resistencia del devanado de excitación corresponde al valor corregido a la temperatura de referencia, y la corriente de excitación corresponde a la condición nominal de funcionamiento, medida directamente durante el ensayo en carga. En casos en que no es posible la realización del ensayo en carga el método de determinación de la corriente que se utiliza para evaluar las pérdidas debe ser acordado entre el fabricante y el comprador.

### **1.3.5 Pérdidas en las escobillas**

Se determinan como el producto de la corriente de excitación nominal por la caída de tensión en escobillas. La caída de tensión admitida para todas las escobillas de cada polaridad será:

- escobillas de carbón o grafiticas 1.0 V
- escobillas metalgrafíticas 0.3 V

es decir una caída total de 2.0 V para las de carbón o grafiticas, y 0.6 para las metalgrafíticas.

### **1.3.6 Pérdidas adicionales**

Las pérdidas adicionales son aquellas que no son fácilmente calculables, pueden subdividirse en dos grupos según que dependan de la tensión o de la corriente.

Al primer grupo pertenecen las pérdidas superficiales y de pulsación, las producidas por un aislamiento imperfecto entre las chapas que constituyen la estructura magnética, por la presencia de rebabas y las producidas en la juntas (flujo que atraviesa partes de notable espesor según una dirección transversal). Las pérdidas adicionales dependientes de la carga pueden determinarse experimentalmente en muy pocos casos (por ejemplo en las máquinas sincrónicas), generalmente se pueden determinar sólo indirectamente, por ejemplo en base al calentamiento.

Estas pérdidas pueden estar presentes tanto en el hierro como en el conductor activo, como así también en las partes estructurales. Las pérdidas adicionales se obtienen como diferencia entre la potencia entregada en el eje menos las pérdidas mecánicas, pérdidas de excitación (si la misma no es independiente) y las pérdidas óhmicas calculadas para la temperatura alcanzada por los arrollamientos en el momento del ensayo. Obtenidas las pérdidas totales se determina el rendimiento con lo cual se finaliza el cálculo.

### **1.3.7 Métodos para la determinación de las pérdidas**

Los ensayos se deben realizar en la máquina nueva con todos los elementos necesarios para su servicio normal, con todos los dispositivos de regulación automática de tensión.

Los instrumentos de medición y sus accesorios, tales como transformadores de medición, shunts y puentes utilizados durante los ensayos, deben ser al menos de clase 1.0. Los instrumentos utilizados para la medición de las resistencias en corriente continua deber ser al menos de clase 0.5. La determinación del rendimiento de una máquina sincrónica puede ser realizada utilizando un método directo o uno indirecto.

El método directo requiere la medición simultánea de la potencia entregada y de la potencia absorbida, y se puede aplicar en aquellos casos en que la diferencia de potencia alcanza un valor considerable, de modo tal que los errores de medida puedan considerarse despreciables respecto al valor de las pérdidas medidas. En máquinas medianas y grandes se prefiere recurrir al método indirecto, que consiste en la determinación del rendimiento convencional, mediante la medición separada de las distintas pérdidas presentes en la máquina.

En tal sentido las normas proponen distintos métodos y en el caso de que se puedan utilizar métodos alternativos para un determinado tipo de máquina, se indican cuales son aquellos preferibles. Son los ensayos los que en definitiva determinan el grado de apartamiento entre los valores calculados y los medidos y que como se sabe son motivo de las garantías. Por ello cuando el rendimiento o las pérdidas totales se obtienen mediante la medición de la potencia de entrada y de salida, una inexactitud en estas mediciones se traduce en un error directo del rendimiento (mediciones de potencia con una exactitud no mayor del 1%, pueden dar un error de la determinación del rendimiento o de las pérdidas del 2%).

## **1.4 Características nominales y calentamiento**

### **1.4.1 Características nominales**

Existen ciertos límites básicos de la velocidad y la potencia que pueden obtenerse de un generador sincrónico. Estos límites se expresan como valores nominales de la máquina. El propósito de los valores nominales es proteger el generador del daño que pudiera ocasionarle una operación inadecuada.

Para éste fin, cada máquina tiene un número de valores nominales indicados en la placa de características fijada en ella. Los valores nominales típicos de una máquina sincrónica son el voltaje, la frecuencia, la velocidad, la potencia aparente (kilovoltamperes), el factor de potencia, la corriente de campo y el factor de servicio.

#### **1.4.1.1 Voltaje, velocidad y frecuencia nominales**

La frecuencia nominal de un generador sincrónico depende del sistema de potencia al cual está conectado. Las frecuencias comúnmente utilizadas hoy día en los sistemas de potencia son 60 Hz en América, 50 Hz en Europa y 400 Hz en aplicaciones especiales y de control. Una vez se conozca la frecuencia, hay únicamente una velocidad de rotación posible para un número de polos dados.

$$n = \frac{120f}{p} \quad (8)$$

La relación fija entre la frecuencia y la velocidad está dada por la ecuación (8) como se describió anteriormente. Quizá el valor nominal más obvio es el voltaje de operación al cual se diseña el generador. El voltaje de generación depende del flujo, la velocidad de rotación y la construcción mecánica de la máquina. Para un tamaño. Para un tamaño de estructura mecánica y velocidad dadas, cuanto mayor sea el voltaje deseado, mayor será el flujo requerido en la máquina. Sin embargo, el flujo no puede ser incrementado indefinidamente ya que hay siempre un máximo permisible de corriente de campo.

Otra consideración para fijar el máximo voltaje admisible es el punto de ruptura del aislamiento de los devanados (los voltajes normales de operación no deben estar muy cercanos al valor punto de ruptura de su aislamiento).

### **1.4.1.2 Potencia nominal**

Valor numérico de la potencia indicada en las características nominales. Éste valor establece las bases de diseño, de construcción y de garantías. Generalmente cuando no se especifica otra cosa se supone que la máquina es de servicio continuo, es decir, funciona con carga constante hasta alcanzar el equilibrio térmico. Para las máquinas rotantes se establecen dos regímenes extremos de funcionamiento, en vacío y a plena carga.

Funcionamiento en vacío es la condición de funcionamiento de una máquina con carga nula (el resto de condiciones de operación son las nominales). Funcionamiento a plena carga es cuando se tiene el mayor valor de carga indicada para una máquina funcionando a la potencia nominal.

Existen dos factores que determinan los límites de potencia de las máquinas eléctricas. Uno es el par mecánico aplicado al eje de la máquina y el otro es el calentamiento de los devanados de la máquina. En todos los motores y generadores sincrónicos prácticos, el eje tiene suficiente capacidad mecánica para manejar mucha mayor potencia de estado estacionario que la de dimensionamiento nominal de la máquina; en consecuencia los límites prácticos de estado estacionario están dados por el calentamiento de los devanados.

### **1.4.1.3 Potencia nominal aparente**

Hay dos devanados en un generador sincrónico y cada uno de ellos debe ser protegido de sobrecalentamiento. Estos dos devanados son el del inducido (armadura) y el de campo.

La máxima corriente aceptable del inducido fija la potencia nominal aparente del generador puesto que la potencia aparente  $S$  está dada por

$$S = 3V_{\phi}I_A \quad (9)$$

Si se conoce el voltaje nominal, la máxima corriente aceptable del inducido, determina los kilovoltamperes del generador:

$$S_{\text{nominal}} = 3V_{\phi,\text{nominal}}I_{A,\text{máx}}$$

$$S_{\text{nominal}} = \sqrt{3}V_{L,\text{nominal}}I_{L,\text{máx}}$$

Es importante tener en cuenta que para el calentamiento de los devanados del inducido, no es importante el factor de potencia de la corriente del inducido. El efecto de calentamiento por pérdidas en el cobre del estator está dado por

$$P_{\text{SCL}} = 3I_A^2 R_A \quad (10)$$

y es independiente del ángulo de la corriente con respecto al voltaje  $V_{\phi}$ . Debido a que el ángulo de la corriente es irrelevante para el calentamiento del inducido, estas máquinas están dimensionados en kilovoltamperes en vez de kilowatts.

#### 1.4.1.4 Factor de potencia

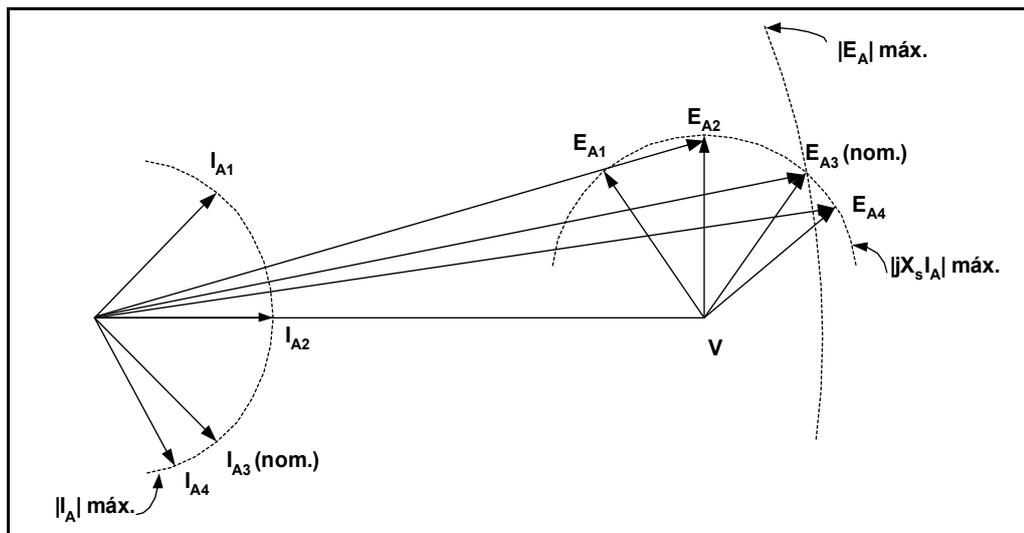
El otro devanado que nos concierne es el de campo. Las pérdidas en el cobre del devanado de campo están dadas por

$$P_{SCL} = I_F^2 R_F \quad (11)$$

tal que el máximo calentamiento permisible fija una máxima corriente de campo en la máquina. Puesto que  $E_A = K\phi\omega$  ésta fija el máximo tamaño aceptable de  $E_A$ .

El efecto de tener una máxima  $I_A$  y un  $E_A$  máximo, se traduce directamente en una restricción sobre el mínimo factor de potencia aceptable del generador cuando se encuentra operando a los kilovoltamperes nominales. La figura 5 muestra el diagrama fasorial de un generador síncrono en que el voltaje y la corriente del inducido son nominales. La corriente puede asumir diferentes ángulos, como se muestra. El voltaje interno generado  $E_A$  es la suma de  $V_\phi$  más  $jX_s I_A$ . Nótese que para algunos de los posibles ángulos de la corriente, el voltaje requerido  $E_A$  excede  $E_{A,máx.}$ . Si el generador fuera operado a la corriente nominal del inducido y estos factores de potencia, el devanado de campo se quemaría.

**Figura 5. Diagrama fasorial de un generador síncrono con voltaje y corriente nominales**



Fuente. Stephen J. Chapman. Mc Graw Hill. **Máquinas Eléctricas.**

El ángulo de  $I_A$ , que requiere el máximo posible  $E_A$  mientras  $V_\phi$  permanece en el valor nominal, da el factor de potencia nominal del generador. Es posible operar el generador a un factor de potencia más bajo (más en atraso) que el nominal, sólo si se restringen los kilovoltamperes suministrados por el generador.

#### **1.4.1.5 Factor de servicio**

La indicación del valor (fracción de la potencia nominal en por ciento) de las cargas a las cuales la máquina está sometida indicando la duración y la secuencia en el tiempo. Como éste tema es de aplicación casi exclusivamente para motores no será tratado en éste trabajo.

#### **1.4.2 Calentamiento**

Las máquinas eléctricas, prescindiendo de otros fenómenos, pueden suministrar una carga (energía eléctrica o mecánica) de modo tal que, en función de la temperatura ambiente, no superen la temperatura de la clase correspondiente a los materiales aislantes utilizados en su construcción.

Se denomina sobreelevación de temperatura de una parte de una máquina a la diferencia entre la temperatura de una determinada parte de la máquina (arrollamientos del inducido, arrollamientos de excitación, núcleo magnético, etc.) medida con métodos apropiados aconsejados por las normas, y la temperatura del fluido de refrigeración, medida también conforme con las indicaciones de las normas. Las normas fijan condiciones de sobreelevación de temperaturas que finalmente corresponden a temperaturas máximas en funcionamiento y que deben comprobarse en los ensayos.

#### **1.4.2.1 Límites de temperaturas**

Para máquinas refrigeradas indirectamente por aire, funcionando a la potencia nominal y a la altura y temperatura máxima del aire especificadas (1000 m sobre el nivel del mar y 40 °C), las normas fijan los límites admisibles de sobreelevación de temperatura por encima de la temperatura ambiente del lugar de funcionamiento. Para máquinas refrigeradas indirectamente por hidrógeno, también se indican los límites admisibles de sobreelevación de temperatura por encima de la temperatura del hidrógeno a la salida del intercambiador de calor, la cual no puede superar los 40 °C.

Por último para máquinas cuyas partes están directamente refrigeradas por un gas o un líquido se indican los límites de temperatura admisibles. Los límites de sobreelevación de temperatura especificados por las normas para los arrollamientos estatóricos con aislación plena para tensiones nominales superiores a 11000 V, de máquinas refrigeradas indirectamente con aire, deberán reducirse en las siguientes cantidades:

- a) cada 1000 V (o fracción) por encima de 11000 V y hasta 17000 V incluido: 1.5 °C en el caso de realizarse las medidas con termómetro, 1 °C cuando las medidas se realizan con indicadores internos de temperatura.
- b) cada 1000 V (o fracción) por encima de 17000 V, una reducción suplementaria de 0.5 °C tanto para las mediciones realizadas con termómetro como con indicadores internos de temperatura.

Los límites de temperatura especificados por las normas para arrollamientos estatóricos con tensión nominal que excede los 11000 V, de máquinas refrigeradas indirectamente con hidrógeno deberán reducirse en las siguientes cantidades:

- 1 °C cada 1000 V (o fracción) por encima de 11000 V hasta 17000 V inclusive.
- además 0.5 °C por cada 1000 V (o fracción) por encima de 17000 V.

Si se varían las condiciones de funcionamiento especificadas, es decir, la altitud y/o la temperatura ambiente máxima (1000 m sobre el nivel del mar y 40 °C) se deben corregir los límites de sobreelevación de temperatura de las máquinas refrigeradas indirectamente con aire.

La densidad del aire también influye en la disipación del calor, y en consecuencia en la temperatura máxima que la máquina alcanza, convencionalmente hasta 1000 m sobre el nivel del mar no corresponde corrección por éste efecto.

#### **1.4.2.2 Determinación de la sobreelevación de temperatura**

Los métodos de medida admitidos por las normas para determinar la sobreelevación de temperatura tanto de los arrollamientos como de otras partes de las máquinas son:

- método de variación de resistencia con el cual se determina el valor medio de temperatura de los arrollamientos.
- método por indicadores internos de temperatura (IIT) (por ejemplo: termómetros a resistencia, pares termoeléctricos etc.) que se introducen en la máquina durante su construcción, en lugares que son inaccesibles cuando la máquina está terminada.

- método por termómetro que incluye los elementos arriba indicados pero puestos en puntos accesibles.
- método por superposición que consiste en medir la resistencia de los devanados conforme al método a) pero sin interrumpir la corriente de alterna de la carga, superponiendo una pequeña corriente continua de medida.

Éste último método que permite efectuar las medidas de resistencia de los arrollamientos sin interrumpir el ensayo en carga (sin necesidad de tener que extrapolar los valores medidos) es aplicable a máquinas de cualquier potencia, de baja y alta tensión. Los valores de temperatura obtenidos utilizando estos últimos métodos, pueden en diversas ocasiones ser de 5 °C a 25 °C más altos que los obtenidos con los métodos mencionados en los primeros tres puntos anteriores.

Como consecuencia de estas diferencias el cuarto método no es aplicable cuando se desean comprobar los límites de temperatura fijados por las normas a los que se refieren los valores nominales y características de funcionamiento. Las normas dan criterios que ayudan a la elección del método de medida de la temperatura de los arrollamientos detallando las correcciones que se deben efectuar cuando corresponda. Además indican los métodos admitidos para medir la temperatura de los cojinetes o rodamientos.

### **1.4.2.3 Corrección por temperatura**

Si la temperatura máxima especificada o resultante del fluido de refrigeración está comprendida entre 0 °C y 40 °C, los límites son los indicados por las normas; sin embargo mediante acuerdo entre fabricante y comprador se pueden incrementar, pero la diferencia entre la temperatura máxima del ambiente y 40 °C no debe superar 30 °C.

Si la temperatura máxima especificada o del fluido de refrigeración excede 60 °C o es inferior a 0 °C, los límites de sobreelevación de temperatura de la máquina son objeto de acuerdo entre fabricante y comprador.

En cambio cuando la temperatura máxima especificada del fluido de refrigeración está comprendida entre 40 °C y 60 °C, los límites de sobreelevación de temperatura indicados por las normas se deben reducir de una cantidad igual a la diferencia entre la temperatura del fluido de refrigeración y 40 °C. Esto equivale como resulta lógico, a mantener los límites de temperatura máxima de las distintas partes independiente de la temperatura ambiente.

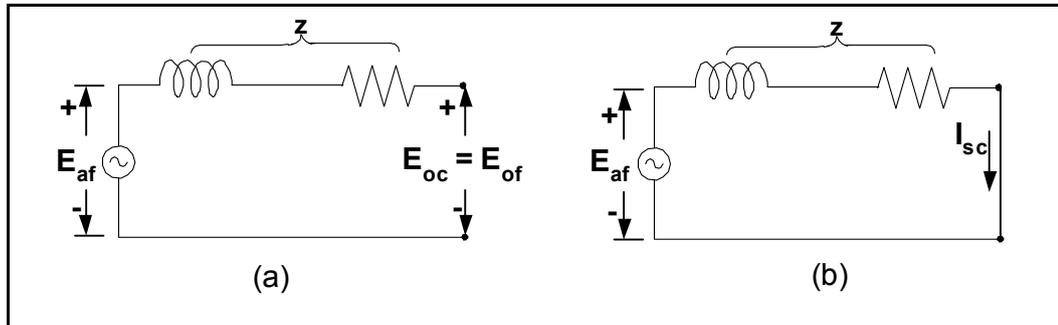
## 2. CARACTERÍSTICAS DE LAS MÁQUINAS

El efecto de saturación en el funcionamiento de máquinas síncronas se toma en cuenta dentro de la curva de magnetización y otros datos obtenidos por pruebas en una máquina existente o de datos de diseño. Los cálculos basados en el diseño están fuera del alcance de éste documento, y solamente algunos métodos de prueba básicos se consideran. La impedancia síncrona no saturada y un valor aproximado de la impedancia síncrona saturada pueden obtenerse de las pruebas de circuito abierto y corto circuito.

En el caso de una fuente de voltaje constante que tiene una impedancia constante, la impedancia se puede encontrar dividiendo el voltaje terminal de circuito-abierto por la corriente de corto circuito. Sin embargo, cuando la impedancia es una función del voltaje de circuito abierto, como lo es cuando la máquina está saturada, las características de circuito abierto o curva de magnetización en adición a las características de corto circuito son requeridas.

La reactancia síncrona no saturada es constante debido a que la reluctancia del hierro no saturada es despreciable. El circuito equivalente de una fase de una máquina síncrona polifásica se muestra en la fig. 6(a) para la condición de circuito abierto y en la fig. 6(b) para la condición de corto-circuito. Ahora  $E_{af}$  es la misma en ambos casos cuando la impedancia  $z = E_{af} / I_{sc}$ , donde  $E_{af}$  son los volts de circuito-abierto por fase e  $I_{sc}$  es la corriente de corto-circuito por fase.

**Figura 6. Circuito equivalente de una fase en condición de corto circuito y circuito abierto**



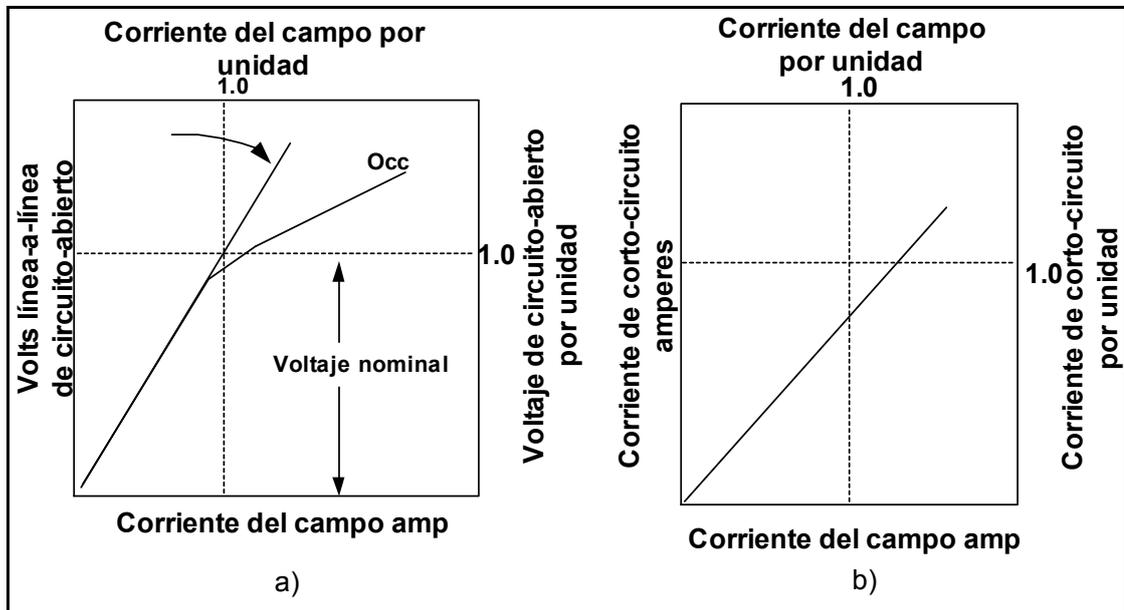
Fuente: Leander W. Matsh. Mc Graw Hill. **Máquinas Electromecánicas y Electromagnéticas**

## 2.1 Característica en circuito abierto

Para obtener las características de circuito-abierto la máquina se impulsa a su velocidad nominal sin carga. Lecturas de voltajes de línea-a-línea se toman para varios valores de la corriente del campo. El voltaje, excepto en máquinas de muy bajo voltaje, se escalona hacia abajo por medio de transformadores de potencial para instrumentos. La figura 7(a) muestra las características de circuito-abierto o curva de saturación. Se muestran dos grupos de escalas; una, volts de línea-a-línea vs. Corriente de campo en amperes y la otra en voltaje de circuito-abierto por unidad vs. Corriente de campo por unidad.

Si no fuera por la saturación magnética del hierro, las características de circuito-abierto serían lineales como está representado por la línea del entrehierro en la figura 7(b). Es importante hacer notar que 1.0 por unidad de la corriente de campo corresponde al valor de la corriente del campo que produciría un voltaje nominal si no hubiera saturación. En base a esta convención, la representación por unidad es tal que hace que las líneas de entrehierro de todas las máquinas sincrónicas sean idénticas.

Figura 7. Curvas características de corto circuito y circuito abierto



Fuente: Leander W. Matsh. Mc Graw Hill. **Máquinas Electromecánicas y Electromagnéticas**

## 2.2 Característica en corto circuito.

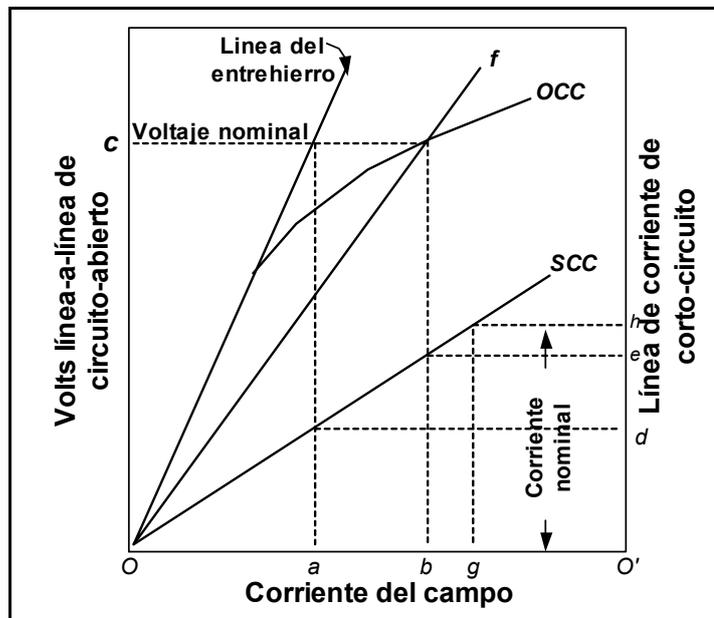
La relación de corto-circuito (RCC) es una medida del tamaño físico de una máquina síncrona nominal a un factor de potencia, kva, y velocidad dados. La relación de corto-circuito se define como la relación de la corriente de campo para voltaje de cero carga nominal a velocidad nominal a la corriente de campo para la corriente de armadura de corto-circuito nominal.

En la figura 8,  $O_b$  es la corriente de campo que produce un voltaje nominal en la característica de circuito-abierto y  $O_g$  la corriente de campo para corriente de corto-circuito nominal. Por lo tanto la relación de corto-circuito es

$$RCC = \frac{O_b}{O_g}$$

Para tener una idea de la influencia del tamaño físico en la relación de corto-circuito, considere una máquina síncrona en donde la longitud  $g$  del entrehierro se dobla mientras el embobinado de la armadura y todas las dimensiones del hierro del estator permanecen iguales. Si la reluctancia del hierro fuera despreciable, la corriente de campo de cero carga, necesitaría que aproximadamente se doblara para producir el mismo voltaje como anteriormente.

**Figura 8. Impedancia síncrona no saturada**



Fuente: Leander W. Matsh. Mc Graw Hill. **Máquinas Electromecánicas y Electromagnéticas**

Doblando la longitud del entrehierro reduce los valores no saturados de la reactancia de la reacción de armadura  $x_{ad}$  a un medio de su valor original, de tal manera que solamente cerca de la mitad del flujo resultante original es necesario para producir corriente de corto-circuito nominal.

Debido a que éste valor de una medio del flujo atraviesa dos veces la longitud original del entrehierro, el valor de la fmm del campo requerida para una corriente de armadura de corto-circuito nominal es prácticamente igual. Sin embargo, se requiere aproximadamente dos veces la corriente de campo o la fmm del campo en ampere vueltas para producir un voltaje de cero carga nominal, debido a que la inductancia mutua La fmm se reduce a un medio, y el embobinado debe aumentarse en tamaño si el calentamiento debe permanecer igual. Como una consecuencia la máquina debe hacerse más grande para acomodar un embobinado de campo más grande.

### **2.3 Impedancia sincrónica no saturada.**

Las características de circuito-abierto y corto-circuito están representadas en la misma gráfica en la figura 8. La corriente de campo  $O_a$  producen un voltaje de línea-a-línea  $O_c$  en la línea del entrehierro que sería el voltaje de circuito-abierto si no hubiese saturación. El mismo valor de la corriente de campo produce la corriente de armadura  $O'd$  y la reactancia sincrónica no saturada es

$$Z_{pu} = \frac{O_c}{\sqrt{3}O'd} \text{ ohms por fase}$$

Cuando la característica de circuito-abierto, línea del entrehierro, y la característica de corto circuito se grafican en valor por unidad, entonces el valor por unidad de la reactancia sincrónica no saturada iguala al voltaje por unidad al voltaje de la línea del entrehierro que resulta del mismo valor de la corriente de campo como aquella que produce una corriente nominal de armadura (1 por unidad) de corto-circuito. En la figura 8 éste sería el valor por unidad en la línea del entrehierro correspondiente a la corriente de campo  $O_g$ .

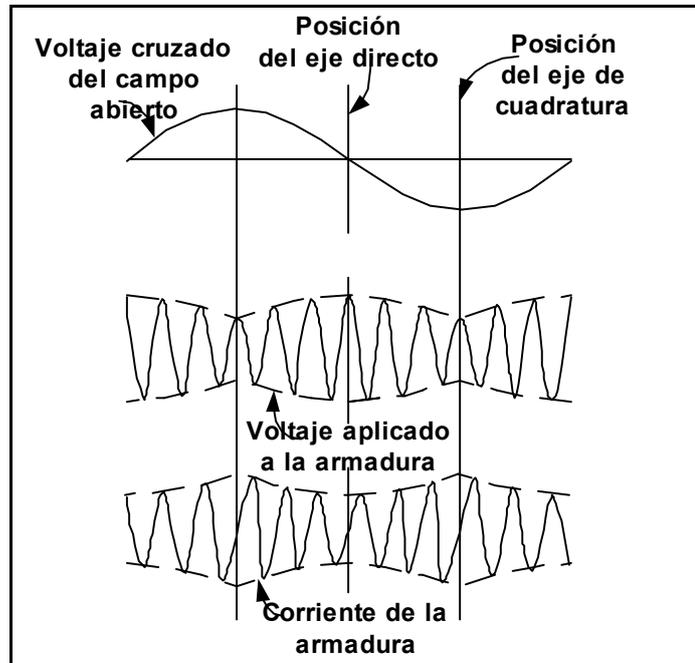
## 2.4 Determinación de $X_d$ y $X_q$ por deslizamiento.

Debido a que la fmm de la armadura reacciona enteramente en el eje directo cuando la corriente de armadura está atrasada respecto del voltaje generado por  $90^\circ$ , la prueba del factor de potencia cero da el valor de la reactancia sincrónica  $x_d$  de eje directo. Sin embargo, es impráctico el tratar de cargar un generador de tal manera que la fmm de su armadura reaccione solamente a lo largo del eje de cuadratura con el objeto de obtener la reactancia sincrónica  $x_q$  del eje de cuadratura.

La prueba de deslizamiento se hace aplicando un reducido voltaje trifásico balanceado a frecuencia nominal al estator, mientras que al rotor se le hace rotar un poco arriba o debajo de la velocidad sincrónica, con el circuito del campo abierto. El eje directo y el eje de cuadratura del rotor alternadamente se deslizan fuera del eje de la fmm de la armadura, causando que la fmm de la armadura reaccione alternadamente a lo largo de los ejes directo y de cuadratura. La secuencia de fases del voltaje aplicado debe ser tal que la fmm de la armadura y del rotor giran en la misma dirección. Se toman oscilogramas del voltaje en terminales de la armadura, corriente de armadura y el voltaje a través del embobinado abierto del campo.

Los oscilogramas son parecidos a los presentados en la figura 9. El deslizamiento indicado en la figura 9 es demasiado alto para valores precisos de  $x_d$  y  $x_q$  debido a las corrientes de eddy inducidas en las caras de los polos y embobinados de amortiguamiento, cuando éstos están en las caras de los polos. El deslizamiento debe hacerse lo menor posible sin sacar al rotor de sincronismo como resultado del par de reluctancia que se estudia en la reacción de armadura de un generador sincrónico de polos salientes. Esto también es una razón para aplicar un voltaje reducido.

**Figura 9. Oscilograma que muestra el deslizamiento de los polos respecto a los ejes**



Fuente: Leander W. Matsh. Mc Graw Hill. **Máquinas Electromecánicas y Electromagnéticas**

Las reactancias de eje directo y de eje de cuadratura se encuentran del oscilograma de la siguiente forma:

$X_d$  = relación de los volts por fase aplicado a los Amperes por fase de la armadura para la posición del eje directo.

El voltaje a través del embobinado abierto del campo es un máximo para la posición del eje directo.

$X_q$  = relación de los volts por fase aplicados a los Amperes por fase de la armadura para la posición del eje de cuadratura.

Valores aproximados de  $x_d$  y  $x_q$  pueden obtenerse de las lecturas de voltímetros y amperímetros. El amperímetro indica un valor mínimo de la corriente para la posición del eje director y un valor máximo para la posición del eje de cuadratura, su deflexión oscilando por lo tanto entre un mínimo y un máximo. Si la fuente tiene una impedancia apreciable, la oscilación en las lecturas en el voltímetro, con un voltaje  $V_{\max}$  ocurriendo cuando la corriente  $I_{\min}$  es un mínimo. Esto se indica por el oscilograma en la figura 9 cuando se desprecia la resistencia de la armadura,

$$x_d = \frac{V_{\max}}{I_{\min}}$$

Las agujas de los instrumentos indicadores están sujetas a una oscilación con el resultado de un error en las lecturas. Mediciones oscilográficas son por lo tanto preferidas.  $x_q$  se asume que porque no está afectada por saturación y el factor de saturación  $k$  necesita aplicarse solamente a  $x_d$ .

## 2.5 Estabilidad.

Si la carga en una máquina sincrónica se incrementa gradualmente hasta que se alcanza un valor de  $\delta$  para el cual la potencia real llega a ser un máximo, se dice que se alcanzó el límite de estabilidad de estado estable. En el caso de una máquina de rotor cilíndrico la potencia real es un máximo cuando  $\delta = \pi/2$  si se desprecia la resistencia de la armadura y la potencia máxima por fase o por unidad es de acuerdo a la ecuación

$$P_{\max} = \frac{VE_{af}}{x_d} \quad (12)$$

Sin embargo, las perturbaciones debidas a cambios repentinos en la carga o fallas en el sistema de potencia eléctrico, causan que el ángulo del par  $\delta$  cambie. Los transitorios resultantes son usualmente de interés en sólo períodos de tiempo tan cortos que  $\lambda_f$  es substancialmente constante y para las derivaciones del tiempo de  $\delta$  lo suficientemente lentas, que los efectos subtransitorios son despreciables. Por lo tanto, se introduce  $x'_d$  en lugar de  $x_d$  de tal forma que la ecuación 12, se modifica de la siguiente manera

$$P_{em} = \frac{VE'_{af}}{x'_d} \text{sen} \delta + \frac{x'_d - x_q}{2x'_d x_q} V^2 \text{sen} 2\delta \quad (13)$$

donde generalmente es conveniente para estudios de estabilidad expresar las cantidades en por unidad.

Mientras  $E'_{af}$  puede considerarse como una cantidad definida, el voltaje en terminales  $V$  es generalmente influenciado por las perturbaciones, un caso extremo es el corto circuito en las terminales del generador. Sin embargo, hay casos en donde el voltaje  $V_e$  en algún punto cercano a un generador de gran capacidad relativamente no se afecta por la perturbación y si la reactancia entre las terminales del generador y el punto de voltaje constante es  $x_e$  la ecuación se convierte en

$$P_{em} = \frac{V_e E'_{af}}{x'_d} \text{sen} \delta + \frac{V_e^2 (x'_d - x_q)}{2x'_d x_q} \text{sen} 2\delta \quad (14)$$

Donde  $\delta$  es ahora el ángulo entre  $E'_{af}$  y  $V_e$  y donde  $X'_d = x'_d + x_e$ , y  $X_q = x_q + x_e$ .

El segundo término en la ecuación 14, usualmente se desprecia en estudios de estabilidad transitoria y además  $E'_{af}$  se reemplaza por  $E'_i$  con el siguiente resultado

$$P_{em} = \frac{V_e E'_i}{x_d} \text{sen} \delta \quad (15)$$

donde  $\delta$  es el ángulo entre  $E'_i$  y  $V_e$ . Debe recordarse que  $E'_i$  adelanta a  $V_e$  en un generador y  $V_e$  adelanta a  $E'_i$  en un motor, de tal forma que la ecuación 15 puede aplicarse a motores sincrónicos así como a generadores sincrónicos.

### **3. CURVAS DE CAPACIDAD DEL GENERADOR SÍNCRONO**

El límite de calentamiento del rotor y del estator, junto con cualquier limitante externa al generador, pueden ser expresados en forma gráfica por un diagrama de capacidad. Un diagrama de capacidad es un dibujo de la potencia compleja  $S = P + jQ$  derivado del diagrama fasorial del generador, suponiendo que  $V_\phi$  es constante en el voltaje nominal de la máquina.

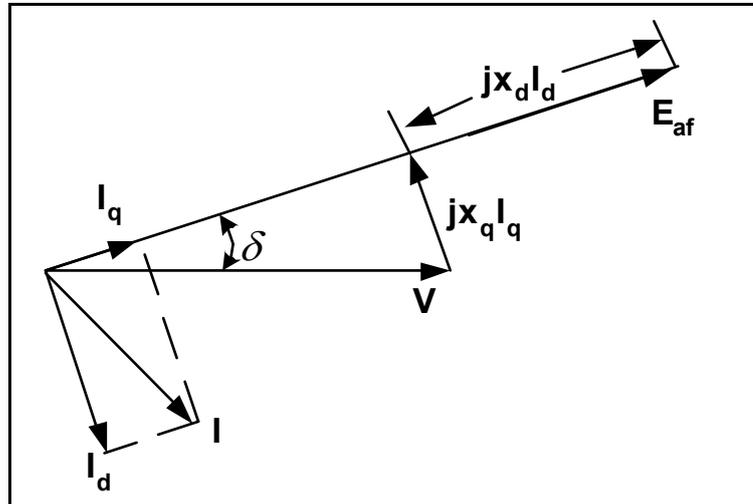
Para la construcción del diagrama de capacidad es necesario determinar los modelos que delimitan la operación del generador, primero lo haremos para el de polos salientes y luego para el de rotor cilíndrico.

El método para determinar los límites de operación de un generador síncrono de polos salientes es similar al de rotor cilíndrico, la diferencia radica en la obtención de las curvas de excitación y límite de estabilidad permanente.

#### **3.1 Límites del generador síncrono de polos salientes**

La resistencia  $r_a$  de la armadura tiene efectos despreciables en la relación entre la potencia de salida de una máquina sincrónica y su ángulo de par  $\delta$  y es por lo tanto no considerada a continuación,  $r_a$  se desprecia en el diagrama de favores de un generador síncrono de polos salientes de la figura 10 que se usa como base para esta derivación.

**Figura 10. Diagrama fasorial de un generador síncrono de polos salientes**



Fuente: Leander W. Matsh. Mc Graw Hill. **Máquinas Electromecánicas y Electromagnéticas**

### 3.1.1 Potencia asociada con $I_q$

La potencia compleja asociada con el eje de cuadratura de la corriente  $I_q$  es

$$S_q = VI_q^* \quad (16)$$

de la figura 10

$$I_q = I_q(\cos \delta + j \operatorname{sen} \delta) \quad (17)$$

$$I_q^* = I_q(\cos \delta - j \operatorname{sen} \delta) \quad (18)$$

$$I_q = \frac{V \operatorname{sen} \delta}{X_q} \quad (19)$$

La sustitución de las ecuaciones 17, 18 y 19 en la ecuación 16, da

$$S_q = \frac{V^2}{X_q} (\operatorname{sen} \delta \cos \delta - j \operatorname{sen}^2 \delta) \quad (20)$$

### 3.1.2 Potencia asociada con $I_d$

La potencia compleja asociada con la corriente de eje directo  $I_d$  es

$$S_d = VI_d^* \quad (21)$$

en la figura 1

$$I_d = I_d(\text{sen } \delta - j\text{cos } \delta) \quad (22)$$

y

$$I_d^* = I_d(\text{sen } \delta + j\text{cos } \delta) \quad (23)$$

$$I_d = \frac{E_{af} - V}{X_d} \text{cos } \delta \quad (24)$$

$$E_f = V\text{cos } \delta + IX_d \text{sen}(\theta + \delta) \quad (25)$$

Cuando las ecuaciones 23 y 24 se sustituyen en la ecuación 21, el resultado es

$$S_d = \frac{VE_{af} - V^2}{X_d} \text{cos } \delta \quad (26)$$

### 3.1.3 Potencia compleja total

La potencia compleja de salida por fase

$$S = S_q + S_d$$

$$S = \frac{VE_{af}\text{sen}\delta}{x_d} + \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right)V^2\text{sen}\delta \cos\delta + j\left(\frac{VE_{af}\cos\delta - V^2\cos^2\delta}{x_d} - \frac{V^2\text{sen}^2\delta}{x_q}\right) \quad (27)$$

que puede reducirse a

$$S = \frac{VE_{af}}{x_d}\text{sen}\delta + \frac{x_d - x_q}{2x_dx_q}V^2\text{sen}2\delta + j\left\{\frac{VE_{af}}{x_q}\cos\delta - \frac{V^2}{2x_dx_q}[(x_d + x_q) - (x_d - x_q)\cos 2\delta]\right\} \quad (28)$$

La ecuación 28 expresa la potencia por fase a menos que sea por unidad.

Por lo tanto, la potencia real de salida de un generador trifásico cuando se expresa en watts es

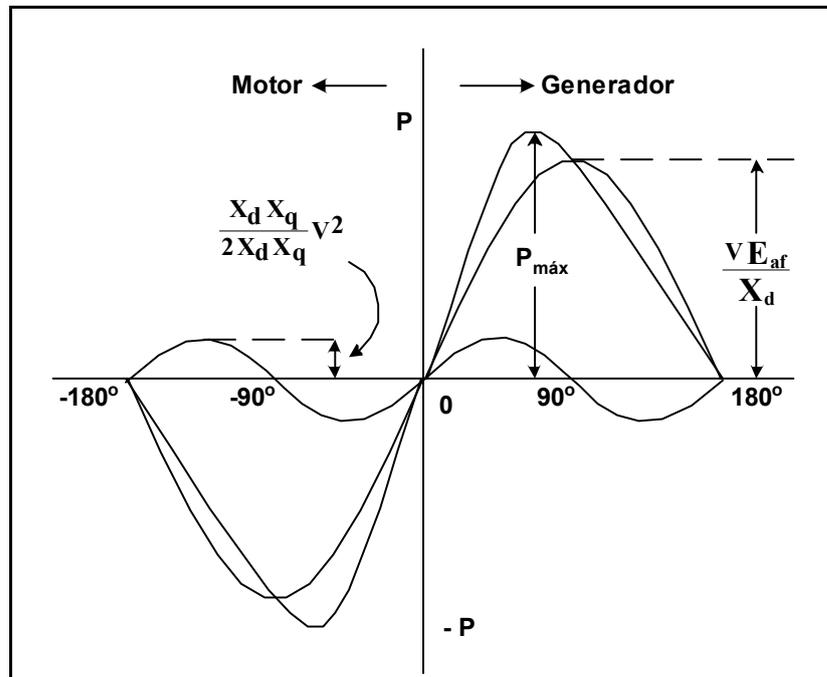
$$P = 3P_{\text{real}} = 3\left[\frac{VE_{af}}{x_d}\text{sen}\delta + \frac{x_d - x_q}{2x_dx_q}V^2\text{sen}2\delta\right] \quad (29)$$

y la potencia reactiva en vars es

$$Q = 3Q_{\text{imag}} = 3\left\{\frac{VE_{af}}{x_q}\cos\delta - \frac{V^2}{2x_dx_q}[(x_d + x_q) - (x_d - x_q)\cos 2\delta]\right\} \quad (30)$$

La característica del ángulo de potencia de una máquina de polos salientes se muestra en la figura 11. Una acción motor resulta cuando  $\delta$  es negativa.

**Figura 11. Potencia vrs. Ángulo en acción motor y acción generador para una máquina síncrona de polos salientes**



Fuente: Fitzgerald, A. E., Charles Kingley y Stephen D. Umans. Mc Graw Hill. **Máquinas Eléctricas**

La potencia reactiva de salida es independiente del signo  $\delta$ , lo que significa que cuando  $r_a$  es despreciable, una máquina síncrona sobreexcitada suministra una potencia reactiva ya sea que opere como motor o generador. Generalmente los motores síncronos se sobreexcitan con el fin de que además de suministrar una carga mecánica, también suministren una potencia reactiva.

Las cargas industriales normalmente operan con una corriente atrasada y cuando un motor síncrono sobreexcitado es parte de la carga, tiende a mejorar el factor de potencia de la carga combinada, una característica conocida como corrección del factor de potencia.

El par electromagnético o par desarrollado para una máquina síncrona trifásica es

$$T_{em} = \frac{3P}{\omega_m} = \frac{3 \times 60}{2\pi n_{sin}} \left( \frac{VE_{af}}{x_d} \sin\delta + \frac{x_d - x_q}{2x_d x_q} V^2 \sin 2\delta \right) \quad (31)$$

La componente

$$T_{rel} = \frac{3 \times 60}{2\pi n_{sin}} \left( \frac{x_d - x_q}{2x_d x_q} V^2 \sin 2\delta \right) \quad (32)$$

Es conocida como par de reluctancia. Es independiente de la excitación y existe solamente si la máquina se conecta a un sistema que recibe potencia reactiva de otras máquinas síncronas que mantienen el voltaje  $V$  en terminales. El par de reluctancia se debe a lo saliente de los polos de campo que tiende a alinear el eje directo con el eje de la fmm de armadura. Esta característica causa que un motor síncrono de polos salientes desarrolle algún par sin una corriente de campo. Pequeños motores síncronos monofásicos, tales como los que se usan en los relojes eléctricos, dependen enteramente en el par de reluctancia para mantener el sincronismo ya que estos motores no tienen embobinado de campo o un rotor de magneto permanente.

Además, motores síncronos integrales, conocidos como motores reluctantes, operan sin una excitación de campo de cd y están encontrando un mayor uso a pesar de su relativamente gran tamaño y su requerimiento de alta potencia reactiva de entrada.

Es impráctico, de cualquier modo, el operar un generador síncrono sin campo de excitación en un sistema de potencia porque puede entonces enviar sólo aproximadamente el 25 por ciento o menos de su valor nominal de potencia real. Además, podría absorber una cantidad excesiva de potencia reactiva.

## 3.2 Límites térmicos

### 3.2.1 Límite térmico de la armadura

La corriente circulante por el estator produce pérdidas por efecto Joule; o, en otras palabras un calentamiento de la máquina. Existe un límite de corriente, considerando de antemano el funcionamiento adecuado de los sistemas de enfriamiento, arriba del cual la máquina resultara dañada permanentemente. Dicha corriente es la  $I_{\text{nominal}}$ .

Asociada a esta corriente está la potencia aparente nominal dada por;

$$S = \sqrt{3}V_L I_L \quad (33)$$

o la potencia por fase dada por

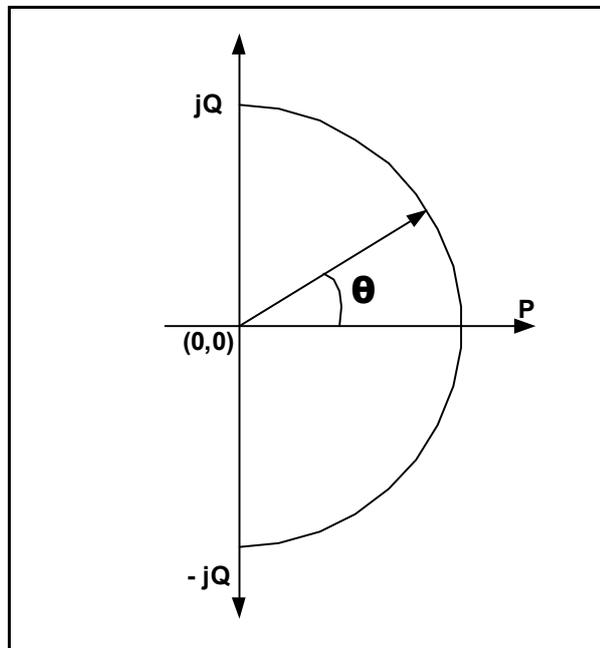
$$S_f = V_f I_f \quad (34)$$

Esta ecuación representa un círculo cuyo radio es la potencia aparente

$$S = |S|e^{-j\theta} = VI^* = P + jQ \quad (35)$$

Cuya gráfica se muestra en la figura 12, en el primero y cuarto cuadrante respectivamente.

**Figura 12. Representación del radio del círculo de armadura**



Fuente: Herick Alberto Sazo Cámara. **Método práctico para determinar las Curvas de Capacidad de Generadores Síncronos de máquinas hidráulicas.**

En ella se observa cómo la potencia aparente representa el radio del círculo de armadura, centrado en el punto (0,0).

### 3.2.2 Límite térmico del campo

Para determinar éste límite, se parte de la expresión para la potencia de salida de una máquina sincrónica de polos salientes, la ecuación 28 reordenándola en función de los ángulos

$$S = \frac{VE_{af}}{x_d} \text{sen } \delta + \frac{x_d - x_q}{2x_d x_q} \text{sen } 2\delta + j \left( \frac{VE_{fa}}{x_d} \text{cos } \delta + \frac{x_d - x_q}{2x_d x_q} \text{cos } 2\delta - V^2 \frac{x_d + x_q}{2x_d x_q} \right) \quad (29)$$

Ordenando términos, se tiene

$$S = \frac{VE_{af}}{x_d}(\text{sen}\delta + j\cos\delta) + \frac{x_d - x_q}{2x_dx_q}(\text{sen}2\delta + j\cos2\delta) - jV^2 \frac{x_d + x_q}{2x_dx_q} \quad (30)$$

$$S = C + B + A \quad (31)$$

En términos generales, esta ecuación se puede identificar por el diagrama que resulta de la suma de 3 fasores.

### 3.2.2.1 Círculo de excitación

El primer término es el fasor C y describe un lugar geométrico llamado "círculo de excitación". Pues el módulo o curvatura de éste círculo es proporcional a la corriente de excitación de campo.

Éste fasor no tiene un centro fijo y se desplaza sobre el extremo del fasor B, sobre el círculo de reluctancia.

$$|C| = \frac{VE_{af}}{x_d} \angle (90 - \delta) \quad (32)$$

### 3.2.2.2 Círculo de reluctancia

El fasor B da origen a un círculo llamado "círculo de reluctancia". Éste fasor móvil, y el ángulo es el doble con respecto al ángulo de potencia del generador.

Cuando ambas reactancias son iguales, B desaparece, por esto no existe para máquinas de rotor cilíndrico.

$$|B| = \frac{V^2(x_d - x_q)}{2x_dx_q} \angle (90 - 2\delta) \quad (33)$$

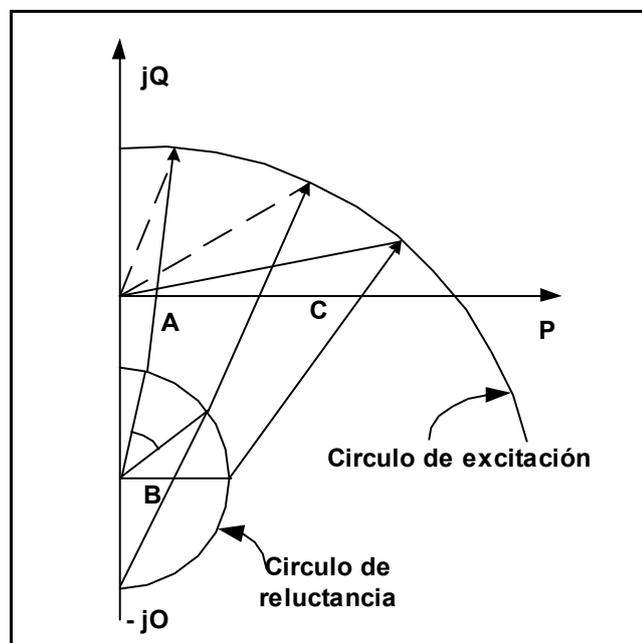
Si la corriente de excitación es nula, o aún con una pequeña excitación de campo negativa, la unidad de polos salientes será capaz de desarrollar un par o potencia, llamado de reluctancia. Esta es debida a la diferencia de reluctancias entre el eje directo y el eje en cuadratura.

### 3.2.2.3 Fasor A

El ángulo de éste fasor no cambia ya que como es un parámetro del generador no cambia durante la operación de éste. Es el ángulo de la impedancia del generador, pero como se desprecia la resistencia del embobinado de armadura el ángulo es de  $90^\circ$ .

$$A = -j \frac{V^2 (x_d + x_q)}{2x_d x_q} \quad (34)$$

Figura 13. Representación del límite térmico del campo



Fuente: Herick Alberto Sazo Cámara. **Método práctico para determinar las Curvas de Capacidad de Generadores Síncronos de máquinas hidráulicas.**

Combinando los tres vectores, el límite térmico del campo viene definido por el lugar geométrico representado por la ecuación

$$S = |A| \angle (90^\circ - \delta) + |B| \angle (90^\circ - 2\delta) + |C| \angle (-90^\circ) \quad (35)$$

como se ven en la figura 13.

### 3.2.3 límite de estabilidad permanente

Durante los períodos de demanda mínima, se requiere que los generadores síncronos absorban reactivos, es decir, operen con excitación reducida; sin embargo se deben tomar en cuenta los problemas de la estabilidad.

En el caso del generador de polos salientes, se complica un poco más la obtención de éste límite; pues para cada valor de corriente de campo, la magnitud y el ángulo del fasor A cambian, al cambiar  $E_f$ . Al dejar margen del 10% de la potencia activa en condiciones nominales, a partir de la curva teórica, se obtiene la curva del límite práctico de estabilidad permanente.

Para fórmular matemáticamente el límite de estabilidad, se hace necesario encontrar el mayor ángulo de potencia, para cada una de las condiciones de excitación, donde el generador puede entregar potencia real sin perder el sincronismo. El límite teórico de estabilidad, para la máquina de polos salientes, es la unión de todos los puntos correspondientes a la potencia máxima cuando  $I_f < I_{fm}$ . Éste límite constará en dos partes: una correspondiente a excitación positiva y la otra a negativa. Expresando la ecuación de potencia real en función del ángulo de potencia  $P(\delta)$ , por medio de los fasores característicos se tiene:

### 3.2.3.1 Excitación positiva

La ecuación que define el límite de estabilidad para la excitación positiva es

$$P_m = B \operatorname{sen} 2\delta_m + C \operatorname{sen} \delta_m \quad (36)$$

Donde  $\delta_m < 90^\circ$ .

### 3.2.3.2 Excitación negativa

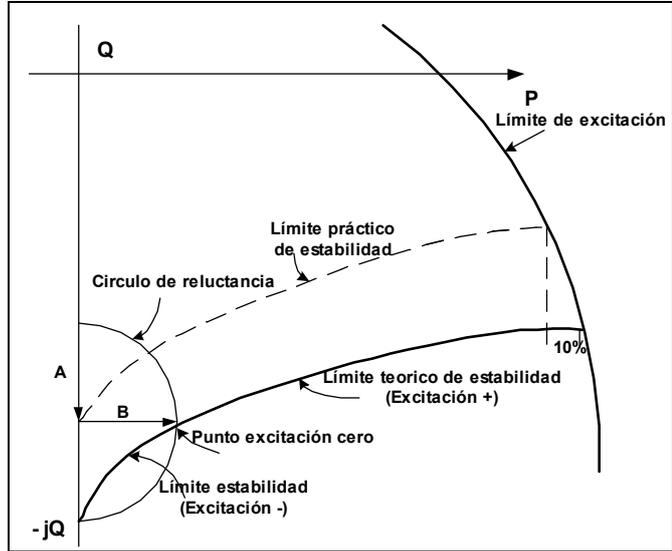
Como en éste caso,  $E_f$  cambia de sentido girando  $180^\circ$  eléctricos, la dirección del fasor C también se invierte, cambiando la ecuación 32 sólo en el signo del fasor C.

$$P_m = B \operatorname{sen} 2\delta_{mn} - C \operatorname{sen} \delta_{mn} \quad (37)$$

### 3.2.4 Límite del sistema de excitación

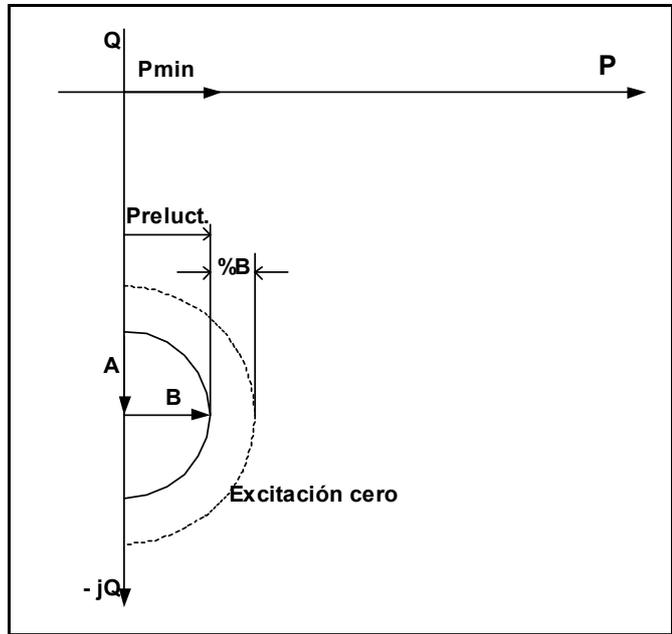
**Tal como se mencionó anteriormente es peligroso hacer trabajar el generador con excitación CERO, pues la potencia de reluctancia es pequeña y no es capaz de soportar las variaciones bruscas de carga experimentadas en el sistema. Bajo estas condiciones, se hace necesario proteger al generador, dándole de un 5 a 10% como mínimo de corriente de campo para funcionamiento estable. Tal condición se logra ampliando la potencia de reluctancia, como un reflejo de esta corriente de campo mínima permisible, un porcentaje del 5 a 10% la magnitud del fasor B, tal como se muestra en la figura 15.**

**Figura 14. Representación del límite de estabilidad**



Fuente: Herick Alberto Sazo Cámara. **Método práctico para determinar las Curvas de Capabilidad de Generadores Síncronos de máquinas hidráulicas.**

**Figura 15. Representación del límite del sistema de excitación**



Fuente: Herick Alberto Sazo Cámara. **Método práctico para determinar las Curvas de Capabilidad de Generadores Síncronos de máquinas hidráulicas.**



#### **4. DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE CAPACIDAD DE UNA MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES**

El análisis correspondiente a la máquina síncrona comprende dos tópicos importantes, cuando la máquina se opera como generador y cuando se opera como motor, éste trabajo esta orientado sólo para el caso de operación de la máquina síncrona operando como generador.

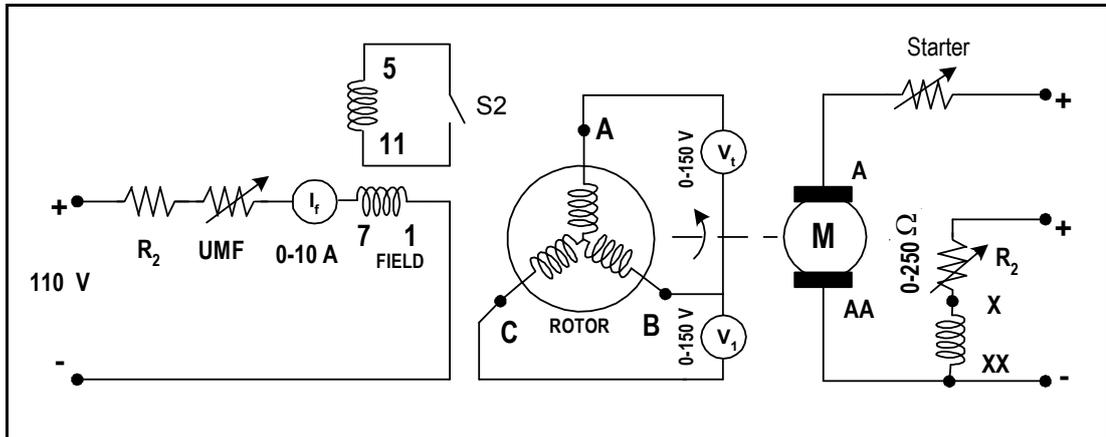
Los datos y curvas que se encontrarán son los correspondientes a la máquina Hampdem del laboratorio de potencia de la Escuela Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería.

##### **4.1 Preparación de la máquina.**

Para obtener las condiciones necesarias mostradas en el diagrama de la figura 16 es necesario el uso de:

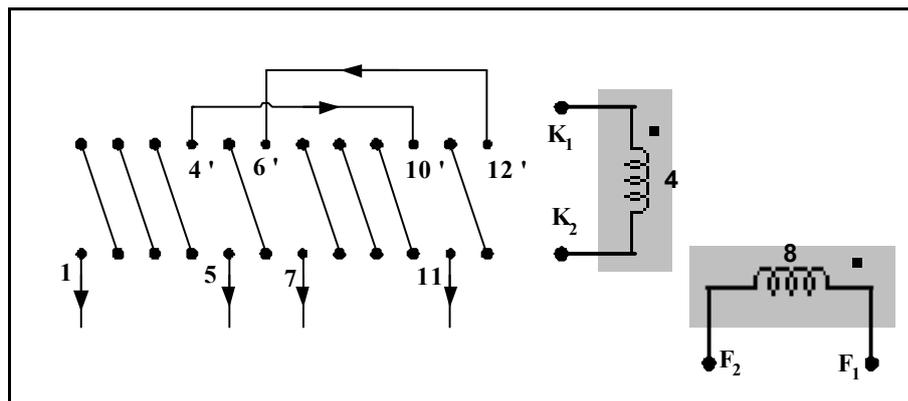
- 1 Vatímetro 0-3000 W.
- 2 Voltímetros 0-150 V.
- 2 Amperímetros 0-20 A, C-A.
- 1 Amperímetro 0-10 A, C-C.
- 1 Amperímetro 0-20 A, C-C.

**Figura 16. Conexiones correspondientes al ensayo de circuito abierto del alternador**



La máquina universal posee internamente conexiones las cuales pueden ser determinadas por las llaves cuyas configuraciones están ya establecidas. En éste caso se utilizó la llave número 9 correspondiente al diagrama de la figura 17.

**Figura 17. Conexiones correspondientes a la llave # 9**



## 4.2 Determinación de la curva de circuito abierto

Con el reóstato de excitación UMF en el mayor valor posible de su resistencia y el interruptor S2 abierto se conecta el motor de impulsión llevando el grupo a la velocidad de 2400 r.p.m. (con esta velocidad el voltaje en terminales es de 76 V).

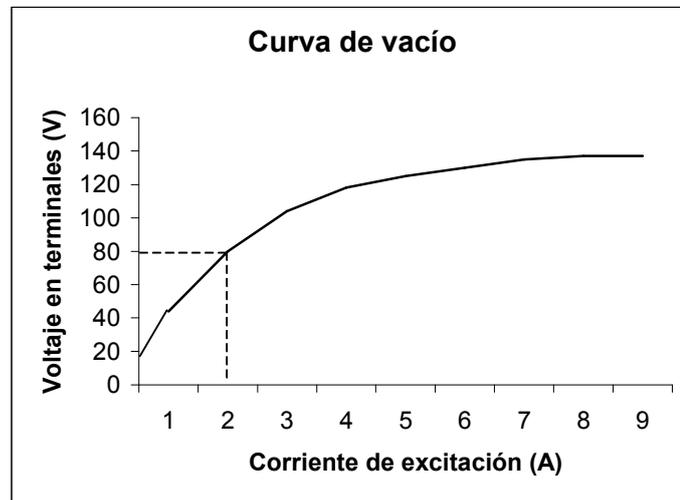
En el paso anterior como S2 esta abierto  $I_f = 0$ . La información proporcionada por el voltímetro no es cero debido al flujo remanente. Al cerrar S2 y tomar los valores de  $I_f$  y  $E_a$  (Utilizando la tabla IV), se disminuye a pequeños saltos UMF, de aquí se toman las lecturas correspondientes de  $I_f$  y  $E_a$ . Debe tomarse en consideración que disminuyendo UMF aumenta la  $I_f$ .

**TABLA II Valores OCC experimentales de la máquina Hampden**

Número de ensayos	Corriente de excitación $I_f$ (A)	Voltaje en terminales $V_t$ (V)	Relación en p.u.
1	0	15	0.16
2	1	45	0.46
3	2	80	1.00
4	3	103	1.30
5	4	118	1.53
6	5	125	1.62
7	6	130	1.69
8	7	135	1.73
9	8	137	1.76

Luego de completar la tabla IV se llevan los valores a un sistema de coordenadas cartesianas, graficando  $E_a$  en el eje de las ordenadas contra  $I_f$  en el eje de las abscisas, se encuentra la llamada característica de circuito abierto (OCC) o curva de vacío mostrada en la figura 18.

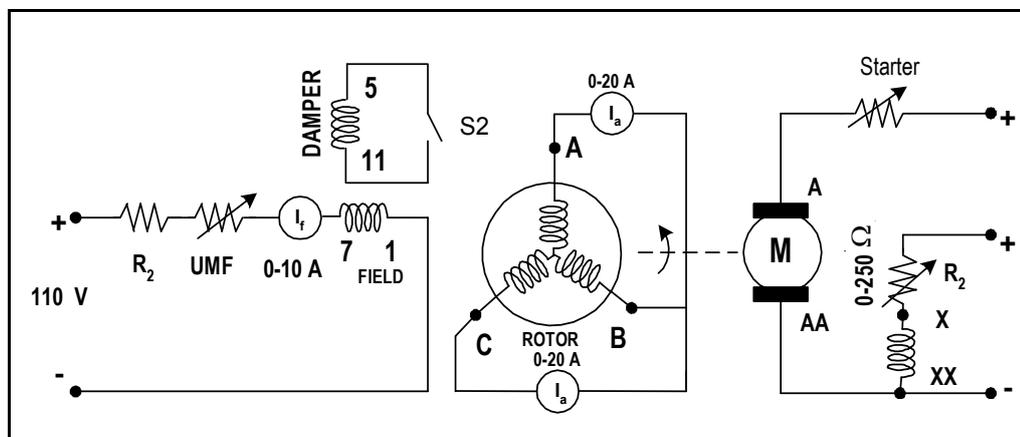
**Figura 18. Curva de vacío de la máquina Hampden Electric**



### 4.3 Determinación de la curva de cortocircuito

De acuerdo a las conexiones de la figura 19 y con la ayuda de la llave #9 es llevado el reóstato de excitación UMF en el mayor valor posible de su resistencia y el interruptor S2 en abierto, se conecta el motor de impulsión llevando el grupo a una velocidad de 2400 r.p.m.

**Figura 19. Conexiones correspondientes al ensayo de cortocircuito del alternador**



Como S2 esta abierto  $I_f = 0$ . Al leer la indicación del amperímetro, se aprecia que esta lectura no será nula debido al flujo remanente. Se cierra H y se anotan los valores de los instrumentos  $I_f$  e  $I_a$  en la tabla V. Al disminuir en pequeños saltos UMF y tomar las lecturas de los instrumentos  $I_f$  e  $I_a$  (use la tabla V).

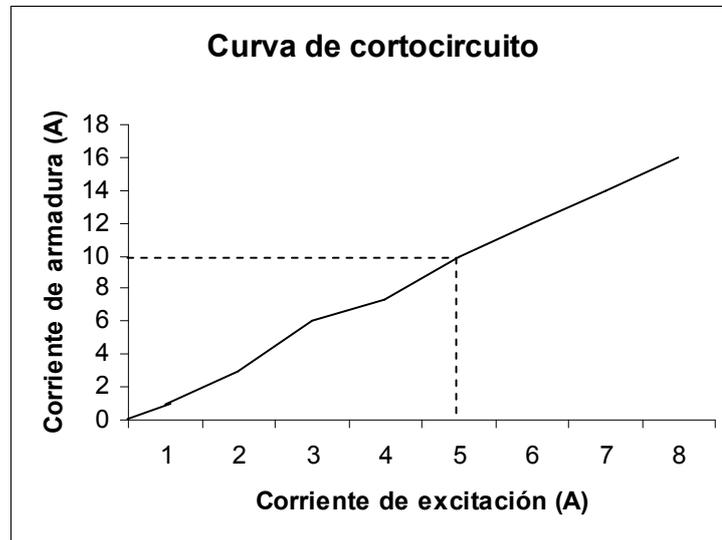
**TABLA III. Valores SCC experimentales de la máquina Hampden Eléctric**

Número de ensayos	Corriente de excitación $I_f$ (A)	Corriente de armadura $I_a$ (A)	Relación en p.u.
1	0	0	0
2	1	1	0.1
3	2	3	0.3
4	3	6	0.6
5	4	7	0.7
6	5	10	1.0
7	6	12	1.2
8	7	14	1.4
9	8	16	1.6

La dependencia de  $I_a$  con respecto a  $I_f$  es lineal, lo que puede parecer extraño si se tiene en cuenta que la fuerza electromotriz en vacío no lo es. La razón es que la corriente  $I_L$  crea un flujo que esta casi en oposición al flujo inductor, de forma que el flujo resultante es pequeño y el núcleo no se satura. Midiendo la resistencia  $R_a$  de uno de los devanados y anotando éste valor en el que corresponda en la tabla V. Éste es el llamado método de Behn Eschenburg.

Graficando en un plano coordenado  $I_a$  en el eje de las ordenadas contra  $I_f$  en el eje de las absisas los datos de la tabla V, se encuentra la llamada característica de cortocircuito (SCC),

**Figura 20. Curva de corto circuito de la máquina Hampden Eléctric**



Esta es la curva que representa el ensayo en cortocircuito con los valores obtenidos experimentalmente.

#### **4.4 Obtención de $X_d$ y $X_q$**

Ahora con los datos obtenidos se encuentra la  $X_d$  y la  $X_q$  que son los valores de las reactancias síncronas de eje directo y eje de cuadratura respectivamente.

De la fórmula (25)

$$X_d = 5/2 = 2.5 \text{ P.U.}$$

y de la relación de  $X_q$  que también se puede observar en el diagrama fasorial:

$$X_q = 1.5 \text{ P.U.}$$

El valor de corriente de excitación que proporciona un voltaje nominal en terminales es 2 A.

El valor de corriente de excitación que proporciona una corriente de armadura nominal es de 5 A.

La relación de cortocircuito para éste generador es de  $2/5 = 0.4$ . Por lo tanto el valor de  $X_d$  es igual al inverso de la relación de cortocircuito.

Además a continuación se muestra el procedimiento en el cálculo de  $E_f$ .

$$\theta = \cos^{-1}(0.8) = 36.869^\circ$$

$$S = V_t I^*$$

$$I = \frac{S}{V_t} = \frac{1.0 / 36.869^\circ}{1.0 / 0^\circ}$$

$$I = 1.0 / -36.869^\circ$$

$$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{IX_q \cos\theta}{V_t + IX_q \sin\theta}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{2.5(0.8)}{1.0 + 1.5 \sin 36.869^\circ}\right)$$

$$\delta = 46.469^\circ$$

$$E_f = V_t \cos\delta + IX_d \sin(\delta + \theta) = \cos 46.469^\circ + 2.5 \sin(46.469^\circ + 36.869^\circ)$$

$$E_f = 3.172 \text{ p.u.}$$

Estos son los datos característicos de la máquina a la cual le queremos determinar sus curvas de capacidad:



#### **4.5 Determinación de las curvas de capacidad**

Para la visualización de los límites característicos de la máquina en cuestión se desarrollo un programa que se encarga del procesamiento de los valores característicos de la máquina y la simulación de las curvas de capacidad llamado CapacidadM.m, en el apéndice B se describen las partes y el desarrollo de éste programa. Por lo tanto, en la computadora utilizada debe instalarse el software Matlab y el programa implementado. A continuación se describen los pasos sencillos pero importantes para lograr la visualización de los límites de capacidad del generador síncrono de polos salientes.

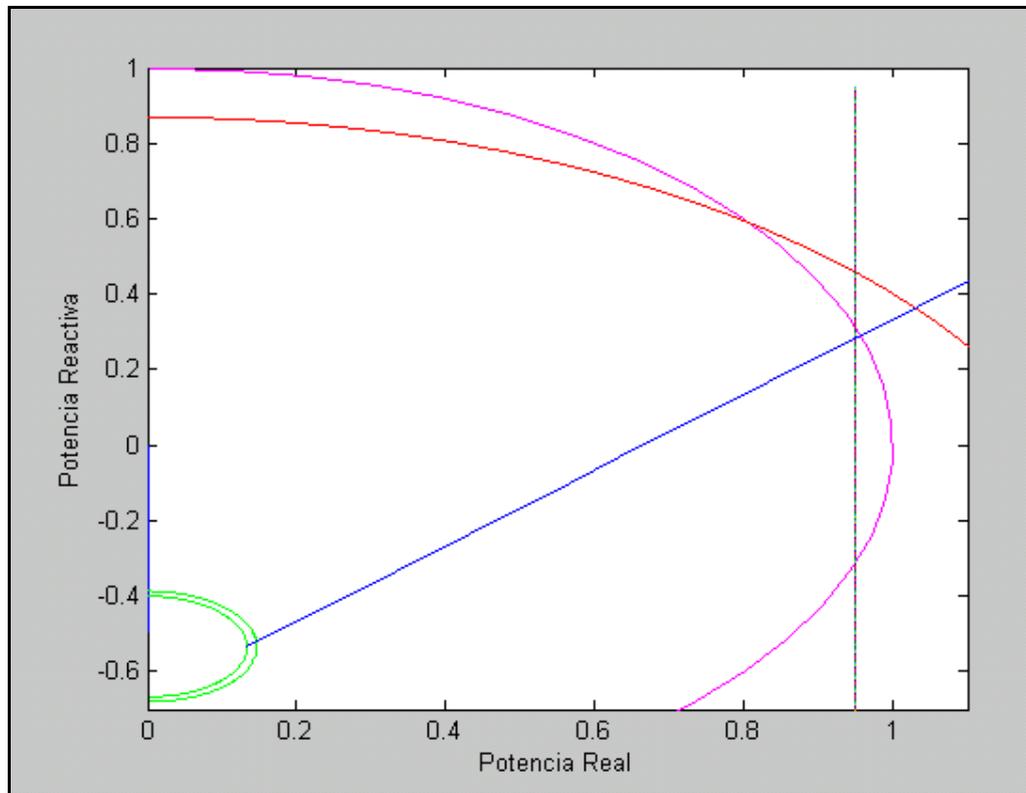
Matlab ejecuta los programas que están ubicados en el directorio de trabajo por lo cual es necesario asegurarse que el directorio elegido para trabajar contenga los programas CapacidadM.m y Curvcap.mdl, con el programa CapacidadM.m ejecutado, se ingresan los parámetros en el encabezado, estos valores de los datos del generador se deben expresar en valores por unidad. El valor  $E_f$  se calcula con la ecuación (8). Una vez colocados los valores, la ejecución del programa se realiza presionando la tecla F5 grabando automáticamente.

Ahora se procede a abrir con el icono Simulink de la página principal de Matlab el programa fuente Curvcap.mdl, en el se puede observar la secuencia de operación de todos los datos característicos de la máquina que son llevados a cabo por medio de diagramas de flujo de señal. Para la ejecución de éste programa se presiona el icono Start Simulación o con la combinación de teclas Ctrl+T.

Finalmente para obtener las curvas se ubica en el Command Window de la página principal de Matlab y se escribe la palabra Return la cual luego de presionar la tecla Enter visualizara en pantalla las curvas de capacidad del generador síncrono de polos salientes al cual corresponden los valores característicos ingresados.

Siguiendo esta secuencia se llega a la representación electrónica de las curvas de capacidad del generador asíncrono de polos salientes, representada en la figura 22.

**Figura 21. Curvas de capacidad de la máquina Hampden Eléctric**



#### **4.6 Interpretación de las curvas de capacidad de la máquina universal Hampdem**

La figura 22 se muestran los límites que existen en el rotor y en el estator debido al aumento de las corrientes de campo y armadura respectivamente, que corresponden al generador síncrono de polos salientes del laboratorio de máquinas eléctricas, también está presente el límite de estabilidad permanente práctico que se dibuja a un 10 % a partir del teórico. Y el círculo o límite de excitación.

La diferencia entre la curva de capacidad del generador de polos salientes frente al de rotor liso, es la presencia del círculo de excitación y la curva de estabilidad permanente.

El área comprendida entre el límite de la armadura, el límite del campo, el límite de estabilidad, el círculo de excitación y el límite del primotor, representa los puntos en donde los valores de corriente y potencias son aceptables para no ocasionarle un sobrecalentamiento el cual venga a causar un daño en los devanados de la máquina.

En el caso de la máquina universal del laboratorio de Máquinas Eléctricas expresa un área delimitada mayoritariamente por la curva de corriente de campo representada en color rojo, una pequeña fracción por la curva de corriente de armadura representada por una línea color morado, el límite de estabilidad representado con la línea azul y del círculo de excitación color verde, se puede observar lo reducida que es con respecto a los valores nominales en p.u. de esta.

La reducción del área de operación permisible sin sobrecalentamiento ha tomado estos valores debido a los sobrecalentamientos a los que ha sido sometida en las prácticas realizadas con anterioridad. Habría que tomarse en cuenta también el tiempo de vida que debería tener la máquina antes de un mantenimiento completo.

En la figura 32 del apéndice se puede observar la curva de capacidad perteneciente al generador síncrono de de la unidad No.1 Jurún Marinalá, se puede observar que el área que encierran los límites es mucho mayor que la de la máquina Hampden del laboratorio de Máquinas Eléctricas.

La disminución en la capacidad del generador se debe a muchos factores tales como:

- Sobrecalentamientos que ha sufrido el generador
- Ambiente marino
- Operaciones inadecuadas
- Tiempo de vida de la máquina
- Altas temperaturas

## CONCLUSIONES

1. No se debe operar el generador sin conocimiento de sus valores nominales y sin conocimiento de los límites de operación, ya que, si esto no se toma en cuenta, el generador podría ser sometido a esfuerzos mecánicos y térmicos en sus devanados provocando su daño permanente.
2. Las Curvas de capacidad del generador síncrono de polos salientes se determinan, mediante un código de programación, los límites de operación del generador cuando sean obtenidos sus valores característicos.
3. La diferencia entre las curvas de capacidad de un generador de rotor cilíndrico y un generador de polos salientes, están en la presencia del límite de excitación, el cual está presente sólo en el caso de un generador de polos salientes debido al par de reluctancia que éste posee.
4. La curva de capacidad de la máquina Hampden Eléctric que pertenece al laboratorio de Máquinas Eléctricas presenta una reducción que se debe a continuos calentamientos a los que fue sometida con anterioridad y a la falta de mantenimiento que es necesaria, ya que, tiene muchos años de uso y a pesar de eso funciona correctamente.
5. Matlab facilitó, en gran manera, la visualización de los límites de operación de la máquina síncrona de polos salientes y el manejo del programa es fácil y rápido, de tal manera que la práctica correspondiente a éste programa no necesita de mucho procedimiento para la obtención de los resultados buscados.



## RECOMENDACIONES

1. Es necesaria la modernización de los métodos de estudios utilizados para el aprendizaje, debido a la demanda existente de experiencia en el ámbito laboral, siendo importante el apoyo que la informática puede brindarnos para alcanzar esos objetivos.
2. La práctica en los laboratorios es el complemento que la teoría no puede llenar en la comprensión del funcionamiento de cualquier dispositivo ya sea de medición, generación, transmisión o distribución. Por lo tanto, debe cuidarse y mantenerse todo el equipo que existe en el laboratorio.
3. Es de vital importancia conocer los datos del fabricante y los diagramas de conexión de un generador, cuando se tenga que realizar una serie de pruebas, para evitar accidentes o un daño permanente a la máquina, también, una mala conexión puede llevar a obtener datos erróneos que no nos darán una información válida del funcionamiento del generador.
4. Se debe tener el conocimiento en el desarrollo de los modelos que representan en base científica el comportamiento de toda maquinaria o herramienta que soluciona tareas, ya sea en el trabajo o en estudio, ya que, de esta manera, se podrá solucionar cualquier problema que se presente a la hora de la operación de esta maquinaria.
5. Lo alcanzado en este trabajo puede ser aplicado como una práctica en el laboratorio del curso de Máquinas Eléctricas.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Chapman, Stephen J. **Máquinas Electricas**. México: Editorial McGraw- Hill. 1992.
2. Fitzgerald, A. E., Charles Kingley y Stephen D. Umans. **Màquinas Eléctricas**. México: Editorial Mcgraw-Hill, 1992. 653pp.
3. Matsh, Leander W. **Máquinas Electromecánicas y Electromagnéticas**. México: Editorial Limusa, 1987.
4. Mcpherson, George. **Introducción a máquinas electricas y transformadores**. México: Editorial Limusa, 1987.
5. Perez Lopez, Cesar. **Matlab y sus Aplicaciones en las Ciencias y la Ingeniería**. México: Editorial Prentice-Hall
6. Sazo Cámara, Herick Alberto. **Método practico para determinar las Curvas de Capacidad de Generadores Síncronos de máquinas hidráulicas**, universidad San Carlos de Guatemala. 1994.

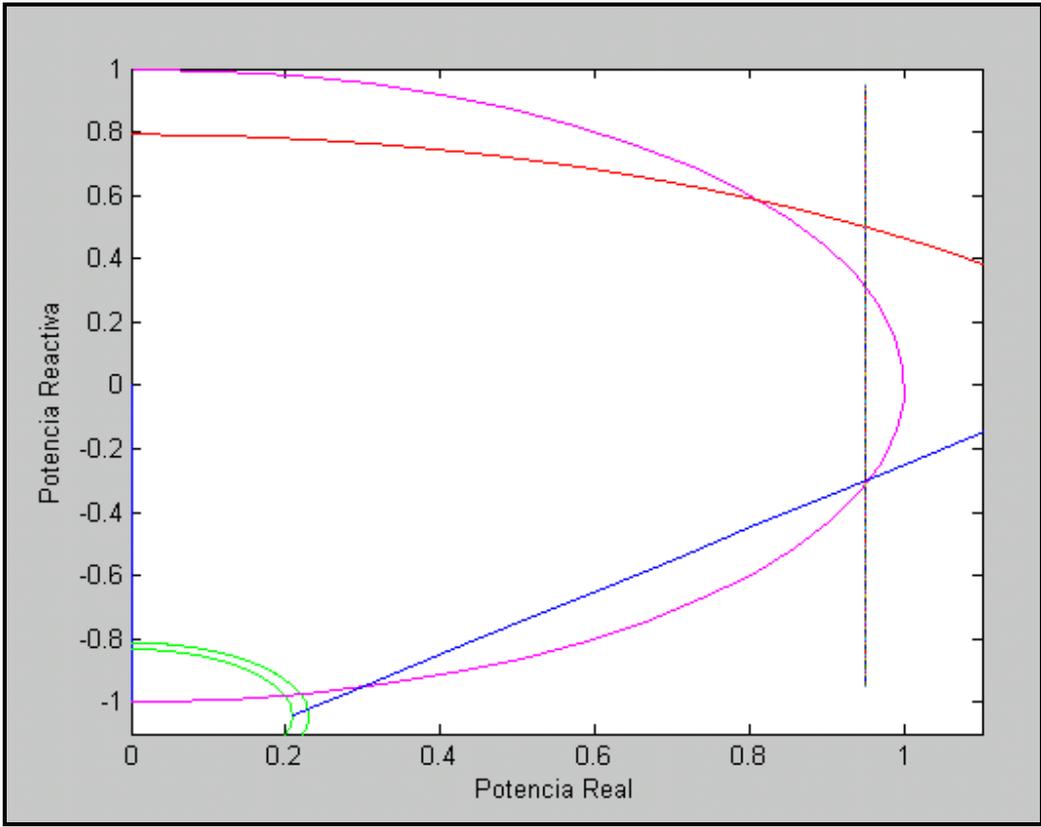


## APÉNDICE

Figura 22. Fotografía de las máquinas universales Hampden Electric.



**Figura 23. Curva de capacidad del generador de la unidad No1 Jurún Marinalá.**



## **A. PRÁCTICA CURVAS DE CAPACIDAD**

El objetivo de la práctica es obtener las curvas características que modelan el comportamiento de la máquina sincrónica cuando trabaja como generador, realizando las pruebas en la máquina universal del laboratorio de potencia en la Escuela Mecánica Eléctrica.

### **A.1 Ensayos en la máquina universal**

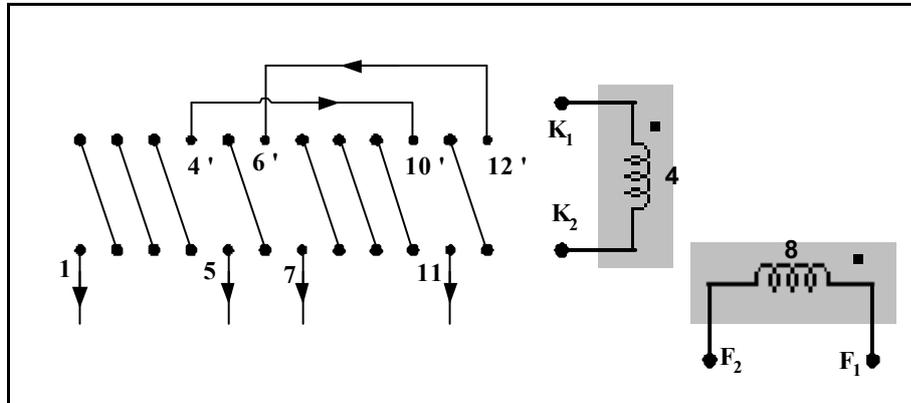
El fundamento teórico en el cual se basa la realización de esta práctica puede obtenerlo a través del material que se explica en seguida:

- Máquinas Eléctricas, Stephen Chapman Tercera Edición Capítulo 3.
- Máquinas Eléctricas, A. E. Fitzgerald Segunda Edición Capítulo 4.
- CD que se proporcionara en el laboratorio.
- <http://kabea.ujaen.es/Descargas/Apuntes/Práctica>

### **A.2 Generalidades**

La práctica correspondiente a la máquina sincrónica comprende dos tópicos importantes, cuando la máquina se opera como generador y cuando se opera como motor, a continuación se muestran, en detalle, las experiencias que engloban la práctica de la máquina sincrónica como generador puesto que éste trabajo está orientado sólo para el caso de operación de la máquina sincrónica como generador.

**Figura 24. Conexiones correspondientes a la llave # 9**



### **Equipo a utilizar**

- Vatímetros 0-3000 W.
- 1 Voltímetro 0-150 V.
- 1 Amperímetro 0-20 A, C-A.
- Amperímetros 0-10 A, C-C.
- 1 Amperímetro 0-20 A, C-C.

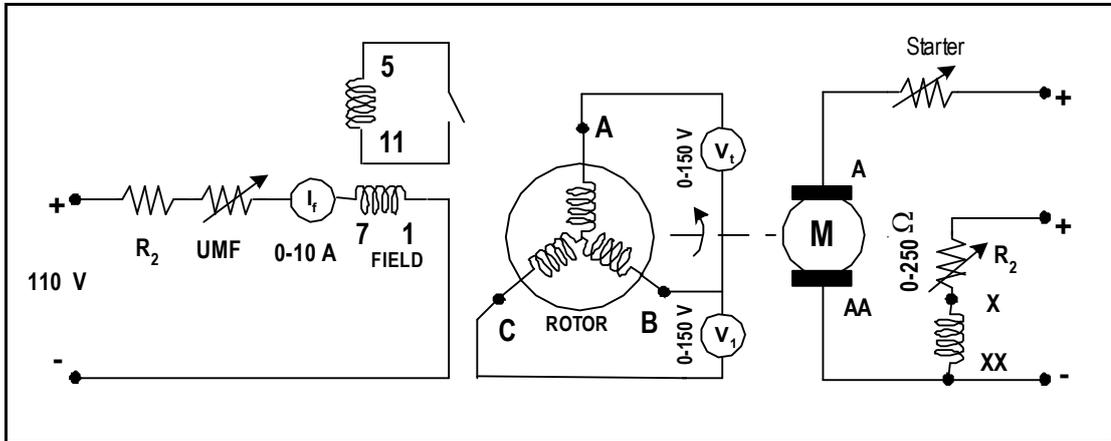
### **A.3 Determinación de $X_d$ y $X_q$**

En esta parte se detallan los pasos a seguir para determinar las reactancias síncronas en un generador de polos salientes, cabe mencionar que el caso de un generador de polos lisos la reactancia síncrona es igual a la reactancia en el eje directo por lo que sólo bastará con encontrar éste parámetro. Para encontrar estos parámetros debemos realizar los ensayos de circuito abierto y de corto circuito.

### **A.3.1 Características de Circuito Abierto (OCC)**

- Haga las conexiones de acuerdo con la figura 17.
- Use la llave #9 (ver figura 16).
- Con el reóstato de excitación UMF en el mayor valor posible de su resistencia y el interruptor S2 abierto conectar el motor de impulsión llevando el grupo a la velocidad de 2400 r.p.m., con esta velocidad el voltaje en terminales será de 76 voltios.
- En el paso anterior como S2 esta abierto  $I_f = 0$ . Lea la información del voltímetro, es probable que el voltímetro no indique una lectura nula, esto se debe al flujo remanente.
- Cierre S2 y tome los valores de  $I_f$  y  $E_a$ , use la tabla II.
- Disminuya a pequeños saltos UMF y tome las lecturas correspondientes de  $I_f$  y  $E_a$ , tome en consideración que disminuyendo UMF aumenta la  $I_f$ , use la tabla II.
- Lleve estos valores a un sistema de coordenadas cartesianas.
- Disminuya escalonadamente  $I_f$  y anote los valores de  $E_a$  e  $I_f$ , tome en consideración que disminuyendo escalonadamente el valor de  $I_f$  aumenta escalonadamente el valor de UMF, use tabla II.
- Lleve estos valores al mismo sistema de coordenadas cartesianas del paso anterior.

**Figura 25. Ensayo de circuito abierto del alternador**



**TABLA IV Datos para confeccionar la OCC del generador**

Número de ensayos	Corriente de excitación $I_f$ (A)	Voltaje en terminales $V_t$ (V)	Relación en p.u.
1	0		
2	1		
3	2		
4	3		
5	4		
6	5		
7	6		
8	7		
9	8		

### Resultados

- Reproduzca el diagrama de conexiones utilizado en el ensayo en circuito abierto del generador síncrono.

- Grafique en un plano coordenado  $E_a$  en el eje de las ordenadas contra  $I_f$  en el eje de las abscisas usando los datos de la tabla II para cada una de las situaciones citadas en los pasos del procedimiento anterior, esta es la llamada característica de circuito abierto (OCC).

### **A.3.2 Características de Corto Circuito (SCC)**

- Haga las conexiones de acuerdo a la figura 18.
- Use la llave #9 (ver figura 16).
- Con el reóstato de excitación UMF en el mayor valor posible de su resistencia y el interruptor S2 en abierto conecte el motor de impulsión llevando el grupo a una velocidad de 2400 r.p.m.
- Como S2 esta abierto  $I_f = 0$ . Lea la indicación del amperímetro, esta lectura no será nula debido al flujo remanente.
- Cierre H y anote los valores de los instrumentos  $I_f$  e  $I_a$  en la tabla III.
- Disminuya a pequeños saltos UMF y tome las lecturas de los instrumentos  $I_f$  e  $I_a$ , use la tabla III.
- La dependencia de  $I_a$  con respecto a  $I_f$  es lineal, lo que puede parecer extraño si se tiene en cuenta que la fuerza electromotriz en vacío no lo es. La razón es que la corriente  $I_L$  crea un flujo que esta casi en oposición al flujo inductor, de forma que el flujo resultante es pequeño y el núcleo no se satura.
- Mida la resistencia  $R_a$  de uno de los devanados y anote éste valor en el valor que corresponda en la tabla III.  
Éste es el llamado método de Behn Eschenburg.

Figura 26. Ensayo de cortocircuito del alternador

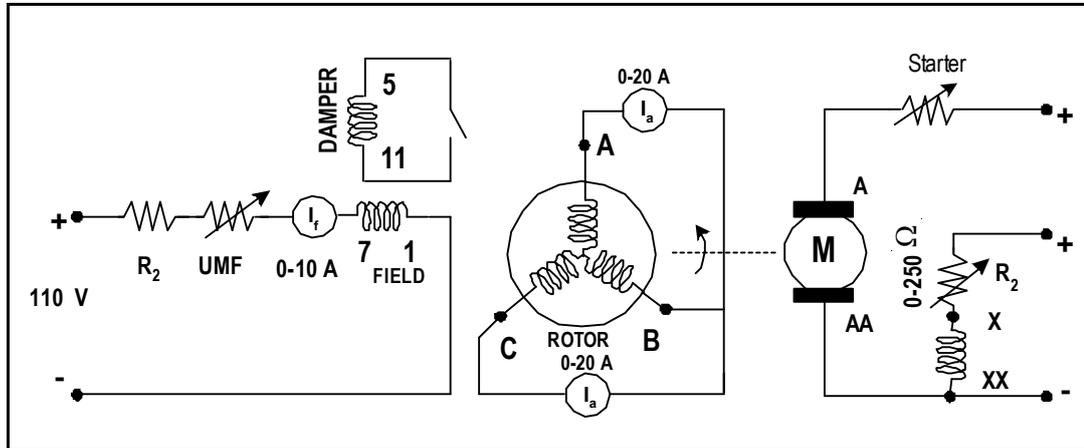


TABLA V Datos para confeccionar la SCC del generador

Número de ensayos	Corriente de excitación $I_f$ (A)	Corriente de armadura $I_a$ (A)	Relación en p.u.
1	0		
2	1		
3	2		
4	3		
5	4		
6	5		
7	6		
8	7		
9	8		

### Resultados

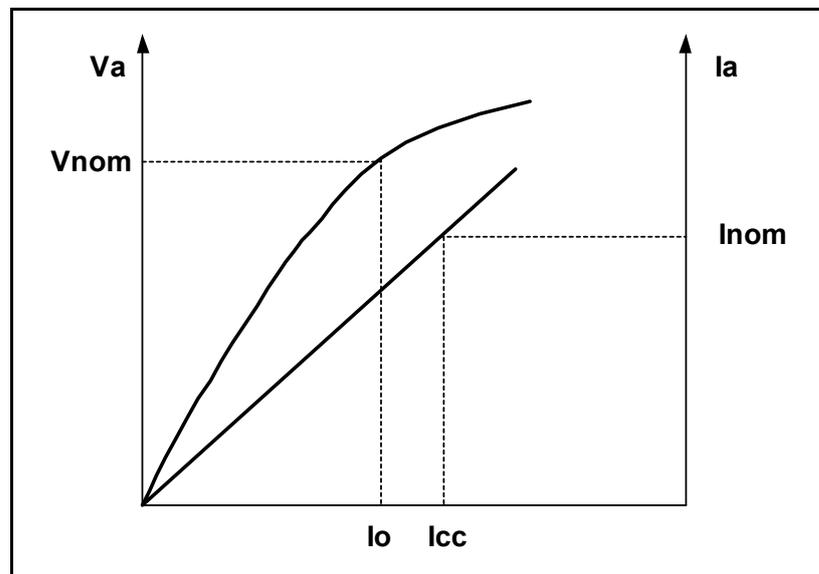
- Reproduzca el diagrama de conexiones utilizado en el ensayo en cortocircuito.
- Grafique en un plano coordenado  $I_a$  en el eje de las ordenadas contra  $I_f$  en el eje de las abscisas los datos de la tabla III, esta es la llamada característica de cortocircuito (SCC).

- Traslade el gráfico de la curva ascendente obtenido en el inciso anterior a un plano coordinado junto con el gráfico del punto 4.3.1.1 con  $E_a$  e  $I_a$  en el eje de las ordenadas e  $I_f$  en el eje de las abscisas.
- Haciendo uso de las relaciones gráficas anteriores y la lectura de  $R_a$  obtenga la reactancia síncrona y de cortocircuito de la Máquina Universal Hampden ensayada deje una memoria de cálculo en su reporte.

#### A.4 Determinación de la reactancia síncrona en el eje directo (xd)

La reactancia síncrona no saturada se calcula a partir de las curvas características de vacío y cortocircuito obtenidas anteriormente tal como se muestra en la figura 19.

**Figura 27. Curvas de saturación y de vacío obtenidas de las tablas**



Por lo tanto la reactancia síncrona en el eje directo no saturada se determinara a partir de la siguiente relación:

$$x_d = I_{cc}/I_o \quad (38)$$

Donde:

$X_d$ : reactancia síncrona en el eje directo no saturado.

$I_{cc}$ : corriente de cortocircuito para la corriente nominal en la armadura.

$I_o$ : corriente de vacío no saturada para la tensión nominal en la línea del entrehierro.

Éste valor, también, equivale a la reactancia síncrona para el caso del generador de polos lisos.

#### **A.5 Determinación de la reactancia síncrona en el eje de cuadratura ( $X_q$ )**

Para la determinación de éste parámetro se hará uso de los resultados obtenidos en la prueba de deslizamiento, así como el valor de  $x_d$  encontrado en el paso anterior. A partir de los valores máximos y mínimos de la corriente y tensión de armadura obtenidas de la prueba de deslizamiento, podemos encontrar las reactancias síncronas saturadas  $x_{ds}$  y  $x_{qs}$  mediante las siguientes relaciones:

$$X_{ds} = E_{max}/I_{min} \quad X_{qs} = E_{min}/I_{max}$$

Luego el valor de la reactancia en cuadratura no saturada se determinará a través de la siguiente relación:

$$X_q = X_d(X_{qs}/X_{ds}) = X_d(E_{min}/E_{max})(I_{min}/I_{max})$$

Todos los valores de reactancias encontrados están dados en por unidad sin embargo, si el objetivo es encontrar el valor de la reactancia síncrona en el eje de cuadratura no saturado, se pueden utilizar los valores reales de tensión y corriente debido a que estos sólo expresan una relación en la ecuación.

#### **A.6 Datos del generador síncrono de polos salientes**

En éste punto se enlistaran los datos que corresponden al generador síncrono de polos salientes tomados de la máquina universal que es parte y que esta situada en el laboratorio de Máquinas Eléctricas. Los datos son los importantes ya que a partir de estos se determinaran las curvas de capacidad.

- Marca
- Tipo
- Polos
- Potencia aparente nominal
- Factor de potencia
- Voltaje nominal
- Corriente nominal
- Frecuencia
- Velocidad nominal
- Relación de corto circuito
- Clase de aislamiento
- $X_d$
- $X_q$

Algunos de los datos son encontrados en la placa de la máquina, los demás son los calculados por los ensayos antes realizados. Es importante que los datos sean trasladados a valores por unidad.

## **A.7 Determinación de la curva de capacidad**

Para la visualización de los límites característicos de la máquina en cuestión haremos uso de la herramienta consistente en un programa elaborado en el ambiente Matlab, por lo cual es necesario el uso de una computadora y que en ella esté instalado el software. A continuación, se describen los pasos sencillos pero importantes para lograr la visualización de los límites de capacidad del generador síncrono de polos salientes.

- Matlab ejecuta los programas que están ubicados en el directorio de trabajo por lo cual es necesario asegurarse que el directorio elegido para trabajar contenga los programas CapacidadM.m y Curvcap.mdl.
- Presionando el icono Open File abrimos el programa fuente CapacidadM.m, en el encabezado se ingresaran los valores de los datos del generador en valores por unidad. El valor  $E_f$  se calcula con la ecuación (8). Una vez colocados los valores, la ejecución del programa se realiza presionando la tecla F5 grabando automáticamente.
- Ahora procedemos a abrir con el icono Simulink de la página principal de Matlab el programa fuente Curvcap.mdl, en el podemos observar la secuencia de operación de todos los datos característicos de la máquina que son llevados a cabo por medio de diagramas de flujo de señal. Para la ejecución de éste programa podemos presionar el icono Start Simulación o con la combinación de teclas Ctrl+T.

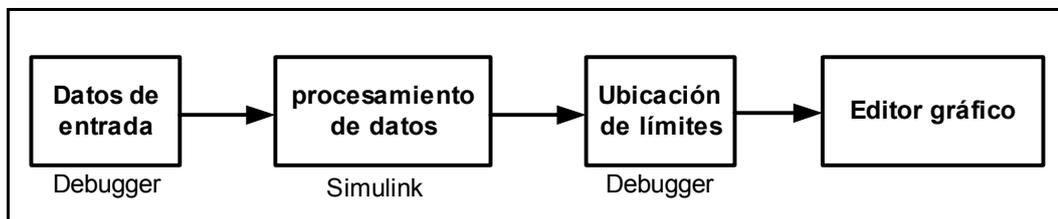
- Finalmente, para obtener las curvas nos ubicamos en el Command Window de la página principal de Matlab y escribimos la palabra Return la cual luego de presionar la tecla Enter visualizara en pantalla las curvas de capacidad del generador síncrono de polos salientes al cual corresponden los valores característicos ingresados.



## B. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

La descripción del funcionamiento del programa y de las partes que lo conforman, así como de toda la herramienta utilizada que brinda el software de Matlab se presenta a continuación. Debido a que el análisis completo para la visualización de las curvas va de la mano con el desarrollo de los modelos matemáticos se presentaran los bloque de flujo de señal que fueron empleados, en ellos existen funciones especiales para cada procedimiento efectuado hasta alcanzar el fin del mismo.

**Figura 28. Diagrama de bloques correspondiente al programa Curvas de capacidad de la máquina síncrona de polos salientes**



En el diagrama de bloques de la figura 23 se muestra como es la estructura básica del programa, también esta es la secuencia que debe llevarse a cabo en la operación del programa.

### B.1 Editor de programas

Permite la creación de informes estándar y personalizados de los algoritmos desarrollados en MATLAB. Los informes pueden ejecutar comandos de MATLAB a medida que se van procesando, lo cual nos ofrece la posibilidad de documentar nuestras pruebas con MATLAB a medida que las realizamos.

### B.1.1 Rutinas para ingreso de variables.

Éste segmento es fundamental en el programa debido a que aquí es en donde se iniciara la toma de los valores que serán analizados y procesados en un filtro de bloques que les darán la forma necesaria a cada señal que a la vez serán transmitidas a otros bloques hasta concluir la cadena en un elemento de almacenamiento.

Los datos ingresados en éste lugar corresponderán a los datos característicos más importantes para la finalidad que estamos tratando. Estos valores se ingresaran de la siguiente manera:

**Figura 29. Figura correspondiente a Datos de entrada**

```
clf; clear;
%Variables
%Xq=0.8;Xd=1.2;fp=0.8;Pm=1;Ef=1.674;Vt=1.0;Sn=1.0;
%Pm=0.8; %potencia mecánica máxima de la turbina

Xq=1.5;
Xd=2.5;
fp=0.8;
Ef=2.2;
Vt=1.0;
Sn=1.0;
Pm=0.9; %potencia mecánica máxima de la turbina
```

Los comandos utilizados que son los disponibles de un grupo denominado de propósito general que pueden ser clasificados en varias categorías. Estas categorías, de acuerdo con la función esencial de los comandos podrían ser.

- Comandos que manejan variables en el espacio de trabajo.
- Comandos que trabajan con ficheros y el entorno operativo.
- Comandos que manejan funciones.
- Comandos que controlan la ventana Command Window.
- Comandos de comienzo y salida de MATLAB.

### B.1.2 Ubicación y especificación de los límites.

En éste bloque los datos son ordenados para dar la ubicación en el eje de coordenadas en función de la potencia real y de la potencia reactiva de los límites los cuales ya han sido procesados en el Simulink.

**Figura 30. Figura correspondiente a ubicación de límites**

```

display('Corra la simulación y luego escriba return')
keyboard
%Creación y extracción de los fasores A, B y C
a=0:0.1:abs(Fasores(1,1));
A=a*-i;
Breal=Fasores(:,2);
B=Fasores(:,2)-i*abs(Fasores(1,1));
B10=Breal*1.1-i*abs(Fasores(1,1));
C=Fasores(:,3);
    %Vector de potencia nominal
[X,Y] = pol2cart(-pi:0.1:pi,Sn);
Icampo=B+C;
Pestatica=Pestatica-i*abs(Fasores(1,1));
y=-Pm:0.001:Pm;

```

En éste paso es en donde los límites toman forma y se ubican en el lugar representativo en valores por unidad. La importancia de éste bloque esta en que éste delimita el área de operación normal del generador sin ser sometido a esfuerzos en sus devanados.

El uso matricial nos ha facilitado el trabajo para el desarrollo de los límites, MatLab emplea matrices porque con ellas se puede describir infinidad de cosas de una forma altamente flexible y matemáticamente eficiente. Una matriz de píxeles puede ser una imagen o una película. Una matriz de fluctuaciones de una señal puede ser un sonido o una voz humana. Y tal vez más significativamente, una matriz puede describir una relación lineal entre los componentes de un modelo matemático. En éste último sentido, una matriz puede describir el comportamiento de un sistema extremadamente complejo. Por ejemplo, una matriz puede representar el vuelo de un avión a 40.000 pies de altura, o un filtro digital de procesamiento de señales.

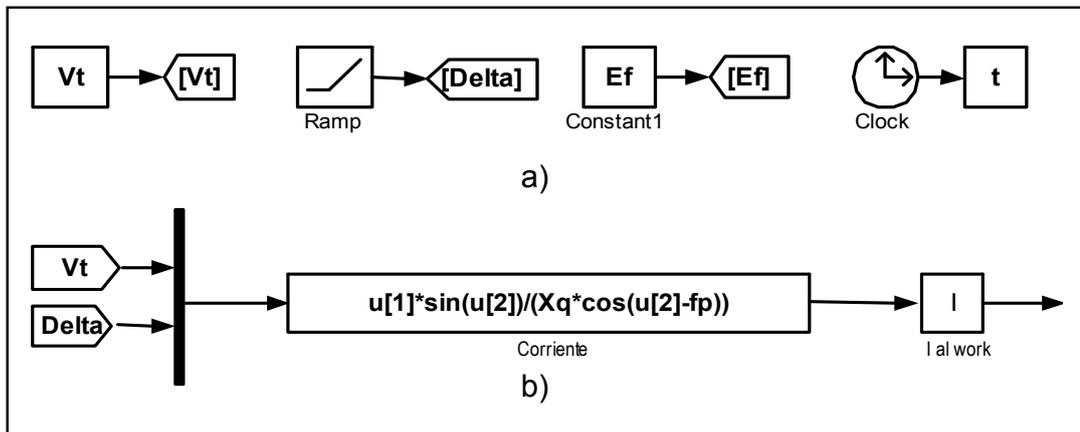
## **B.2 Simulink**

Es un entorno gráfico interactivo para el modelado, análisis y simulación de una gran variedad de sistemas dinámicos, discretos, analógicos e híbridos, mediante la utilización de diagramas de bloques. Permite la incorporación de los algoritmos y controles que se hayan desarrollado en C previamente a la utilización de Simulink.

### **B.2.1 Procesamiento de datos.**

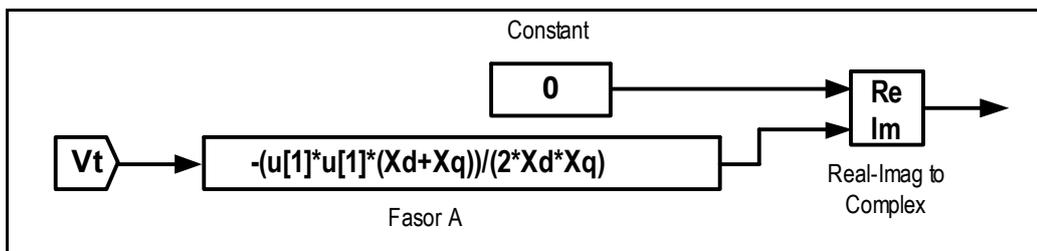
Los datos obtenidos en el Editor/Debugger son trasladados al Simulink a través de marcas especiales figura 26, guardando sus valores en banderas para su posterior procesamiento.

**Figura 31. Diagrama de bloques correspondiente al traslado de datos a Simulink**

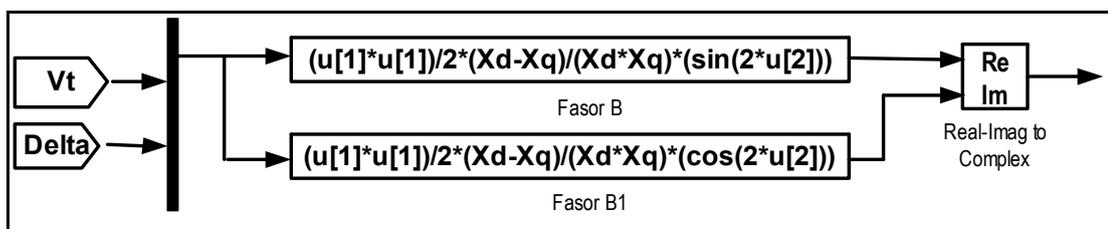


Los fasores descritos en el apartado 3.2 ahora son transformados en diagramas de bloques para los requerimientos del Simulink, fasores A, B y C representados en las figuras 27,28 y 29 respectivamente.

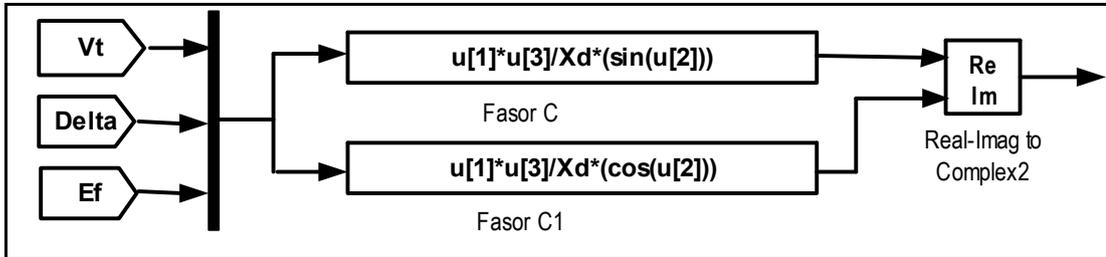
**Figura 32. Diagrama de bloques correspondiente al Fasor A**



**Figura 33. Diagrama de bloques correspondiente al Fasor B**

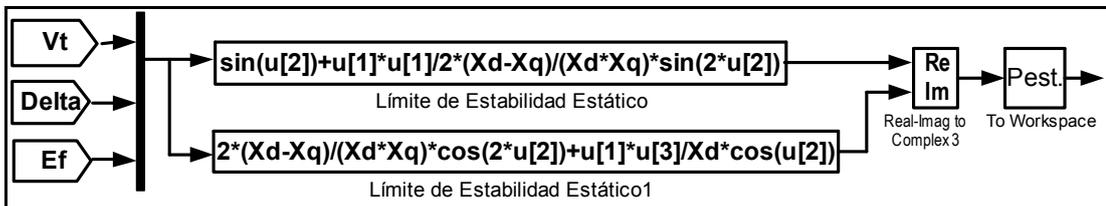


**Figura 34. Diagrama de bloques correspondiente al Fasor C**



Además de los fasores A, B y C, también es necesario introducir el límite de estabilidad permanente del apartado 3.2.3 representado en el diagrama de bloques de la figura 30

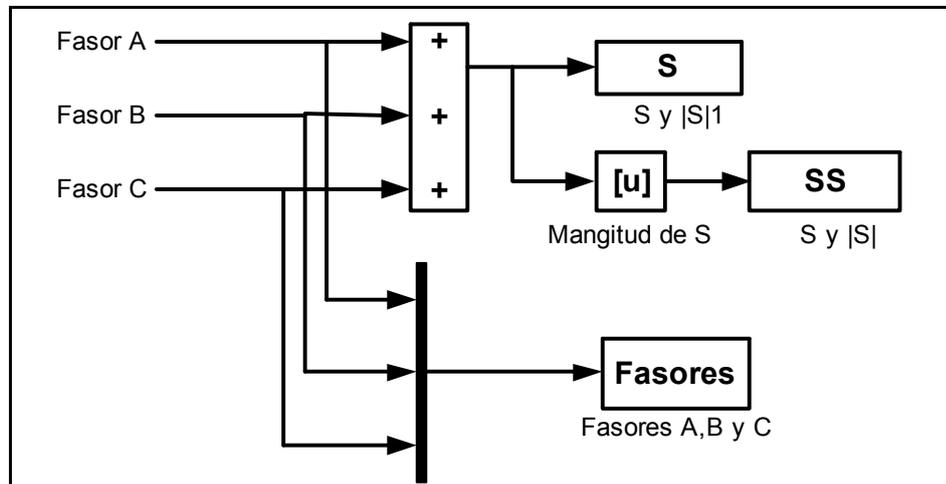
**Figura 35. Diagrama de bloques correspondiente al Límite de estabilidad permanente**



Los valores filtrados en el Simulink son recolectados figura 31 y entregados nuevamente al Editor/Debugger para continuar con el proceso mostrado en el diagrama de bloques de la figura 23

Éste conjunto de diagramas reducen espacio y trabajo en el programa ya que de no ser por éste sistema gráfico se pudo haber llegado a lo mismo pero con mayor dificultad matemática, hubiese sido complicado el desarrollo matricial para el desarrollo de todo éste sistema.

**Figura 36. Diagrama correspondiente a la salida de datos del Simulink**



### **B.3 Editor de gráficos.**

El módulo básico de MATLAB ofrece una gama amplia de opciones a la hora de realizar representaciones gráficas. Permite realizar gráficos de curvas planas y superficies, posibilitando la agrupación y la superposición. También es posible trabajar colores, rejillas, marcos, etc., en los gráficos. Las representaciones de funciones pueden realizarse en coordenadas implícitas, explícitas y paramétricas. MATLAB es, por tanto, un software matemático con elevadas prestaciones gráficas, lo que le distingue de muchos otros paquetes de cálculo simbólico. En el caso del programa que estamos utilizando el editor de gráficos genera los límites que delimitan el área de operación de un generador síncrono de polos salientes, con los datos en valores por unidad.



