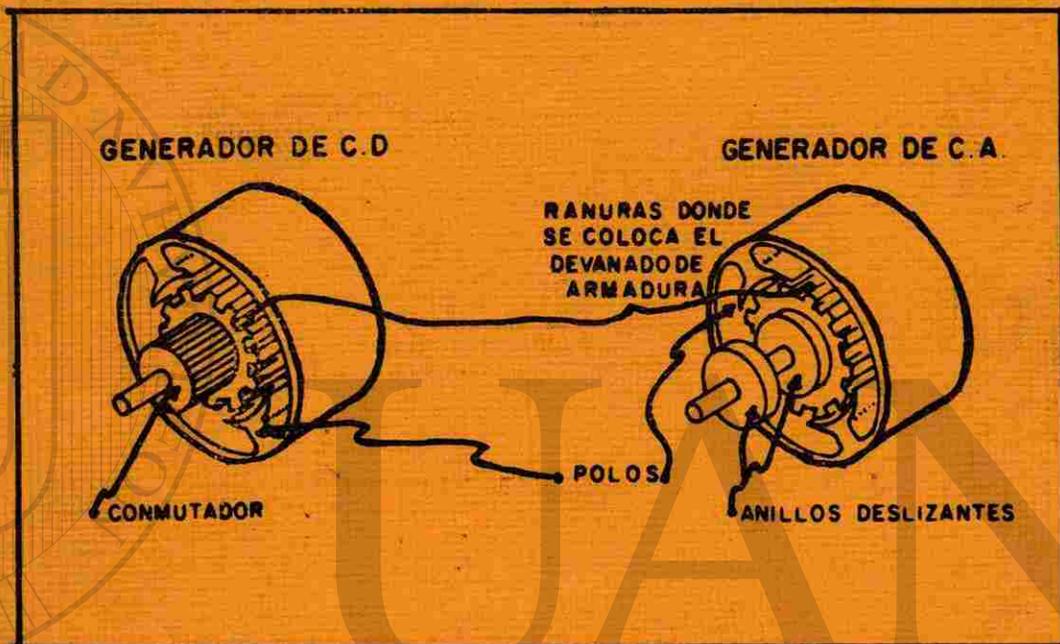


Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

U.A.N.L.



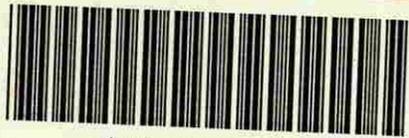
MAQUINAS SINCRONICAS

Monterrey, N. L.,

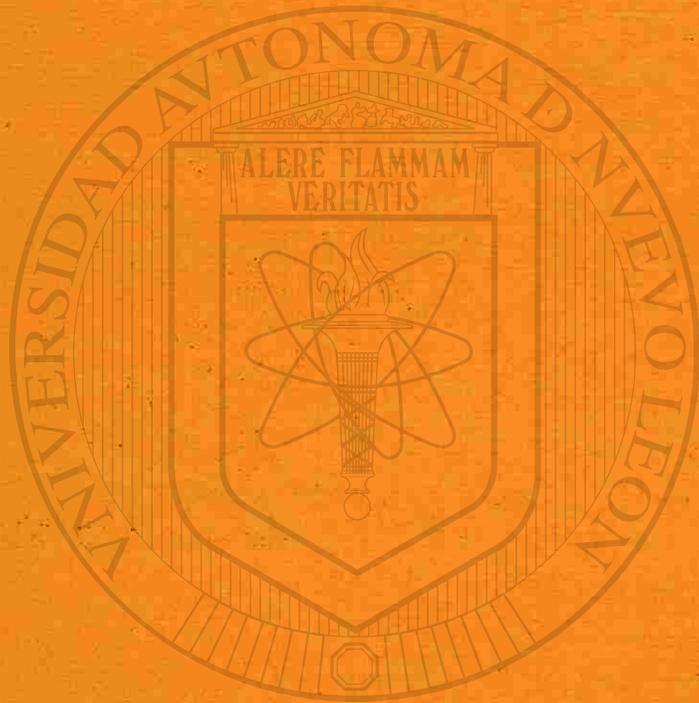


TK 273

M3



1020082595



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

no hay 054

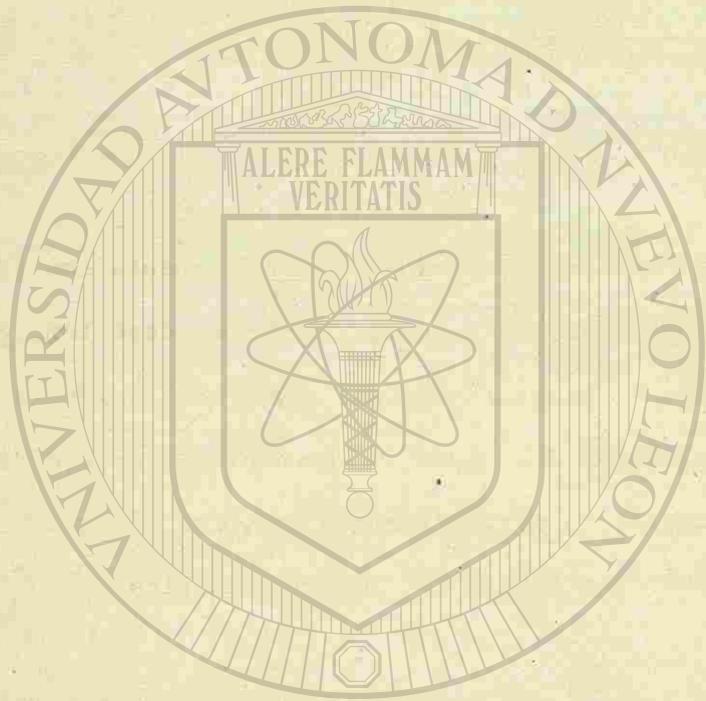
PRESENTACION

JUAN L

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA



[Handwritten signature]



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

INDICE

PRESENTACION

PAG.

Introducción	1
El Generalato Universitario	3
Formas del Voluntario	3
Presentación	9
El presente trabajo debe ser evaluado tomando en cuenta las limitaciones en tiempo y académicas del autor. Más aún, debe tomarse solamente como una base de discusión de los temas que aborda ya que es una visión muy personal del orden en que deben verse y en algunos casos representa también la concepción muy personal del que los explica, es decir, deben ser leídos con espíritu crítico.	14

Finalmente es justo aclarar que estos materiales han sido presentados por el autor para ser utilizados en un tesis, recurso utilizado en nuestra escuela para acercar fondos económicos a los departamentos. Deseamos también que las opiniones y críticas se nos han llegar por algún medio para así poder mejorarlos.

Juan López

1245 NT
2 M
32228 ✓
22
24
25

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

TK 2731

M 3

PRESENTATION



FONDO UNIVERSITARIO

35958

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

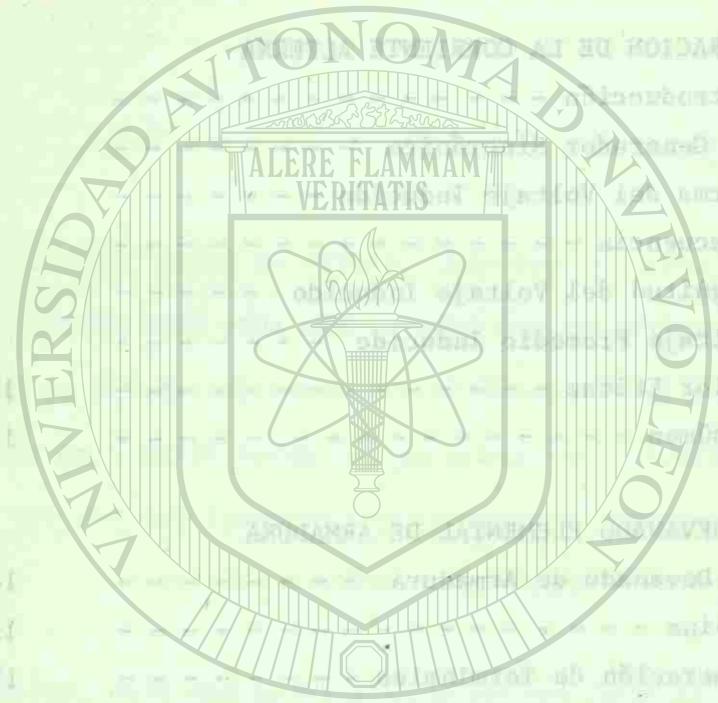
[Handwritten signature]

INDICE

PAG.
29

	PAG.
CAPITULO IV. METODOS DE DISEÑO DE ALTERNAN	29
Introducción	30
CAPITULO I. GENERACION DE LA CORRIENTE ALTERNA	30
Introducción	1
El Generador Sincrónico	3
Forma del Voltaje Inducido	3
Frecuencia	8
Magnitud del Voltaje Inducido	9
Voltaje Promedio Inducido	9
Valor Eficaz	11
Resúmen	13
CAPITULO II. EL DEVANADO ELEMENTAL DE ARMADURA	13
El Devanado de Armadura	14
Bobina	15
Numeración de Terminales	17
Conexión en Estrella de los Devanados	19
Diagrama Circular	20
Resúmen	21
CAPITULO III. TIPOS DE ROTORES Y FORMA REAL DE LA FUERZA MAGNETOMOTRIZ DEL ROTOR.	21
Introducción	22
Rotor de Polos Salientes	22
Fuerzas Magnetomotrices Armónicas	24
Rotor Liso o Cilíndrico	25

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

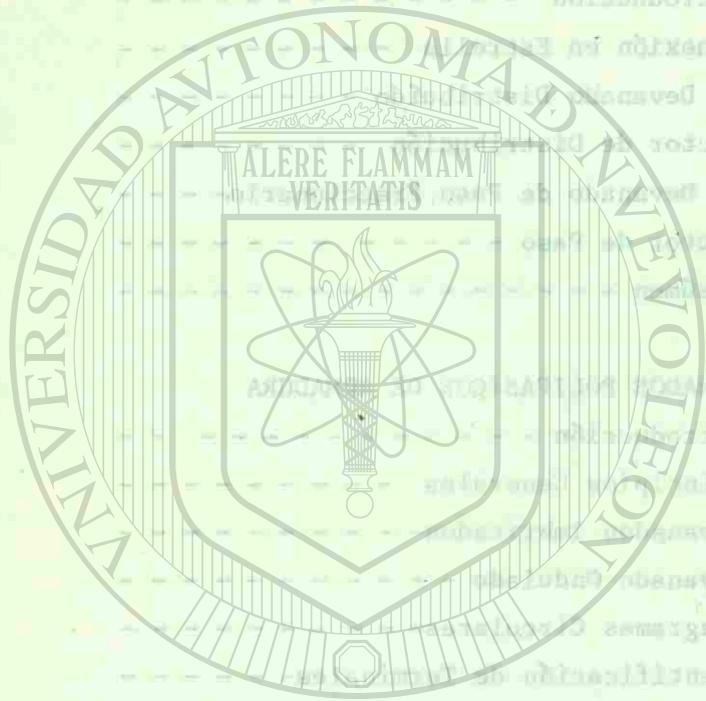


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

	PAG.
Resúmen - - - - -	29
CAPITULO IV. METODOS DE DISMINUCION DE ARMONICAS	
Introducción - - - - -	30
Conexión en Estrella - - - - -	30
El Devanado Distribuido - - - - -	33
Factor de Distribución - - - - -	35
El Devanado de Paso Fraccionario - - - - -	41
Factor de Paso - - - - -	43
Resúmen - - - - -	49
CAPITULO V. DEVANADOS POLIFASICOS DE ARMADURA	
Introducción - - - - -	50
Principios Generales - - - - -	50
Devanados Imbricados - - - - -	53
Devanado Ondulado - - - - -	58
Diagramas Circulares - - - - -	58
Identificación de Terminales - - - - -	69
Devanado en Estrella - - - - -	69
Devanado en Delta - - - - -	73
Problemas - - - - -	76
CAPITULO VI. EL MOTOR SINCRONICO, METODOS DE ARRANQUE ®	
Introducción - - - - -	78
El Campo Giratorio - - - - -	78
Métodos de Arranque - - - - -	85
Inversión de Giro - - - - -	90

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO I

PAG.

CAPITULO VII. DIAGRAMAS VECTORIALES DEL GENERADOR Y DEL MOTOR CON ROTOR CILINDRICO.

Diagramas Vectoriales del Generador y del Motor con Rotor Cilíndrico. - - - - -	91
Máquina No Saturada - - - - -	91
Máquina Saturada - - - - -	94

CAPITULO VIII. CARACTERISTICAS DEL GENERADOR SINCRONICO

Característica de Vacío - - - - -	96
Característica en Carga - - - - -	97
Característica en Corto Circuito - - - - -	101
Triángulo de Potier - - - - -	102
Relación de Corto Circuito - - - - -	104
Determinación de la Reactancia Síncrona de Eje Directo X_d - - - - -	106
Regulación de la Tensión - - - - -	107
Problemas - - - - -	114

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

GENERACION DE LA CORRIENTE ALTERNA

Introducción.- En el estudio de los Transformadores y de las Máqui--
de C.D. nos damos cuenta de que lo fundamental para inducirle -
voltaje a una bobina está en HACER VARIAR LA MAGNITUD DEL FLUJO-
MAGNETICO ENLAZADO POR ELLA. Es decir, en el generador de C.D.-
al darle un movimiento al rotor, hacemos que las bobinas en él -
colocadas giren dentro del flujo magnético provocado por los po-
los del estator para llevar a cabo la inducción del voltaje.
El voltaje inducido en las bobinas de ésta manera, es sin duda -
un voltaje alterno. Sin embargo en las escobillas aparece volta-
je directo debido a que el arreglo conmutador-escobillas, permi-
te rectificarlo.

¿Podemos entonces, de un generador de Corriente Directa obtener
Corriente Alterna?

¡Claro que SÍ!, Basta con cambiar el conmutador por anillos ro-
santes y lograremos ese objetivo. La figura 1-1 nos muestra un-
generador de C.D. (faltan en él las bobinas de armadura). La fi-
gura 1-2 nos enseña la misma máquina convertida en un generador-

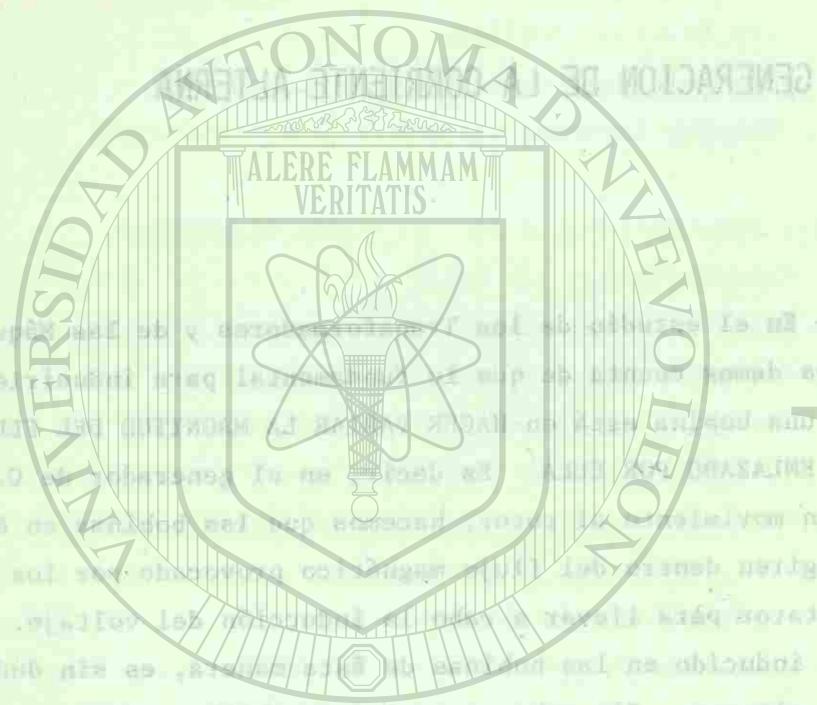
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

GENERACION DE LA CORRIENTE ALTERNA

Introducción.- En el estudio de los Transformadores y de las Máquinas de C.D. nos damos cuenta de que lo fundamental para inducirle un voltaje a una bobina está en HACER VARIAR LA MAGNITUD DEL FLUJO MAGNETICO ENLAZADO POR ELLA. Es decir, en el generador de C.D. al darle un movimiento al rotor, hacemos que las bobinas en él colocadas giren dentro del flujo magnético provocado por los polos del estator para llevar a cabo la inducción del voltaje. El voltaje inducido en las bobinas de ésta manera, es sin duda un voltaje alterno. Sin embargo en las escobillas aparece voltaje directo debido a que el arreglo conmutador-escobillas, permite rectificarlo.

¿Podemos entonces, de un generador de Corriente Directa obtener Corriente Alterna?

¡Claro que SÍ!, Basta con cambiar el conmutador por anillos rotantes y lograremos ese objetivo. La figura 1-1 nos muestra un generador de C.D. (faltan en él las bobinas de armadura). La figura 1-2 nos enseña la misma máquina convertida en un generador-



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

de C.A.

GENERADOR DE C.D.

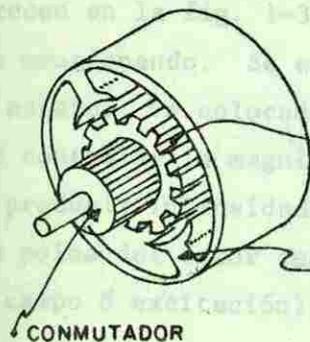


Fig. 1-1 Esquema de un Generador de Corriente Directa

GENERADOR DE C.A.

RANURAS DONDE SE COLOCA EL DEVANADO DE ARMADURA



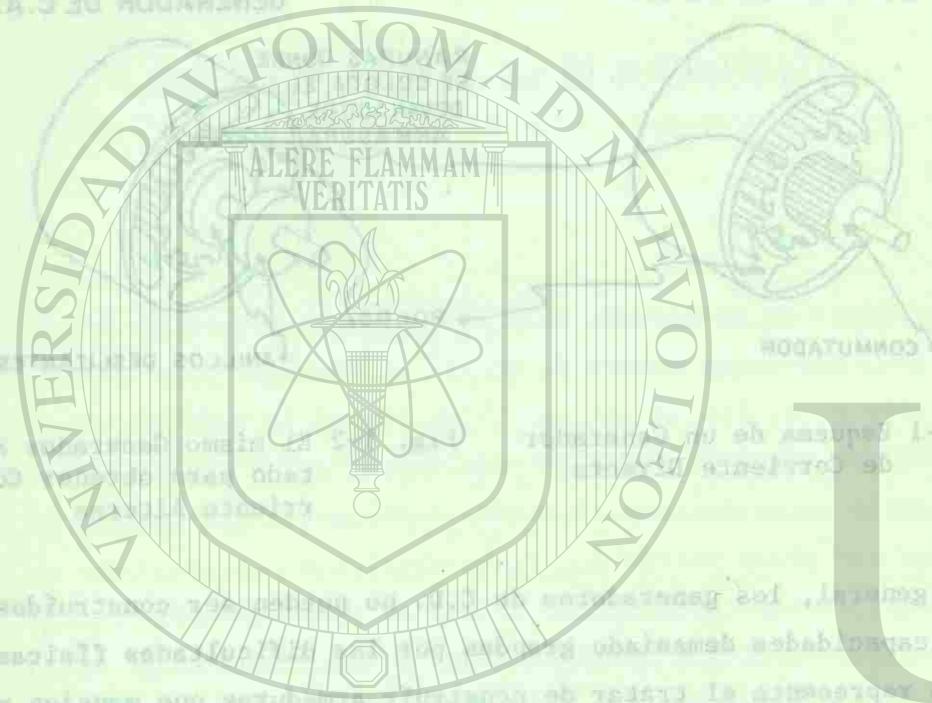
Fig. 1-2 El mismo Generador Adaptado para obtener Corriente Alterna

En general, los generadores de C.D. no pueden ser construídos para capacidades demasiado grandes por las dificultades físicas que representa el tratar de construir armaduras que manejen mucha energía, pero principalmente, por los problemas que plantea la conmutación de corrientes excesivas. Por estas mismas razones, y por algunas otras, el generador de Corriente Alterna de la figura 1-2 resulta poco recomendable.

Si lo que deseamos, es producir flujo variable dentro de las bobinas de armadura podemos, por otra parte, colocar dichas bobinas fijas en el estator y los polos en el rotor (ver fig. 1-3), obteniendo resultados semejantes al generador de la fig. 1-2 pero con las ventajas que nos significa fijar el embobinado de ar-

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

GENERADOR DE C.D. GENERADOR DE C.D.



madura en el estator.

El Generador Síncrono.- Consideramos entonces, que las partes principales de que consta el Generador Síncrono son las que aparecen en la fig. 1-3, con las funciones que posteriormente iremos mencionando. Se entiende, que en las ranuras dibujadas en el estator, va colocado el embobinado de armadura y que para poder controlar la magnitud del flujo de los polos pero también para producir intensidades considerables de flujo, conviene que los polos del rotor sean electroimanes (rodeados por las bobinas de campo ó excitación).

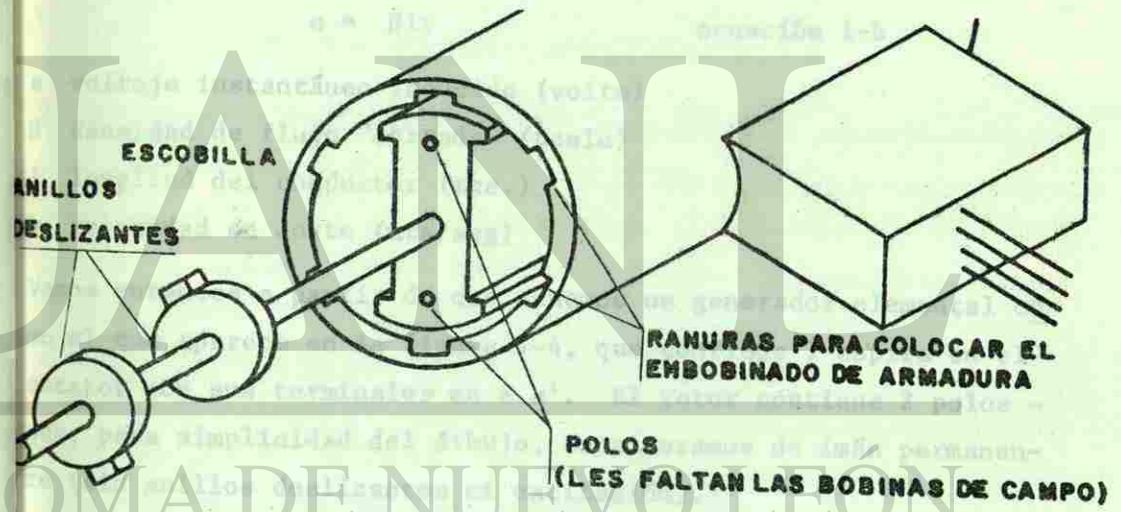
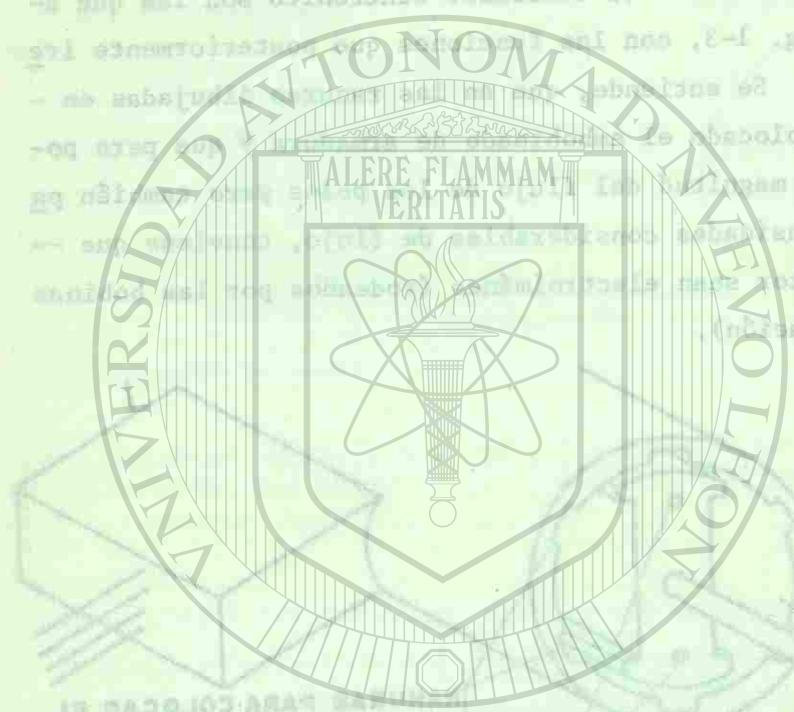


Fig. 1-3 Generador Síncrono Elemental

2 Forma del Voltaje Inducido.- El valor instantáneo del voltaje inducido en una bobina que enlaza a un flujo variable, está especificado por la Ley de Faraday que nos dice que:

$$e = N \frac{d\phi}{dt} \quad \text{ecuación 1-a}$$

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA



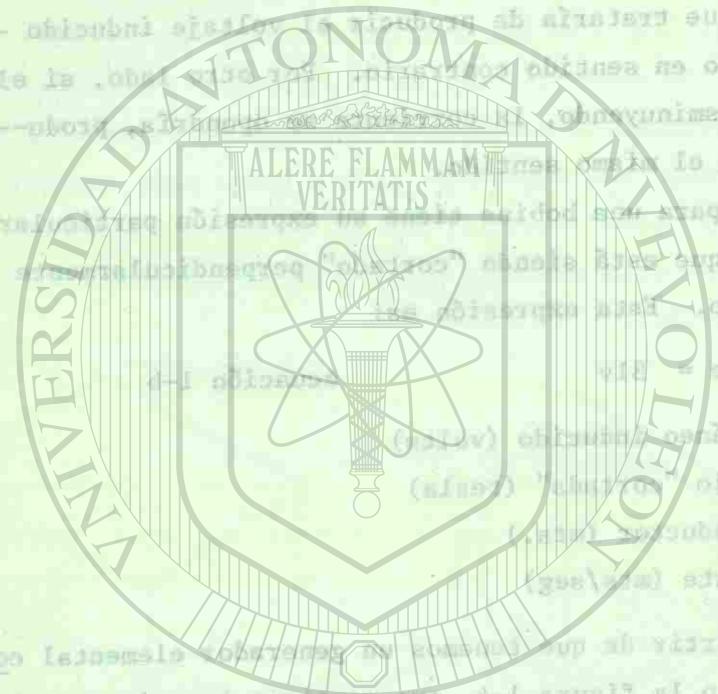
y su polaridad por la Ley de Lenz la que aclara que "EL VOLTAJE-INDUCIDO DEBE TRATAR DE PRODUCIR UNA CORRIENTE QUE SE OPONGA A LA VARIACION DE FLUJO". Es decir que, si el flujo está aumentando, la corriente que trataría de producir el voltaje inducido -- produciría un flujo en sentido contrario. Por otro lado, si el flujo estuviera disminuyendo, la corriente se opondría, produciendo un flujo en el mismo sentido.

La Ley de Faraday para una bobina tiene su expresión particular para un conductor que está siendo "cortado" perpendicularmente por líneas de flujo. Esta expresión es:

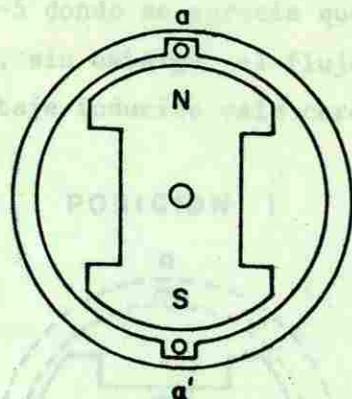
$$e = \beta l v \quad \text{ecuación 1-b}$$

- e voltaje instantáneo inducido (volts)
- β densidad de flujo "cortada" (tesla)
- l longitud del conductor (mts.)
- v velocidad de corte (mts/seg)

Vamos entonces a partir de que tenemos un generador elemental como el que aparece en la figura 1-4, que contiene 1 espira en el estator con sus terminales en a a'. El rotor contiene 2 polos -- que, para simplicidad del dibujo, consideramos de imán permanente (sin anillos deslizantes ni excitación).

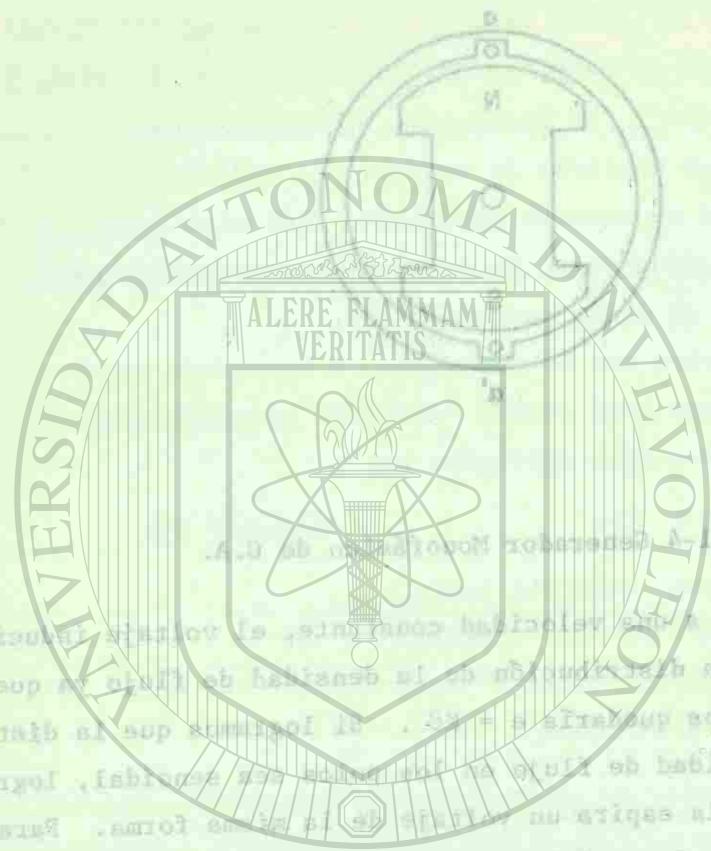


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Si el rotor, gira a una velocidad constante, el voltaje inducido sólo depende de la distribución de la densidad de flujo ya que - la ecuación 1-b nos quedaría $e = K\beta$. Si logramos que la distribución de la densidad de flujo en los polos sea senoidal, lograremos inducir en la espira un voltaje de la misma forma. Para concretar sobre la forma del voltaje inducido y sobre la frecuencia consideraremos primero que la distribución de la densidad de flujo en un polo de la máquina es senoidal y, en segundo término consideraremos que los conductores "a" y "a'" ocupan posiciones simétricas en el estator con respecto a los polos, es decir, que cuando "a" esté cortando cierta densidad de flujo bajo un polo norte "a'" esté cortando la misma densidad bajo el polo sur (bobina de paso completo).

Vamos a analizar el voltaje inducido en la espira cuando el rotor está en movimiento. La primera posición que observaremos, a



parece en la fig. 1-5 donde se aprecia que los conductores enlazan el máximo flujo, sin embargo, el flujo que cortan es nulo y por lo tanto el voltaje inducido vale cero.

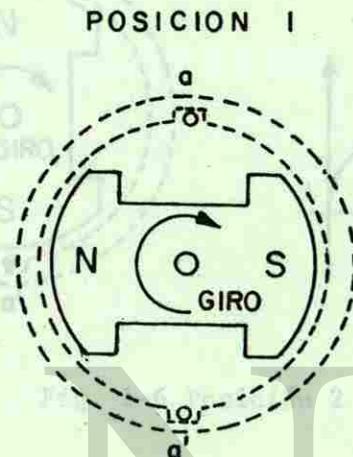
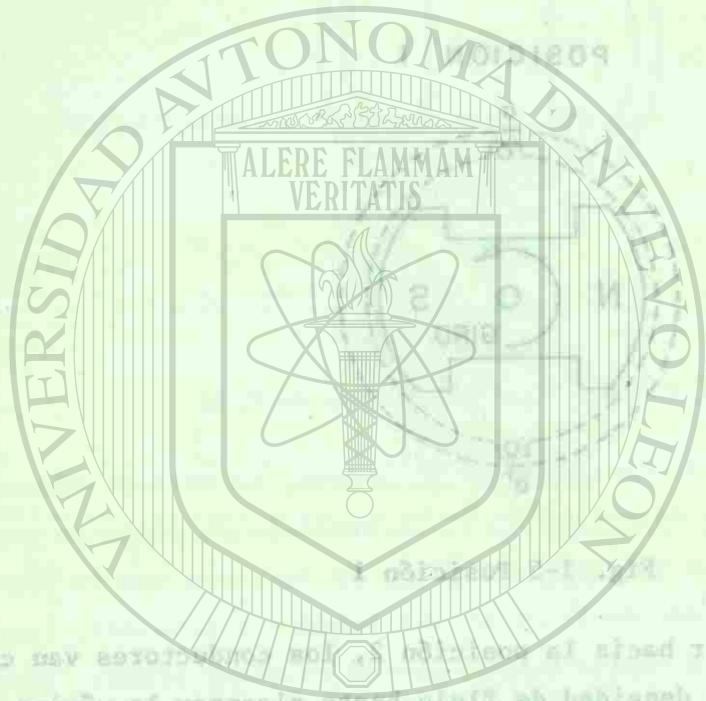


Fig. 1-5 Posición 1

Al avanzar el rotor hacia la posición 2, los conductores van cortando cada vez más densidad de flujo hasta alcanzar la máxima -- (centro de los polos), y entonces máximo voltaje inducido.

La polaridad del voltaje inducido la podemos determinar de la siguiente forma: La espira, en la posición 1 está enlazando todo el flujo, que dentro de ella viaja hacia el lado derecho, al desplazarse hacia la posición 2, este flujo enlazado va disminuyendo por lo tanto el voltaje inducido en la espira trata de producir una corriente que refuerce al flujo (o sea que se oponga a su variación), por lo tanto entrará por abajo y saldrá por arriba.

Fig. 1-7 Posición 3



POSICION 2

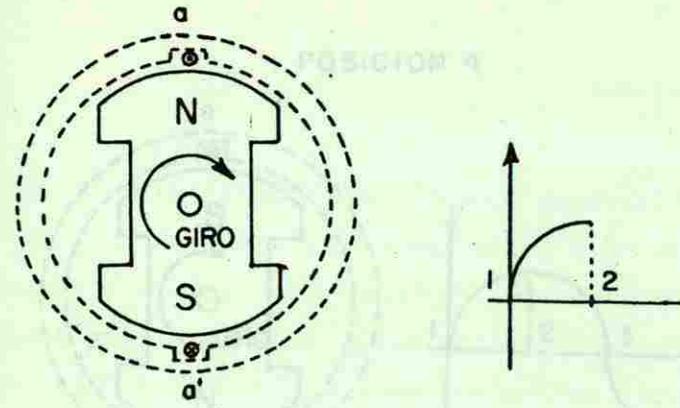


Fig. 1-6 Posición 2

Al dirigirse el rotor desde la posición 2 hacia la 3, nuevamente los conductores pasarán a cortar cero densidad de flujo y por lo tanto a inducir cero voltaje.

POSICION 3

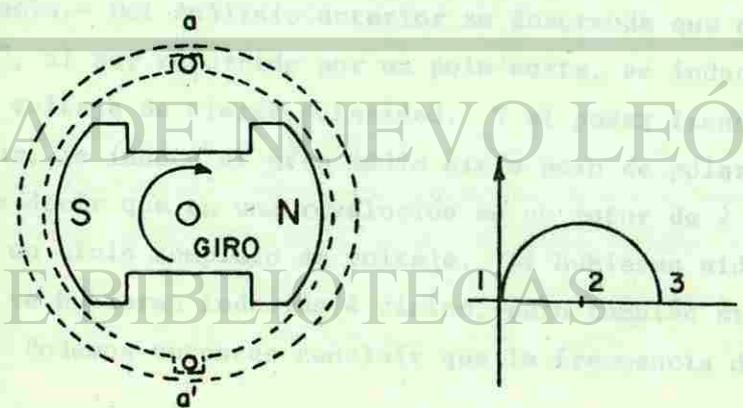
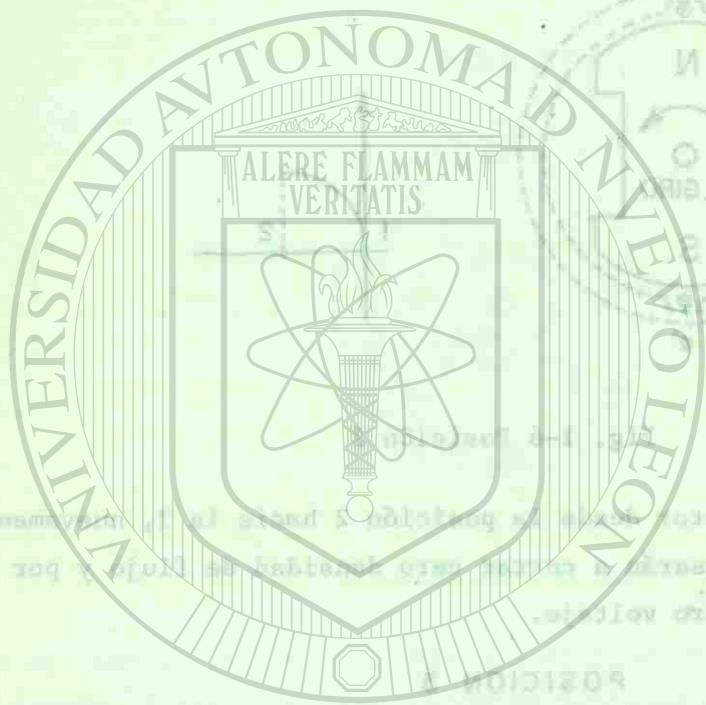


Fig. 1-7 Posición 3

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Al pasar de 3 a 4, nuevamente los conductores pasarán a máximo - voltaje inducido que según la Ley de Lenz tendrá la polaridad -- contraria a la posición 2, es decir, entrará la corriente por a - y saldrá por a'.

POSICION 4

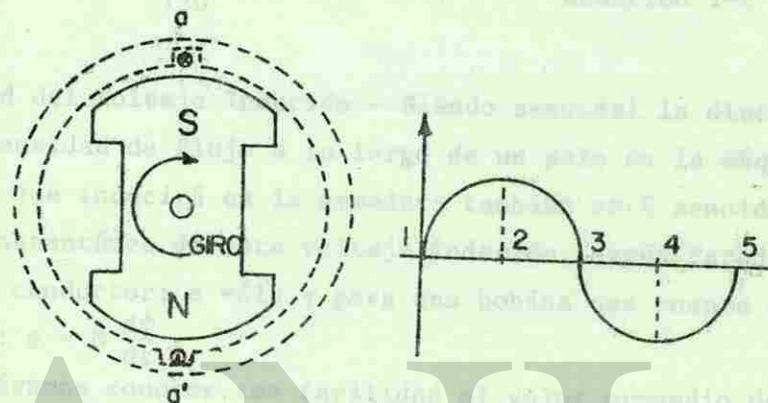
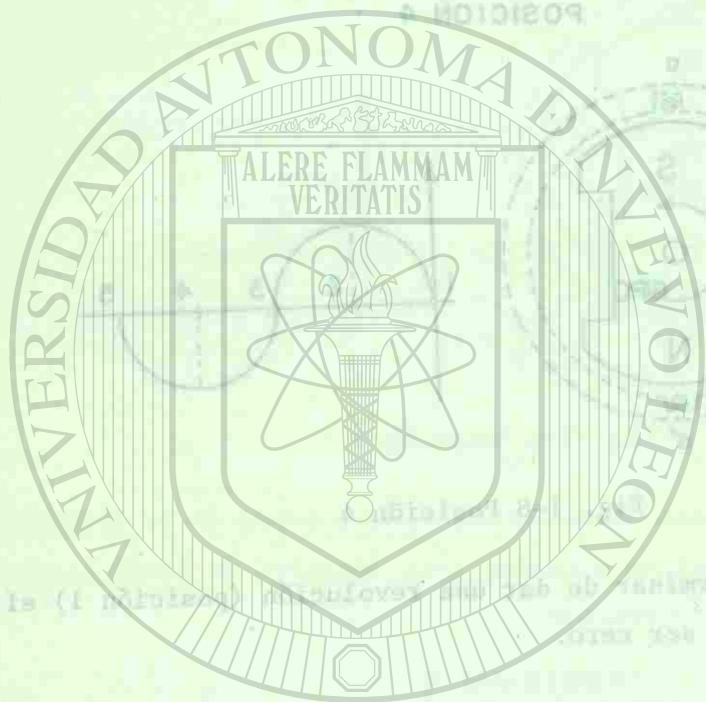


Fig. 1-8 Posición 4

Finalmente, al terminar de dar una revolución (posición 1) el -- voltaje volverá a ser cero.

-3 Frecuencia.- Del Análisis anterior se desprende que en el conduc_{tor} "a", al ser recorrido por un polo norte, se induce medio ciclo de voltaje de cierta polaridad. Y al pasar frente a él, el polo sur, le induce el otro medio ciclo pero de polaridad opuesta. Es decir que en una revolución de un rotor de 2 polos, se genera un ciclo completo de voltaje. Si hubieran sido 2 revoluciones se hubieran inducido 4 ciclos, pero también si fueran 4 - polos. Podemos entonces concluir que la frecuencia del voltaje-



inducido depende del número de pares de polos y del número de --
REVOLUCIONES POR SEGUNDO

$$f = \frac{P}{2} * \frac{n}{60}$$

n velocidad (RPM)
p # de polos

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

ecuación 1-c

1-4 Magnitud del Voltaje Inducido.- Siendo senoidal la distribución de la densidad de flujo a lo largo de un polo en la máquina, el voltaje que inducirá en la armadura también será senoidal. El valor instantáneo de este voltaje inducido, según Faraday, vale para un conductor: $e = \beta lv$ y para una bobina que cuenta con N -- vueltas: $e = N \frac{d\phi}{dt}$.

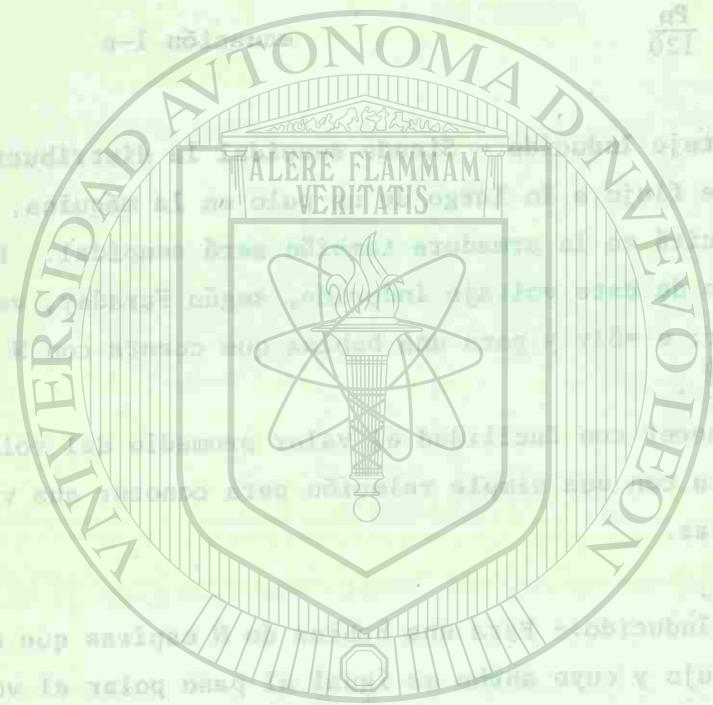
Si pudiéramos conocer con facilidad el valor promedio del voltaje inducido, basta con una simple relación para conocer sus valores máximo y eficaz.

5 Voltaje Promedio Inducido.- Para una bobina de N espiras que enlazan el mismo flujo y cuyo ancho es igual al paso polar el voltaje promedio lo encontramos por:

$$E_{prom} = N \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

ecuación 1-d

Sabemos que en un ciclo completo de voltaje para una onda senoidal su promedio vale cero. Sin embargo, podemos conocer el valor promedio de voltaje para un medio ciclo. Este se puede saber al observar la variación de flujo producida por el giro del rotor al pasar de la posición 1 a la posición 3 (fig. 1-9).



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

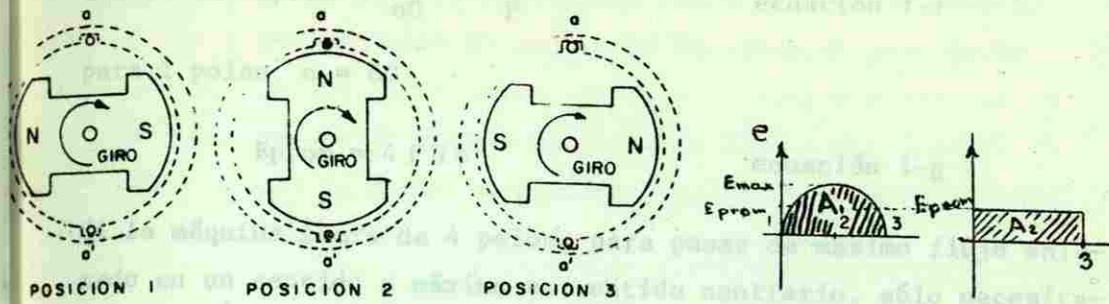


Fig. 1-9

En la posición 1, la bobina enlaza todo el flujo de un polo que viaja hacia el lado derecho (dentro de la bobina), y en la posición 3 la bobina enlaza todo el flujo nuevamente pero en dirección contraria, por lo tanto, el incremento de flujo en este período vale: $\Delta\phi = 2\phi$. Donde ϕ es el flujo por polo de la máquina. Para calcular el Δt , lo ponemos en función de la velocidad:

Si n RPM - - - - - 60 seg.

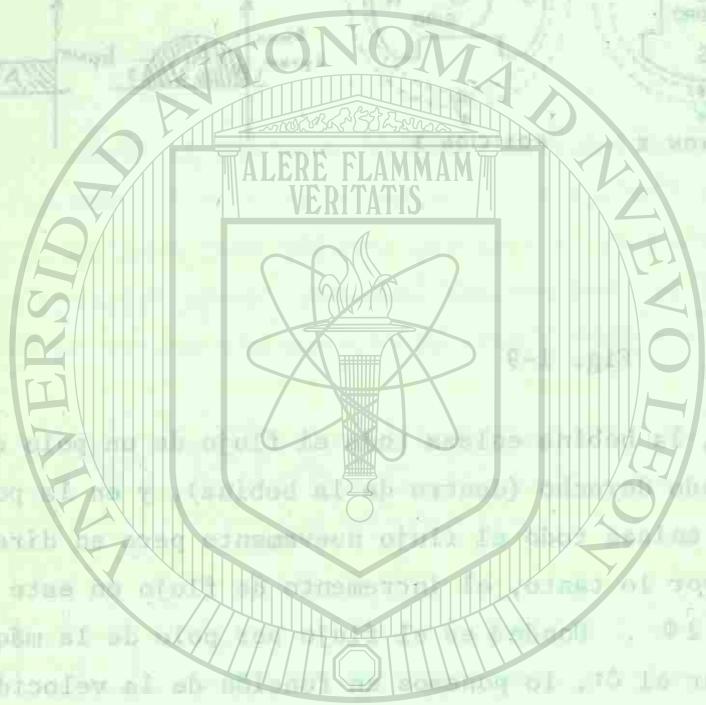
$\frac{1}{2}$ revolución - - - Δt seg.

$$\Delta t = \frac{60}{2n}$$

$$E_{prom} = N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = N * \frac{2\phi}{\frac{60}{2n}}$$



$$E_{prom} = \frac{4nN\phi}{60} \quad \text{como } n = \frac{120}{P}$$



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Tendremos: $E_{prom} = \frac{4N\phi}{60} * \frac{120}{p}$ ecuación 1-f

para 2 polos $n = 60$

$E_{prom} = 4 f N \phi$ ecuación 1-g

Si la máquina fuera de 4 polos, para pasar de máximo flujo enlazado en un sentido a máximo en sentido contrario, sólo necesita el rotor $\frac{1}{4}$ de revolución por lo tanto:

$f = \frac{Pn}{120}$ se duplica (se entiende que para la misma "n")

por lo tanto en la ecuación 1-f la frecuencia será el doble, pero igual pasará con el número de polos así que la ecuación permanecerá inalterable y además, será válida para cualquier número de polos y velocidad.

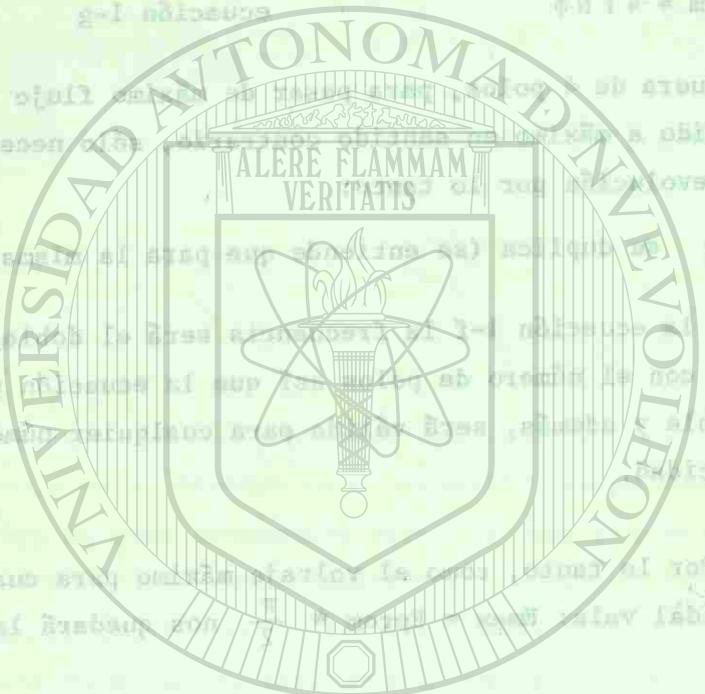
1-6 Valor Eficaz.- Por lo tanto, como el voltaje máximo para cualquier onda senoidal vale: $E_{max} = E_{prom} * \frac{\pi}{2}$ nos quedará la ecuación 1-h:

$E_{max} = 2\pi f N \phi$ ecuación 1-h

y el valor eficaz: $E_{ef} = E_{max} * \frac{1}{\sqrt{2}}$

$E_{ef} = 4.44 f N \phi$ volts ecuación 1-i

- f Frecuencia (CPS)
- N Número de espiras
- ϕ Flujo por polo (webbers)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
 DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Se entiende para estas expresiones que las N espiras enlazan el mismo flujo y que el ancho de la bobina es igual al paso polar. Si deseáramos inducir un voltaje trifásico, basta con agregar -- otras dos bobinas desfasadas de la primera 120° eléctricos (1 Polo = 180°) lo que para una máquina de 2 polos significa 120° geométricos (ver fig. 1-10).

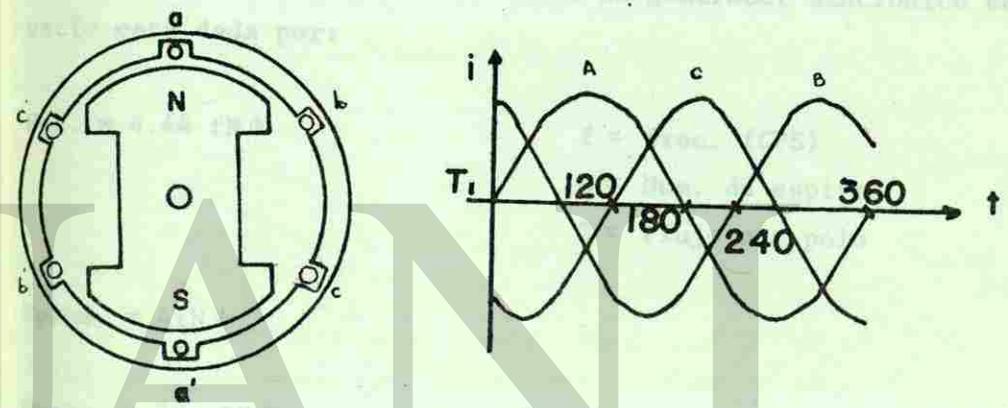


Fig. 1-10 Generador Trifásico

Es decir, las ecuaciones de voltaje antes vistas representan al voltaje por fase en un generador trifásico. Entendiéndose que el desfaseamiento entre fase y fase valdrá 120°.



RESUMEN CAPÍTULO I

EL DEVANADO ELEMENTAL DE ARMADURA

La magnitud del voltaje inducido en un generador sincrónico en vacío está dada por:

$$E_{ef.} = 4.44 f N \phi$$

f = frec. (CPS)

N = Num. de espiras

ϕ = Flujo por polo

$$E_{prom.} = 4fN\phi$$

$$E_{max.} = 2\pi fN\phi$$

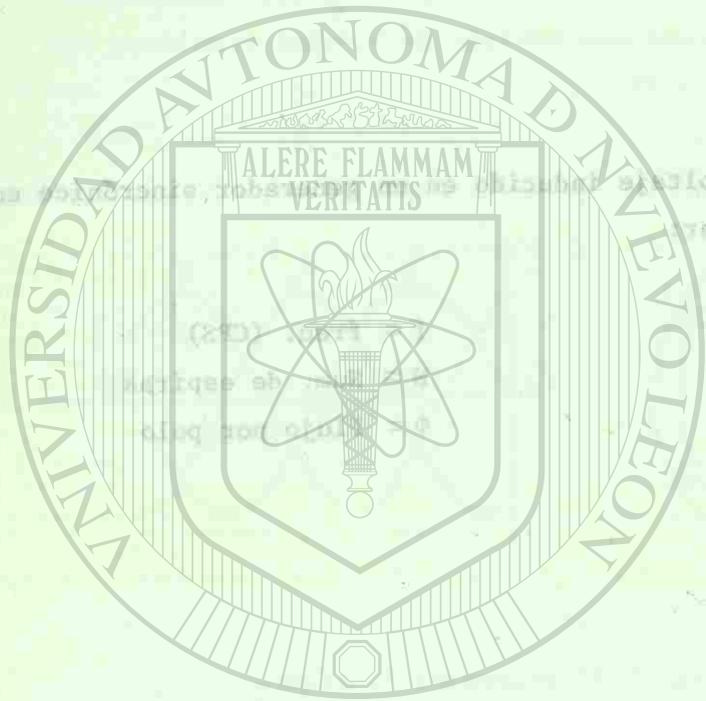
La frecuencia del voltaje inducido en un generador sincrónico:

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

p = Num. de Polos

n = Velocidad (RPM)

f = Frecuencia (CPS)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
 DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO II

EL DEVANADO ELEMENTAL DE ARMADURA

El Devanado de Armadura.- Para diseñar un devanado de armadura buscos, entre otras cosas, que el ancho de la bobina se aproxime al paso polar para que los voltajes inducidos por los lados activos vayan siempre en el mismo sentido. (ver fig. 2-1).

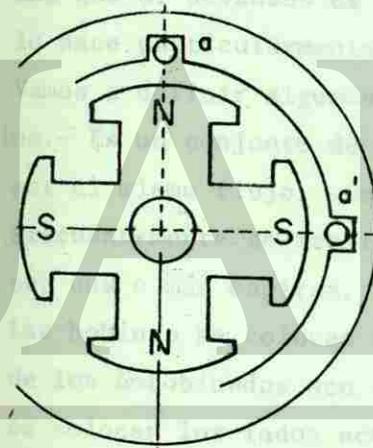


Fig. 2-1a



Fig. 2-1b

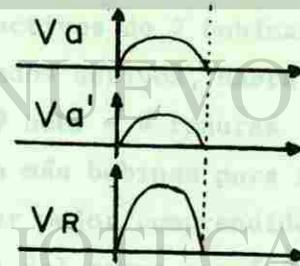
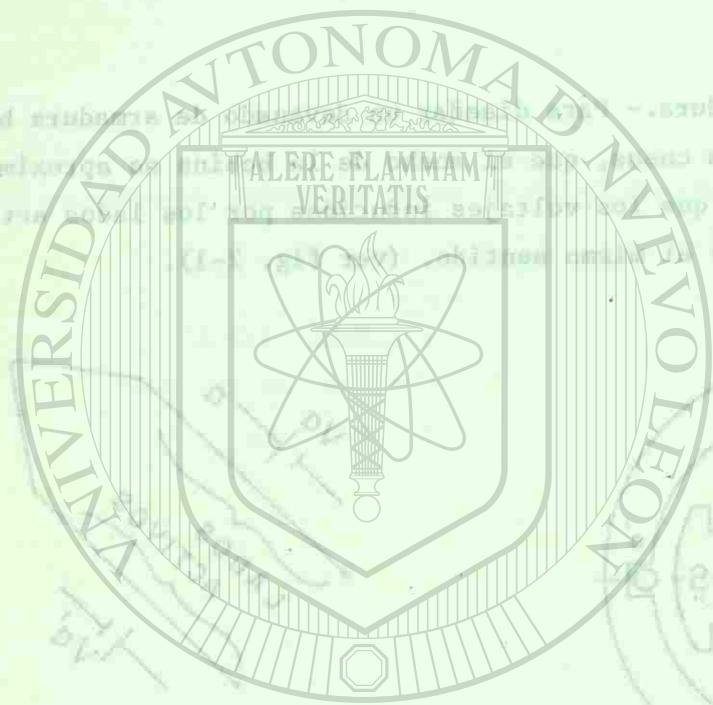


Fig. 2-1c



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

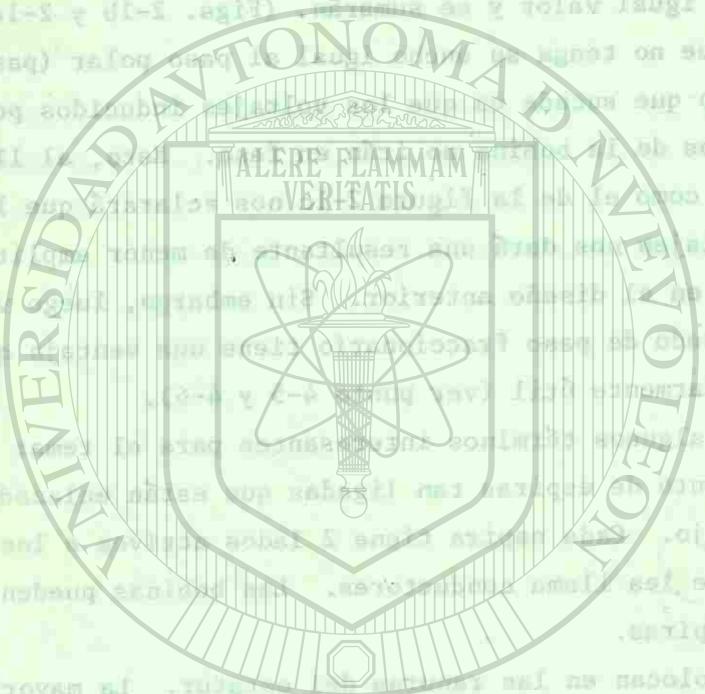
En la figura 2-la se aprecia la colocación de una bobina de paso completo (de centro a centro de los polos), donde podemos determinar el sentido de los voltajes inducidos los que en cualquier momento tendrán igual valor y se sumarán. (Figs. 2-1b y 2-1c). En una bobina que no tenga su ancho igual al paso polar (paso -- fraccionario) lo que sucede es que los voltajes inducidos por -- los lados activos de la bobina no irán en fase. Esto, al llevar lo a un esquema como el de la figura 2-1c nos aclarará que la suma de los 2 voltajes nos dará una resultante de menor amplitud -- que la obtenida en el diseño anterior. Sin embargo, luego veremos que el devanado de paso fraccionario tiene una ventaja que -- lo hace particularmente útil (ver punto 4-5 y 4-6).

Vamos a definir algunos términos interesantes para el tema:

Bobina.— Es un conjunto de espiras tan ligadas que están enlazadas -- por el mismo flujo. Cada espira tiene 2 lados activos a los que frecuentemente se les llama conductores. Las bobinas pueden tener una o más espiras.

Las bobinas se colocan en las ranuras del estator. La mayoría -- de los embobinados son de dos capas, es decir que en cada ranura se colocan los lados activos de 2 bobinas diferentes. Como cada bobina equivale a 2 lados activos, habrá tantas ranuras como bobinas: Para 2 capas # bob. = # ranuras (Q).

Cada fase aporta una o más bobinas para formar cada polo de la -- máquina, esto, podrá ser mejor comprendido en el capítulo 6 cuando se vea la formación del campo magnético giratorio. Es decir que cada fase aporta un grupo de bobinas para formar cada polo -- de la máquina, y, el grupo puede tener una o más bobinas dependiendo si el devanado es o no distribuido.



Por ejemplo, si queremos desarrollar un devanado de 2 capas, 6 -- ranuras, 3 fases, 2 polos, tendremos que el número de bobinas es igual a Q (# ranuras) o sean 6. Por lo tanto a cada fase le tocarían 2 bobinas.

Como cada fase tiene que colaborar a la formación de cada polo y solo cuenta con 2 bobinas, le aportará sólo 1 bobina por polo. Entonces $q = 1$ $q = \# \text{ bobinas/grupo.}$

Si contamos con 6 ranuras, cada polo abarcará 3 (paso polar). Vamos a hacer el ancho de la bobina (w) igual al paso polar (τ). -

Ver fig. 2.2

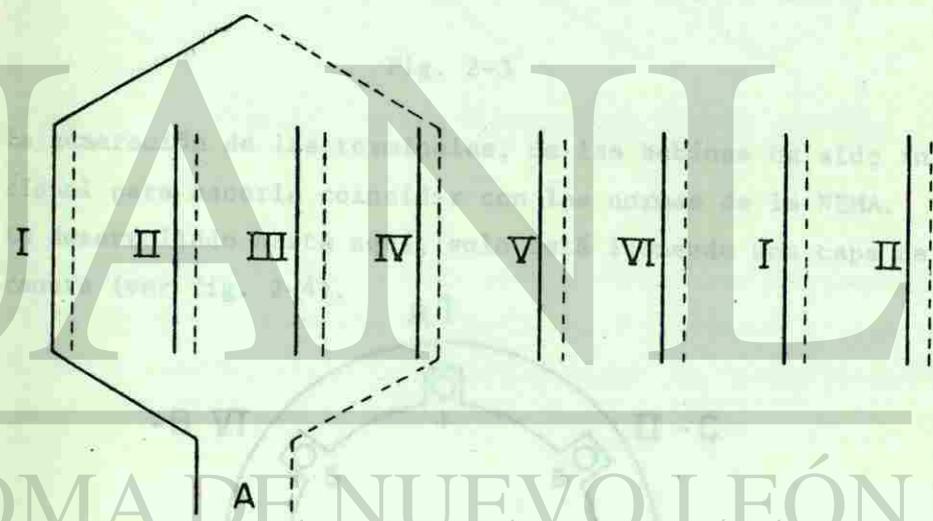


Fig. 2-2

Para dibujar el principio de la otra fase, hay que avanzar en las ranuras el equivalente a 120° eléctricos. Como son 2 polos, tendremos en el estator $2 \cdot 180 = 360^\circ$ eléctricos. Al haber 6 ranuras, habrá 60° /ranura. El principio de la fase B, irá entonces 2 ranuras después y la fase C, 2 más después. (Ver fig. 2-3)

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

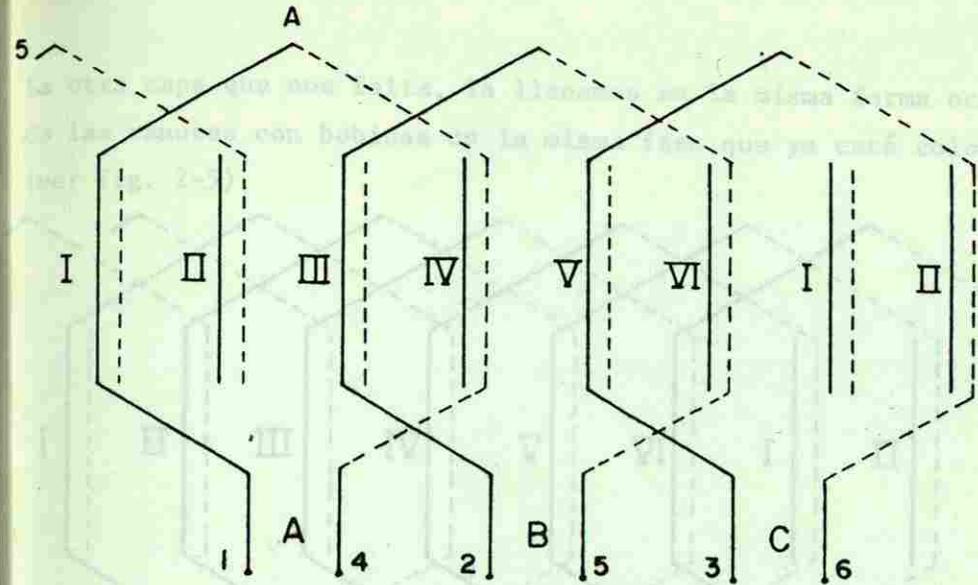
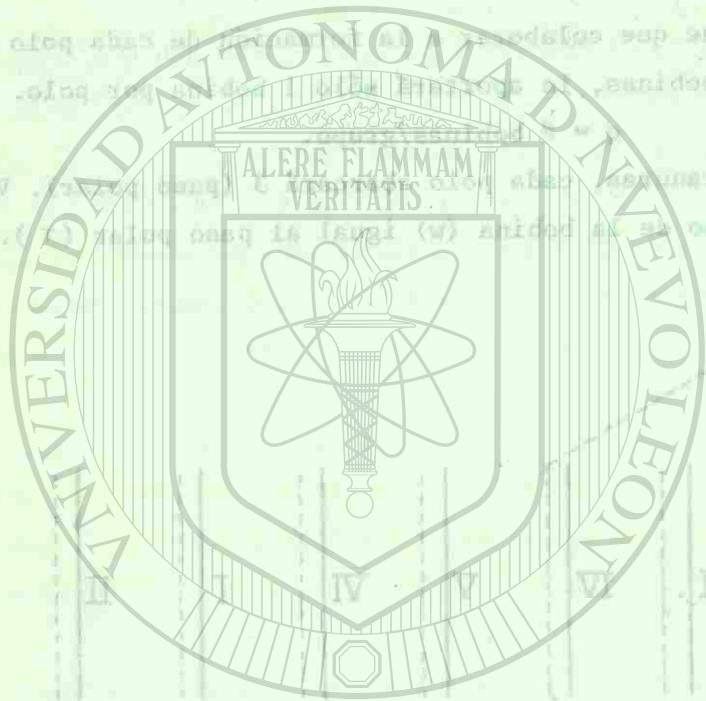


Fig. 2-3

La numeración de las terminales, de las bobinas ha sido intencional para hacerla coincidir con las normas de la NEMA. Lo desarrollado hasta aquí, solo está llenando una capa de cada ranura (ver fig. 2-4).

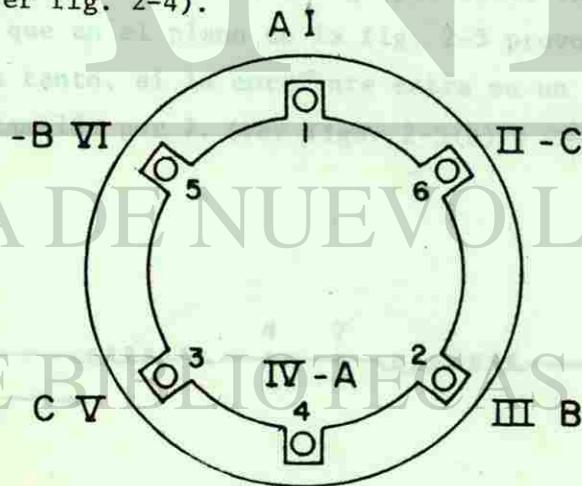


Fig. 2-4



Fig. 2-4

La otra capa que nos falta, la llenamos en la misma forma ocupando las ranuras con bobinas de la misma fase que ya está colocada (ver fig. 2-5).

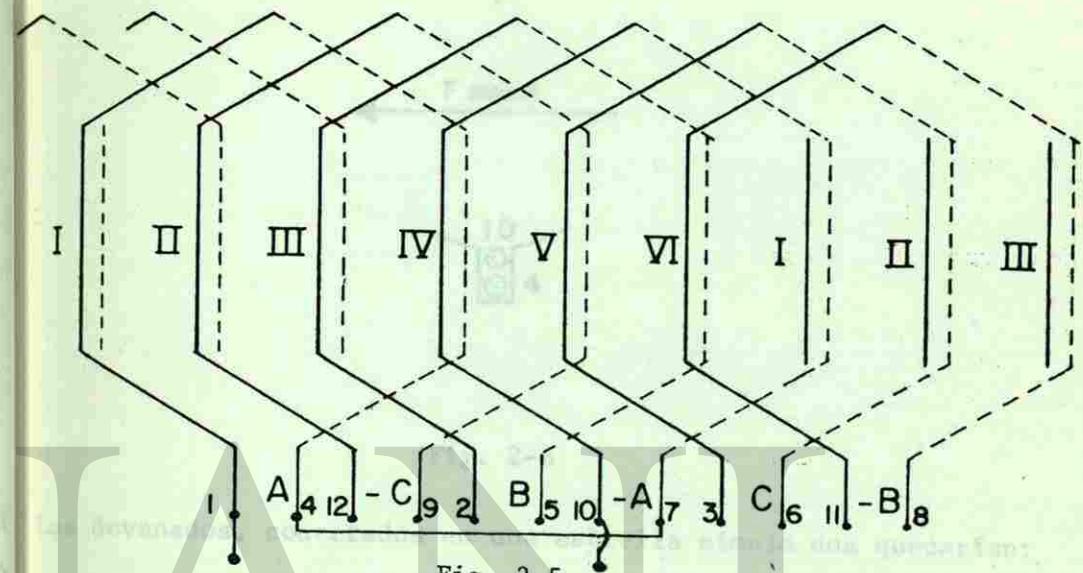


Fig. 2-5

Para crear polos opuestos, los grupos de la fase A deben llevar corrientes que en el plano de la fig. 2-5 provoquen flujos opuestos, por lo tanto, si la corriente entra en un instante por 1, debe entrar también por 7. (Ver figs. 2-5(a) y 2-6)

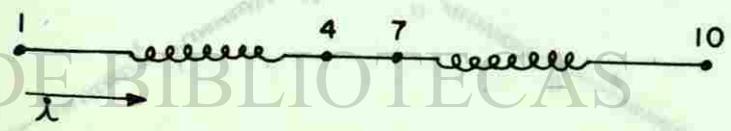
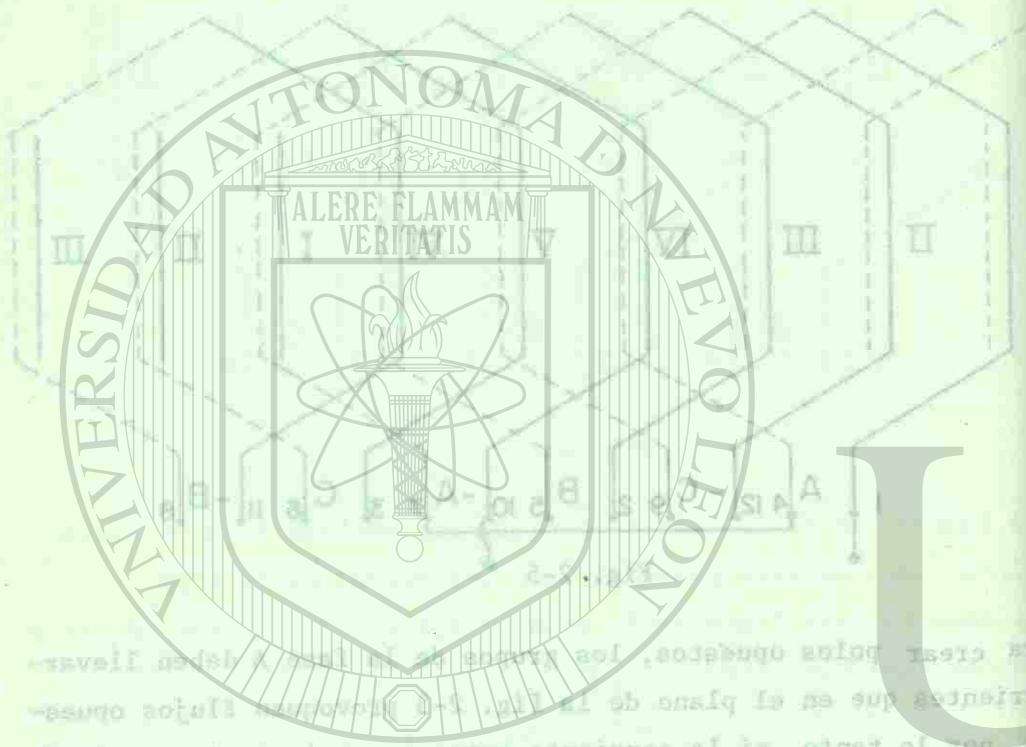


Fig. 2-5(a)

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

...en otras partes que nos falte, la llevamos en la misma forma...
 ...las ranuras con bobinas de la misma clase que ya está colocada...
 ...ver fig. 2-5).



...de un devanado de bobinas en el que aparece en la fig. 2-7

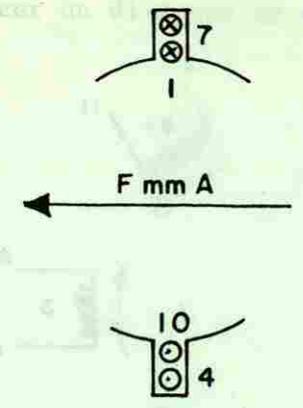
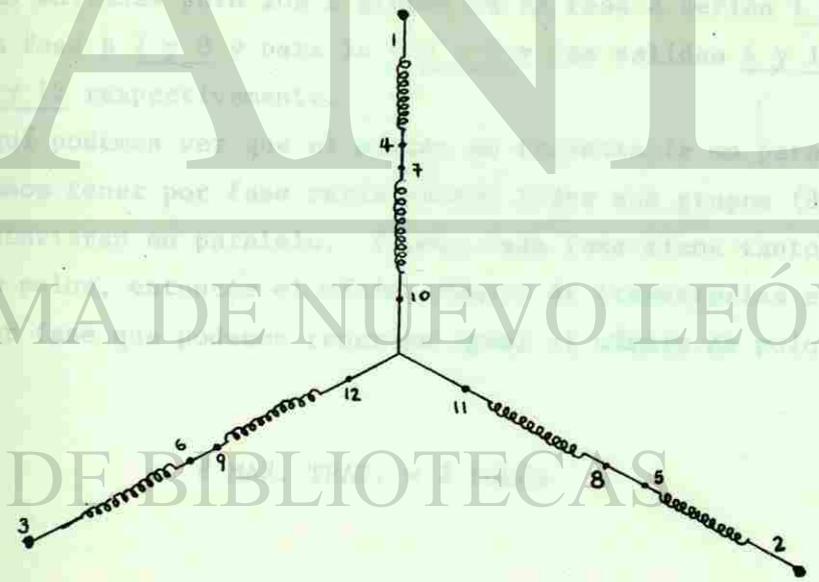
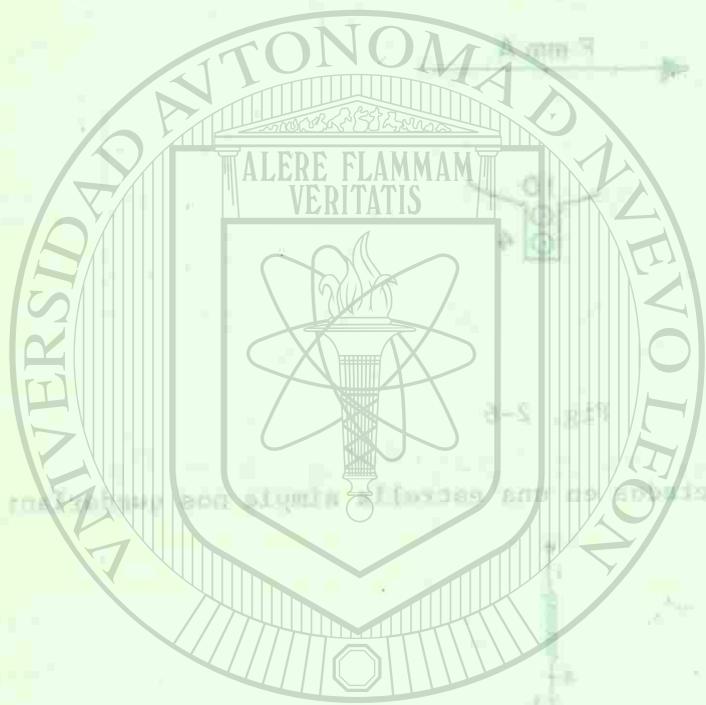


Fig. 2-6

Los devanados, conectados en una estrella simple nos quedarían:



BIBLIOTECA UNIVERSITARIA



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
 DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Otra forma de hacer un diagrama es el que aparece en la fig. 2.7

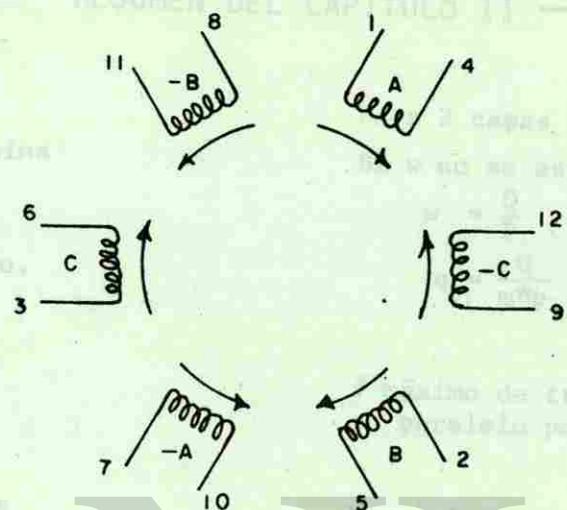


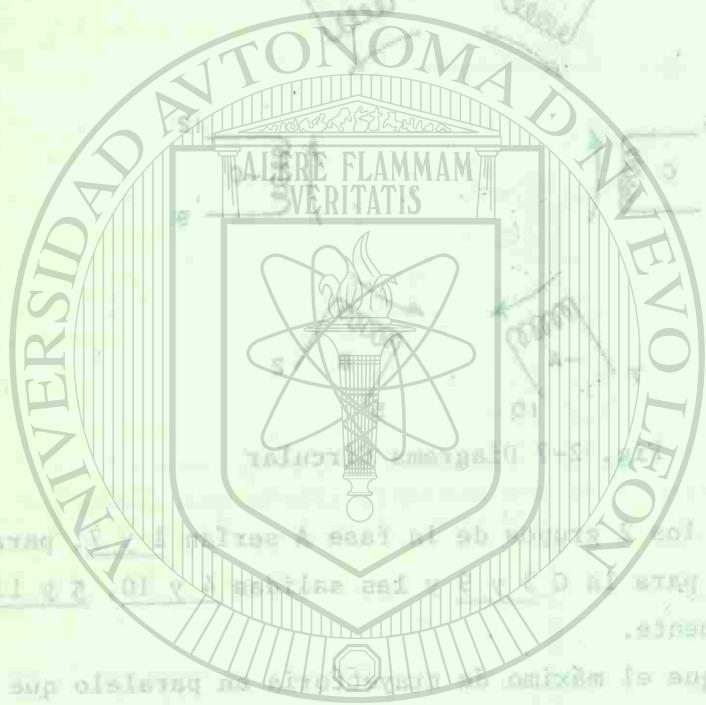
Fig. 2-7 Diagrama Circular

Las entradas para los 2 grupos de la fase A serían 1 y 7, para la fase B 2 y 8 y para la C 3 y 9 y las salidas 4 y 10, 5 y 11 y 6 y 12 respectivamente.

Aquí podemos ver que el máximo de trayectoria en paralelo que podemos tener por fase sería cuando todos sus grupos (de esa fase) estuvieran en paralelo. Y como cada fase tiene tantos grupos como polos, entonces el máximo número de trayectorias en paralelo por fase que podemos tener es igual al número de polos.



$$\# \text{ MAX. TRAY.} = \# \text{ POLOS}$$



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

RESÚMEN DEL CAPÍTULO II

- Q = # Ranuras
- w = Ancho de Bobina
- τ = Paso Polar
- q = # Bobinas/Gpo.
- m = # fases
- P = # Polos

Para 2 capas # bobinas = Q

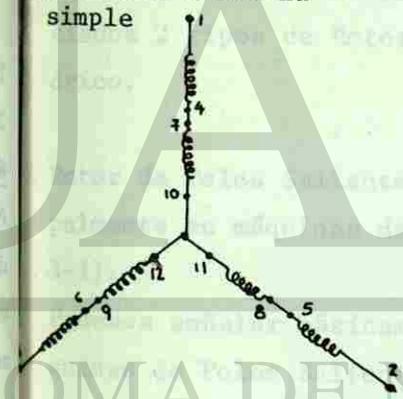
Si w no se especifica,

$$w = \frac{Q}{P}$$

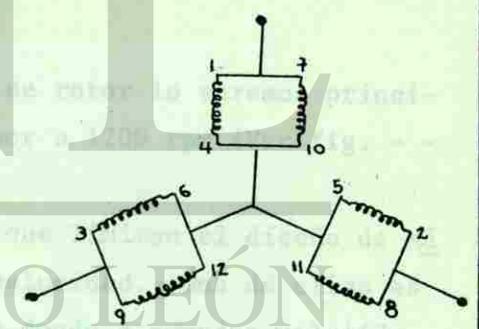
$$q = \frac{Q}{m \cdot p}$$

máximo de trayectorias en paralelo por fase = p

Nomenclatura Nema para una estrella simple



Nomenclatura Nema para una doble estrella



CAPITULO III

TIPOS DE ROTORES Y FORMA REAL DE LA FUERZA MAGNETOMOTRIZ DEL ROTOR

En las Máquinas Síncronas podemos encontrar claramente diferenciados 2 tipos de Rotores: Polos Salientes y Rotor Liso ó Cilíndrico.

1 Rotor de Polos Salientes.- Este tipo de rotor lo veremos principalmente en máquinas de velocidad menor a 1200 rpm (Ver fig. - - 3-1).

Podemos señalar básicamente 2 causas que limitan el diseño de Máquinas de Polos Salientes para alta velocidad. Una de ellas es la concentración de masa en los polos donde a grandes velocidades se producirían fuerzas centrífugas excesivas. La otra causa son las pérdidas por ventilación, que en este tipo de rotor serían considerables a más de que serían máquinas muy ruidosas.

Entonces, es frecuente encontrar máquinas con este tipo de rotor movidas por turbinas hidráulicas (baja velocidad).

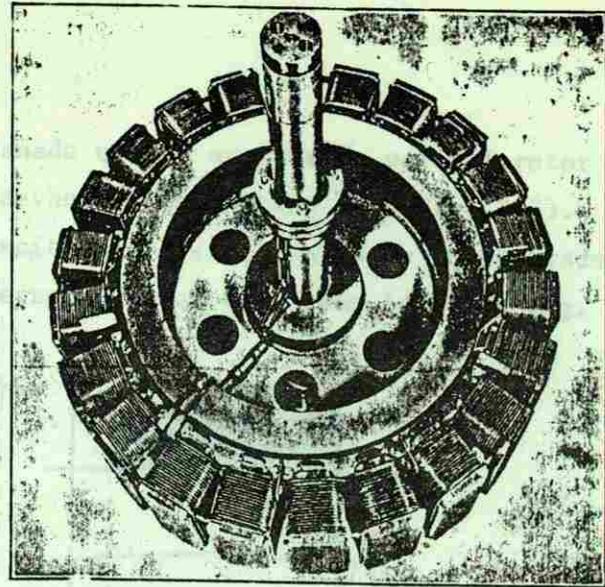
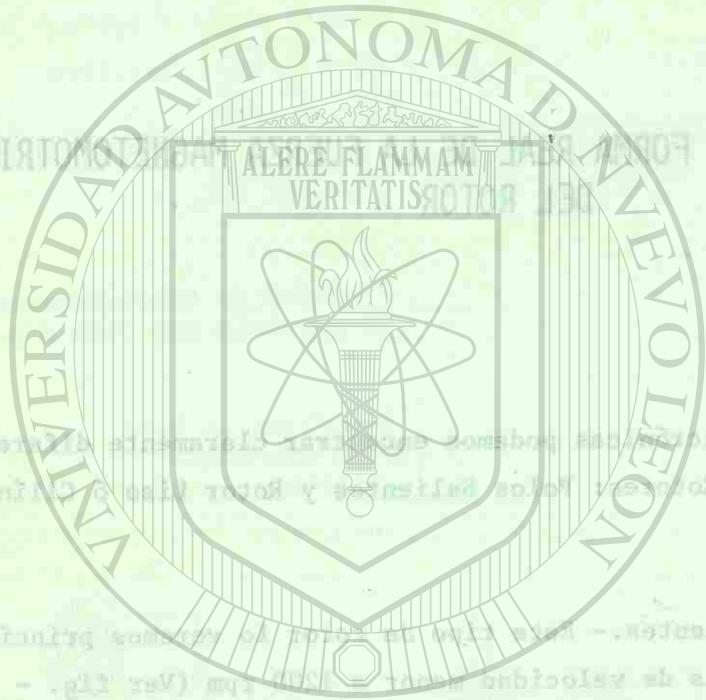
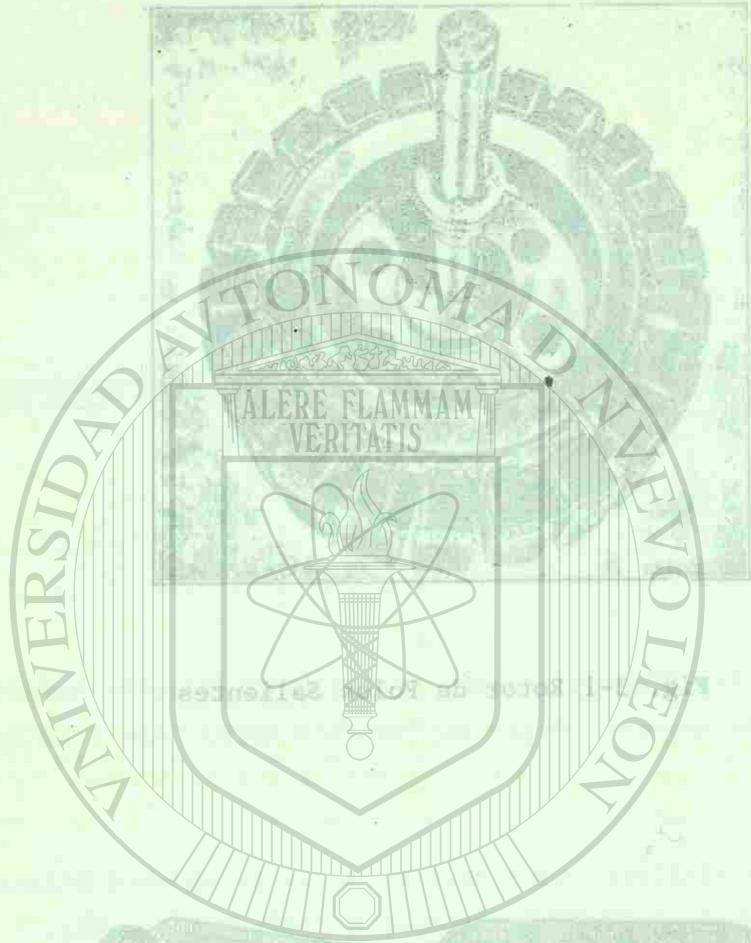


Fig. 3-1 Rotor de Polos Salientes



Fig. 3-2 Polo Saliente en dos Instantes de su Construcción



El tipo de devanado que se acostumbra para el rotor de polos salientes es el devanado Concentrado (ver fig. 3-2). Al pasar la corriente de excitación por el devanado concentrado de un polo, produce una fuerza magnetomotriz como la de la fig. 3-3.

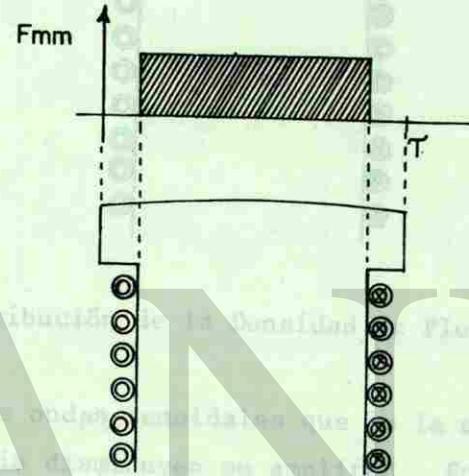


Fig. 3-3 Distribución de la Fmm en un Polo Saliente

Sin embargo, con el fin de que la densidad de flujo producida -- por la Fuerza Magnetomotriz se aproxime un poco a una onda senoidal, los polos se fabrican con 2 características especiales:

- 1) Una expansión polar donde habrá mayor reluctancia que en el centro del polo y
- 2) Un entrehierro mayor en los extremos del polo comparado con el centro del mismo (ver fig. 3-4).

2 Fuerzas Magnetomotrices Armónicas.- Según el análisis de Fourier, una onda periódica no senoidal, puede ser considerada como la su

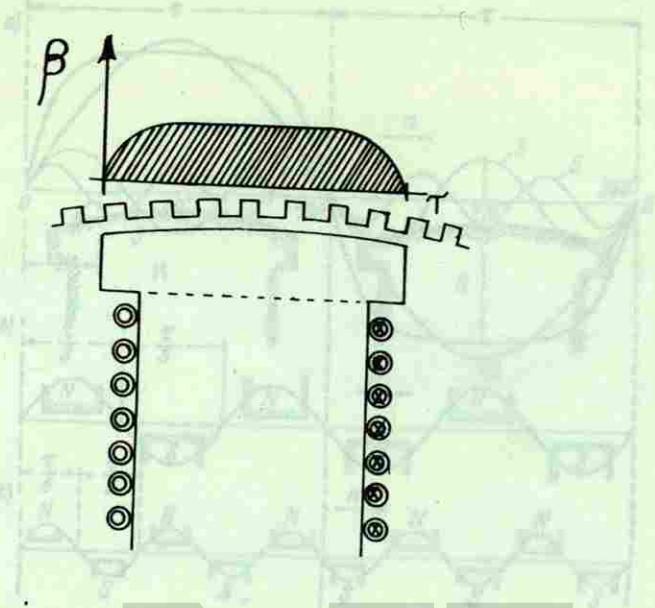
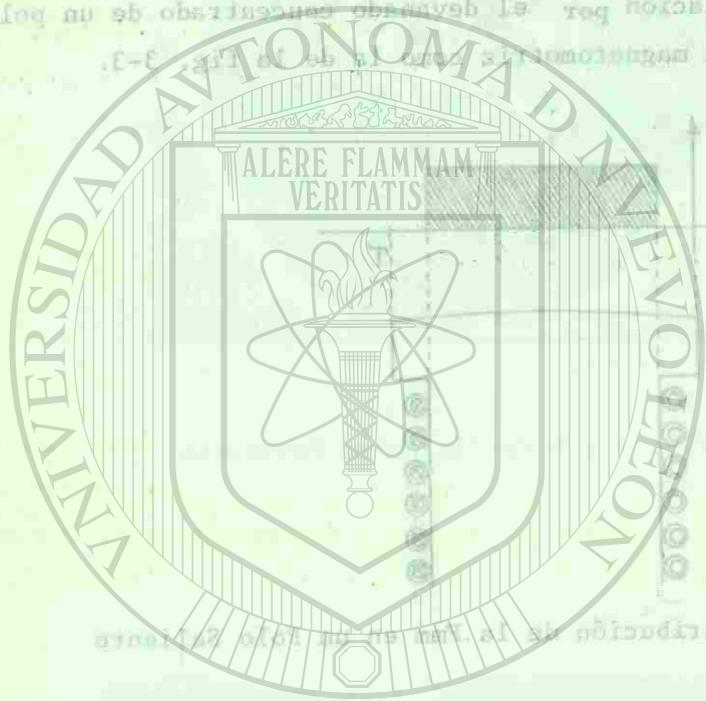


Fig. 3-4 Distribución de la Densidad de Flujo en un Polo Saliente

ma de muchas ondas senoidales que en la medida en que aumentan - su frecuencia disminuyen su amplitud. Entonces, la distribución de la Densidad de Flujo en una máquina de Polos Salientes podría ser como se ilustra en la figura 3-5 (aunque solo se dibujaron - la fundamental, la 3a. y la 5a. armónicas).

Obviamente, de la distribución de la densidad de flujo en los polos de la máquina concluimos que el voltaje inducido tendrá la - misma forma, ya que el voltaje en cualquier momento, en los conductores, es proporcional a β .

$$e = \beta l v$$

3-3 Rotor Liso ó Cilíndrico.- Este tipo de Rotor, toma su nombre por su forma, la cual le permite trabajar satisfactoriamente a altas

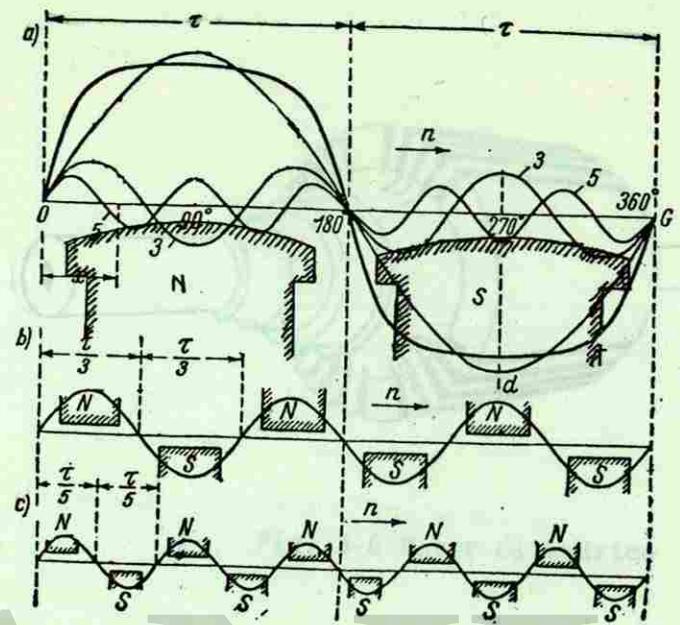
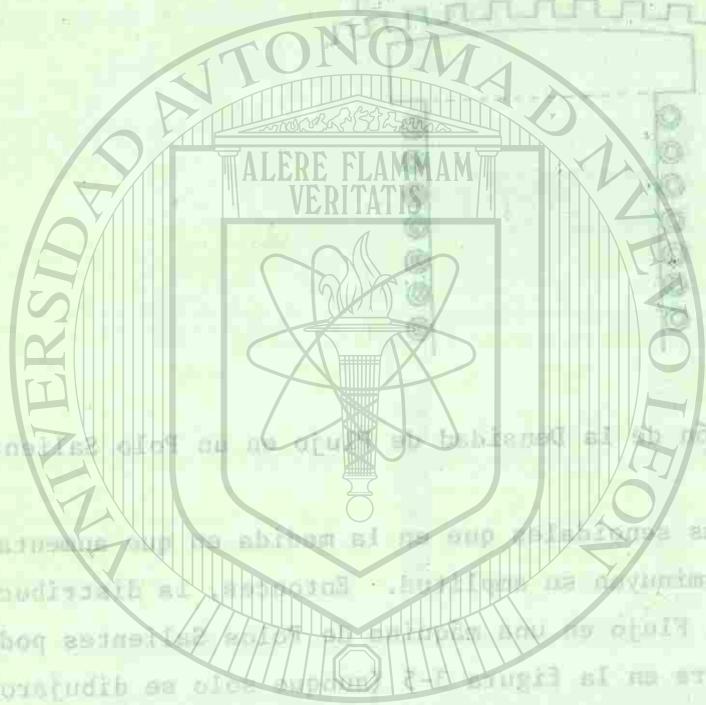
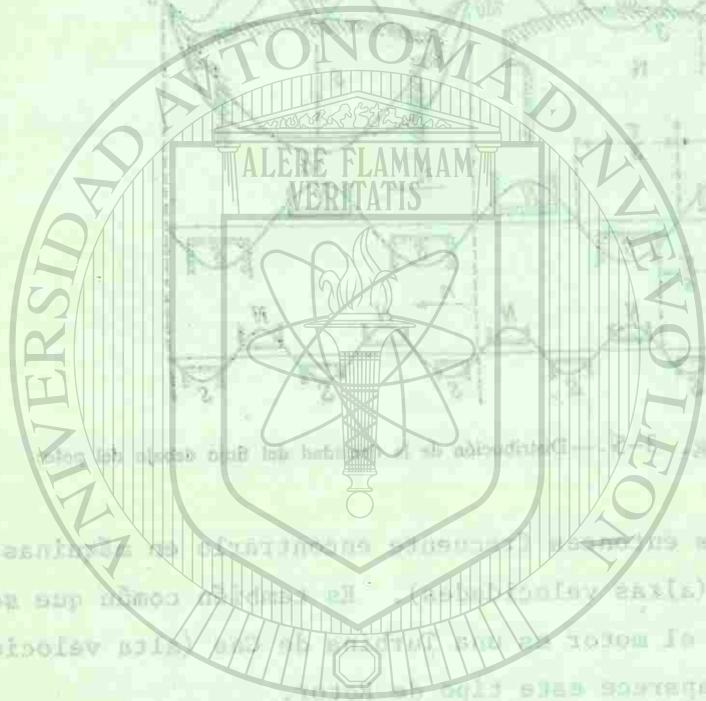


Fig. 3-5.—Distribución de la densidad del flujo debajo del polo:

velocidades. Es entonces frecuente encontrarlo en máquinas de 2, 4 y 6 polos (altas velocidades). Es también común que se le reconozca cuando el motor es una Turbina de Gas (alta velocidad). En la fig. 3-6 aparece este tipo de Rotor.

El tipo de devanado que se usa en estos rotores es el concéntrico hecho a propósito en esta forma para lograr que la fuerza magnetomotriz que produce la corriente, se aproxime lo más posible a una onda senoidal (ver figs. 3-7 y 3-8).

Se nota, en la figura 3-8 que aunque la distribución de la densidad de flujo no es perfectamente senoidal, al menos se aproxima más que en la máquina de Polos Salientes (ver figs. 3-4 y 3-8).



veLOCIDADES. En entonada, la fuerza electromotriz es función de la
2. 4 y 6 polos (ejes de polos). La fuerza electromotriz es función de la
reconoce cuando el motor es un motor de inducción (alta velocidad).
En la fig. 3-6 aparece este tipo de rotor.
El tipo de devanado que se usa en estos rotors es el concentrado.
no hecho a propósito en esta forma para lograr que la fuerza mag-
netomotriz no produce la corriente de escape de las partes
a una zona aislada (ver figs. 3-7 y 3-8).
Se nota, en la figura 3-8 que aunque la distribución de la densi-
dad de flujo no es perfectamente uniforme, al menos es aproxima-
da a la forma de onda sinusoidal (ver figs. 3-4 y 3-8).

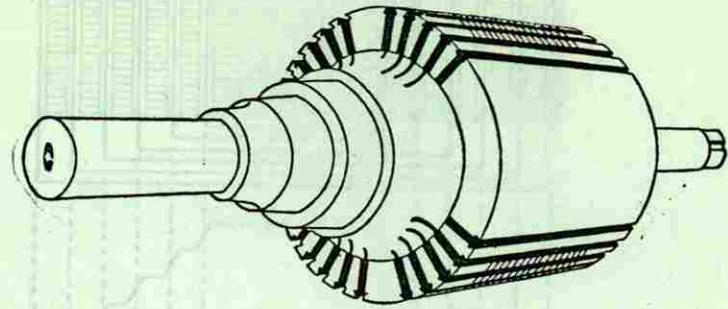


Fig. 3-6 Rotor Cilíndrico

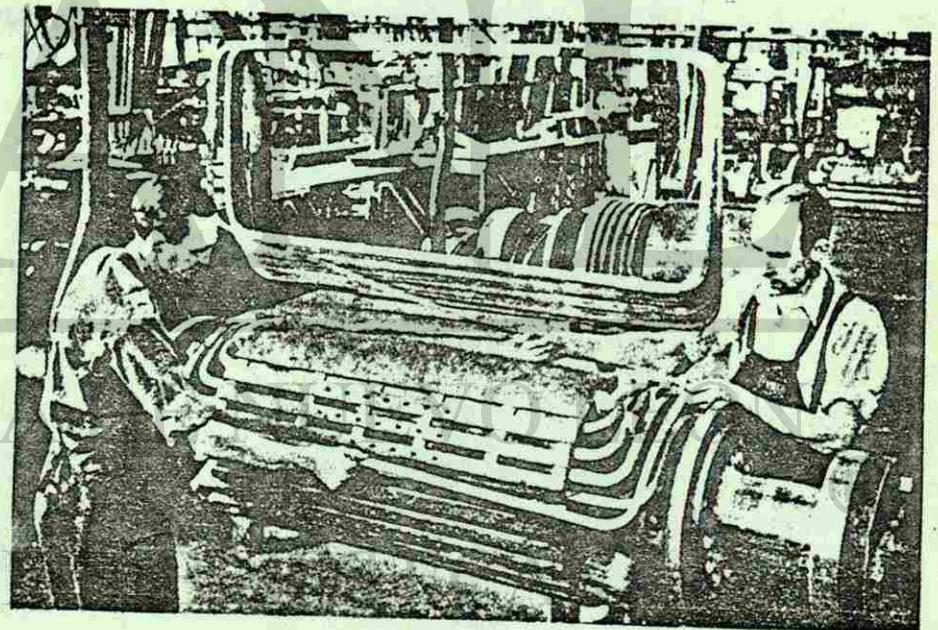


Fig. 3-7 Montando el Devanado Concéntrico en un Rotor Cilíndrico

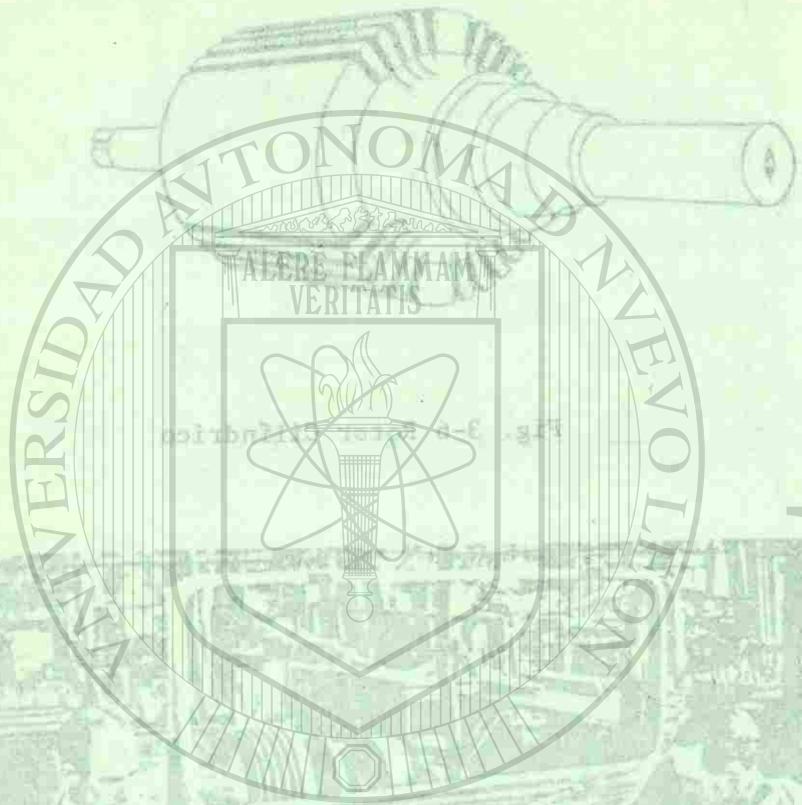


Fig. 3-7 Montando el devanado concentrado en un Rotor Cilíndrico

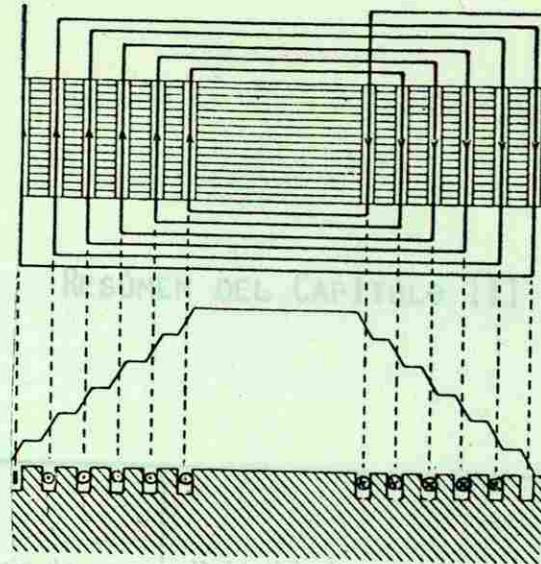


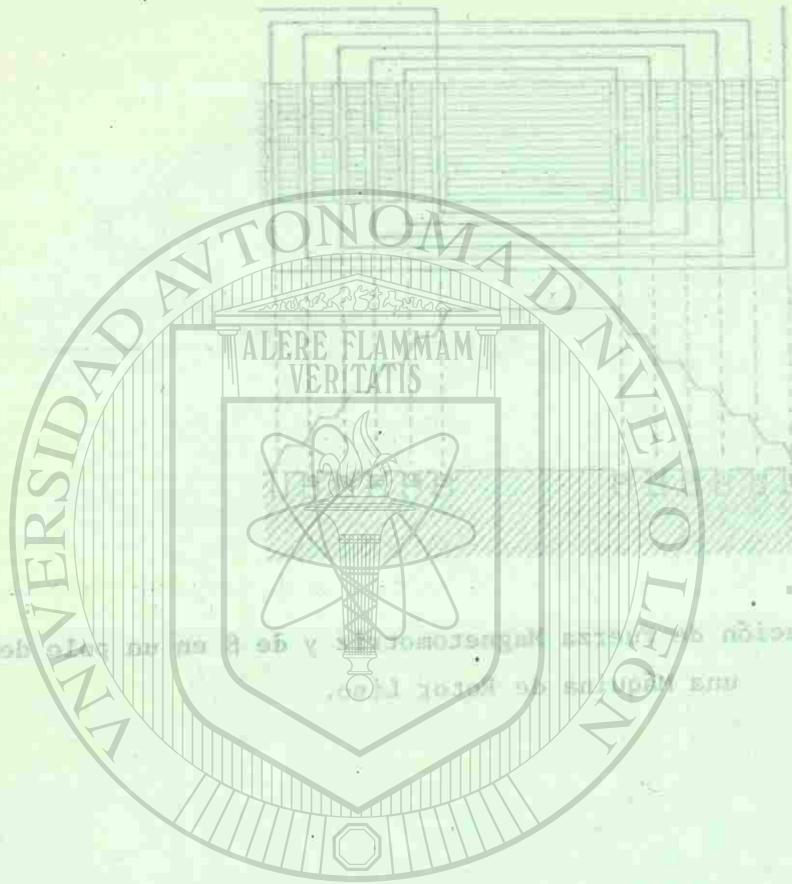
Fig. 3-8 Distribución de Fuerza Magnetomotriz y de β en un polo de una Máquina de Rotor Liso.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



BIBLIOTECA UNIVERSITARIA



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

RESÚMEN DEL CAPÍTULO III

Tipos de Rotores	Tipo de Devanado	Velocidad a 60 Hz (Rango)	# de Polos
Liso ó Cilíndrico	Concéntrico	3600, 1800 RPM	2, 4
Polos Salientes	Concentrado	Menos de 1200 (Salvo Máqs. Pequeñas)	6 ó más (Máqs. pequeñas pueden tener 4)

CAPITULO IV

METODOS DE DISMINUCION DE ARMONICAS

4-1 Introducción.- Debido a que la distribución de la densidad de flujo en los polos de la máquina no es senoidal, el voltaje que induce en las bobinas de armadura tampoco lo es. Según el desarrollo de Fourier, la onda de voltaje (no senoidal) se considera formada por una onda senoidal de la misma frecuencia llamada fundamental sumada a otras de mayor frecuencia y menor amplitud llamadas armónicas. Según la cualidad de la función original (par o impar) aparecen o no las armónicas pares. En este caso, solo existirá la fundamental y las armónicas nones (3a., 5a., 7a., -- 9a., etc.). Si logramos eliminar estas armónicas, prácticamente convertiríamos a la onda original de voltaje en una onda puramente senoidal (la fundamental). Esto se busca principalmente porque se conoce que los voltajes armónicos pueden producir efectos nocivos en las cargas y en las líneas tales como pérdidas, ruido, vibraciones y hasta pares parásitos en el caso de motores.

4-2 Conexión en Estrella.- La conexión en estrella del devanado de -



armadura del generador es un recurso para que la 3a. armónica - (la de mayor amplitud) no aparezca entre los voltajes de línea.- Esto se debe a que como los voltajes entre líneas van desfasados 120° , las 3eras. armónicas (triple frecuencia) se desfazarán - - $120 \times 3 = 360^\circ$ entre sí, lo que significa que irán en fase (ver -- figs. 4-1 y 4-2).

CONEXION EN ESTRELLA DE LA ARMADURA.

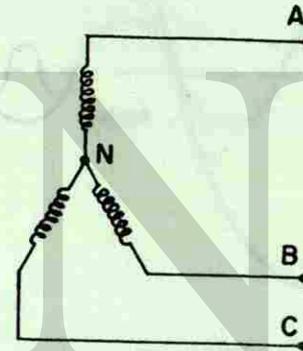


Fig. 4-1 Conexión en Estrella de la Armadura

Como es fácil apreciar en la figura 4-2, mientras que las "fundamentales" van desfasadas, las 3eras. armónicas van en fase por lo que no provocan ninguna diferencia de potencial entre línea y línea.

Debemos aclarar también que la 3era. armónica no aparecería para cargas trifásicas o monofásicas de línea a línea, pero si se manifiesta en cargas monofásicas de línea a neutro.

armadura del generador es un recurso para que la 3a. armónica
 (La de mayor amplitud) no aparezca entre los voltajes de línea.
 Esto se debe a que cuando los voltajes entre líneas van desfasados
 150°, las 3as. armónicas (entre líneas) se desfasarán
 150° x 3 = 450° entre sí, lo que equivale a 90° en fase (ver
 figs. 4-1 y 4-5).

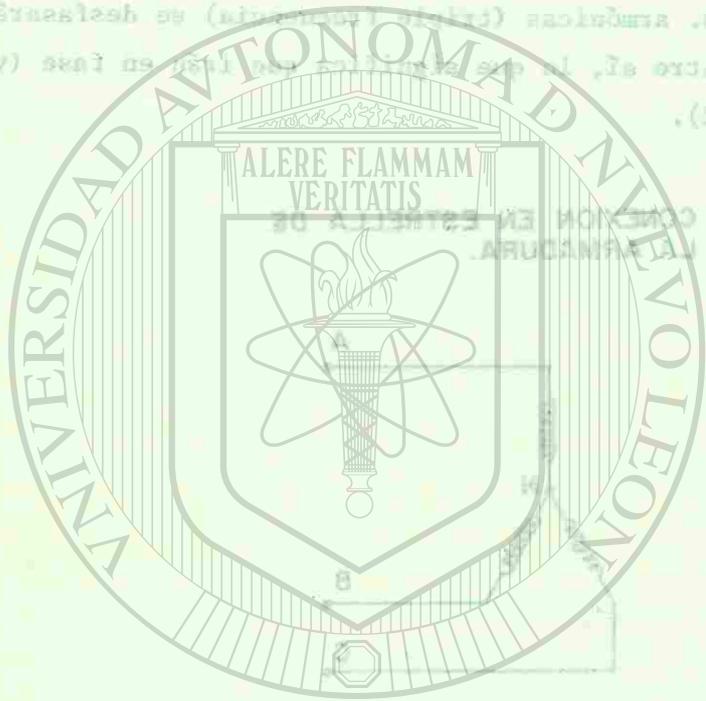


Fig. 4-1 Conexión en estrella de la Armadura

como es lógico esperar, en la figura 4.2, cuando las "fundas"
 "monofásicas" van desfasadas, las 3as. armónicas van en fase por
 lo que no provocan ninguna diferencia de potencial entre líneas.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

armadura en cargas monofásicas de línea a punto.
 cargas trifásicas o monofásicas de línea a línea, pero si se ma-
 ntiene el mismo tamaño que la 3a. armónica no aparecerá para

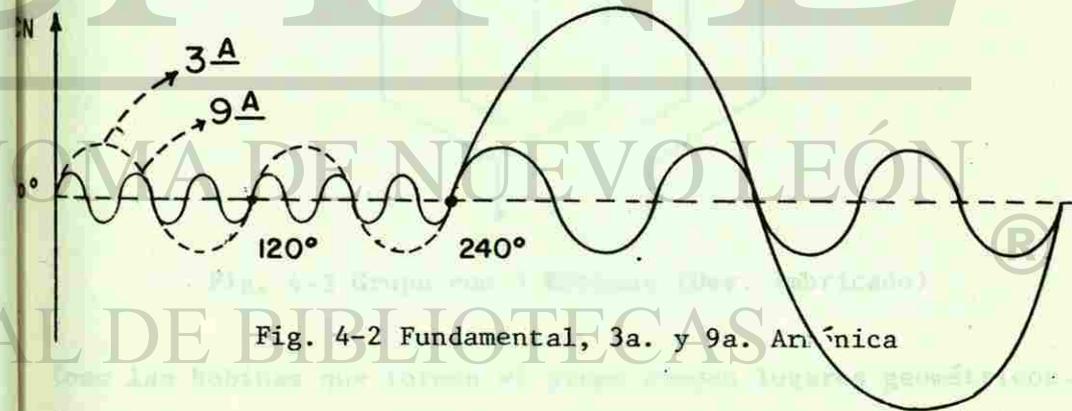
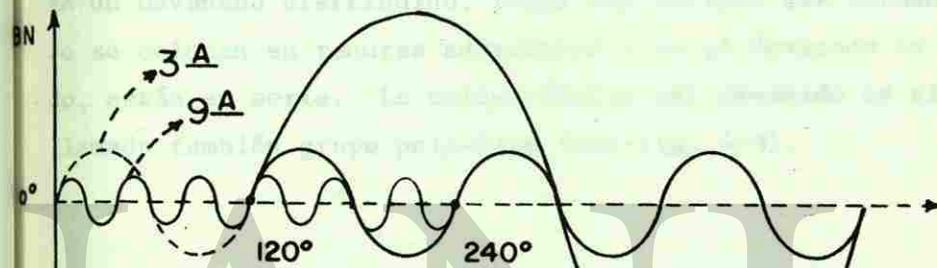
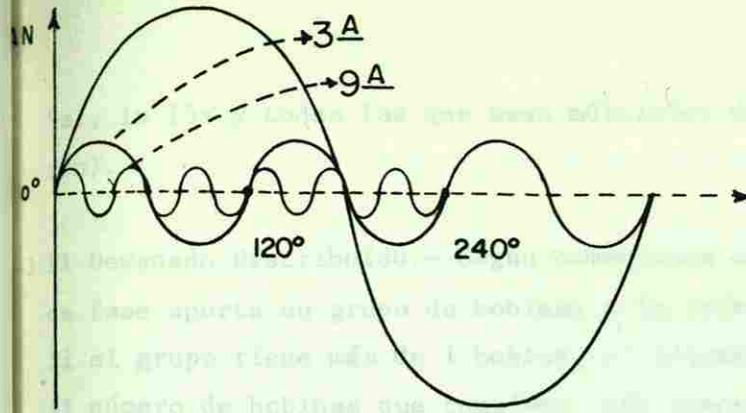
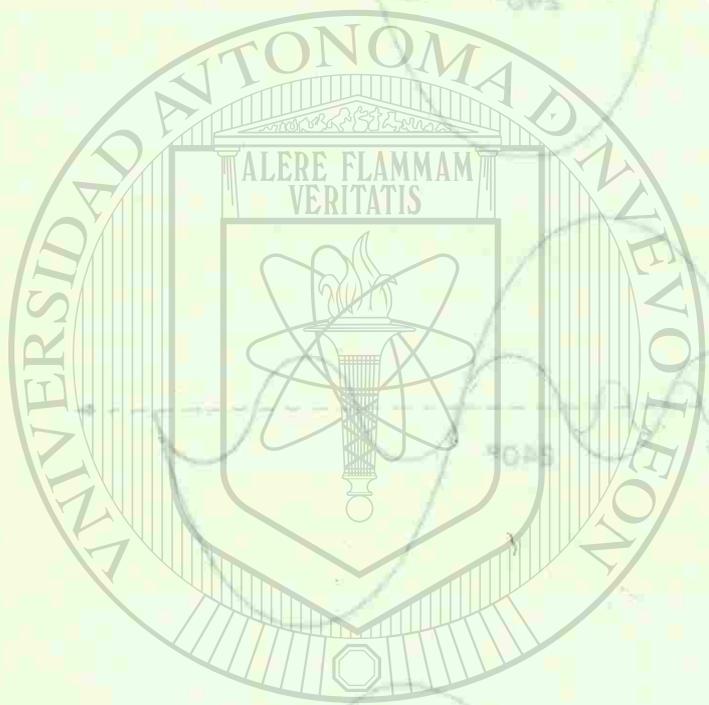


Fig. 4-2 Fundamental, 3a. y 9a. Armónica

Finalmente, del anterior análisis concluimos que no sólo la 3a.-
 armónica desaparece de los voltajes de línea, sino también la --

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA
 CARILLA ALFONSINA



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

9a., la 15a y todas las que sean múltiplos de 3 (por la misma razón).

3 El Devanado Distribuido.- Según comentamos en el capítulo II, cada fase aporta un grupo de bobinas a la formación de cada polo.- Si el grupo tiene más de 1 bobina, el devanado será distribuido. Al número de bobinas que contiene cada grupo le llamamos "q". En un devanado distribuido, todas las bobinas que forman el grupo se colocan en ranuras adyacentes y si el devanado es imbricado, están en serie. La unidad básica del devanado es el grupo - llamado también grupo polo-fase (ver fig. 4-3).

GRUPO CON TRES BOBINAS

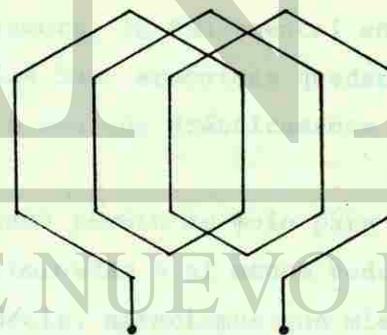
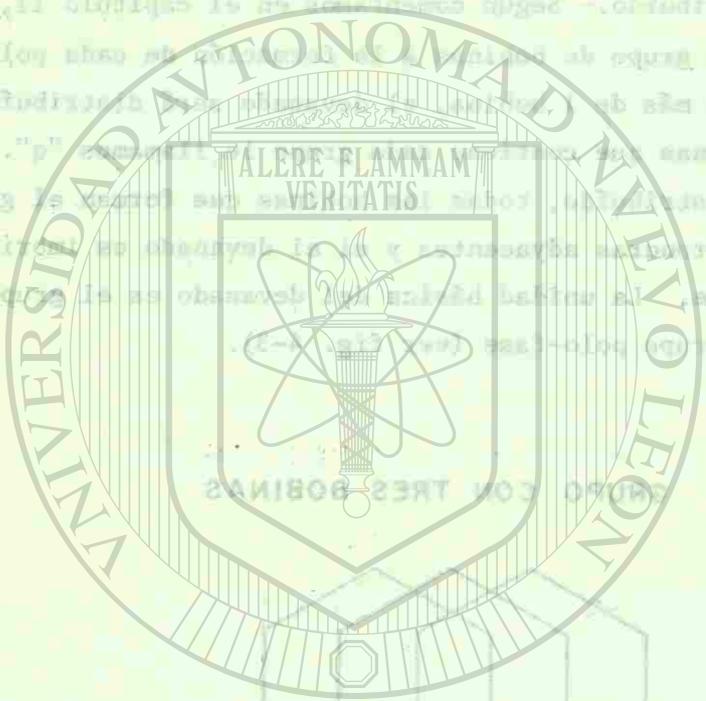


Fig. 4-3 Grupo con 3 Bobinas (Dev. Imbricado)

Como las bobinas que forman el grupo ocupan lugares geométricos-diferentes y como en cada lugar del estator (entre 2 polos) existe, en un momento dado, una densidad de flujo diferente, los vol-



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Fig. 4-3 Grupo con 3 bobinas (Dev. Imprimado)

tajes inducidos por las bobinas de un mismo grupo, estarán ligeramente desfasados (ondas fundamentales). La suma vectorial de estos voltajes, en un instante dado, nos dará el voltaje resultante por grupo. Esto explica porqué, el voltaje máximo inducido por grupo siempre es menor que el voltaje máximo de bobina -- multiplicado por q (# bob/gpo.)

Sin embargo, si hablamos del voltaje inducido en las bobinas en función de sus componentes (fundamental y armónicas), podremos observar algo interesante, y es que mientras la fundamental se desfasa un pequeño ángulo entre bobina y bobina (ángulo de ranura), la 5a. y 7a. armónicas se desfasarán 5 y 7 veces más respectivamente lo que puede llevar a que automáticamente el voltaje de la 5a., ó 7a. armónicas de una bobina se elimine con el de la siguiente que está en serie con ella. Por ejemplo, si tuviéramos un devanado de $q = 2$ bob/gpo. en donde hubiera un ángulo de 36° entre ranura y ranura, la fundamental entre ambas bobinas se desfasará 36° pero las 5as. armónicas quedarán desfasadas un ángulo igual a: 36×5 o sea que prácticamente se eliminarán entre sí (ver fig. 4-4).

Este ejemplo, que hemos puesto es solo para ilustrar que pueden las armónicas ser eliminadas o al menos reducidas con un devanado distribuido, es decir, apreciamos que mientras que el voltaje de las fundamentales sufre una pequeña merma (al sumarlos vectorialmente), el voltaje de las 5as. armónicas quedó eliminado. No es preciso hacer esta eliminación de un solo paso, es decir con 2 bob/gpo. sino que podemos hacerlo con más bobinas, sin perder de vista que lo importante es buscar que la resultante de la armónica que queremos eliminar se aproxime a cero en las termina--

VOLTAJES INDUCIDOS EN UN CASO SUPUESTO DE 2 BOBINAS

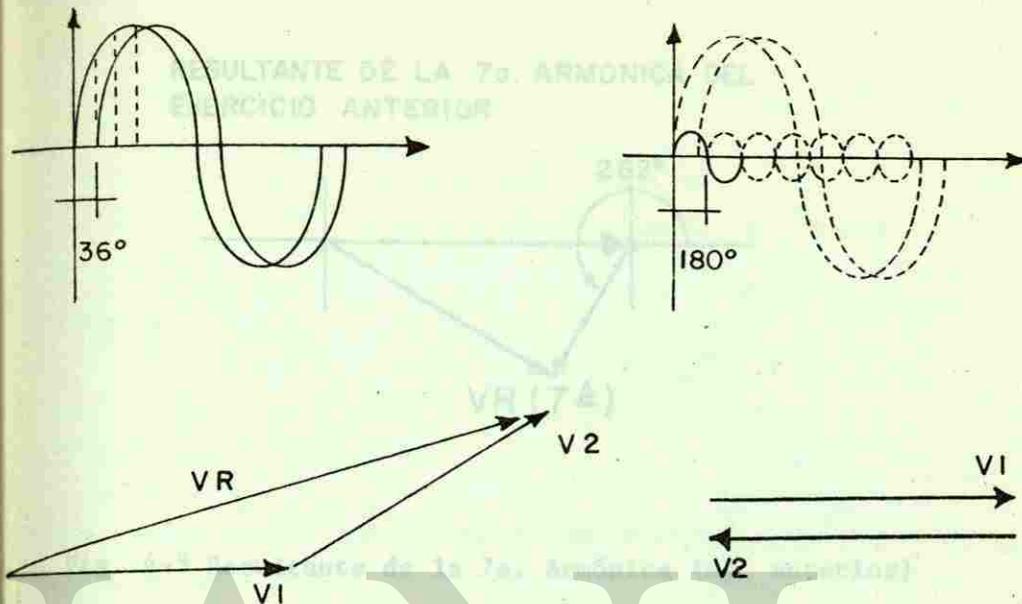


Fig. 4-4 Voltajes inducidos en un caso supuesto con 2 bob/gpo.

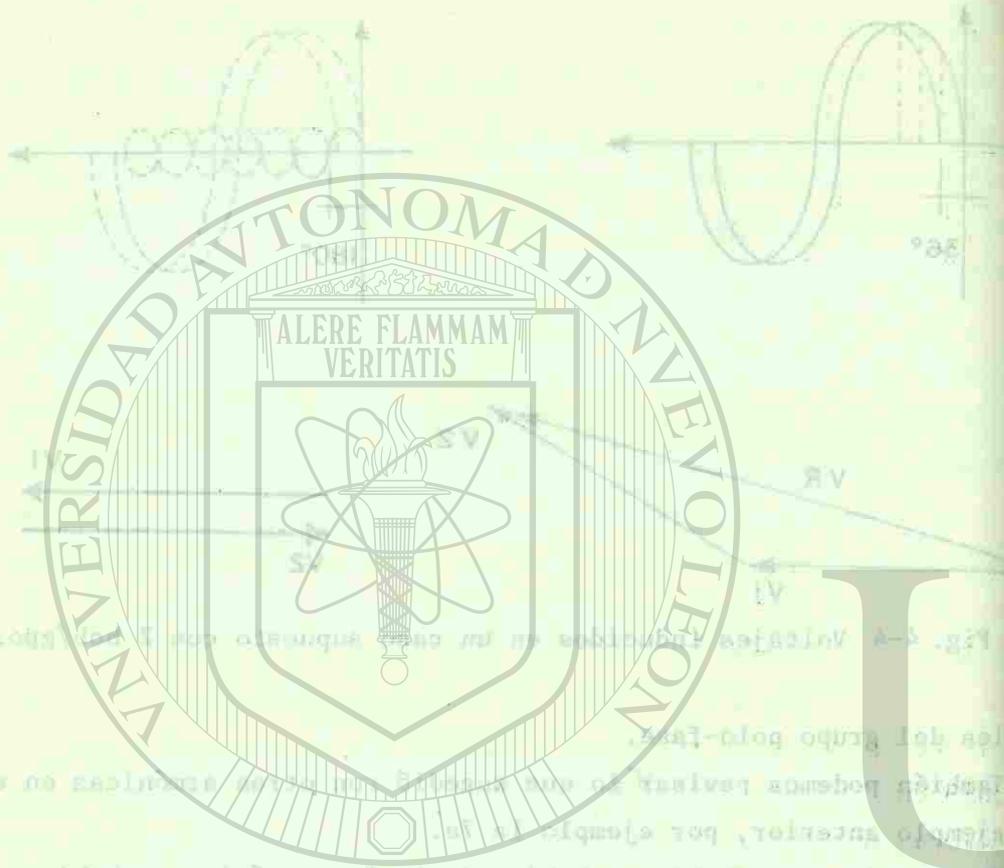
les del grupo polo-fase.

También podemos revisar lo que sucedió con otras armónicas en el ejemplo anterior, por ejemplo la 7a.

El voltaje entre bobina y bobina de la 7a. armónica se hubiera -- desfasado un ángulo igual a: 36×7 , o sean 252° eléctricos, es -- decir se reduciría pero no tanto como la 5a. (ver fig. 4-5).

Normalmente, se busca que la distribución del devanado si acaso -- no elimina la 5a. y la 7a. armónicas, al menos logre reducir am -- bas en forma importante.

Factor de Distribución.- El voltaje inducido por grupo, para un -- devanado distribuido deberá ser menor que el voltaje inducido -- por bobina (E_B) multiplicado por q (# bob/gpo.). O sea que tene



RESULTANTE DE LA 7a. ARMÓNICA DEL EJERCICIO ANTERIOR.

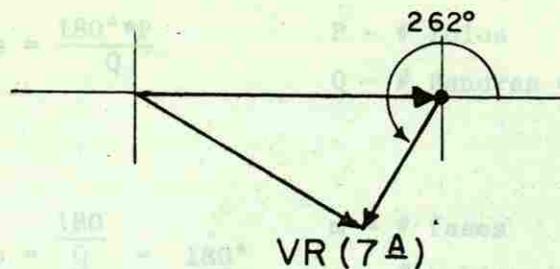


Fig. 4-5 Resultante de la 7a. Armónica (ej. anterior)

mos que afectar el voltaje qE_B por un Factor de Distribución -- " K_d " (menor que la unidad). Es decir, el voltaje por grupo nos quedaría:

$$E_G = qE_B * K_d$$

Es fácil comprender, que el factor de distribución " K_d " tiene -- distinto valor para la onda fundamental que para las armónicas, -- y precisamente lo que intentamos con la distribución del devanado es que K_d se aproxime más a la unidad para la onda fundamen-- tal mientras que para las armónicas que deseamos eliminar, se -- aproxime lo más posible a cero. El voltaje inducido en una vuel-- ta de una bobina está en fase con las otras vueltas de la misma-- bobina (prácticamente ocupan el mismo lugar). Y, por otro lado, los voltajes inducidos en bobinas de un mismo grupo van desfasa-- dos uno de otro. Vamos a llamarle α_s al ángulo de desfasamiento



RESULTANTE DE LA 1ª ARMÓNICA DEL
EJERCICIO ANTERIOR

que existe entre una ranura y la siguiente:

Para un devanado de 2 capas, α_s para la onda fundamental sería:

$$\alpha_s = \frac{180^\circ * P}{Q} \quad \begin{array}{l} P - \# \text{ Polos} \\ Q - \# \text{ Ranuras} = \# \text{ Bobinas} \end{array}$$

o también:

$$\alpha_s = \frac{180}{\frac{Q}{P}} = \frac{180^\circ}{mq} \quad \begin{array}{l} m - \# \text{ fases} \\ q - \# \text{ bobinas/gpo.} \end{array}$$

Hemos hecho la igualdad entre $\frac{Q}{P}$ y mq debido a que como q es el número de bobinas por grupo, $q * p$ sería el número de bobinas por fase y, el número de bobinas totales:

$$Q = qmP$$

Ejemplo: Calcular los grados eléctricos que existen entre ranuras para la fundamental de fuerza magnetomotriz o de voltaje para un devanado de 3 fases con 4 bobinas por grupo.

$$m = 3\phi$$

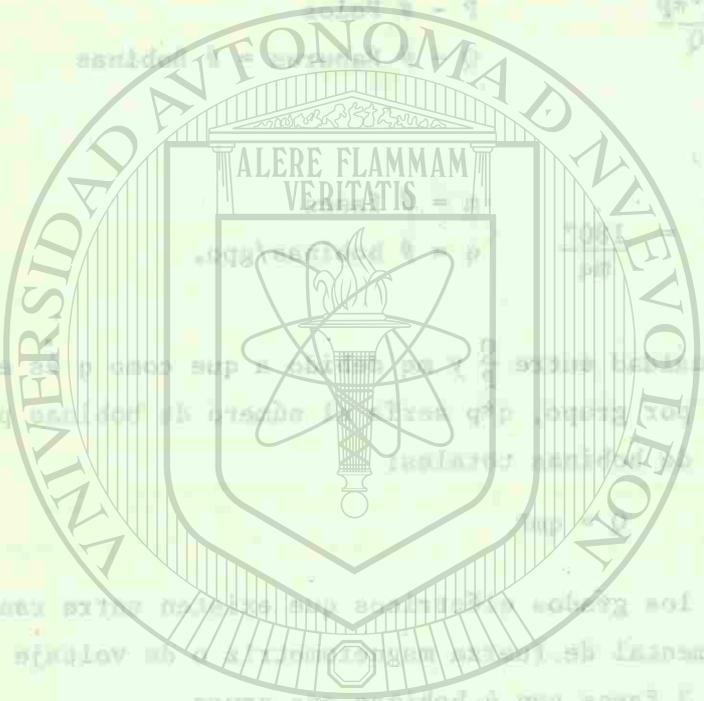
$$q = 4 \text{ bob/gpo.}$$

$$\alpha_s = \frac{180}{3*4} = 15^\circ$$

Si tuviéramos, por ejemplo, 3 bobinas por grupo, los voltajes nos podrían quedar como en la figura 4-6.

El factor de distribución para cualquier devanado está definido por:

$$K_d = \frac{|\sum \text{vectorial de voltajes}|}{\sum \text{aritmética de voltajes}}$$



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

3

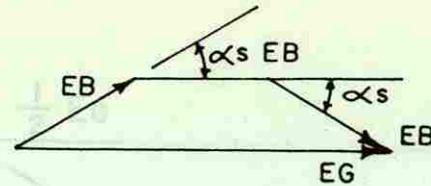


Fig. 4-6 Vectores para un Grupo de 3 Bobinas

vamos, de esta definición de K_d , a tratar de determinar una expresión más concreta y más general:
para q bobinas:

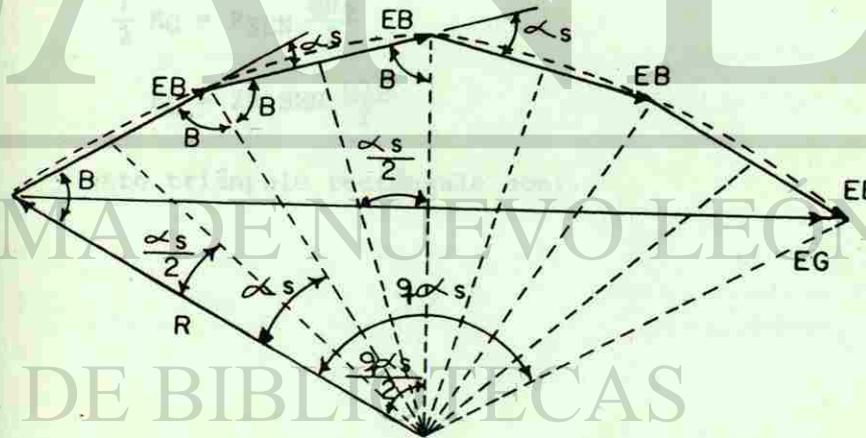
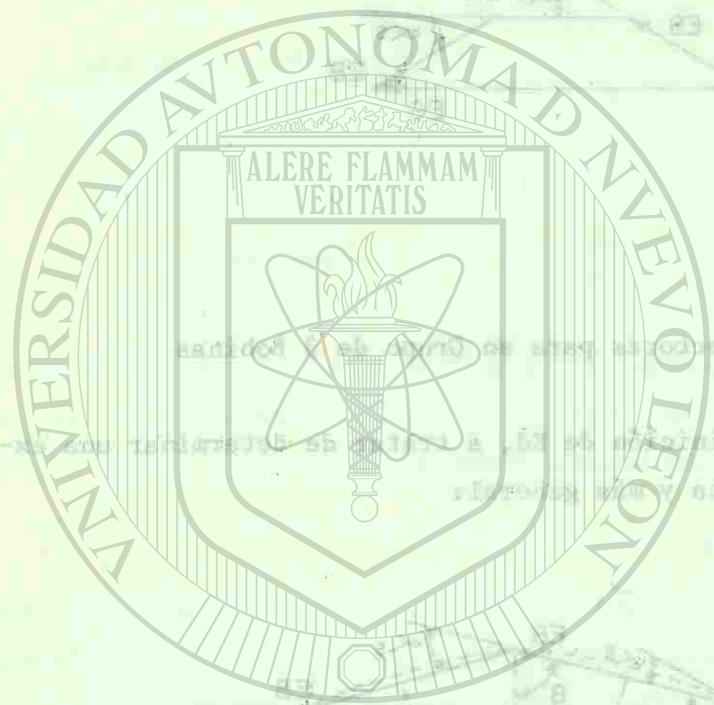


Fig. 4-7 Polígono de Tensiones en un Grupo



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Podemos formar un triángulo rectángulo con los siguientes valores:

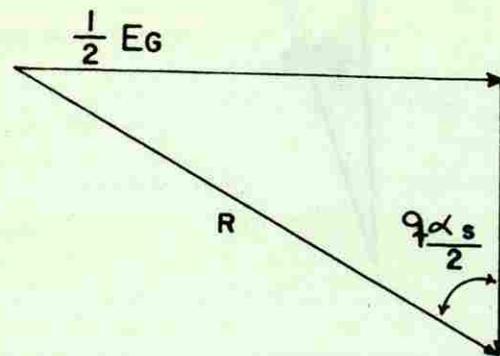
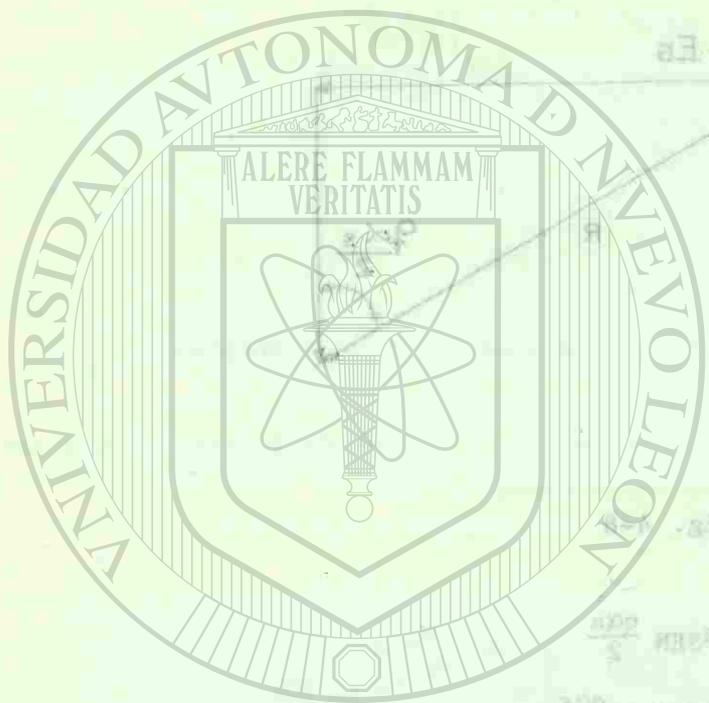


Fig. 4-8

$$\frac{1}{2} EG = R \text{SEN } \frac{q\alpha s}{2}$$

$$EG = 2R \text{SEN } \frac{q\alpha s}{2}$$

... y otro triángulo rectángulo con:



$$\frac{1}{2} E_B$$

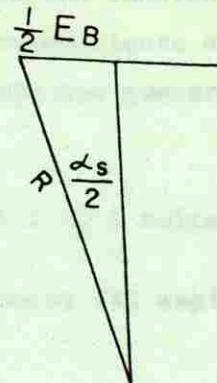


Fig. 4-9

$$\frac{1}{2} E_B = R \text{ SEN } \frac{\alpha_s}{2}$$

$$E_B = 2 R \text{ SEN } \frac{\alpha_s}{2}$$

entonces, el factor de distribución nos quedaría:

$$K_d = \frac{2R \text{ SEN } \frac{q\alpha_s}{2}}{q \cdot 2R \text{ SEN } \frac{\alpha_s}{2}} = \frac{\text{SEN } \frac{q\alpha_s}{2}}{q \text{ SEN } \frac{\alpha_s}{2}}$$

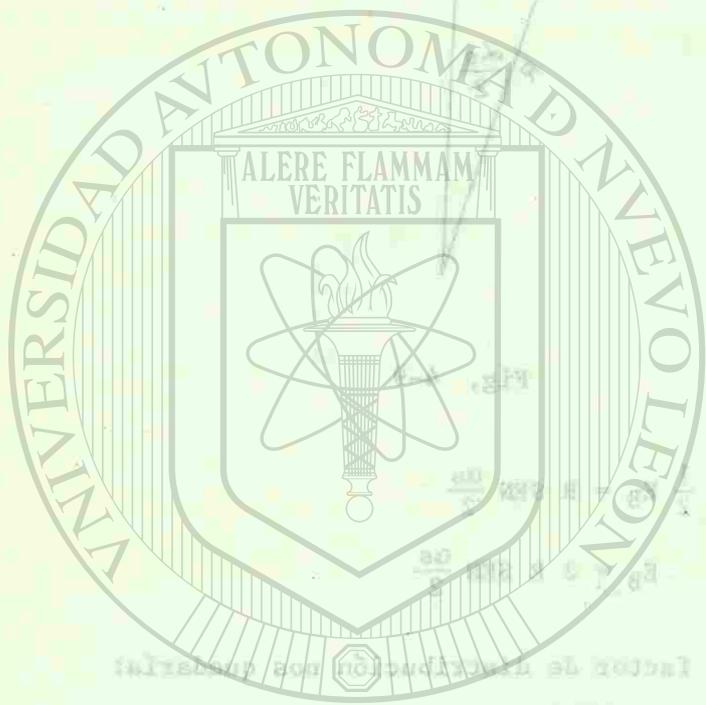
$$K_d = \frac{\text{SEN } \frac{q\alpha_s}{2}}{q \text{ SEN } \frac{\alpha_s}{2}}$$

ecuación 4-a



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Esta ecuación, tendrá aplicación también para las armónicas, cuidando sólo de poner el correspondiente α_s para cada armónica.

El voltaje inducido por grupo nos quedará entonces:

$$E_G = q E_B K_d \quad \Phi \text{ webbers}$$

$$= q K_d * 4.44 f N_B \Phi \text{ volts} \quad N_B \text{ espiras/bobina}$$

Realmente, $q N_B$ serían entonces las espiras por grupo (N_G) entonces tendremos:

$$E_G = 4.44 f N_G \Phi \text{ volts}$$

Si hacemos N el número de espiras por fase, la ecuación de voltaje por fase nos quedaría:

$$E_f = 4.44 f N \Phi K_d \text{ volts}$$

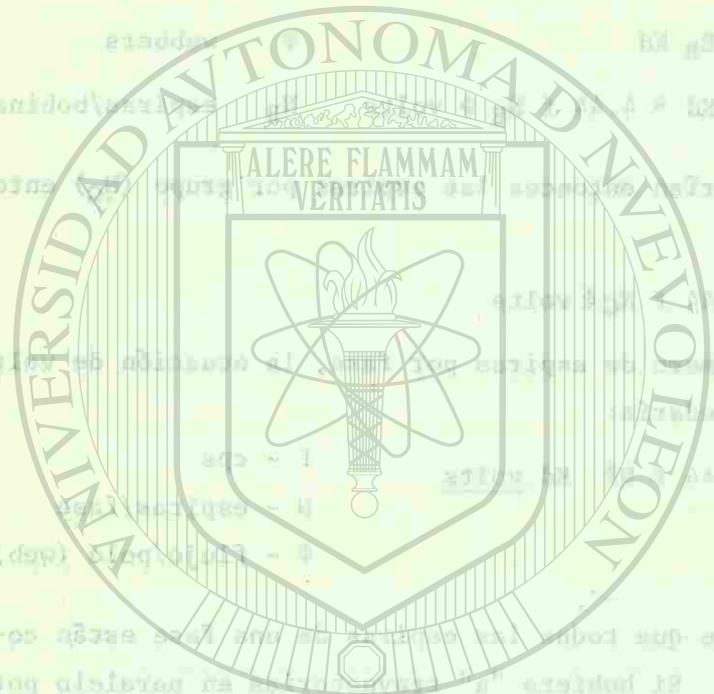
f - cps
 N - espiras/fase
 Φ - flujo/polo (web)

Esta fórmula supone que todas las espiras de una fase están conectadas en serie. Si hubiera "a" trayectorias en paralelo por fase, la ecuación nos quedaría:

$$E_f = \frac{4.44 f N \Phi K_d}{a} \quad \text{ecuación 4-b}$$

En seguida, en la fig. 4-10 aparece una tabulación con los valores de los factores de distribución para fundamental y algunas armónicas.

El Devanado de Paso Fraccionario.- Si hacemos el ancho de la bobina igual al paso polar, lograremos que los voltajes inducidos-



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$q=2$	2	3	4	5	6	7	8	9
k_{a6}	0,966	0,960	0,958	0,957	0,957	0,957	0,956	0,955
k_{a5}	0,707	0,667	0,654	0,646	0,644	0,642	0,641	0,640
k_{a4}	0,259	0,217	0,205	0,200	0,197	0,195	0,194	0,194
k_{a3}	-0,259	-0,177	-0,158	-0,149	-0,145	-0,145	-0,141	-0,140
k_{a2}	-0,707	-0,333	-0,270	-0,247	-0,236	-0,299	-0,225	-0,222
k_{a1}	-0,966	-0,177	-0,126	-0,110	-0,102	-0,097	-0,095	-0,095
k_{a10}	-0,966	0,217	0,126	0,102	0,092	0,086	0,085	0,081
k_{a9}	-0,707	0,667	0,270	0,200	0,172	0,158	0,150	0,145
k_{a8}	-0,259	0,960	0,158	0,102	0,084	0,075	0,070	0,066
k_{a7}	0,259	0,960	-0,205	-0,110	-0,084	-0,072	-0,066	-0,062
k_{a6}	0,707	0,667	-0,654	-0,247	-0,172	-0,145	-0,127	-0,118
k_{a5}	0,966	0,217	-0,958	-0,149	-0,092	-0,072	-0,065	-0,057

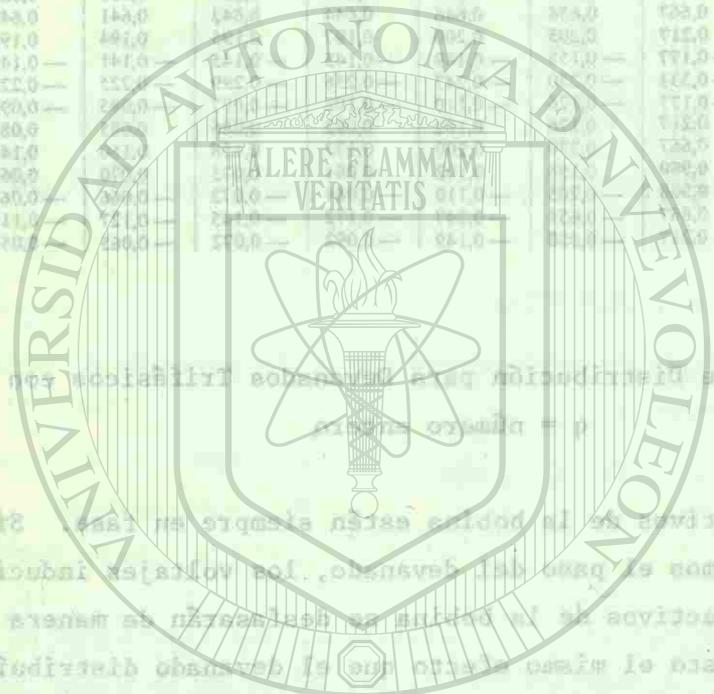
Fig. 4-10 Factores de Distribución para Devanados Trifásicos con $q = \text{número entero}$

por los 2 lados activos de la bobina estén siempre en fase. Sin embargo, si acortamos el paso del devanado, los voltajes inducidos por los lados activos de la bobina se desfazarán de manera que provoquemos justo el mismo efecto que el devanado distribuido. Es decir, vamos a sacrificar un poco de voltaje de la onda fundamental pero lograremos disminuir mucho más, la amplitud de algunas armónicas.

Vamos a poner un ejemplo para ser más ilustrativos:

Tenemos un devanado con un paso polar $\tau = 6$ ranuras y, decidimos hacer el ancho de la bobina $w = 5$ ranuras. Entonces, como el paso polar vale 180° , 6 ranuras son igual a 180° . Por supuesto, el ángulo entre ranuras valdrá 30° , esto quiere decir, que los lados activos de la bobina en cuanto a la onda fundamental estarán corridos 30° (pusimos 5 ranuras en lugar de 6).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000



La 5a. armónica sin embargo, se desfazará 5×30 o sean 150° . La 7a. armónica 210° , es decir, ambas se desfazarán un ángulo cercano a 180° lo que hará que al sacar la resultante en los lados activos de las bobinas de la 5a. y 7a. armónicas, se aproximará a cero (ver fig.4.11).

EFFECTO DEL PASO FRACCIONARIO.

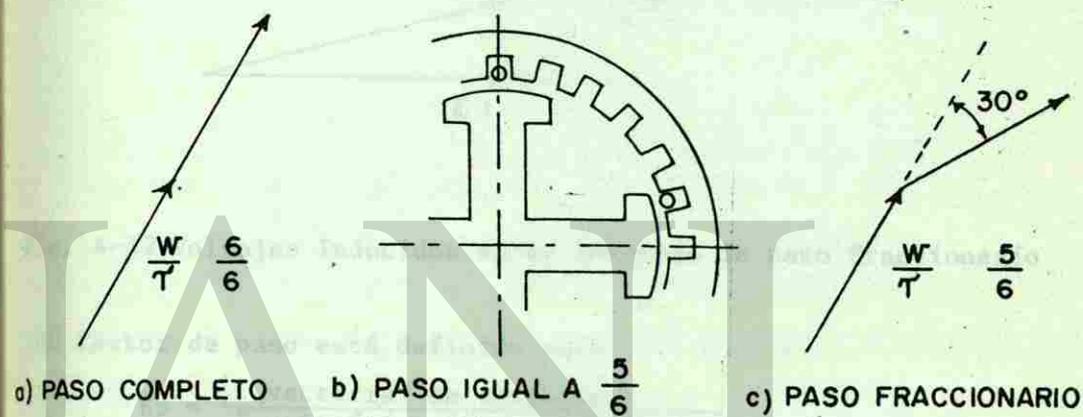
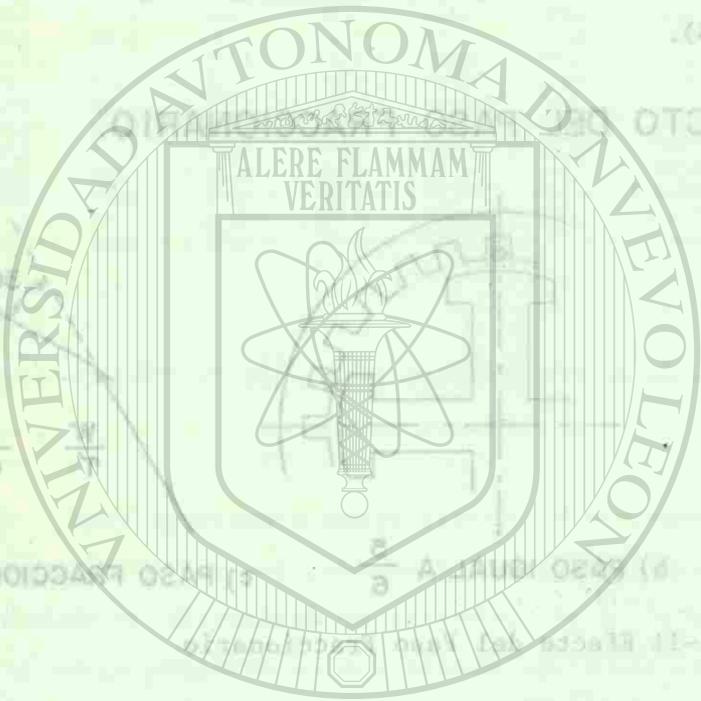


Fig.4-11 Efecto del Paso Fraccionario

El devanado de paso fraccionario puede hacerse con un número de ranuras mayor o menor a las correspondientes al paso polar, produciendo iguales resultados. Sin embargo, se prefiere el paso acortado porque requiere menor cantidad de cobre.

Factor de Paso.- Los voltajes inducidos por los 2 lados activos de una bobina con paso acortado y su resultante, aparecen en la fig. 4-12



VOLTAJE INDUCIDO EN UN DEV. DE PASO FRAC-
CIONARIO.

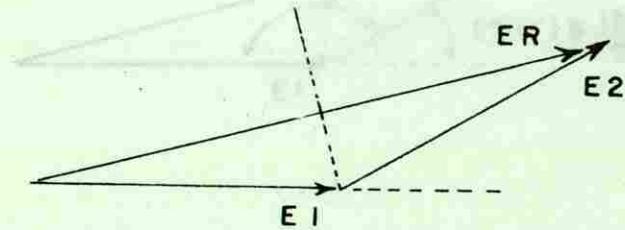


Fig. 4-12 Voltajes Inducidos en un Devanado de paso Fraccionario

El factor de paso está definido por:

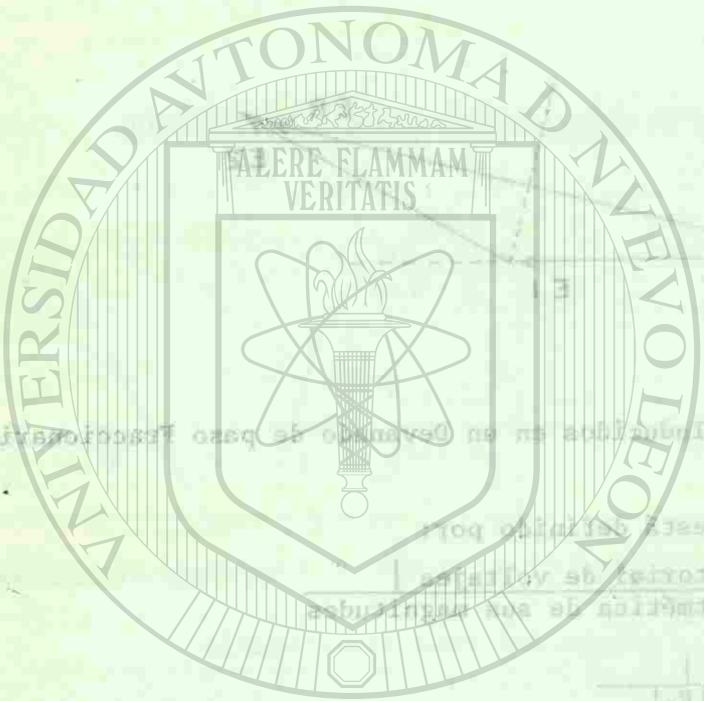
$$K_p = \frac{|\Sigma \text{ vectorial de voltajes }|}{\Sigma \text{ aritmética de sus magnitudes}}$$

$$K_p = \frac{|E_R|}{|E_1| + |E_2|}$$

... τ es el paso polar y $(\tau - w)$ es el desfaseamiento entre ambos lados de la bobina. Para expresar el desfaseamiento en grados eléctricos será:

$$(\tau - w) * \frac{180^\circ}{\tau} \quad \text{donde}$$

$(\tau - w)$ es el desfaseamiento en ranuras y $\frac{180^\circ}{\tau}$ es el ángulo entre ranuras. Entonces, el diagrama vectorial más detallado nos quedará como en la figura 4-13.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

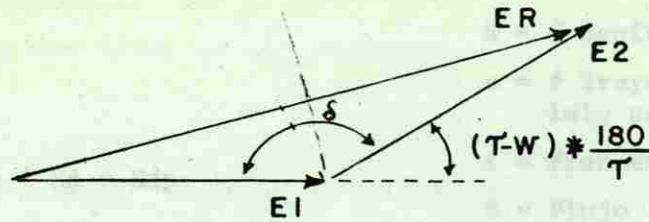


Fig. 4-13 Diagrama Vectorial más Detallado

Entonces, a la mitad de E_R formaremos un triángulo rectángulo -- donde un ángulo vale $\frac{\delta}{2}$:

$$\frac{E_R}{2} = E_1 \text{ sen } \left(\frac{\delta}{2} \right)$$

$$\delta = 180 - (\tau - w) * \frac{180}{\tau} = 180 - 180 + \frac{w}{\tau} * 180$$

$$\delta = \frac{w}{\tau} * 180$$

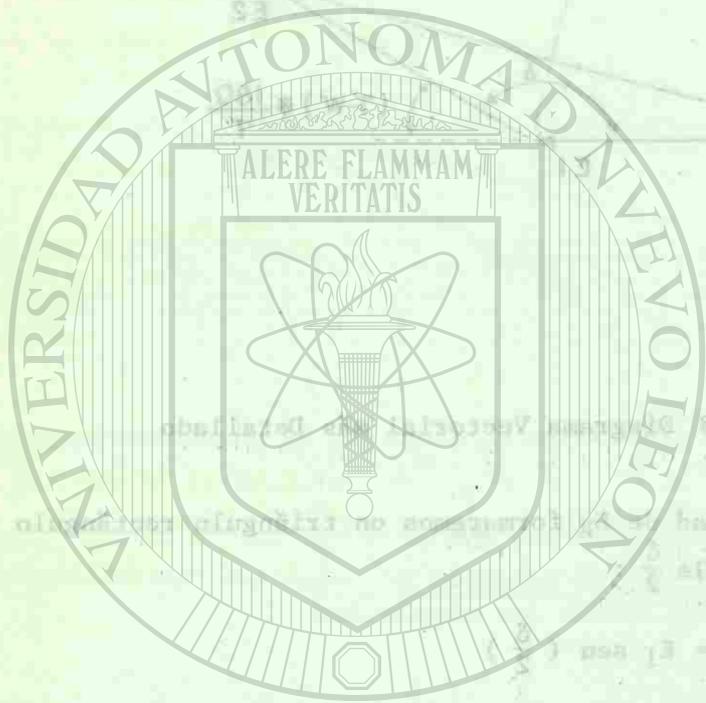
$$E_R = 2 E_1 \text{ sen } \left(\frac{w}{\tau} * 90^\circ \right)$$

$$2 E_1 \text{ sen } \left(\frac{w}{\tau} * 90^\circ \right)$$

$$K_p = \frac{2 E_1 \text{ sen } \left(\frac{w}{\tau} * 90^\circ \right)}{2 E_1} = \text{sen } \left(\frac{w}{\tau} * 90^\circ \right)$$

$$K_p = \text{sen } \frac{w}{\tau} * 90^\circ$$

Entonces, tomando en cuenta el factor de paso y el factor de dis



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

tribución, la fórmula de voltaje inducido por fase nos quedará:

$$E_f = 4.44 f \frac{N}{a} \Phi K_d K_p \text{ volts}$$

- N = # Espiras por fase
- a = # Trayectorias en paralelo por fase.
- f = Frecuencia (Hz)
- Φ = Flujo (webbers)
- E_f = Voltaje inducido por fase

$$K_p * K_d = K_{dp}$$

Entonces:

$$E_f = 4.44 f \frac{N}{a} \Phi K_{dp}$$

Enseguida, en la figura 4-14 aparecen los factores de paso para la fundamental y para algunos armónicos de algunos devanados de paso fraccional:

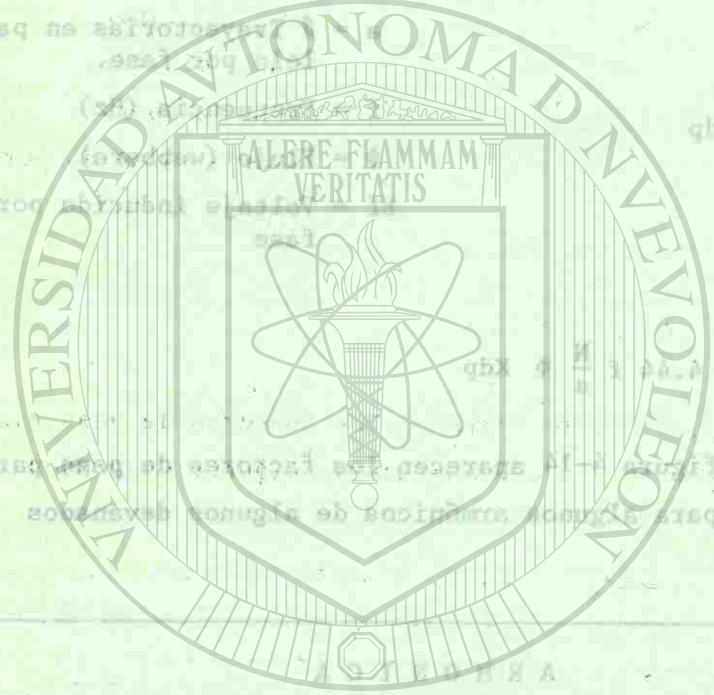
Relación de paso ($\frac{w}{T}$)	ARMÓNICA				
	1a.	3a.	5a.	7a.	11a.
2/3	.866	.000	.866	.866	.866
4/5	.951	.588	.000	.588	.951
5/6	.966	.707	.259	.259	.966
6/7	.975	.782	.434	.000	.782

Fig. 4-14 Factores de Paso para las Armónicas

Resolución. La fórmula de voltaje inducido por fase nos da:

$$E_f = 4.44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi_m \cdot k_p \cdot \frac{1}{s}$$

$N = 4$ espiras por fase



Relación de paso $(\frac{w}{\tau})$	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95
k_p	0.675	0.72	0.765	0.81	0.855
k_p^2	0.455	0.518	0.586	0.656	0.731
k_p^3	0.342	0.374	0.410	0.441	0.476
k_p^4	0.260	0.283	0.309	0.331	0.354
k_p^5	0.197	0.211	0.228	0.241	0.256
k_p^6	0.148	0.158	0.171	0.181	0.192
k_p^7	0.110	0.117	0.125	0.131	0.138
k_p^8	0.082	0.086	0.091	0.095	0.099
k_p^9	0.061	0.063	0.065	0.067	0.069
k_p^{10}	0.046	0.047	0.048	0.049	0.050

Fig. 4-14 Factores de paso para las armónicas

Se nota, en la fig. 4-14 que una relación de paso de 5/6 logra -- reducir la 5a. y 7a. armónica a casi 1/4 de su valor mientras -- que la fundamental casi no sufre merma. Por ésto, esta relación de paso es muy común en los devanados.

Ejemplo.-

Se tiene un generador sincrónico trifásico, cuyos grupos se han conectado formando 3 estrellas en paralelo y tiene los siguientes datos:

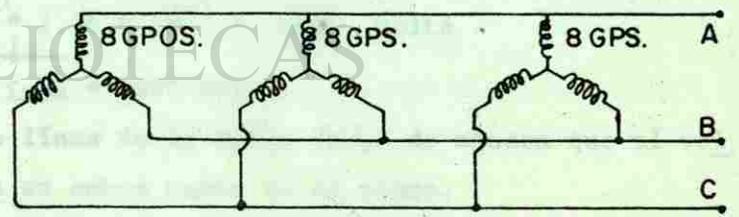
- P = 24 polos
 - f = 60 Hz
 - m = 3 fases
 - Q = 216 ranuras
 - 2 capas
 - 18 conductores/ranura
 - $\frac{w}{\tau} = 0.778$
 - E vacío = 2300 volts (líneas)
- Solución
- Q = 216 ranuras = 216 bobinas
 - # espiras totales = $\frac{18}{2}$ cond/ranura * 216 ran. = 1944 espiras

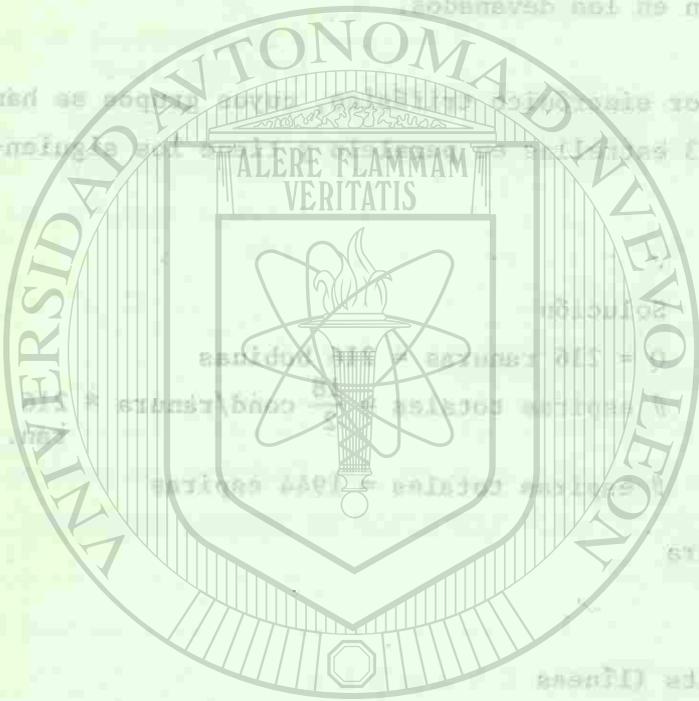
- a) ¿cuánto vale el Φ por polo en vacío $\frac{N}{\text{fase}} = \frac{1944}{3} = 648 \text{ esp/fase}$
- b) ¿Si se forman 2 deltas en paralelo cuál sería el voltaje de línea? $E_{\text{fase}} = \frac{2300}{\sqrt{3}}$

$$k_p = \sin \frac{w}{\tau} * \frac{\pi}{2} = \sin (.778 * 90^\circ)$$

$$= \sin 70^\circ$$

$$k_p = 0.94$$





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



RESUMEN CAPITULO IV

$$Kd = \frac{\text{sen } q \left(\frac{\alpha_s}{2} \right)}{q \text{ sen } \frac{\alpha_s}{2}} \quad \alpha_s = \frac{180 \cdot p}{Q} = \frac{180 \cdot 24}{216}$$

$$\alpha_s = 20^\circ E$$

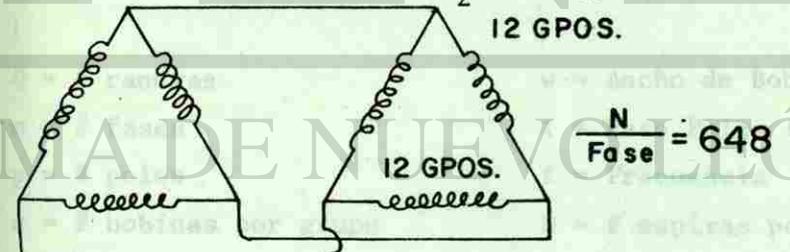
$$Kd = \frac{\text{sen } 3 (10)^\circ}{3 \text{ sen } 10^\circ} = \frac{.5}{3(.174)} \quad q = \frac{Q}{m \cdot p} = \frac{216}{3 \cdot 24} = 3 \frac{\text{bob.}}{\text{gpo.}}$$

$$Kd = 0.96 \quad Kdp = .94 \cdot .96 = .9024$$

$$\phi = \frac{E_{\text{fase}}}{4.44 f \frac{N}{a} Kdp} \text{ webb}$$

$$= \frac{2300}{4.44 \cdot \sqrt{3} \cdot 60 \cdot \frac{648}{3} \cdot .9024}$$

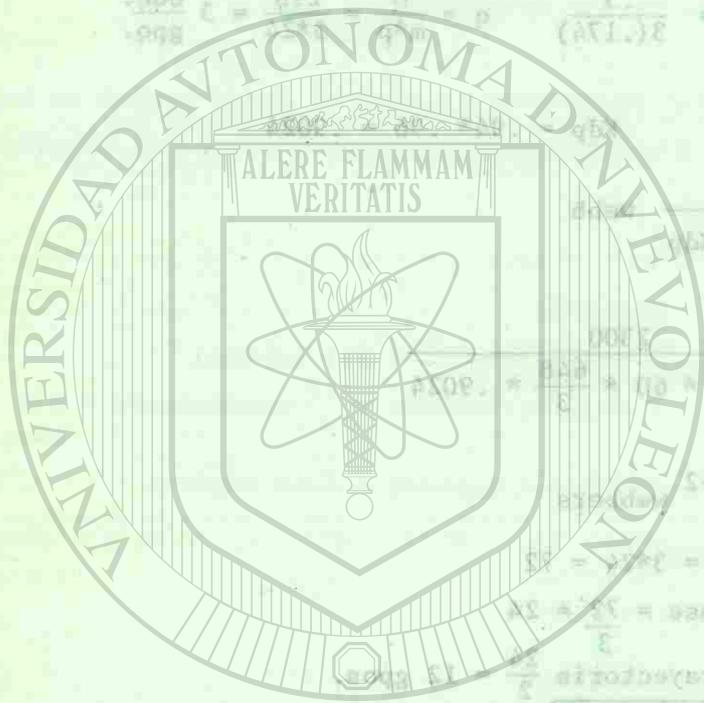
- a) $\Phi = 2.56 \cdot 10^{-2}$ webbers
- b) # grupos = $m \cdot p = 3 \cdot 24 = 72$
- # grupos por fase = $\frac{72}{3} = 24$
- # grupos por trayectoria $\frac{24}{2} = 12$ gpos.



$$E = 4.44 \cdot 60 \cdot \frac{648}{2} \cdot 2.56 \cdot 10^{-2} \cdot .9024 \text{ volts}$$

$$E_{\text{fase}} = E_{\text{línea}} = 1992 \text{ volts}$$

Este sería el voltaje de línea de la doble delta de manera que el voltaje inducido por bobina en ambos casos es el mismo.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$Q = \# \text{ bobinas por grupo} = \frac{Q}{m \cdot p}$$

$$\alpha_s = \text{Desfasamiento entre ranuras adyacentes} = \frac{180^\circ \cdot p}{Q}$$

$$K_d = \text{Factor de Distribución} = \frac{\text{sen} \left(\frac{q \alpha_s}{2} \right)}{q \text{sen} \left(\frac{\alpha_s}{2} \right)}$$

$$K_p = \text{Factor de Paso} = \text{sen} \left(\frac{w}{\tau} * 90^\circ \right)$$

$$E_{\text{fase}} = 4.44 f * \frac{N}{a} * \Phi K_{dp}$$

Q = # ranuras

w = Ancho de Bobina (ranura)

m = # fases

τ = Paso Polar (ranuras)

p = # polos

f = Frecuencia

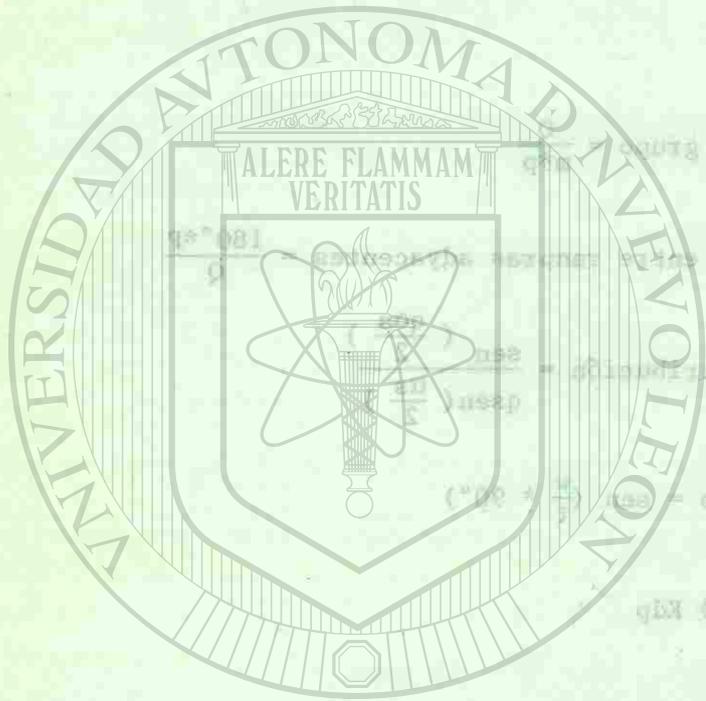
q = # bobinas por grupo

N = # espiras por fase ^(R)

α_s = Desfasamiento entre ranuras a = # Trayect. en paralelo por fase.

Φ = Flujo por polo (webbers)

K_{pd} = Factor del Devanado



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCION GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO V

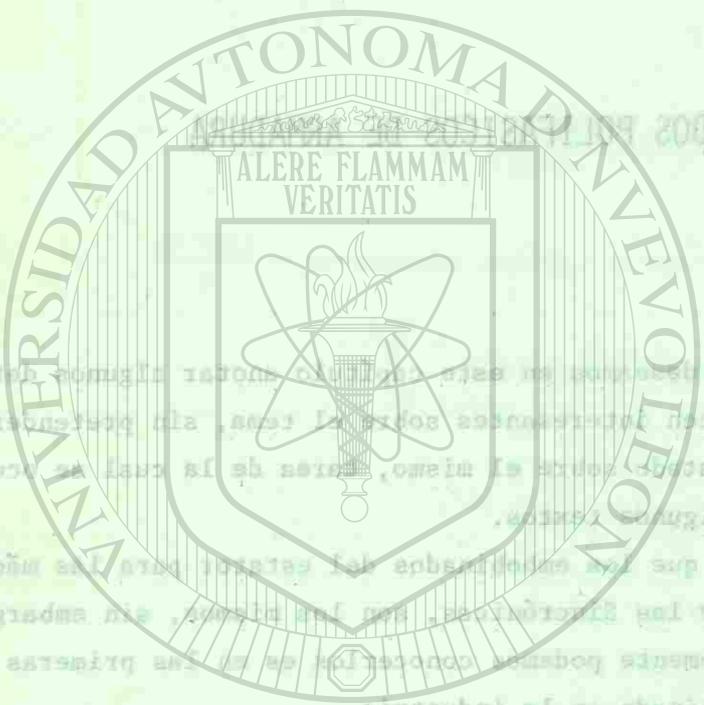
DEVANADOS POLIFASICOS DE ARMADURA

Bajo este título, deseamos en este capítulo anotar algunos detalles que nos parecen interesantes sobre el tema, sin pretender desarrollar un tratado sobre el mismo, tarea de la cual se ocupan ampliamente algunos textos.

Es justo aclarar, que los embobinados del estator para las máquinas de Inducción y las Sincrónicas, son los mismos, sin embargo donde mas probablemente podamos conocerlos es en las primeras -- por su uso generalizado en la industria.

5-1 Principios Generales.- Los devanados polifásicos del estator los podemos encontrar en dos tipos principalmente: Imbricado y Ondulado (ver fig. 5-1) de los cuales el mas común es el primero.

Los devanados polifásicos generalmente son de doble capa por lo tanto, el número de ranuras (Q) es igual al número de bobinas -- (figs. 5-2 y 5-3).



DEVANADOS

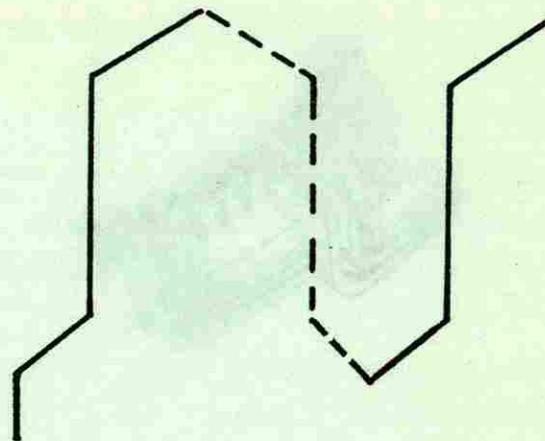
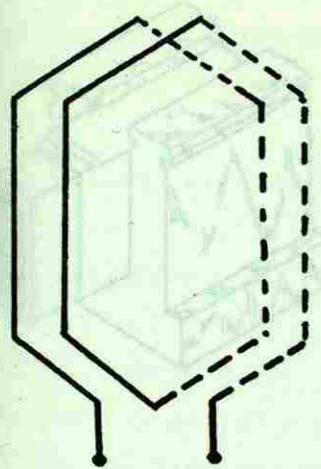


Fig. 5-1(a) Bobinas de un devanado imbricado.

Fig. 5-1(b) Bobinas de un devanado ondulado.

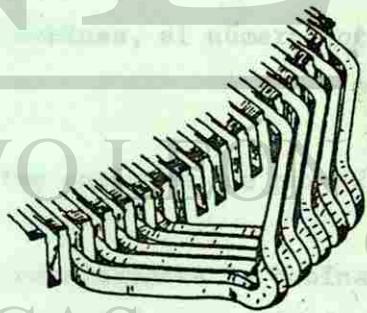
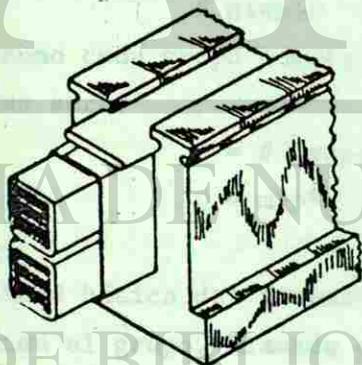


Fig. 5-2 Devanado de 2 Capas

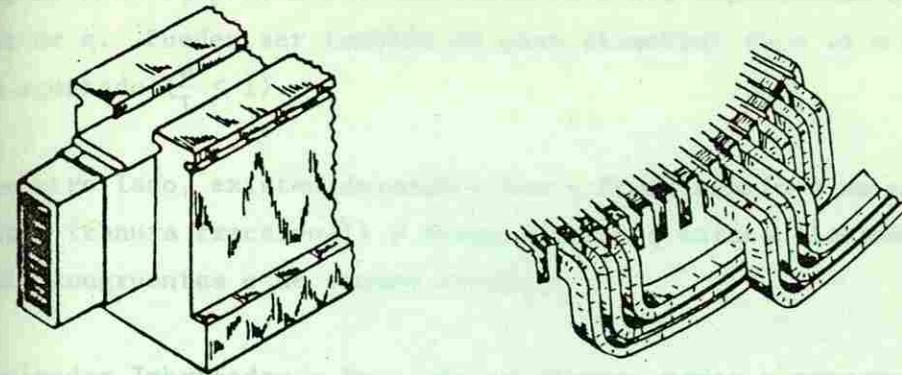
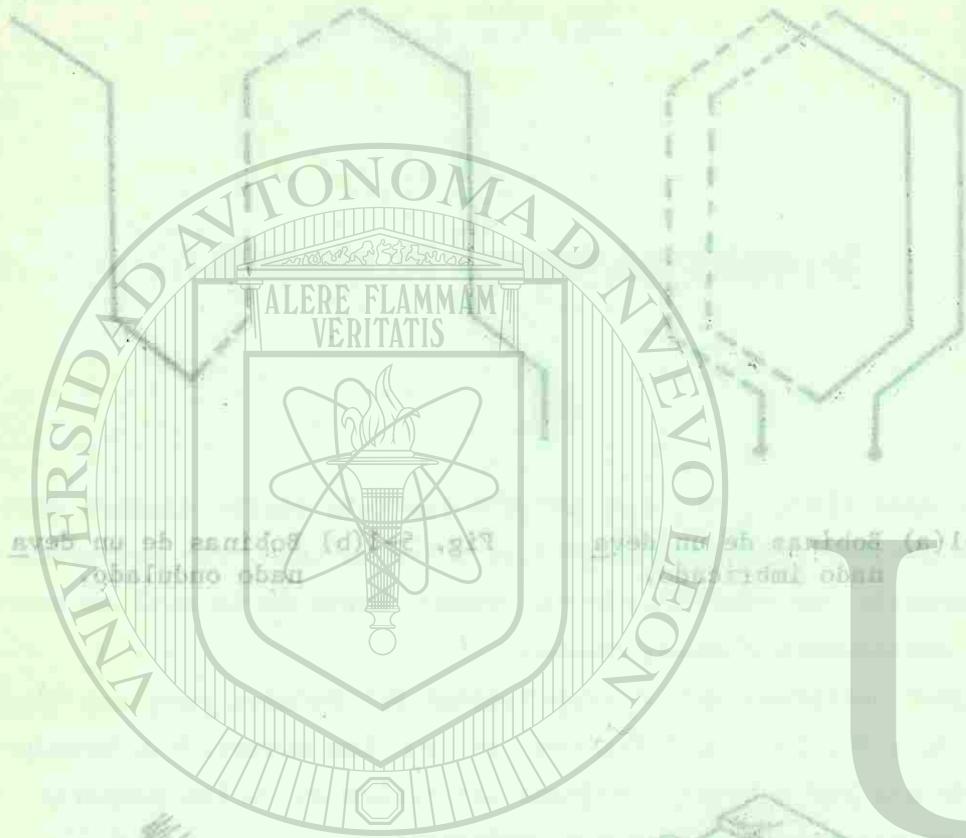


Fig. 5-3 Devanado de una sola capa

Como antes mencionamos, cada fase aporta un grupo de bobinas para la formación de cada polo, por lo que cada fase contendrá tantos grupos como polos. El número de grupos totales será entonces:

$$\# \text{ grupos} = m * p$$

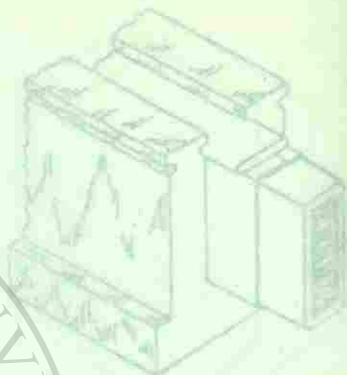
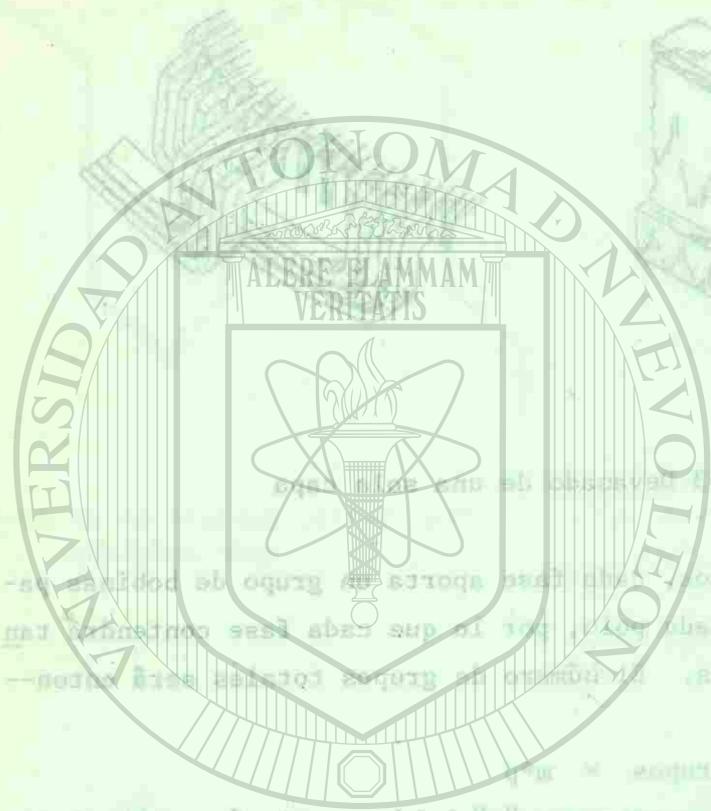
.... como cada grupo cuenta con "q" bobinas, el número total de bobinas será:

$$Q = \# \text{ grupos} * q$$

$$Q = m * p * q \quad (\text{se entiende que para 2 capas})$$

La unidad básica del devanado no es precisamente la bobina sino más bien el grupo, llamado en ocasiones el "grupo polo-fase".

En cada fase, al tener tantos grupos como polos, se podrán como máximo formar tantas trayectorias en paralelo como grupos, es decir, como polos.



Los devanados, pueden ser distribuidos o no, dependiendo del valor de q . Pueden ser también de paso diametral ($w = \tau$) o de paso acortado ($\frac{w}{\tau} < 1$).

Por otro lado, existen devanados con q fraccionario o no congruentes (ranura fraccional) y devanados con q entero llamados también congruentes o de ranura integral.

Devanados Imbricados.- Para obviar tiempo, vamos a esquematizar en diferentes formas y para diferentes conexiones, un devanado imbricado de 2 polos, trifásico, de 2 capas, en un estator de 12 ranuras y de paso completo.

$$q = \frac{Q}{m \cdot p} = \frac{12}{3 \cdot 2} = 2 \text{ bobinas por grupo}$$

$$\tau_{\text{paso polar}} = \frac{Q}{P} = \frac{12}{2} = 6 \text{ ranuras por polo}$$

como es de paso completo, $w = \tau$

$$w = 6 \text{ ranuras (ancho de la bobina)}$$

Para continuar, conviene ir viendo la figura 5-4. Si asignamos las ranuras 1 y 2 a un grupo de la fase A, las ranuras 3 y 4 serán para la fase C y las 5 y 6 para la fase B (para comprender mejor esta distribución, ver tema del campo giratorio en el siguiente capítulo).

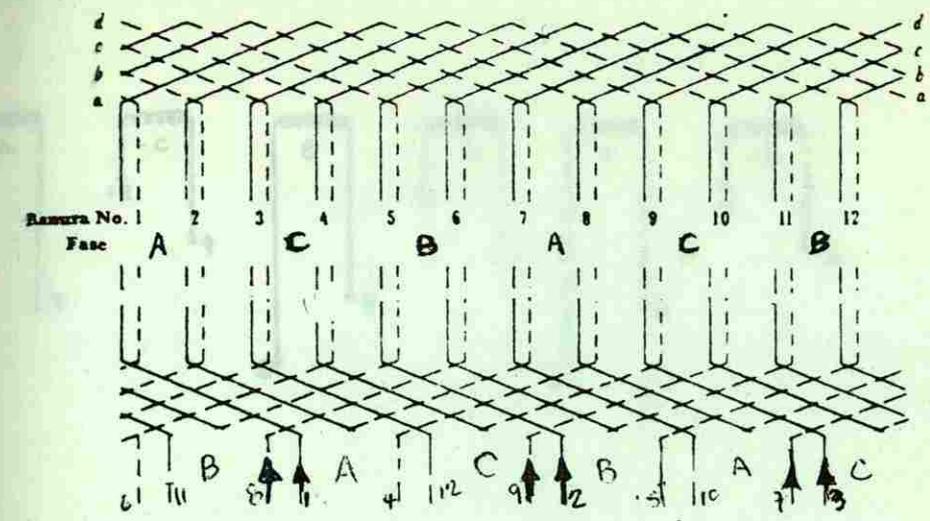
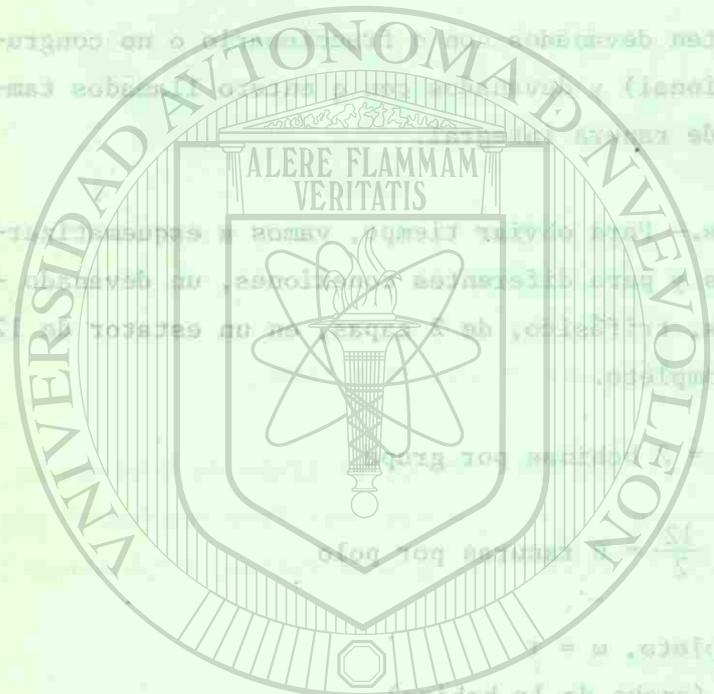
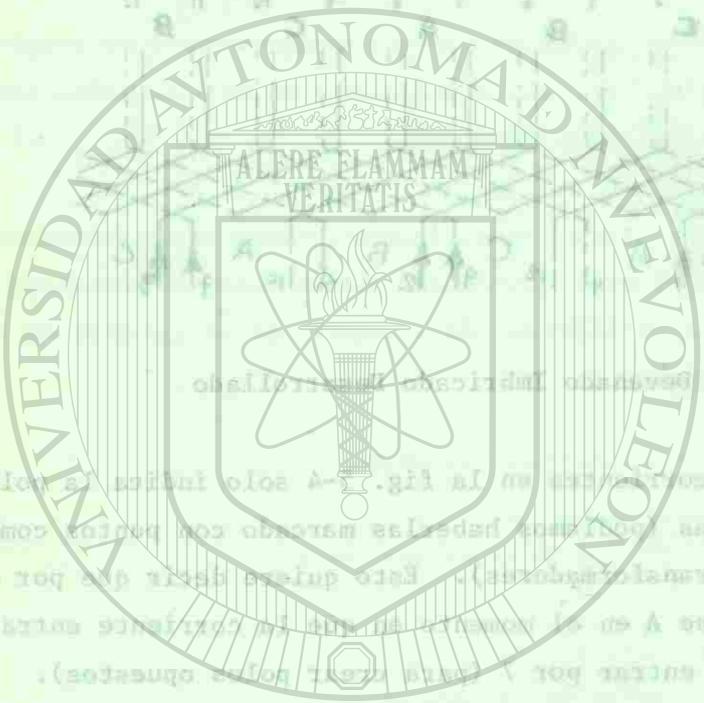


Fig. 5-4 Devanado Imbricado Desarrollado

El sentido de las corrientes en la fig. 5-4 solo indica la polaridad de las bobinas (podíamos haberlas marcado con puntos como se acostumbra en transformadores). Esto quiere decir que por ejemplo, para la fase A en el momento en que la corriente entra por 1 debe también entrar por 7 (para crear polos opuestos).

La entrada de la fase B debe ser la terminal 2 debido a que esta terminal hace contacto con la ranura 6 la que está 120° eléctricos desfasada de la entrada de A (ranura 1). Otra forma de esquematizar el devanado es como indica la fig. 5-5.

Esta forma de esquematizar el desarrollo de los grupos, también se puede hacer en forma circular y en lugar de señalar la polaridad con puntos. Hacerlo con flechas (fig. 5-6).



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

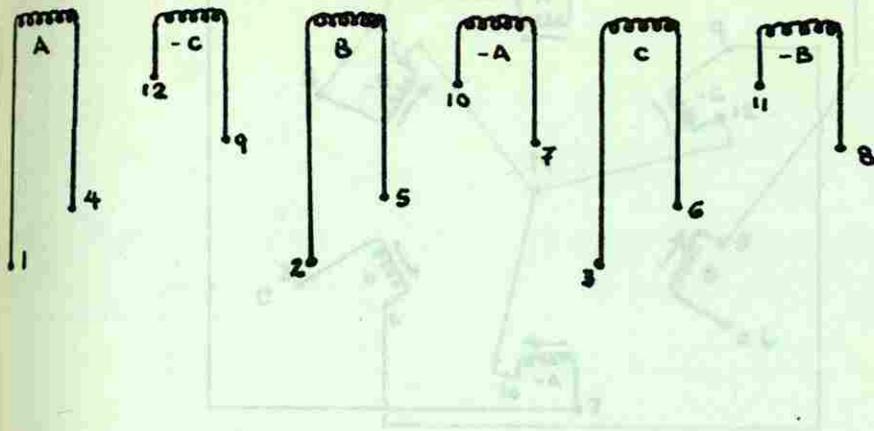


Fig. 5-5 Diagrama de Grupos del Devanado

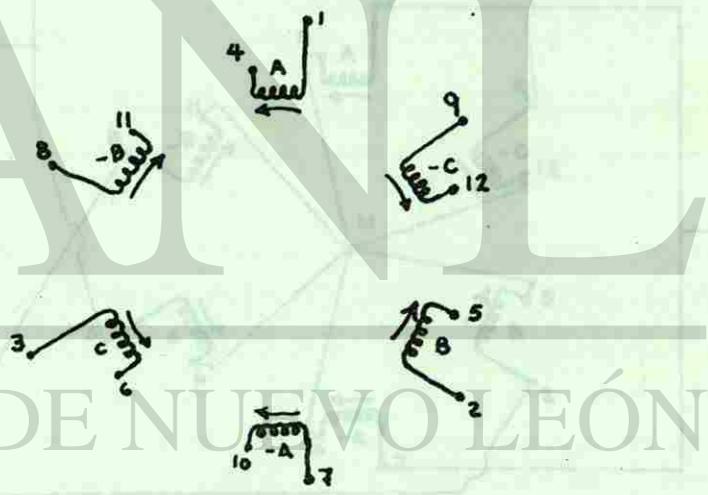
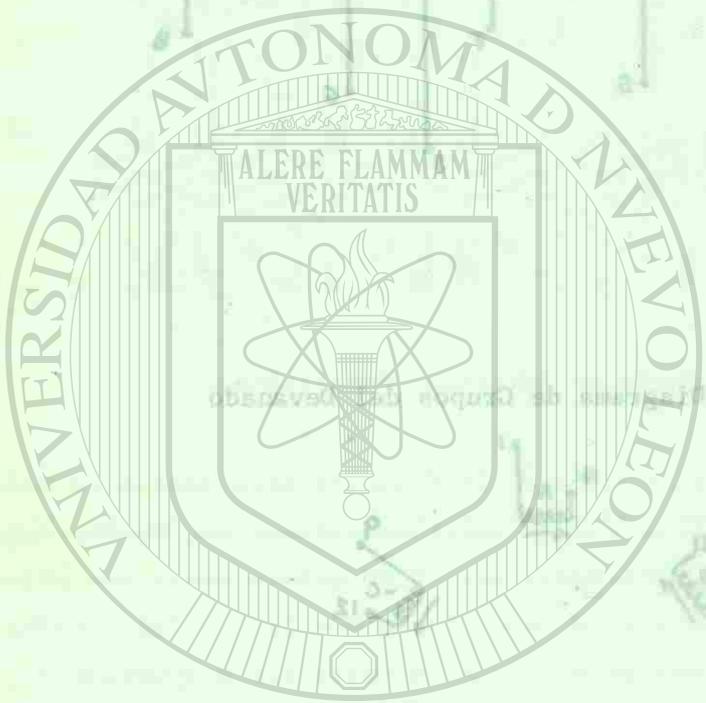


Fig. 5-6 Diagrama Circular

Enseguida, vamos a dibujar los diagramas circulares del mismo devanado conectado en diferentes maneras (fig. 5-7, 5-8 y 5-9).



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

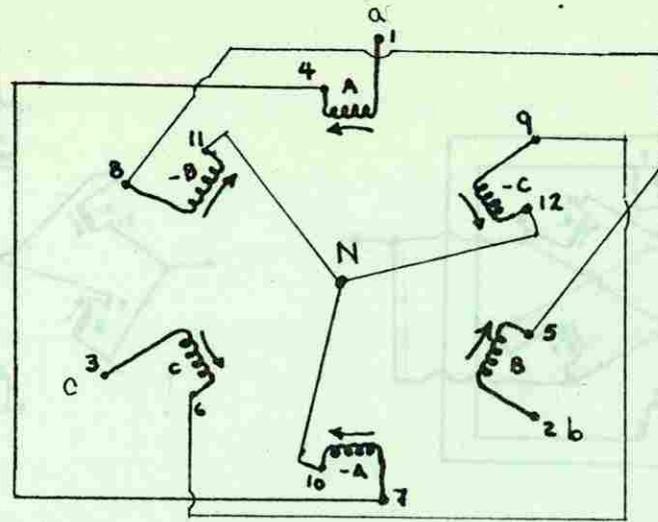


Fig. 5-7 Conexión para una Estrella Simple (Alto Voltaje)

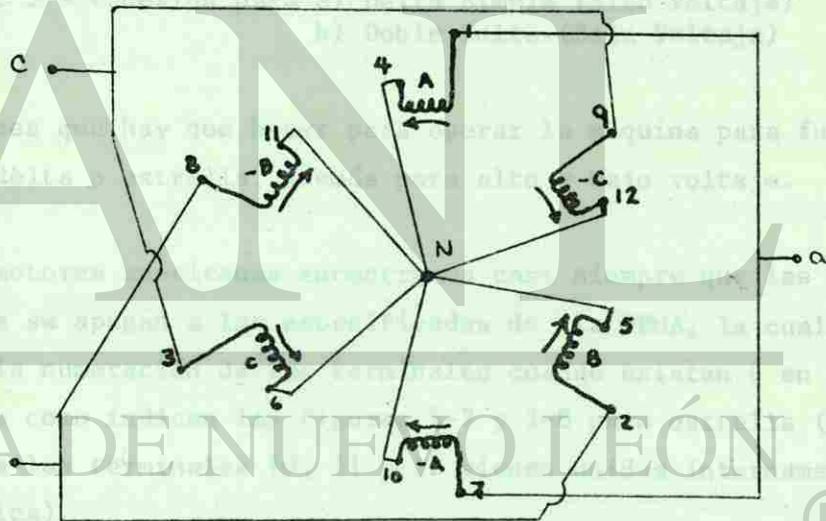
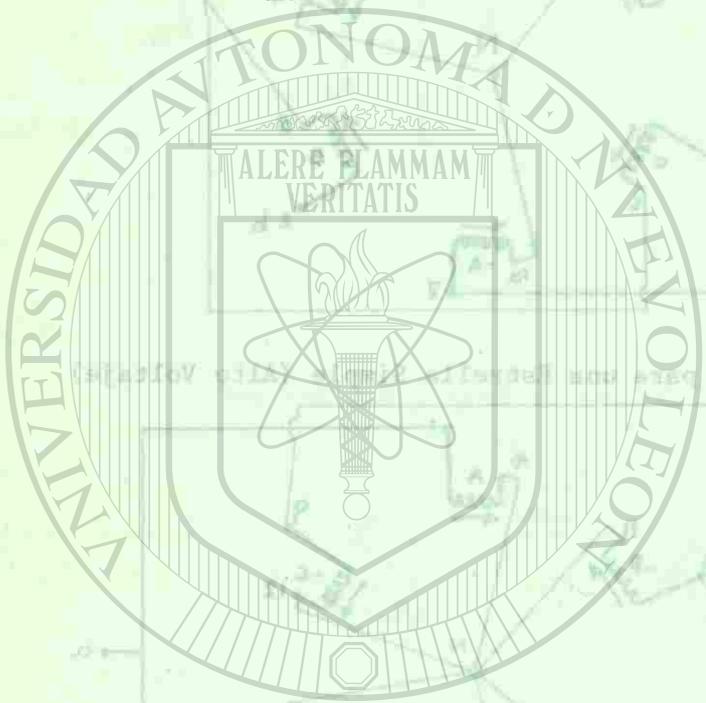


Fig. 5-8 Conexión para una Doble Estrella (Bajo Voltaje)

Los estatores de las máquinas sincrónicas tienen devanados iguales a los estatores de los motores de inducción. Con frecuencia, en una máquina encontramos en la placa especificadas las -



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

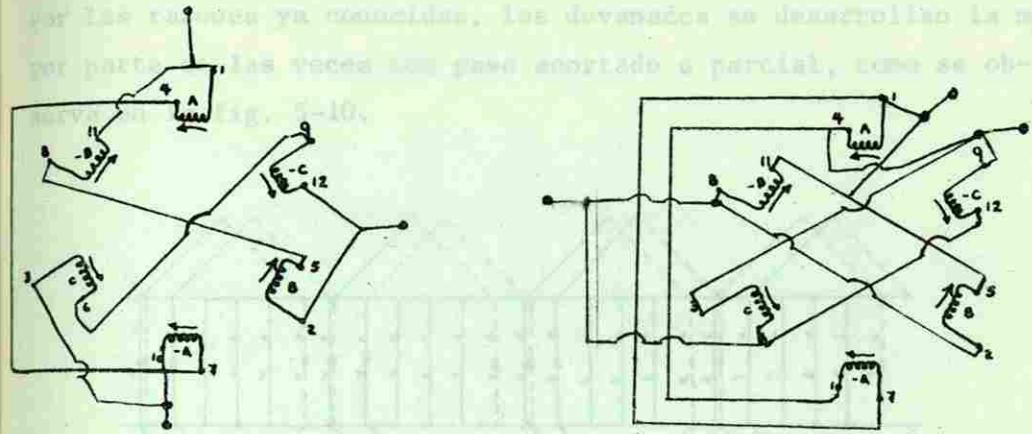
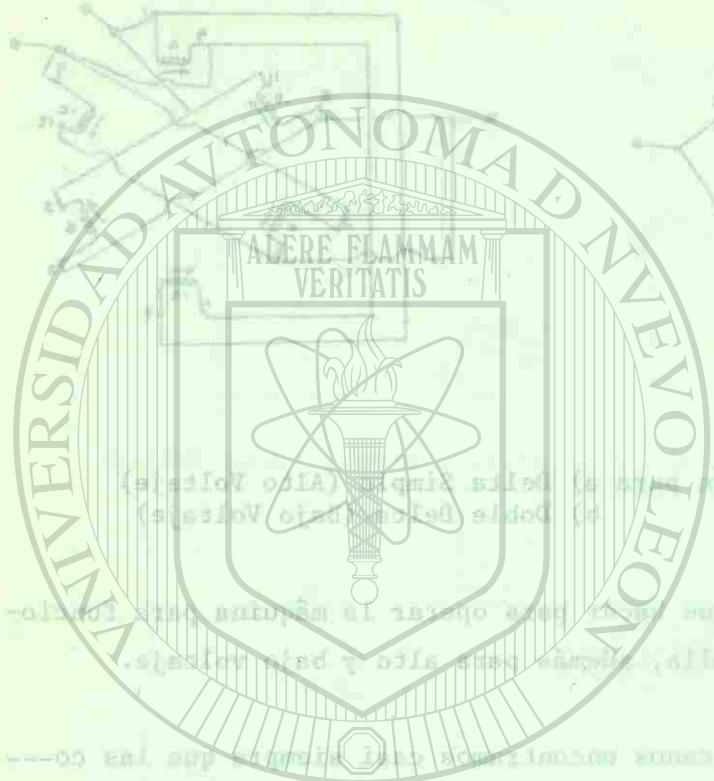


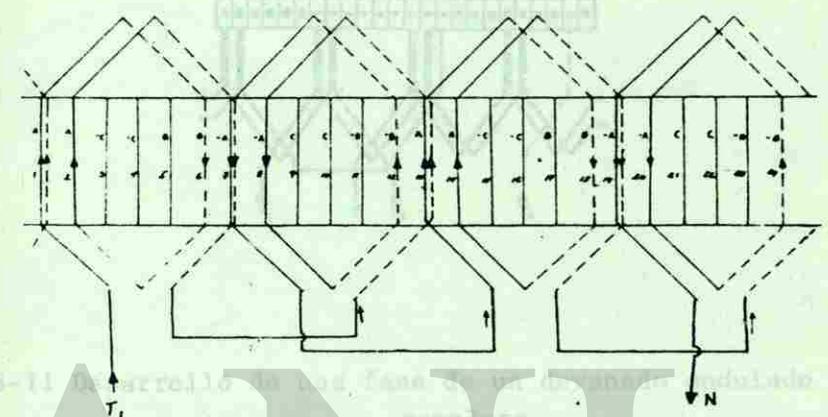
Fig. 5-9 Conexión para a) Delta Simple (Alto Voltaje)
b) Doble Delta. (Bajo Voltaje)

conexiones que hay que hacer para operar la máquina para funcionar en delta o estrella, además para alto y bajo voltaje.

En los motores americanos encontramos casi siempre que las conexiones se apegan a las especificadas de la NEMA, la cual indica que la numeración de las terminales cuando existen 9 en el tablero es como indican las figuras 5-7 y 5-8 para estrella (se supone que las terminales 10, 11 y 12 vienen unidas internamente de fábrica).



Por las razones ya conocidas, los devanados se desarrollan la mayor parte de las veces con paso acortado o parcial, como se observa en la fig. 5-10.



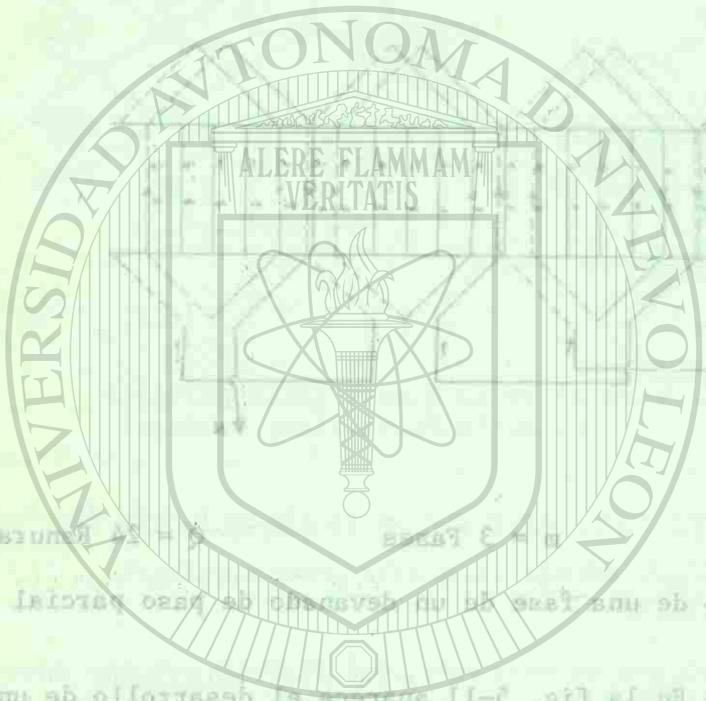
$P = 4$ Polos $m = 3$ Fases $Q = 24$ Ranuras

Fig. 5-10 Desarrollo de una fase de un devanado de paso parcial

5-3 Devanado Ondulado.- En la fig. 5-11 aparece el desarrollo de una fase para un devanado ondulado de 24 ranuras, 4 polos, 2 capas, 3 fases:

En el desarrollo de las otras 2 fases se hace enseguida para que dar como aparece en la fig. 5-12.

5-4 Diagramas Circulares.- En las siguientes figuras, veremos aparecer algunos devanados arreglados en diagramas circulares de grupos para diferentes conexiones.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

12 GRUPOS, 3 FASES, 4 POLOS

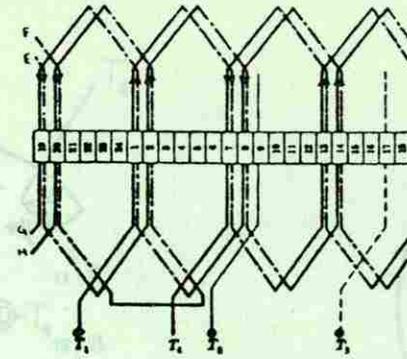


Fig. 5-11 Desarrollo de una fase de un devanado ondulado de paso completo.

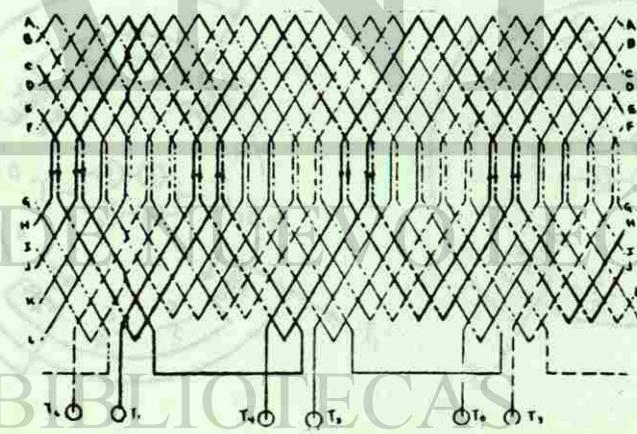


Fig. 5-12 Devanado Ondulado de 24 ranuras, 4 polos, 2 capas, 3 fases

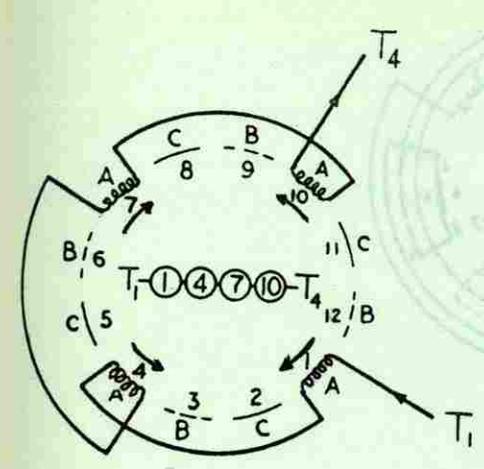


Fig. 5-13(a) Fase A conectada en serie

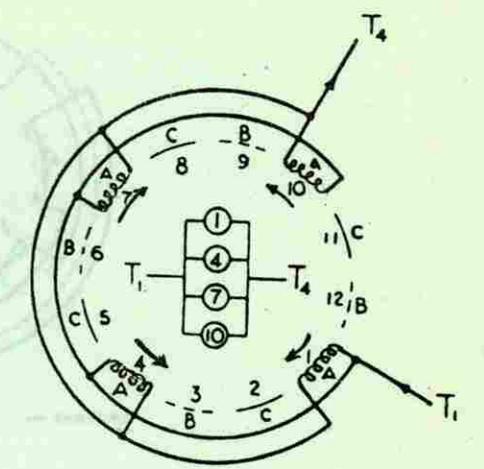


Fig. 5-13(b) Fase A con el máximo de trayectorias en paralelo (P)

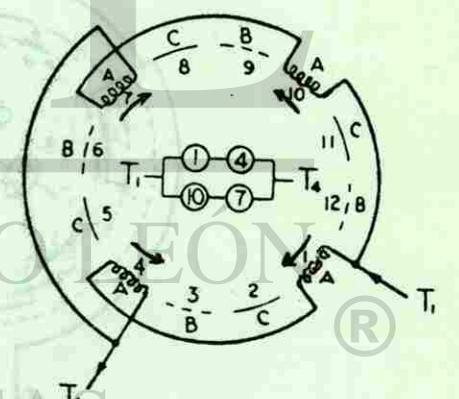
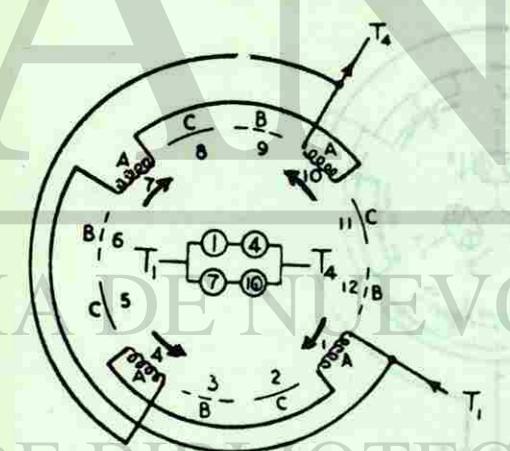


Fig. 5-13(c) Diferentes formas de conectar la fase A con 2 trayectorias en paralelo.

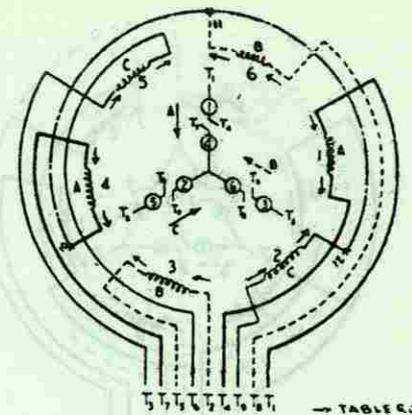


Fig. 5-14(a) Diagrama con 9 terminales al tablero para ser conectado en estrella simple o doble estrella.

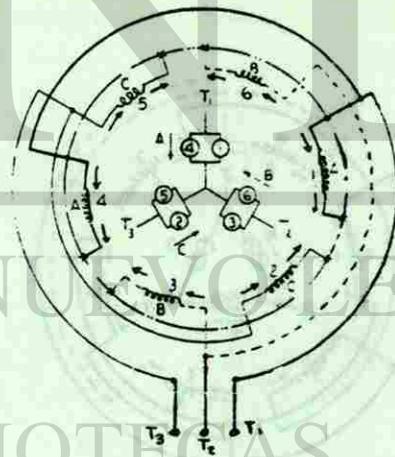


Fig. 5-14(b) Conexión para una doble estrella



BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Fig. 5-14(b) Conexión para una doble estrella

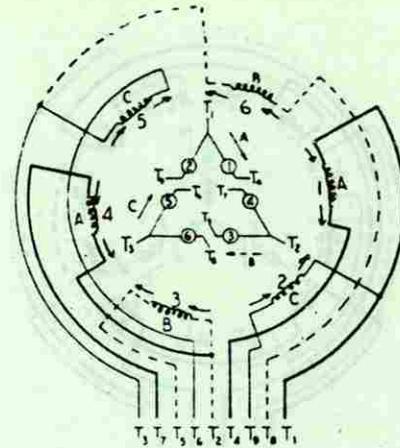


Fig. 5-14(c) Diagrama con 9 terminales para conectarse en delta simple o doble delta

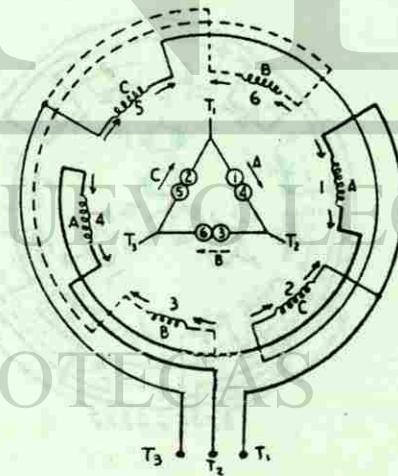
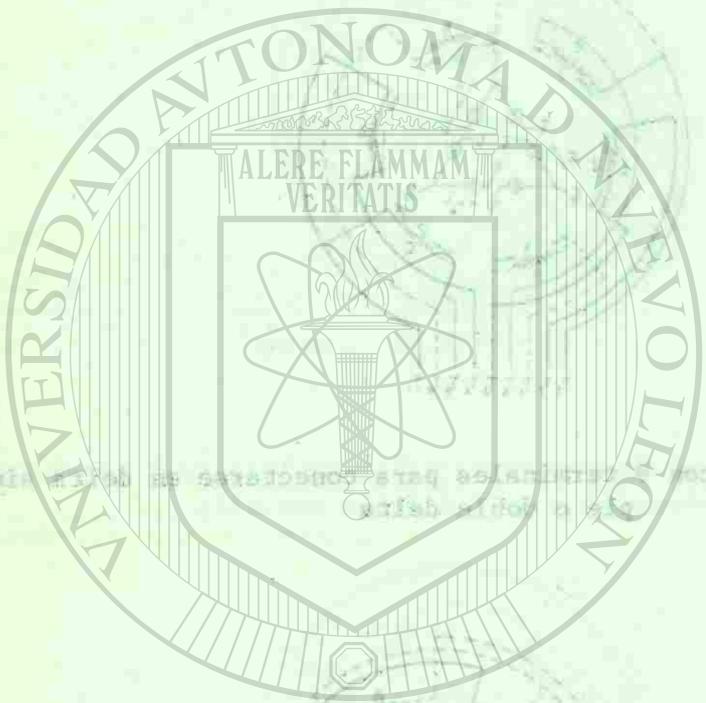


Fig. 5-14(d) Conexión en Delta Simple

BIBLIOTECA ALFONSINA

6 GRUPOS, 3 FASES, 4 POLOS



12 GRUPOS, 3 FASES, 4 POLOS

ESTRELLAS

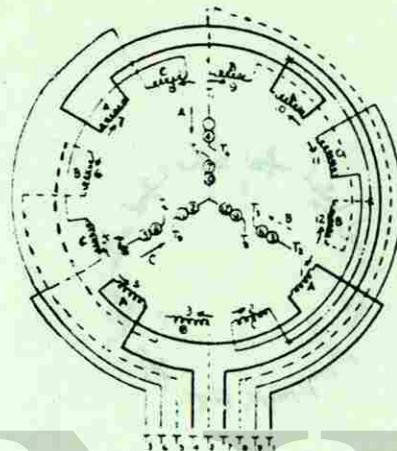


Fig. 5-15(a) Diagrama con 9 terminales para conectarse en estrella simple o en doble estrella



Fig. 5-15(b) Diagrama con 9 terminales para conectarse en una doble estrella o en una estrella cuádruple.



BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

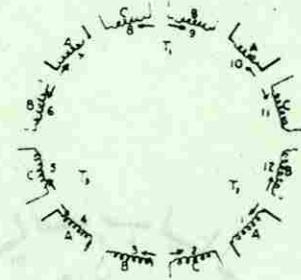


Fig. 5-15(c) Conéctese para una Delta Simple

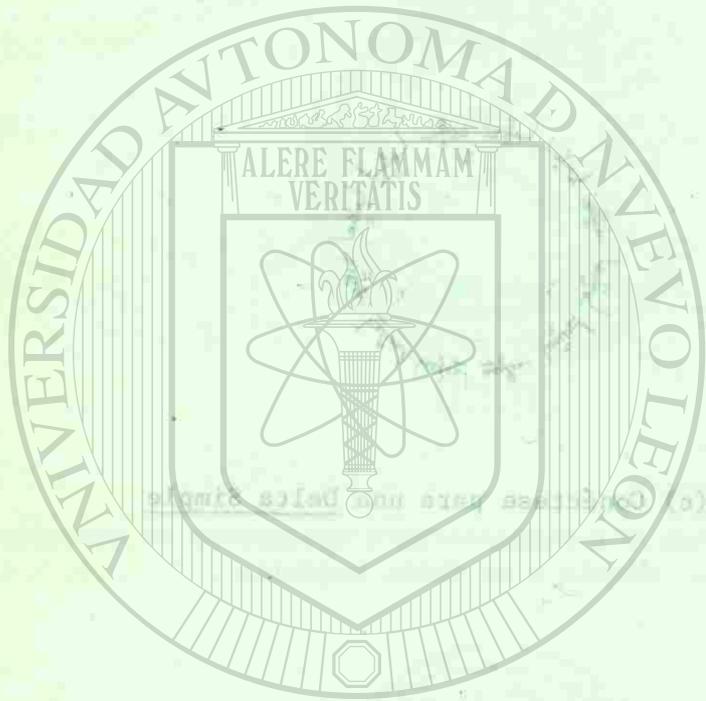
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Fig. 5-15(d) Conéctese para 4 Deltas en Paralelo

12 GRUPOS, 3 FASES, 6 POLOS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

PARA EL ALUMNO
18 GRUPOS, 6 POLOS, 3 FASES

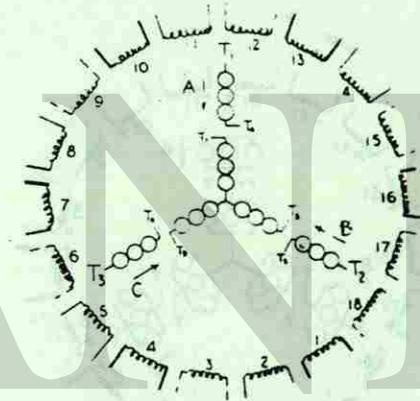
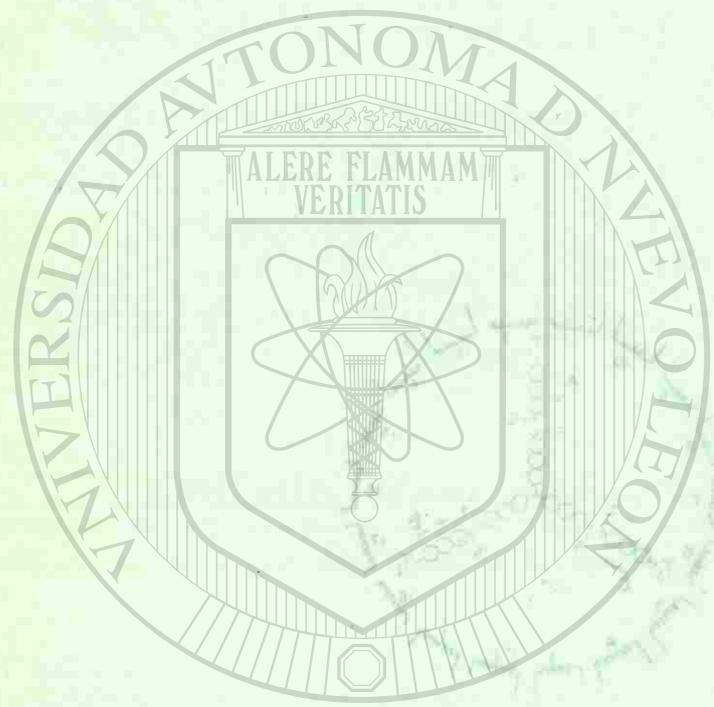
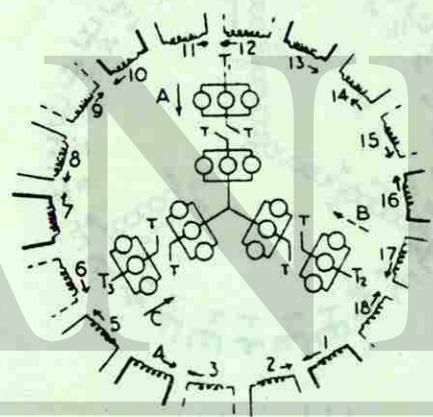


Fig. 5-16(a) Conéctese de manera que vayan 9 terminales al tablero- (numeradas) para que pueda ser conectado en estrella - simple o doble.

PARA EL ALUMNO
18 GRUPOS, 6 POLOS, 3 FASES



PARA EL ALUMNO
18 GRUPOS, 6 POLOS, 3 FASES

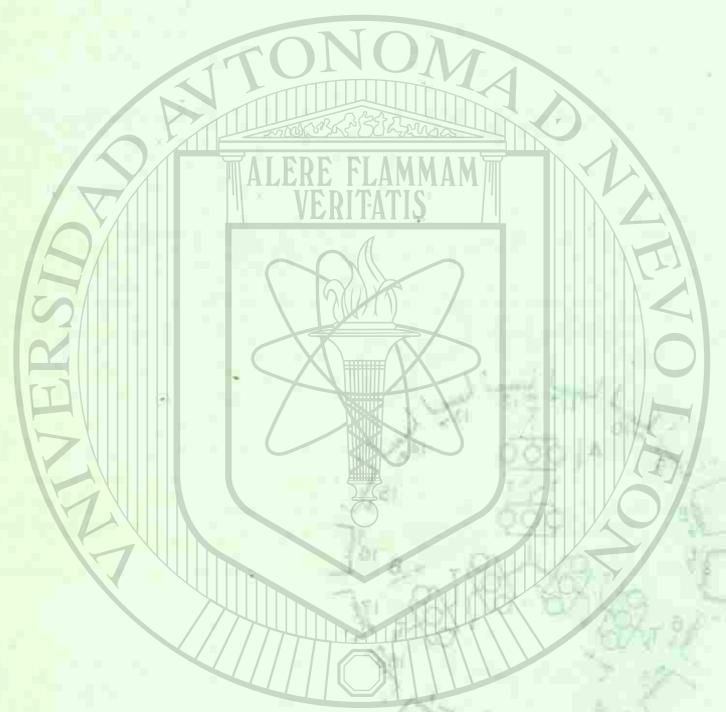


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

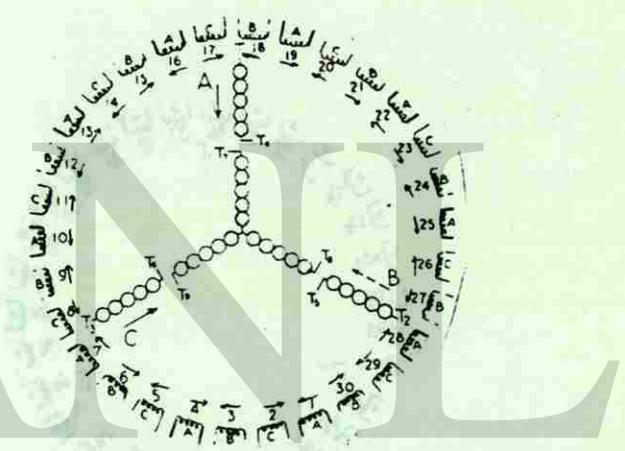
Fig. 5-16(b) Arréglese de manera que salgan al tablero 9 terminales para que pueda ser conectado en 3 o en 6 estrellas en paralelo.

PARA EL ALUMNO
18 GRUPOS, 6 POLOS, 3 FASES



BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

PARA EL ALUMNO
30 GRUPOS, 10 POLOS, 3 FASES



CAPILLA ALFONSINA

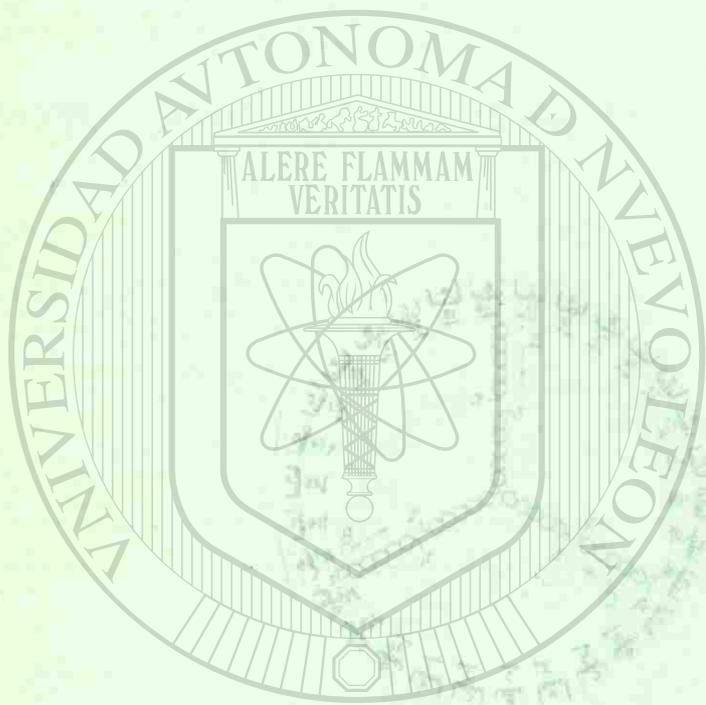
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Fig. 5-17(a) Arréglese para que salgan 9 terminales al tablero para conectarse en una estrella simple o una doble estrella.

30 GRUPOS, 10 POLOS, 3 FASES



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

PARA EL ALUMNO
30 GRUPOS, 10 POLOS, 3 FASES

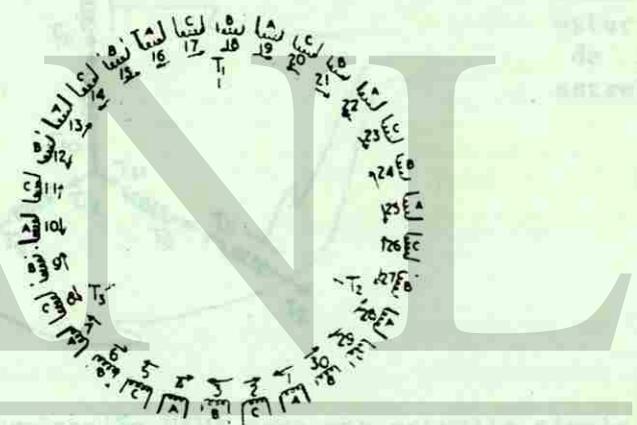
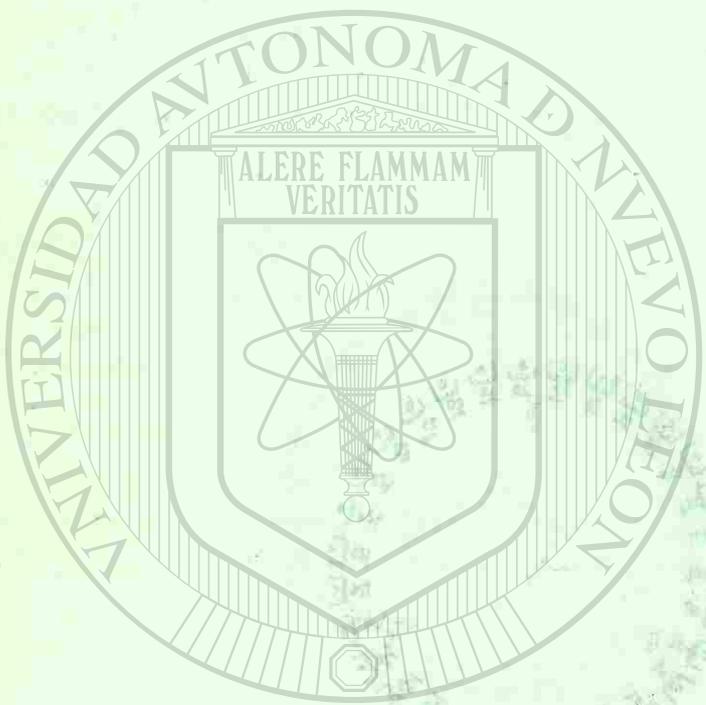


Fig. 5-17(b) Conéctese para que aparezcan 9 terminales en el tablero para 5 o 10 estrellas en paralelo.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

30 GRUPOS, 10 POLOS, 3 FASES
PARA EL ALBANO

5 Identificación de Terminales.- Con frecuencia, nos encontramos -
motores cuyas terminales han perdido la numeración y esto hace -
difícil la conexión de los devanados. Este método se usa cuando
se tiene un motor con 9 terminales tipo americano.

*Devanado en estrella.- La numeración standard establecida por -
NEMA es la que aparece en la fig. 5-18.

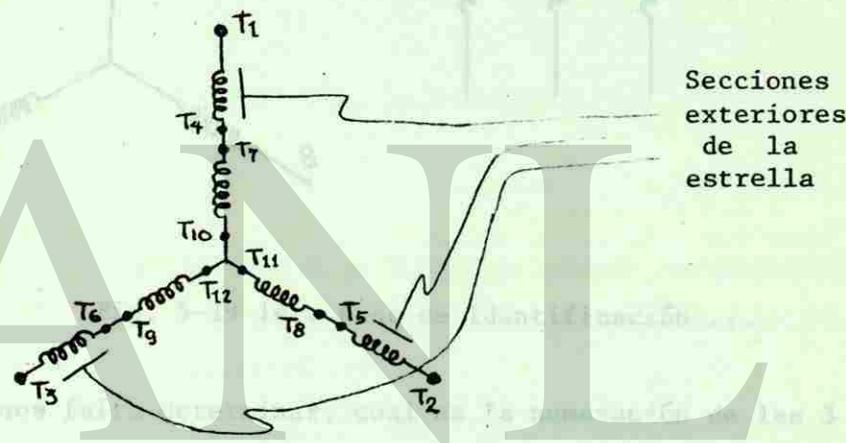
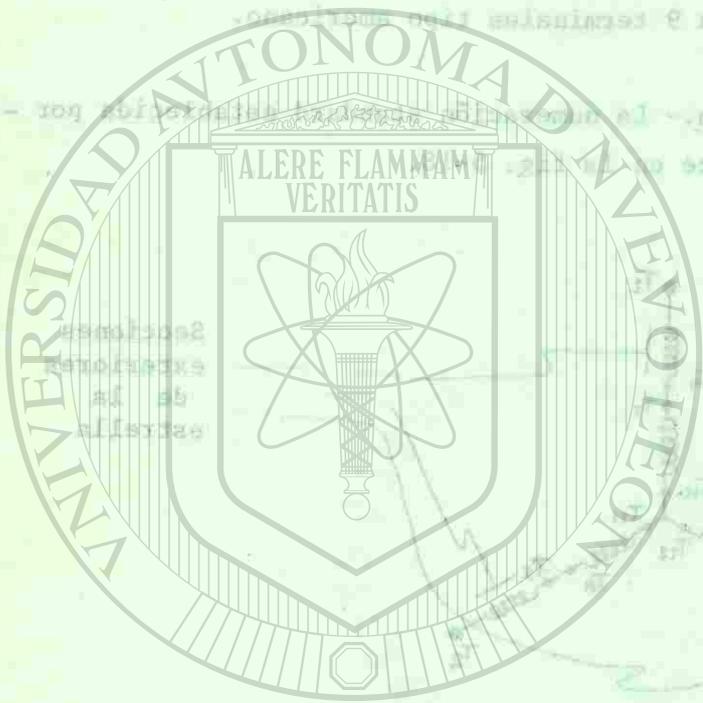


Fig. 5-18 Numeración NEMA para una estrella simple

Al haber 9 terminales en el tablero, se entiende que las termina-
les 10, 11 y 12 ya vienen internamente conectadas y por lo tanto
no aparecen.

El primer paso se lleva a cabo con un ohmetro, midiendo continui-
dad entre una terminal y las restantes. Si solo tiene continui-
dad con otra terminal, quiere decir que ambas pertenecen a una -



BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

de las secciones exteriores de la estrella, ya sea 1-4, 2-5 o 3-6. Pero si acaso se le encuentra continuidad con otras 2 terminales, las 3 formarán parte de la estrella central y las ennumeramos arbitrariamente como 7, 8 y 9 (ver fig. 5-19),

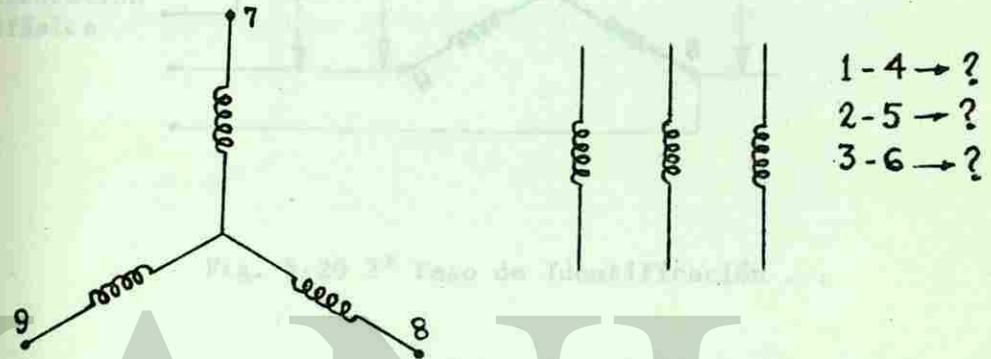
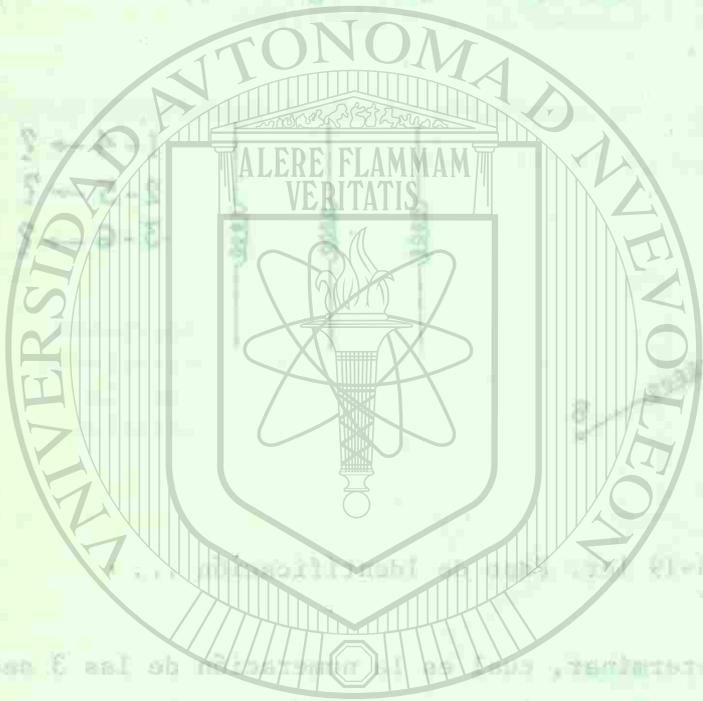


Fig. 5-19 ler. Paso de Identificación ...

Ahora, nos falta determinar, cual es la numeración de las 3 secciones desconocidas. Para aclarar esto, primeramente se pone en serie una de estas 3 secciones con cualquiera de las terminales de la estrella central. En este caso la pusimos en serie con la terminal 7 (ver fig. 5-20).

A continuación, se alimenta en las terminales 7, 8 y 9 un voltaje pequeño, suficiente para hacer girar el rotor (motor de inducción) y se mide el voltaje entre la terminal libre de la sección exterior con respecto a una y a otra terminal de las libres de la estrella interior (en este caso 8 y 9).



de las secciones exteriores de la estrella, ya sea 1-4, 1-2 o 1-6. Pero si se desea se la alimenta con otras 3 terminales, las 3 formarán parte de la estrella central y las otras 3 formarán parte de la estrella exterior (ver fig. 5-19).



Ahora, nos falta determinar, cuál de las 3 secciones desconocidas, para analizar esto, primeramente se pone en

parte una de las 3 secciones con cualquier de las terminales de la estrella central. En este caso, la número es 4 con la

A continuación, se alimenta en las terminales 1, 2 y 3 un voltaje, para que se pueda medir el voltaje entre la terminal libre de la sección exterior con respecto a una y a otra terminal de las líneas de la estrella interior (en este caso 4 y 5).

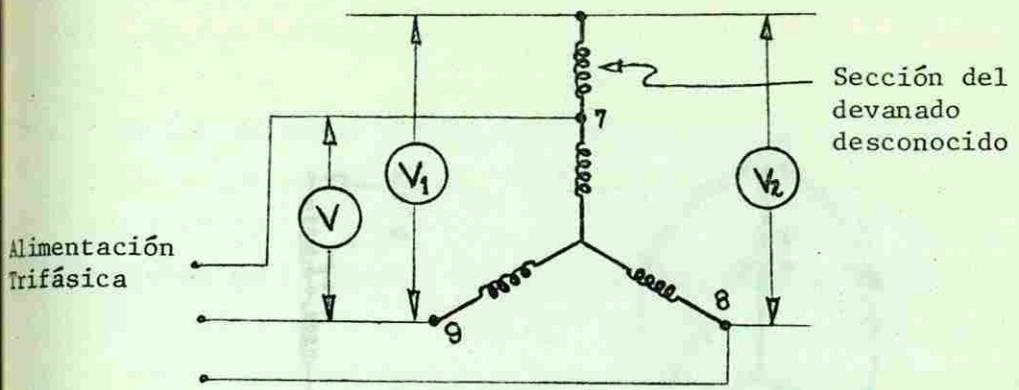
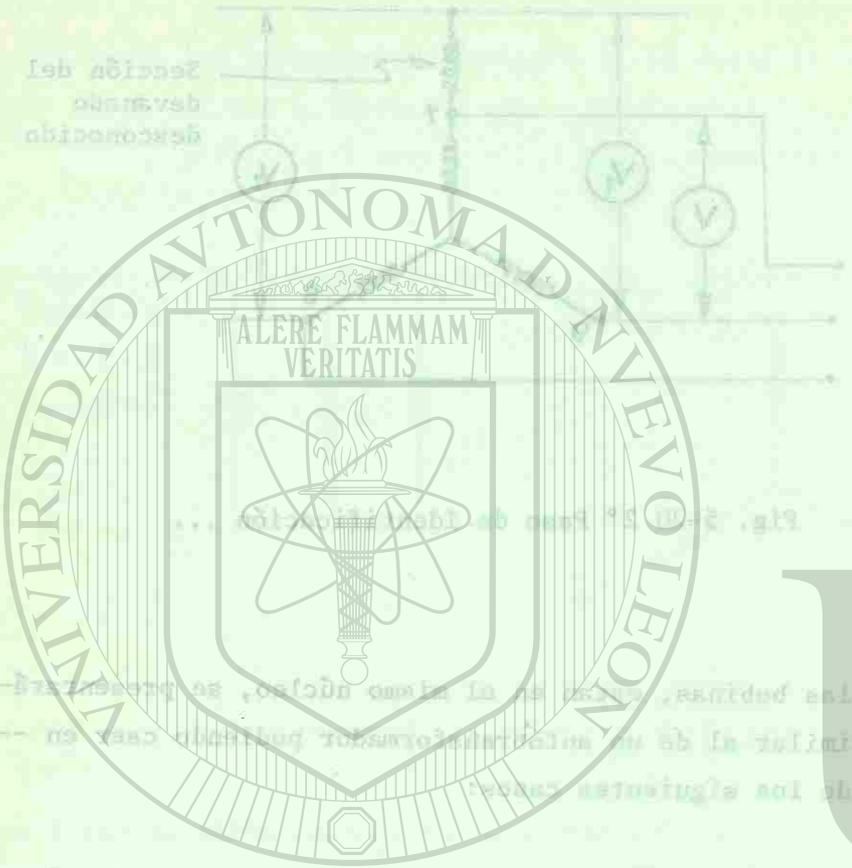


Fig. 5-20 2° Paso de Identificación ...

Como todas las bobinas, están en el mismo núcleo, se presentará un efecto similar al de un autotransformador pudiendo caer en cualquiera de los siguientes casos:

- 1.- Que los voltajes leídos sean iguales y mayores que el voltaje alimentado, lo que nos indica que la sección conectada pertenece a la fase donde la pusimos y además que está correctamente polarizada. Entonces, la numeramos como 1 la terminal libre y 4 la que habíamos unido con 7. (ver fig. 5-21).
- 2.- Que los voltajes leídos sean iguales pero menores que el aplicado. Esto nos indica que la bobina pertenece a esa fase (por los voltajes iguales) pero que está conectada al revés. O sea, que numeramos como 4 la terminal que estaba libre y -



que los voltajes medidos sean diferentes a uno si. Esto significa que el devanado de la bobina 1-4 responde a una fase (ver fig. 5-21). Se ve que los voltajes medidos en la bobina 1-4 y 1-7 son iguales y mayores que el voltaje medido en la bobina 4-7. Esto indica que la bobina 1-4 y 1-7 están conectadas en serie. Esto nos indica que la bobina pertenece a esa fase. Por los voltajes medidos se ve que está conectada al revés. Se ve que el terminal de la bobina que está libre y

como 1 la que habíamos unido con 7 (ver fig. 5-21).

que los voltajes medidos sean diferentes a uno si. Esto significa que el devanado de la bobina 1-4 responde a una fase (ver fig. 5-21). Se ve que los voltajes medidos en la bobina 1-4 y 1-7 son iguales y mayores que el voltaje medido en la bobina 4-7. Esto indica que la bobina 1-4 y 1-7 están conectadas en serie. Esto nos indica que la bobina pertenece a esa fase. Por los voltajes medidos se ve que está conectada al revés. Se ve que el terminal de la bobina que está libre y

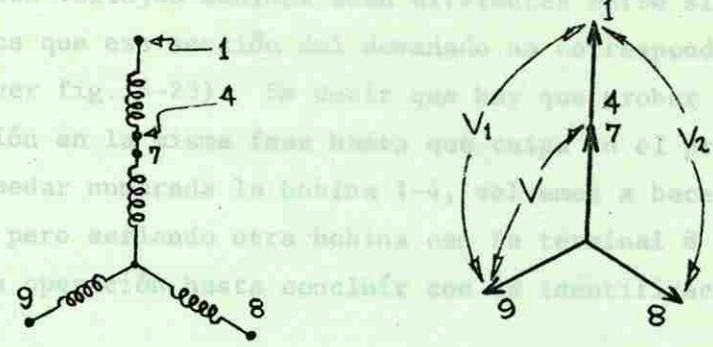


Fig. 5-21 Primera Posibilidad

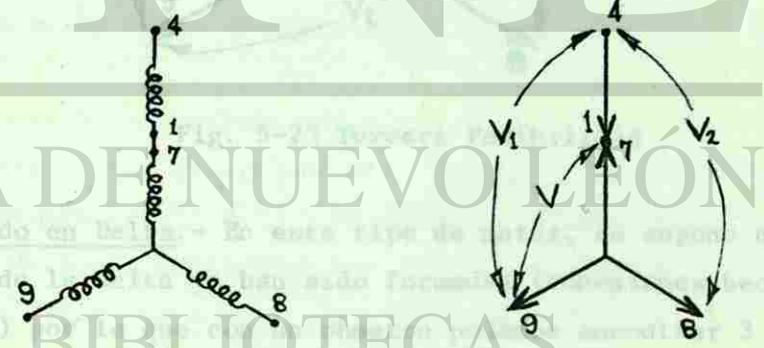
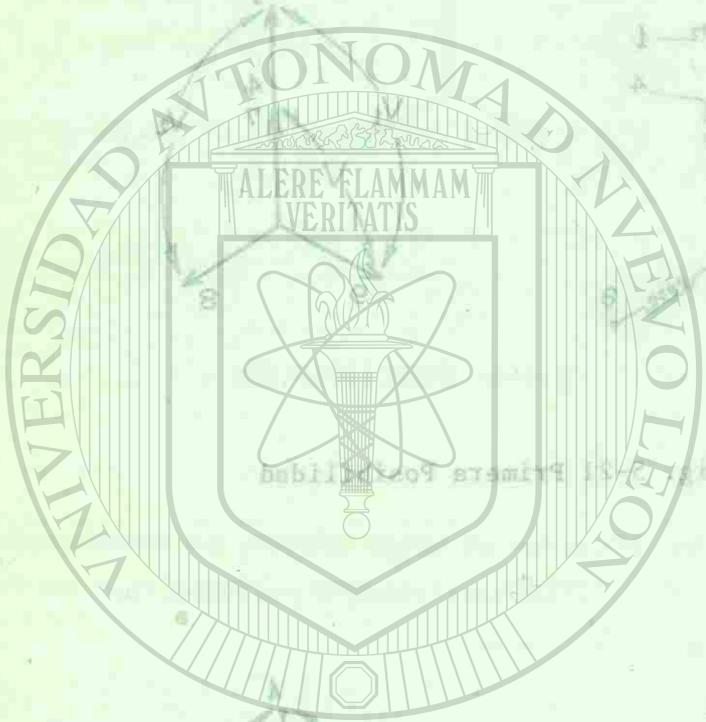


Fig. 5-22 Segunda Posibilidad



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

como 1 la que habíamos unido con 7 (ver fig. 5-22).

3.- Que los voltajes medidos sean diferentes entre sí. Esto significa que esa sección del devanado no corresponde a esa fase (ver fig. 5-23). Es decir que hay que probar con otra -- sección en la misma fase hasta que caiga en el primer caso. Al quedar numerada la bobina 1-4, volvemos a hacer la operación pero seriando otra bobina con la terminal 8 y repitiendo la operación hasta concluir con la identificación.

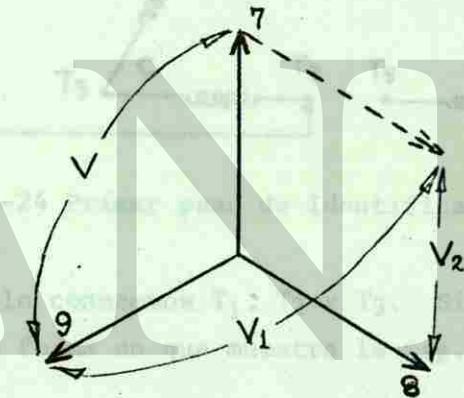
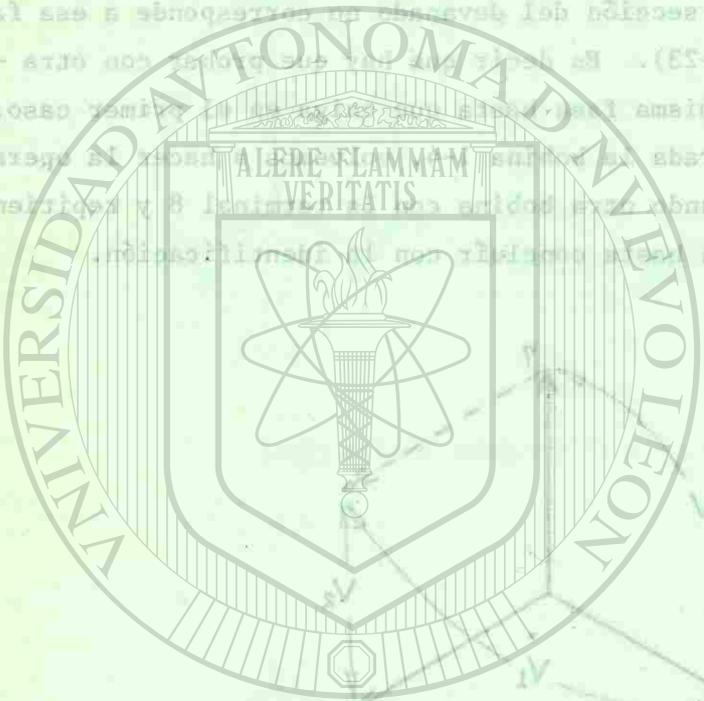


Fig. 5-23 Tercera Posibilidad

*Devanado en Delta.- En este tipo de motor, se supone que las esquinas de la delta ya han sido formadas (conexiones hechas internamente) por lo que con un ohmetro podemos encontrar 3 grupos de terminales con continuidad es decir, T_1 con T_4 y T_9 , T_2 con T_5 y T_7 finalmente T_3 con T_6 y T_8 . Además, se pueden localizar los vértices (T_1 , T_2 y T_3) midiendo la resistencia (la resistencia -



BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

de T_4 a T_9 es el doble de la de T_1 a T_4 y de T_1 a T_9). Para comprender mejor esto, ver fig. 5-24.

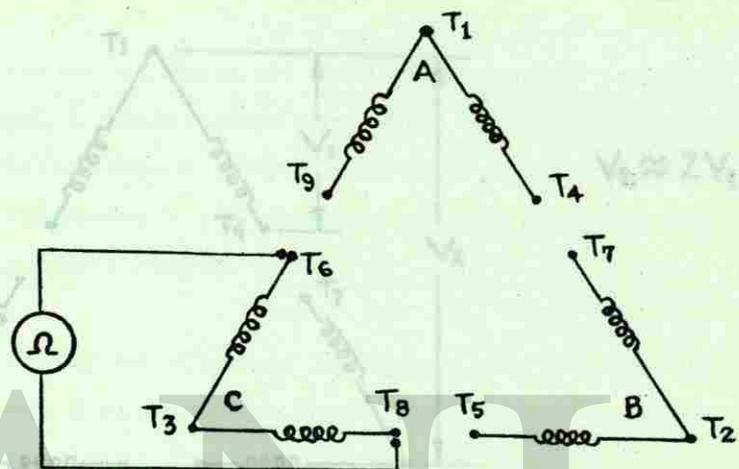
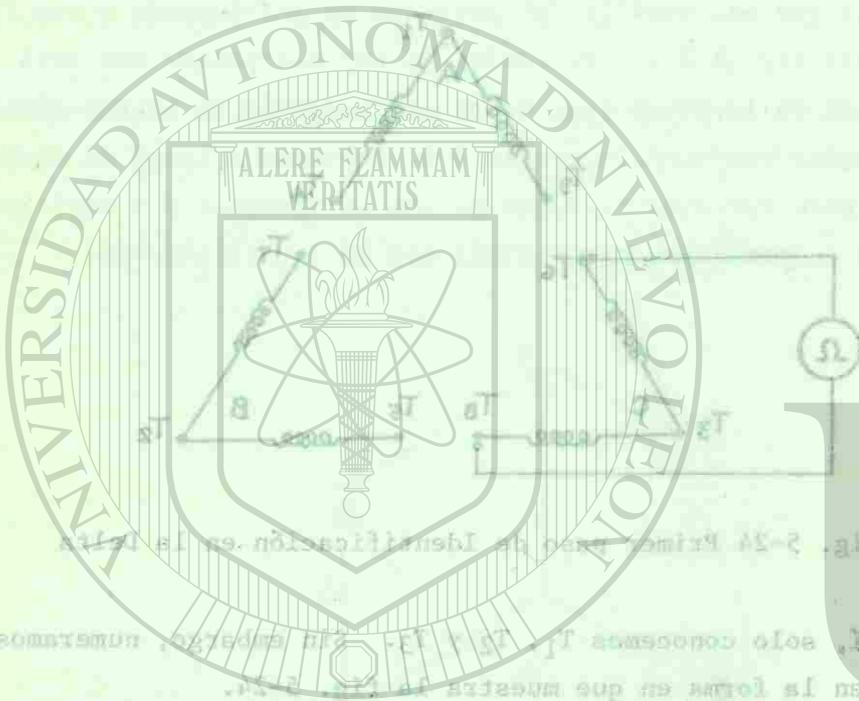


Fig. 5-24 Primer paso de Identificación en la Delta

Hasta aquí, solo conocemos T_1 , T_2 y T_3 . Sin embargo, numeramos el resto en la forma en que muestra la fig. 5-24.

A continuación alimentamos el circuito A con un voltaje trifásico pequeño (a que gire el motor) después de haber unido las presentes terminales T_4 y T_7 . En seguida, medimos voltaje entre T_1 y T_2 de donde concluimos que si el voltaje entre T_1 y T_2 es el doble del voltaje entre T_1 y T_4 , las terminales 4 y 7 estarán correctamente puestas. Si el voltaje es menor al doble habrá que intercambiar numeración entre T_7 y T_5 y repetir la prueba. Si nuevamente no resulta, habrá que intercambiar numeración entre T_4 y T_9 y repetimos la prueba. Si finalmente no resulta solo --

de T_4 a T_5 es el doble de la de T_1 a T_2 y de T_1 a T_3 . Para com-
prender mejor esto, ver fig. 5-24.



nos queda poner la numeración T_7 y T_5 a las terminales que origi-
nalmente las tenían y la prueba tendrá que resultar. (ver fig. -
5-25).

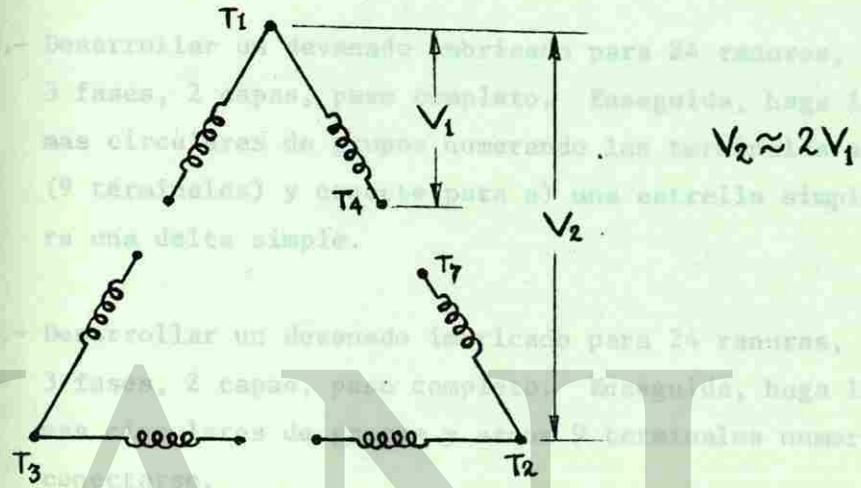
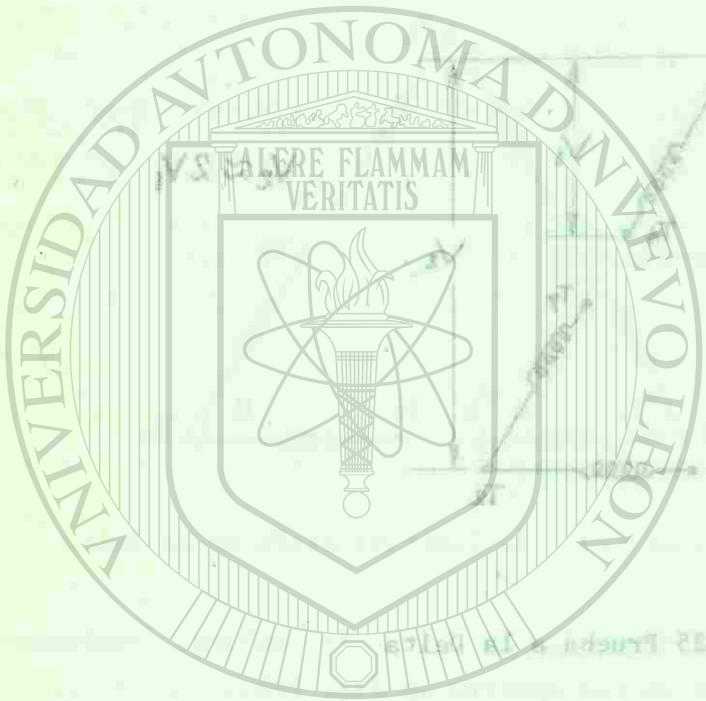


Fig. 5-25 Prueba a la Delta

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

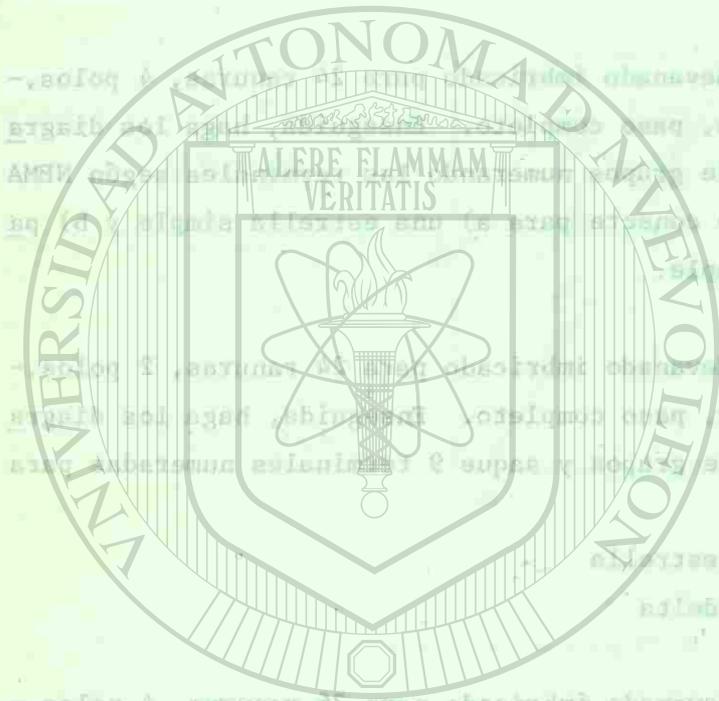
... queda poner la numeración T₁ y T₂ a las terminales que origina
... las terminales y la prueba podrá que realizar. (ver fig. 4)



PROBLEMAS

- 1.- Desarrollar un devanado imbricado para 24 ranuras, 4 polos, - 3 fases, 2 capas, paso completo. Enseguida, haga los diagramas circulares de grupos numerando las terminales según NEMA (9 terminales) y conecte para a) una estrella simple y b) para una delta simple.
- 2.- Desarrollar un devanado imbricado para 24 ranuras, 2 polos, - 3 fases, 2 capas, paso completo. Enseguida, haga los diagramas circulares de grupos y saque 9 terminales numeradas para conectarse.
 - a) En una doble estrella
 - b) En una doble delta
- 3.- Desarrollar un devanado imbricado para 36 ranuras, 4 polos, - 3 fases, 2 capas, paso completo. Enseguida, haga los diagramas circulares de grupos, saque 9 terminales y conecte para:
 - a) Una estrella simple
 - b) Una doble estrella
 - c) Una delta simple
 - d) Una doble delta
- 4.- Haga los diagramas circulares para un devanado que tiene 48-bobinas, 4 polos, 3 fases y conectarlo para:
 - a) Una estrella simple

PROBLEMAS



BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

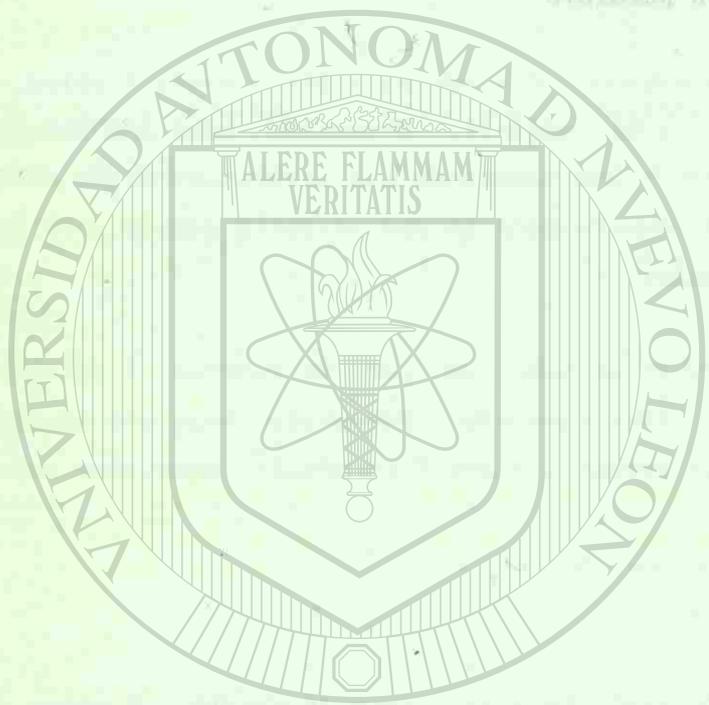
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPÍTULO VI

- b) 4 estrellas en paralelo
- c) Una delta simple
- d) 4 deltas en paralelo

EL MOTOR SINCRÓNICO, MÉTODOS DE ARRANQUE

CAPILLA ALFONSO X



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

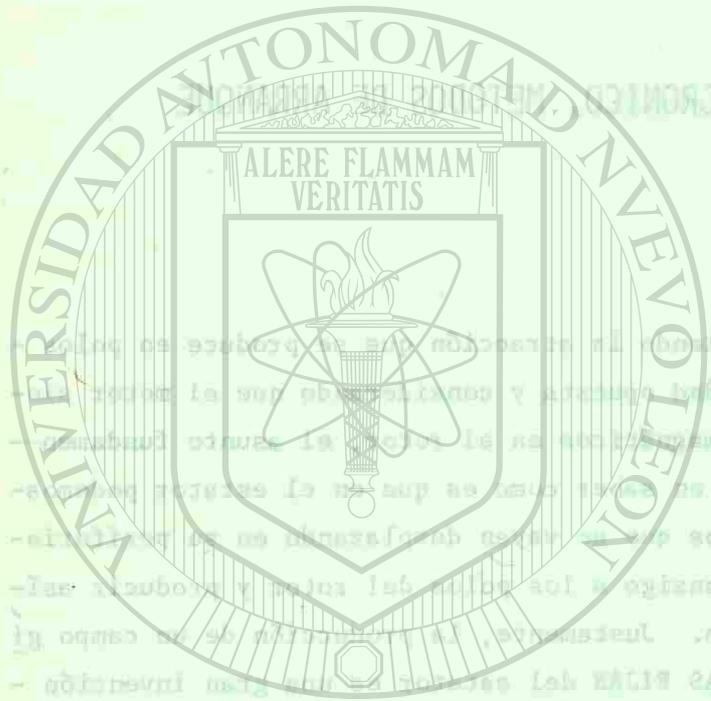
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO VI

EL MOTOR SINCRONICO, METODOS DE ARRANQUE

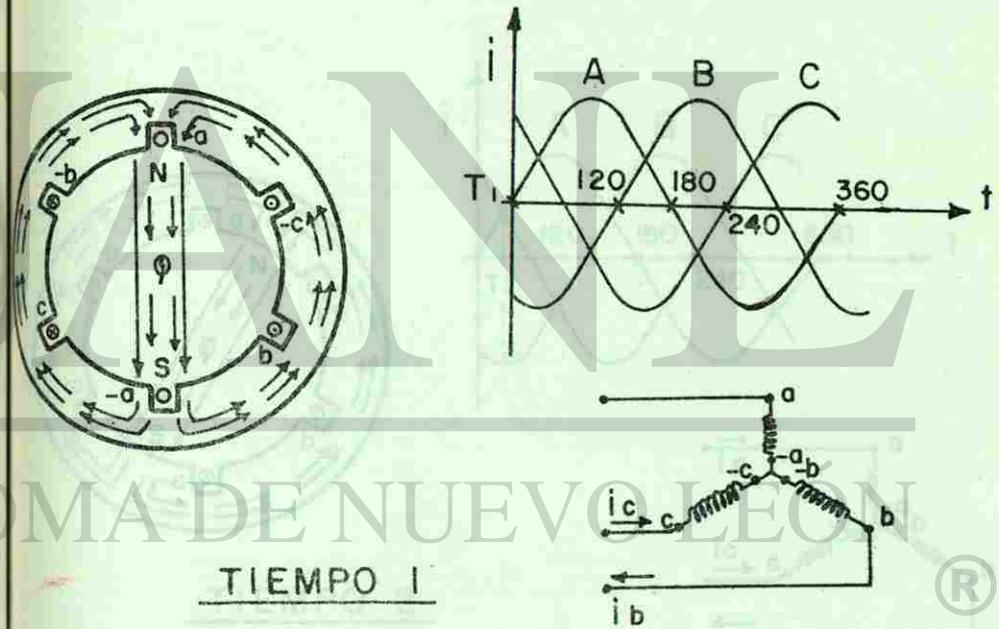
Introducción.- Conociendo la atracción que se produce en polos magnéticos de polaridad opuesta y considerando que el motor sincrónico posee polos magnéticos en el rotor, el asunto fundamental estriba entonces en saber como es que en el estator podemos crear polos magnéticos que se vayan desplazando en su periferia para que arrastren consigo a los polos del rotor y producir así el movimiento deseado. Justamente, la producción de un campo giratorio en las BOBINAS FIJAS del estator es una gran invención que conviene estudiar con detalle.

El Campo Giratorio.- Para producir un campo magnético en el estator que se pueda desplazar regularmente, necesitamos contar con una alimentación de voltaje al menos trifásica ya que con un voltaje monofásico está visto que solo se produciría un campo magnético pulsante mas no giratorio (en el mejor de los casos, en un motor monofásico de fase partida lograremos un desplazamiento -- del campo magnético pero en forma muy irregular y sacrificando -- eficiencia). Entonces, contamos con que tenemos una alimenta---



BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

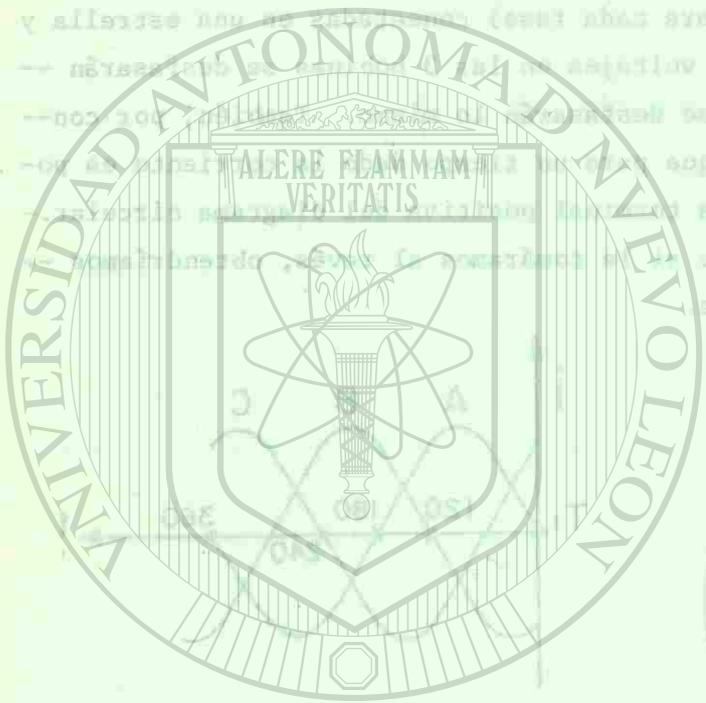
ción trifásica de voltaje y que podemos aplicarla a bobinas distribuidas estratégicamente en el estator para producir y desplazar dicho campo. Por sencillez, vamos a analizar un estator con solo 3 bobinas (una para cada fase) conectadas en una estrella y asumimos que como los voltajes en las 3 bobinas se desfazarán 120° , las corrientes se desfazarán lo mismo. También, por convención consideramos que para un tiempo dado la corriente es positiva, entrará por la terminal positiva del diagrama circular. Se entiende claro, que si la tomáramos al revés, obtendríamos idénticas conclusiones.



TIEMPO I

Fig. 6-1

Vamos pues a empezar analizando el instante de tiempo I (ver -- fig. 6-1), donde podemos observar que la corriente en la fase A



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

vale cero (por lo tanto en el diagrama circular, en la bobina -- a-a no hay corriente), en la fase B es negativa (entrará la corriente entonces por -B en el diagrama circular) y la C es positiva (entrará por C). Podemos ver en el diagrama circular, que al entrar la corriente por -b y por c y salir por -c y por b, -- (con la ley de la mano derecha) se producirá un flujo hacia abajo como marca el diagrama circular, provocando en el estator polos magnéticos (norte arriba y sur abajo).

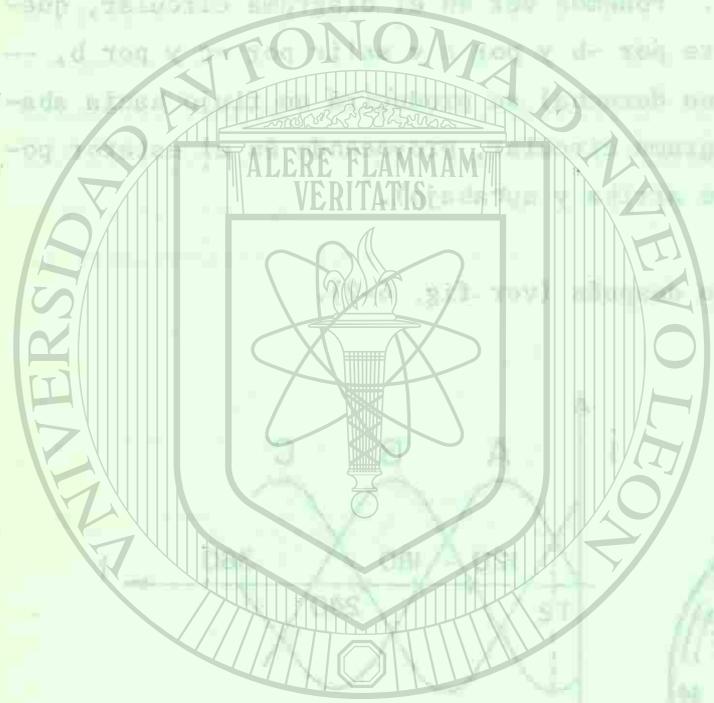
Un instante de tiempo después (ver fig. 6-2).



Fig. 6-2

Observaremos que las corrientes en las fases A y C son positivas

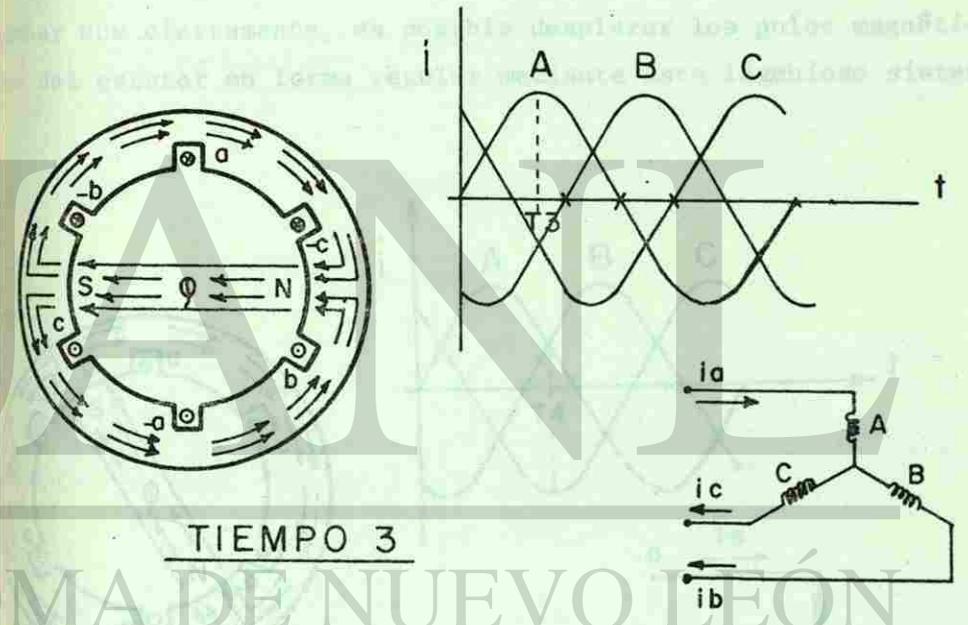
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

por lo que entrarán por las terminales a y c y en la fase B negativa por lo que tendrá que salir por b. Asignados estos sentidos de corrientes podremos observar en el diagrama circular, que el flujo magnético producido por estas corrientes ya ha sufrido un pequeño desplazamiento.

Analizemos ahora un instante de tiempo después, al que llamaremos Tiempo 3 (ver fig. 6-3).

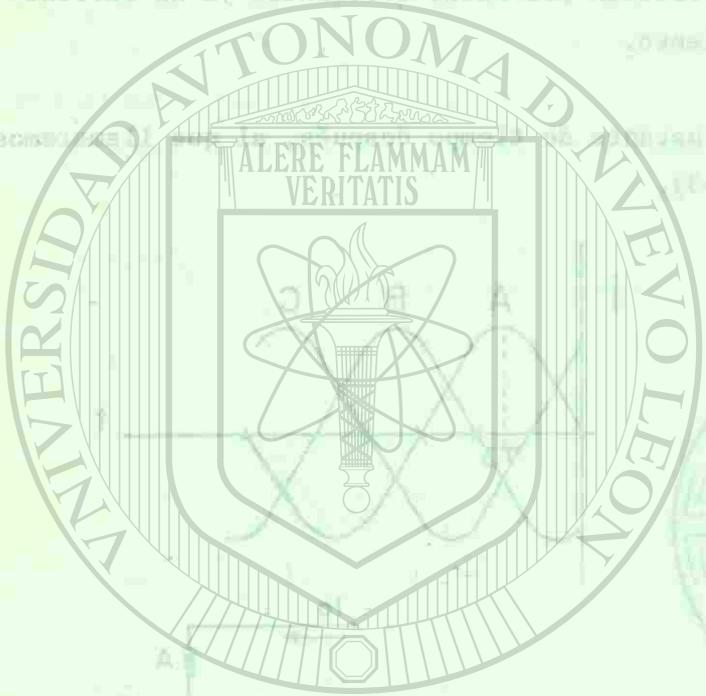


TIEMPO 3

Fig. 6-3

Aquí, se observa que mientras que la corriente en la fase A sigue siendo positiva, en las fases B y C será negativa. Así que la corriente en el diagrama circular entrará por las terminales a, -c y -b produciendo un flujo horizontal hacia el lado izquier

que en que entran por las bobinas A y B en la fase B para
 en la que están que está que está que está que está que está
 que está que está que está que está que está que está que está
 que está que está que está que está que está que está que está
 que está que está que está que está que está que está que está



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECA

que está
 que está que está que está que está que está que está que está
 que está que está que está que está que está que está que está
 que está que está que está que está que está que está que está

o sea que los polos del estator han sufrido un nuevo despla-
 zamiento.

Si nuevamente, analizamos para otro instante de tiempo T_4 obser-
 varemos que los polos magnéticos del estator se han corrido otra
 vez a una nueva posición (ver fig. 6-4).

Finalmente, si revisamos de las figuras 6-5 a 6-9 podremos com-
 probar que ciertamente, es posible desplazar los polos magnéti-
 cos del estator en forma regular mediante este ingenioso sistema.

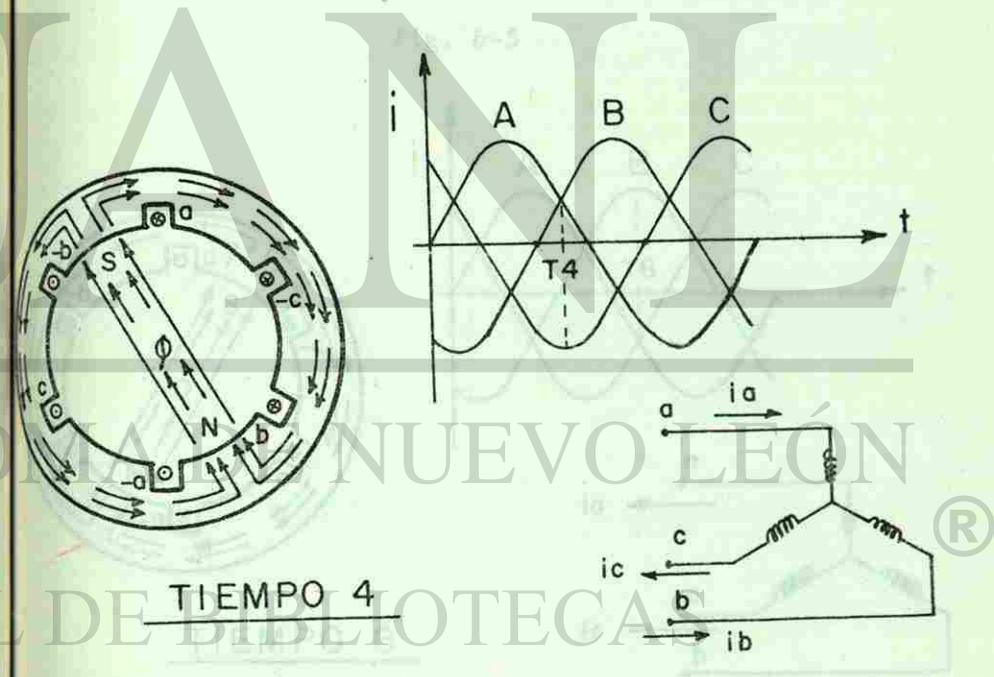
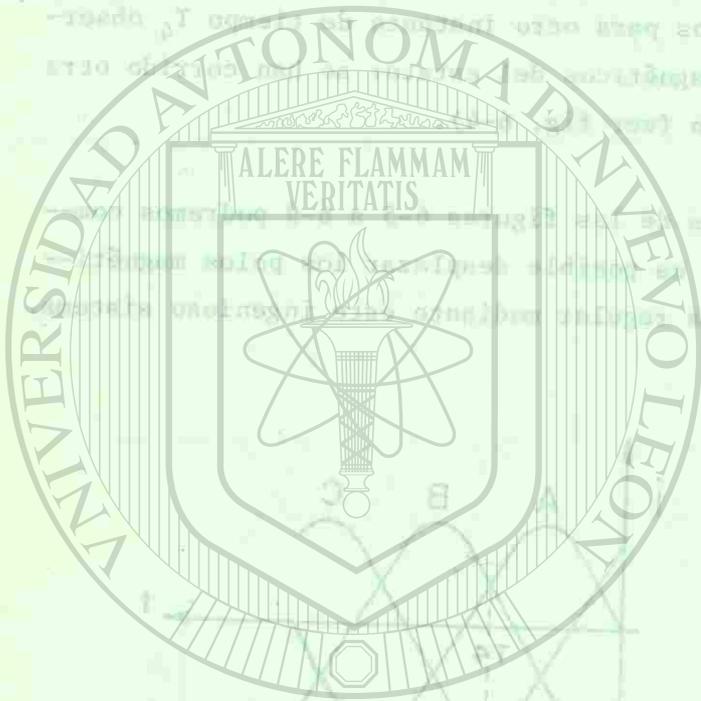


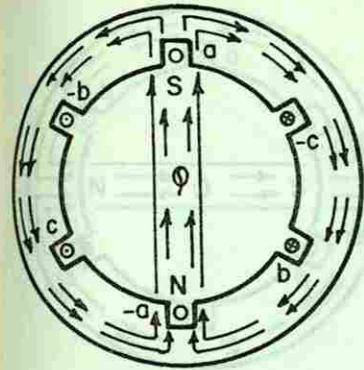
Fig. 6-4



BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECA



TIEMPO 5

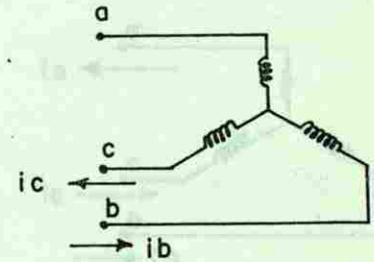
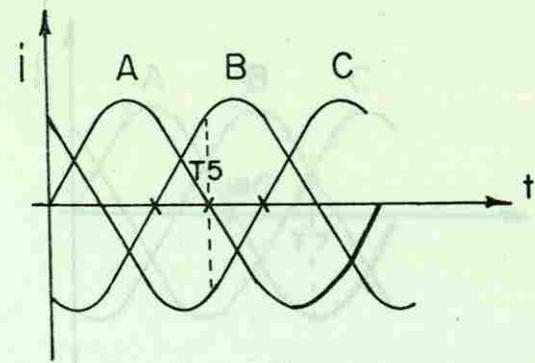
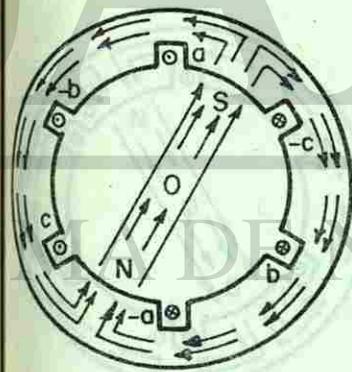


Fig. 6-5



TIEMPO 6

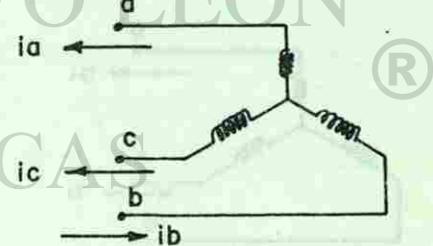
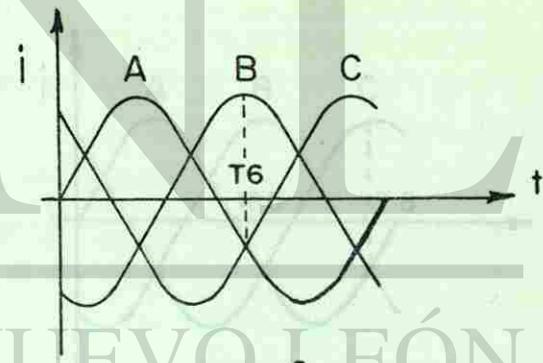
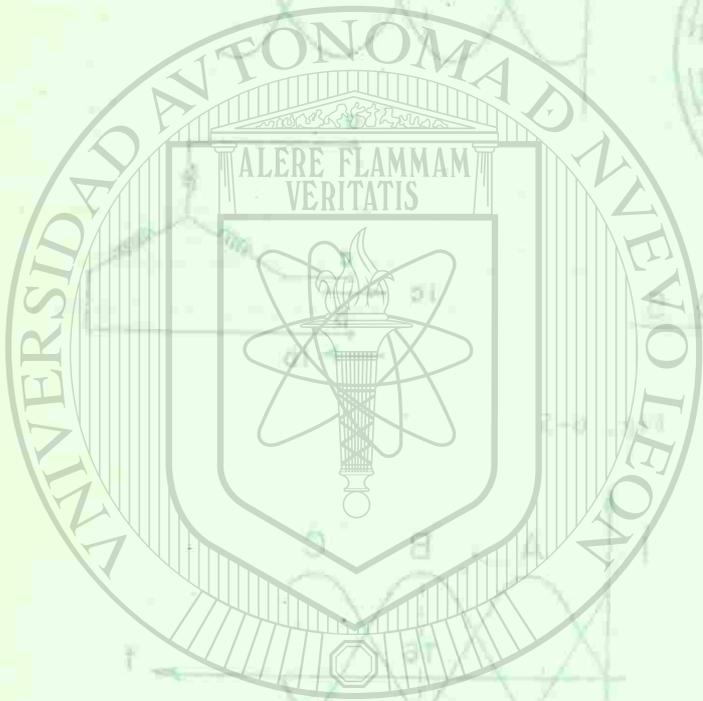
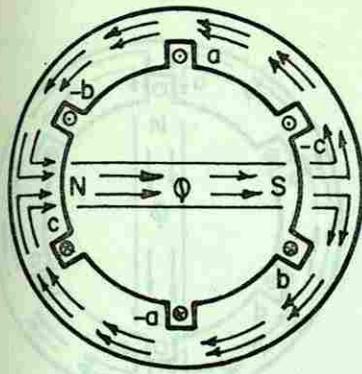


Fig. 6-6



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



TIEMPO 7

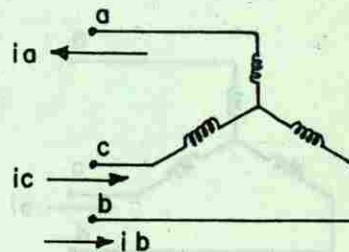
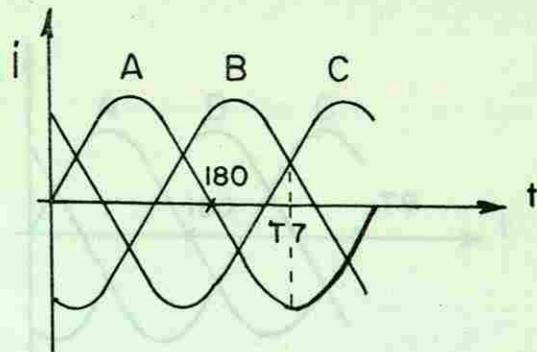
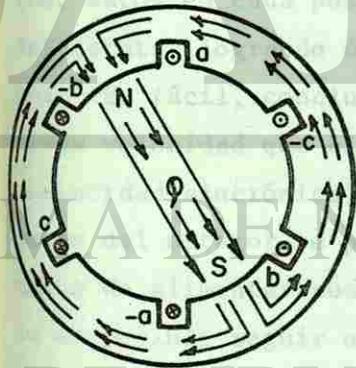


Fig. 6-7



TIEMPO 8

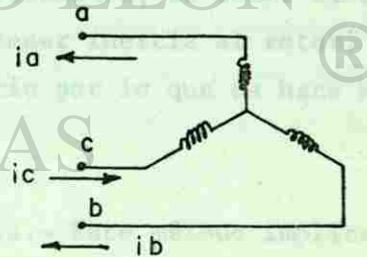
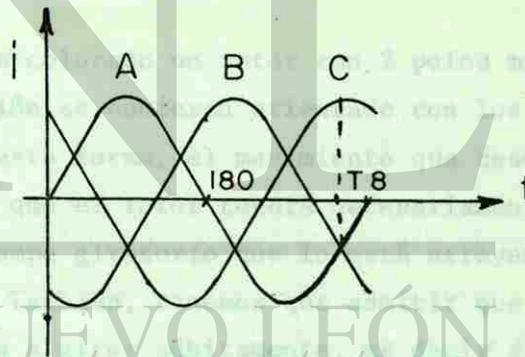
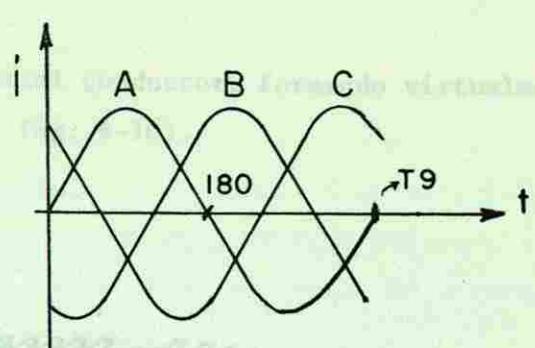
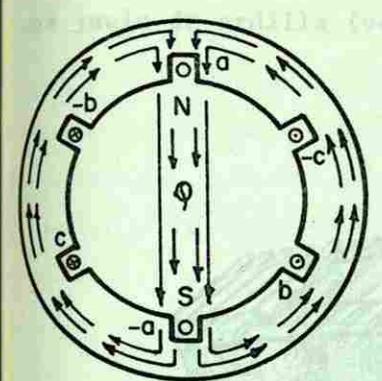


Fig. 6-8



TIEMPO 9

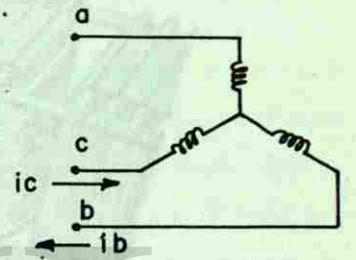
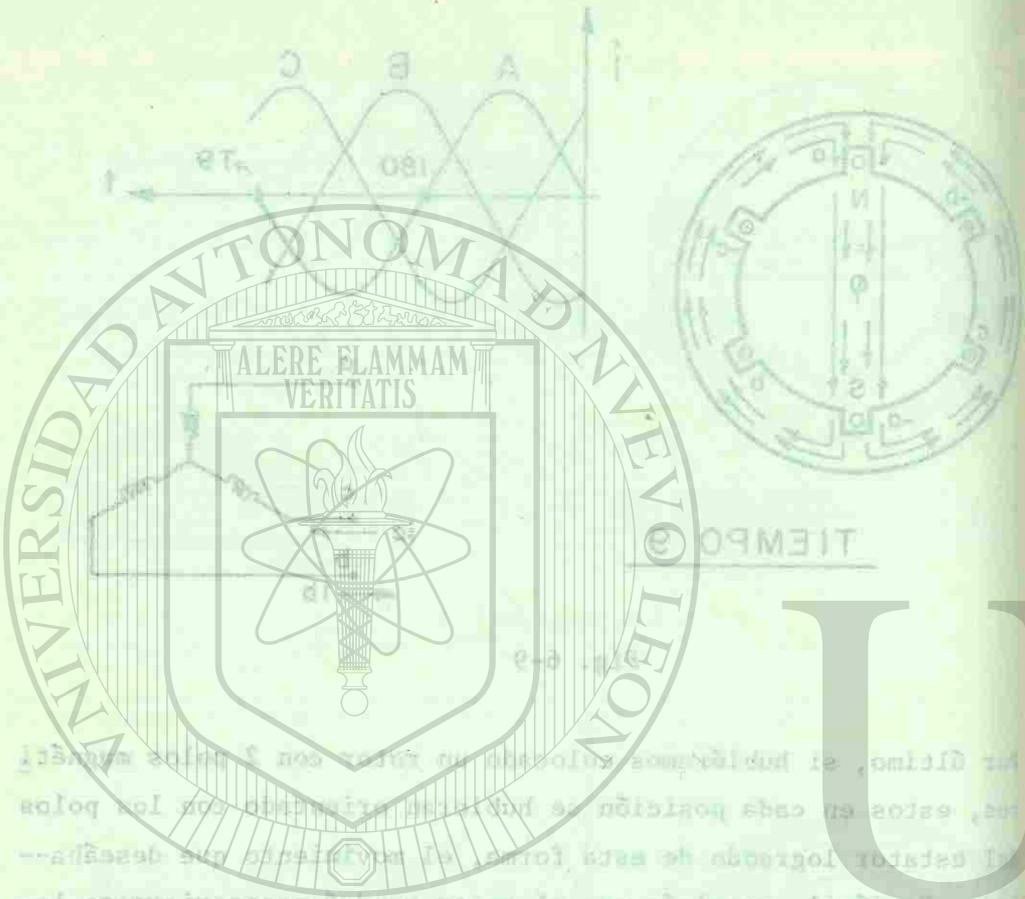


Fig. 6-9

Por último, si hubiéramos colocado un rotor con 2 polos magnéticos, estos en cada posición se hubieran orientado con los polos del estator logrando de esta forma, el movimiento que deseábamos. Es fácil, concluir que el rotor tendrá necesariamente la misma velocidad que el campo giratorio que lo está atrayendo -- (velocidad sincrónica). También, tenemos que admitir que el campo del estator se pone a girar súbitamente, es decir al momento de alimentar sus bobinas. Al tener inercia el rotor, no le es posible seguir al campo giratorio por lo que se hace necesario algún medio de arranque extra.

2 Métodos de Arranque.- Jaula de Ardilla.- Este método implica -- que en el rotor aparte de los polos o sobre de ellos se inser--



ten unas barritas de material conductor, formando virtualmente una jaula de ardilla (ver fig. 6-10).

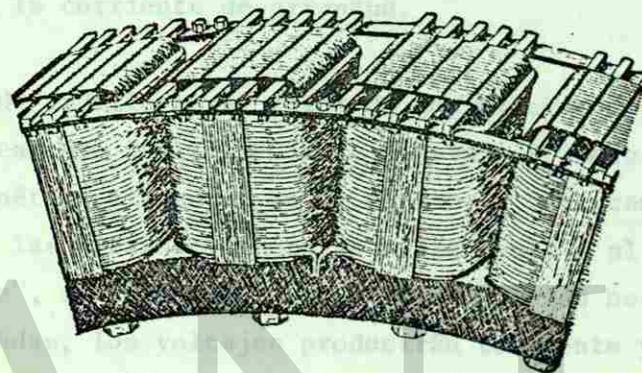


Fig. 6-10 Rotor de Polos salientes con Jaula de Ardilla

El arrollamiento jaula de ardilla es conocido por arrollamiento-amortiguador. Las barras amortiguadoras están colocadas en ranuras taladradas en las zapatas polares (ver figura 6-10); están colocados en ambos lados de las zapatas polares por segmentos que se unen juntos para hacer una conexión en anillo en cada lado de los polos. La jaula no está completa, ya que no hay barras en los espacios interpolares.

Justamente como en el motor de inducción jaula de ardilla, el mo

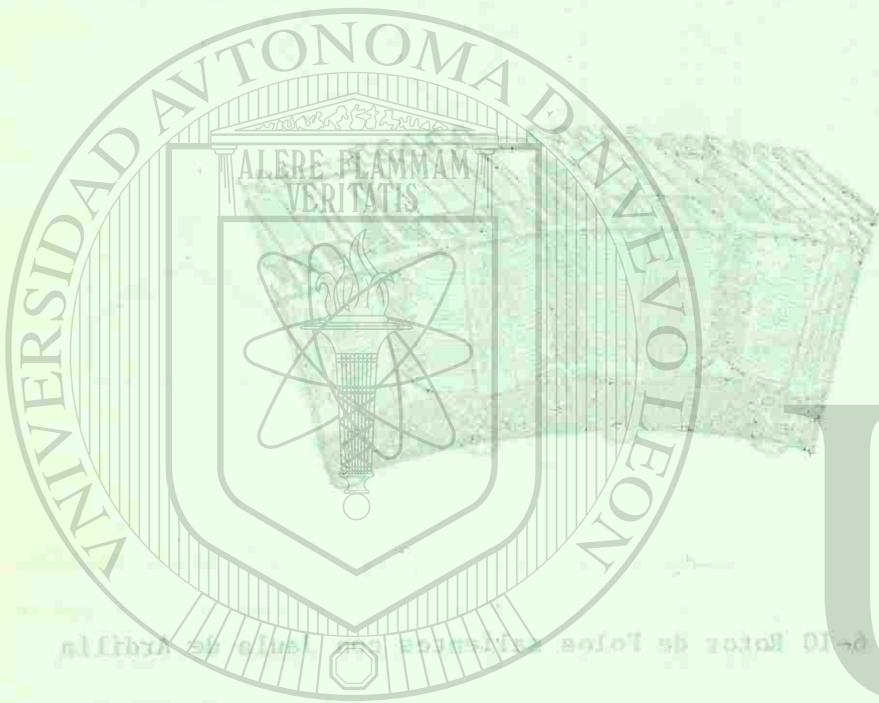


Fig. 6-10 Rotor de los motores de inducción con jaula de ardilla.

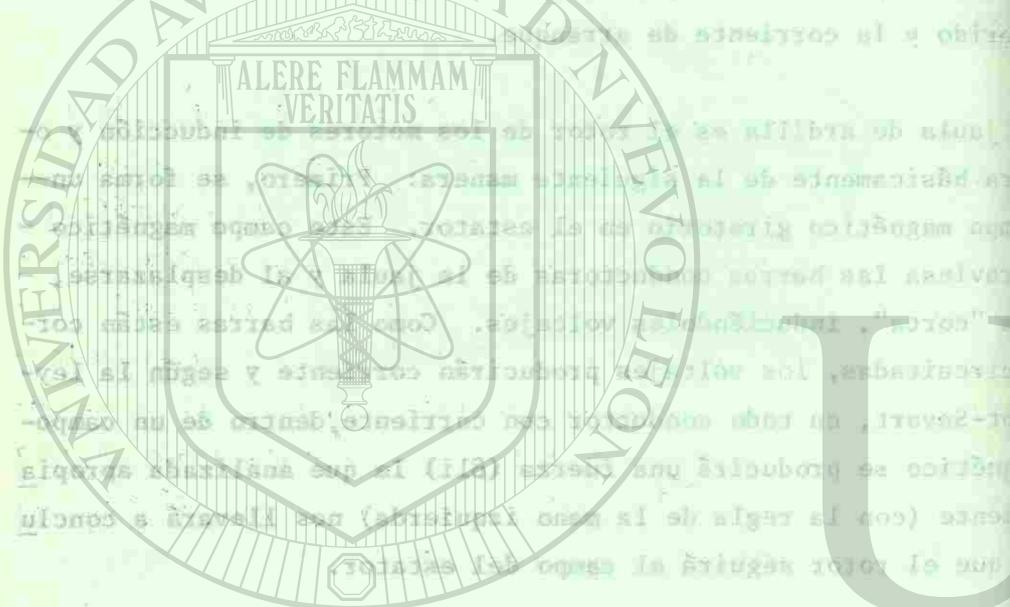
tor síncrono toma una corriente de arranque relativamente grande de las líneas. No obstante, ya que se va a usar el arrollamiento amortiguador únicamente para el arranque, y no para la marcha como en el motor de inducción, pueden ajustarse libremente su resistencia y reactancia para adaptar el par motor de arranque requerido y la corriente de arranque.

La jaula de ardilla es el rotor de los motores de inducción y opera básicamente de la siguiente manera: Primero, se forma un campo magnético giratorio en el estator. Este campo magnético atraviesa las barras conductoras de la jaula y al desplazarse, las "corta", induciéndoles voltajes. Como las barras están cortocircuitadas, los voltajes producirán corriente y según la ley Biot-Savart, en todo conductor con corriente, dentro de un campo magnético se producirá una fuerza (βli) la que analizada apropiadamente (con la regla de la mano izquierda) nos llevará a concluir que el rotor seguirá al campo del estator.

Según se puede concluir, en el motor de inducción, el rotor no podrá nunca alcanzar al campo magnético, ya que haría que no hubiera "corte" de flujo y por tanto, dejaría de haber fuerza inducida. Sin embargo, el motor síncrono sólo necesita que el rotor se aproxime lo más posible a la velocidad síncrona, cosa que si es posible con la jaula de ardilla.

El flujo giratorio no puede inducir una fem en el arrollamiento del campo a la velocidad síncrona, porque a esta velocidad el --

flujo está estacionario con respecto a los polos. No obstante, esto es completamente diferente durante el período de arranque cuando la velocidad de la estructura del campo es menor que la del flujo giratorio; en este caso se induce una fem elevada en el arrollamiento del campo que tiene un número de espiras mayor, y esta fem inducida puede conducir a una falla del aislamiento, si se deja abierto el arrollamiento del campo durante el arranque. Para proteger el arrollamiento del campo se cierra este a través de una resistencia durante el período de arranque. Esta resistencia se quita del circuito del campo, y se aplica la excitación de C-D cuando el rotor alcanza su velocidad máxima de motor de inducción; el motor entonces entra en sincronismo y gira como un motor síncrono. A la velocidad síncrona el arrollamiento amortiguador es inefectivo.



La resistencia insertada en el circuito del campo durante el arranque es alrededor de 5 a 15 veces la resistencia del arrollamiento del campo. Además, protegiendo este arrollamiento mejora también el funcionamiento al arranque del motor a deslizamientos bajos. En la figura 6-11 se muestran características típicas -- par motor-velocidad de motores síncronos durante el arranque. En algunas máquinas, el mismo embobinado de excitación puede servir de jaula de ardilla, es decir, se puentea con una resistencia al arrancar y cerca de la velocidad síncrona se le alimenta el voltaje de C.D. de excitación para que llegue a su velocidad síncrona.

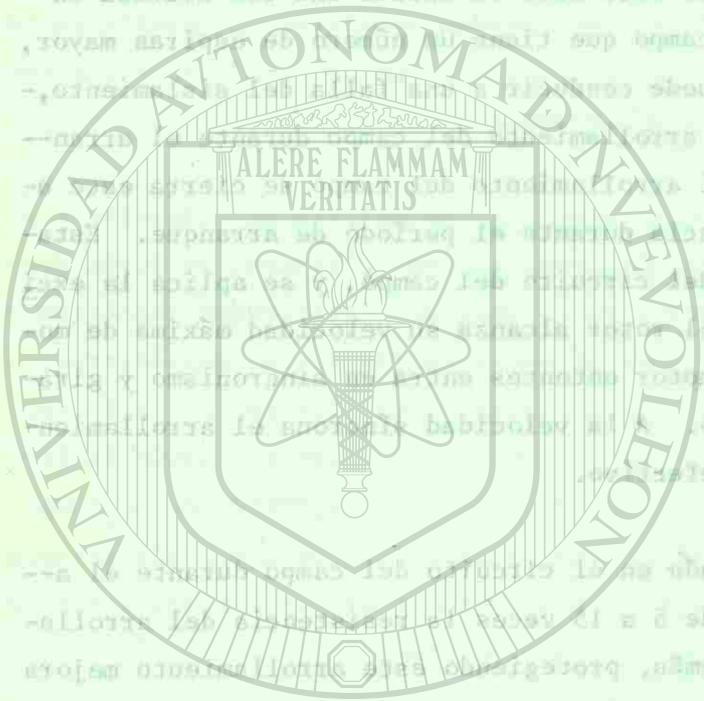
flujo está estacionario con respecto a los polos. No obstante, esto es completamente diferente durante el período de arranque cuando la velocidad de la estructura del campo es menor que la del flujo giratorio; en este caso se induce una fem elevada en el arrollamiento del campo que tiene un número de espiras mayor, y esta fem inducida puede conducir a una falla del aislamiento, si se deja abierto el arrollamiento del campo durante el arranque. Para proteger el arrollamiento del campo se cierra este a través de una resistencia durante el período de arranque. Esta resistencia se quita del circuito del campo, y se aplica la excitación de C-D cuando el rotor alcanza su velocidad máxima de motor de inducción; el motor entonces entra en sincronismo y gira como un motor síncrono. A la velocidad síncrona el arrollamiento amortiguador es inefectivo.

La resistencia insertada en el circuito del campo durante el arranque es alrededor de 5 a 15 veces la resistencia del arrollamiento del campo. Además, protegiendo este arrollamiento mejora también el funcionamiento al arranque del motor a deslizamientos bajos. En la figura 6-11 se muestran características típicas -- par motor-velocidad de motores síncronos durante el arranque.

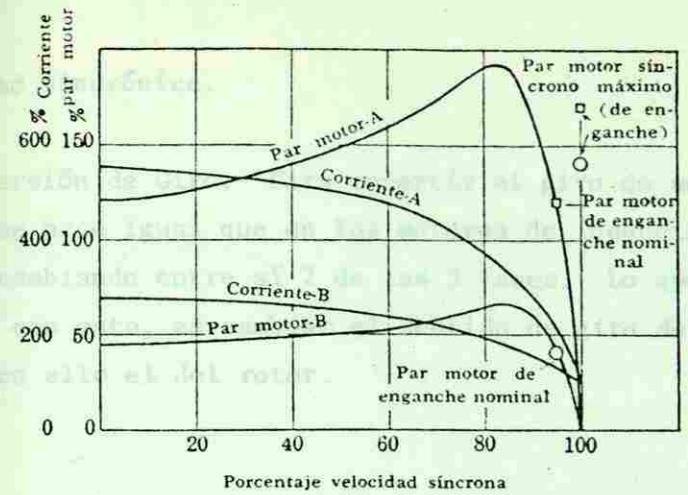
En algunas máquinas, el mismo embobinado de excitación puede servir de jaula de ardilla, es decir, se puentea con una resistencia al arrancar y cerca de la velocidad síncrona se le alimenta el voltaje de C.D. de excitación para que llegue a su velocidad síncrona.

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

CAPILLA ALFONSO X



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

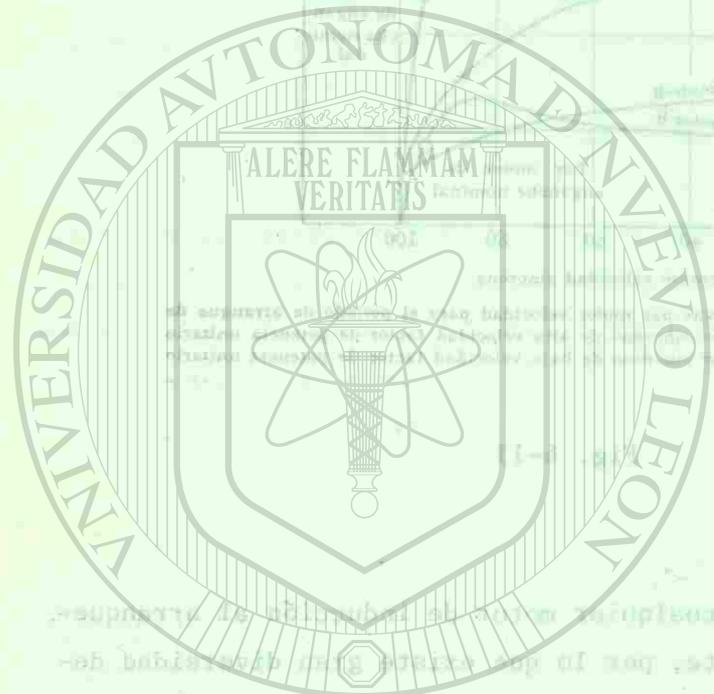


Curvas par motor velocidad para el periodo de arranque de
A-Motor síncrono de alta velocidad factor de potencia unitario
B-Motor síncrono de baja velocidad factor de potencia unitario

Fig. 6-11

Es justo recordar que cualquier motor de inducción al arranque toma muchísima corriente, por lo que existe gran diversidad de formas para arrancarlos a voltajes reducidos, desde resistencias, inductancias, hasta arrancadores electrónicos de estado sólido. Como el motor síncronico lo arrancamos en muchas ocasiones como de inducción, toda esta gama de arrancadores a voltaje reducido es útil para él.

Mediante Primomotor.- Esta forma de arrancar un motor síncronico requiere que en la misma flecha esté acoplado un motor de cualquier tipo. Sin embargo, muchas de las veces, este motor es un motor de inducción que lo llevará hasta cerca de su velo-



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

idad sincrónica.

3 Inversión de Giro.- Para invertir el giro de un motor sincrónico se hace igual que en los motores de inducción, es decir, intercambiando entre sí 2 de las 3 fases. Lo que realmente hacemos con esto, es cambiar el sentido de giro del campo giratorio y con ello el del rotor.

Diagrama vectorial del Generador y del Motor con Reactancia Síncrona.- Se considerará primero la máquina no saturada y posteriormente la máquina saturada.

1) Máquina no saturada.- Vamos a considerar los siguientes factores: el flujo de excitación F , el flujo de inducción F_i y el flujo de inducción $F_{i'}$ que se induce en el rotor por el flujo de excitación F .

FASE	FLUJOS	VOLTAJES INDUCIDOS
Campo (MF)	F	E
Inducción de rotor	F_i	E_i
Inducción de campo	$F_{i'}$	$E_{i'}$

DIAGRAMAS VECTORIALES DEL GENERADOR Y DEL MOTOR CON ROTOR CILINDRICO

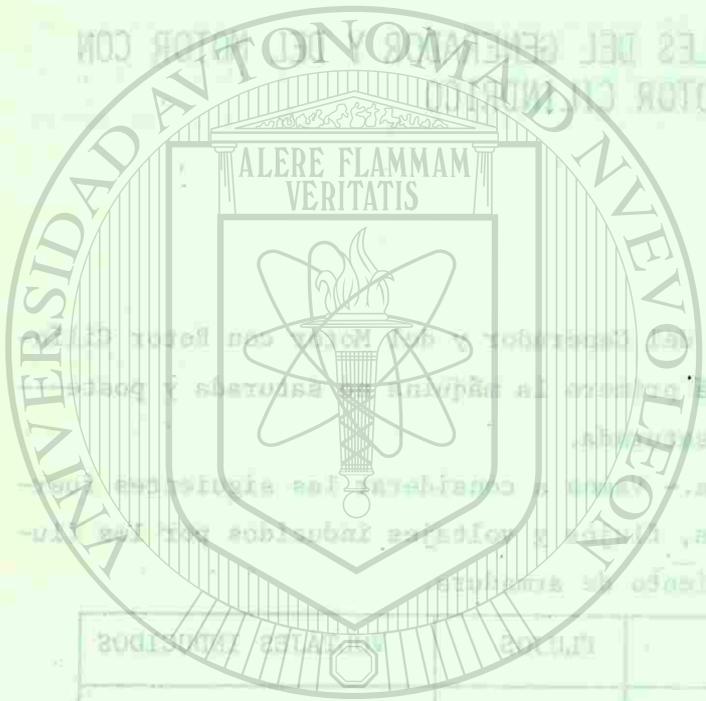
Diagramas vectoriales del Generador y del Motor con Rotor Cilíndrico.- Se considerará primero la máquina no saturada y posteriormente la máquina saturada.

a) Máquina no saturada.- Vamos a considerar las siguientes fuerzas magnetomotrices, flujos y voltajes inducidos por los flujos en el arrollamiento de armadura.

FMMS	FLUJOS	VOLTAJES INDUCIDOS
Campo (Mf)	ϕ_f	E_f
Reacción de Armadura	ϕ_a	$I_a X_a$
Fuerza magnetomotriz del flujo -- disperso	ϕ_l	$I_a X_l$

La ecuación de mallas de Kirchoff para el funcionamiento como generador es:

$$E_f = V + I_a R_a + j I_a X_l + j I_a X_a \quad \text{ec. 7-1}$$



Inductancia	ϕ_f	Campo (Mf)
Reactiva	ϕ_r	Reacción de
Resistencia	ϕ_a	armadura
Inductancia	ϕ_d	disperso

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

E_f es el voltaje inducido solamente por la fuerza magnetomotriz y flujo del campo (M_f, ϕ_f).

La ecuación de voltaje para el motor será:

$$V + E_f = I_a R_a + j I_a X_l + j I_a X_a \quad \text{ec. 7-2}$$

Puede parecer raro el signo atribuido a E_f en este caso de la ecuación 7-2, sin embargo lo que hemos hecho es sumar los dos voltajes que se alimentan a la máquina por agentes externos, es decir V es alimentada desde afuera (fuente) pero E_f se produce en la armadura gracias a la alimentación de corriente de campo y movimiento de la máquina, además, son 2 voltajes relativamente independientes entre sí.

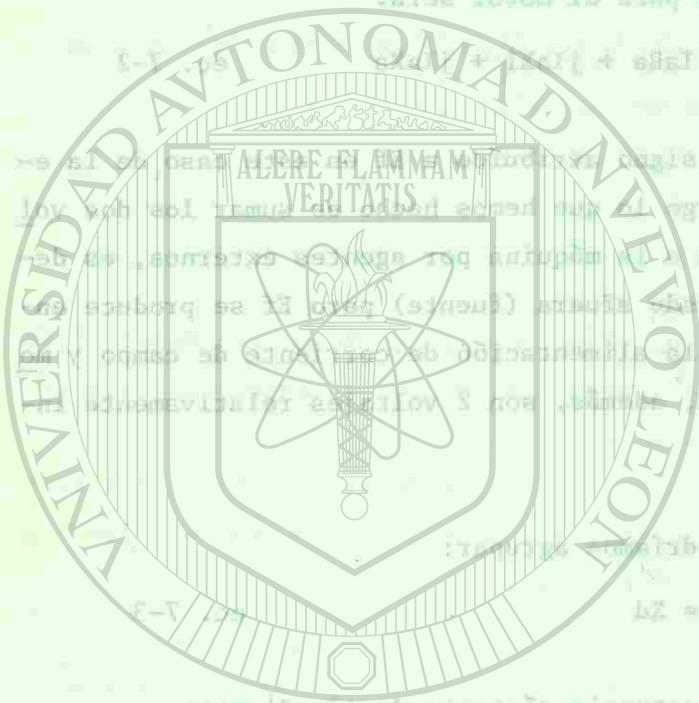
En ambas ecuaciones podríamos agrupar:

$$X_l + X_a = X_d \quad \text{ec. 7-3}$$

A X_d se le llama la reactancia síncrona de eje directo.

Los diagramas vectoriales correspondientes a las ecuaciones 7-1 y 7-2 aparecen en seguida, en las figs. 7-1 y 7-2, 7-3 y 7-4.

Pueden hacerse las siguientes observaciones sobre los 4 diagramas vectoriales: En un generador con corriente atrasada, la reacción de armadura se opone a la fuerza magnetomotriz de campo. En un generador con corriente adelantada, la reacción de armadura refuerza a la fuerza magnetomotriz de campo de manera tal que el voltaje con carga puede resultar incluso mayor que el de va-



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

cio (regulación negativa).

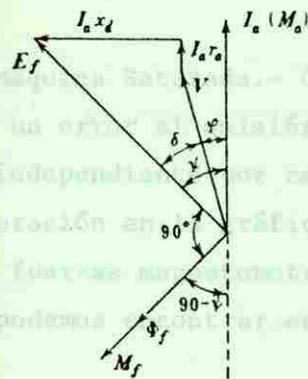


Fig. 7-1 Diag. vectorial de un Gen. síncrono no saturado con rotor cilíndrico - corriente atrasada.

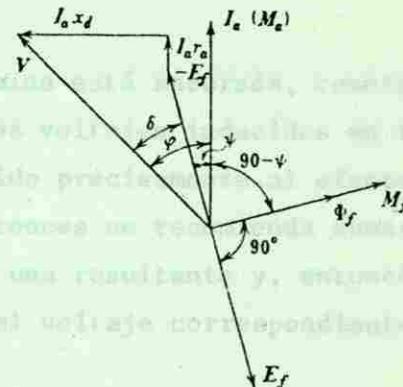


Fig. 7-2 Diag. vectorial de un motor síncrono no saturado con rotor cilíndrico.

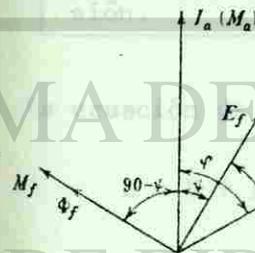


Fig. 7-3 Diagrama vectorial de un generador síncrono no saturado con rotor cilíndrico-corriente adelantada.

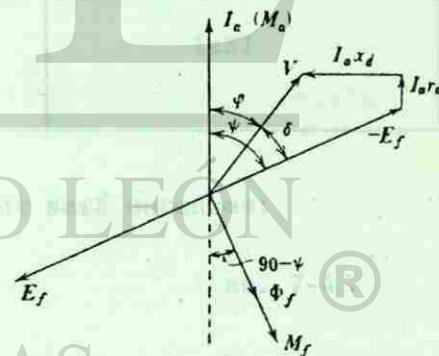
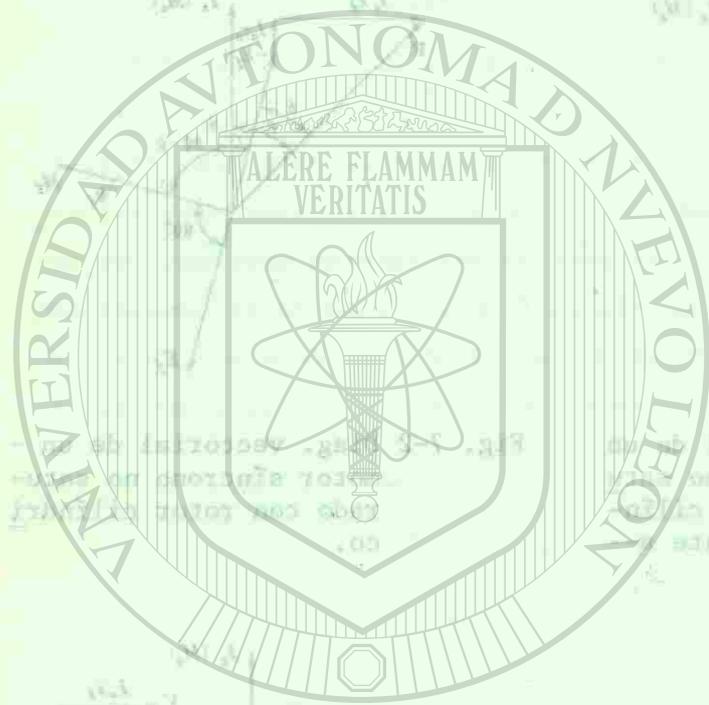


Fig. 7-4 Diag. vectorial de un motor síncrono corriente adelantada.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Para el motor podemos concluir que la corriente atrasada hace -- que la reacción de armadura refuerce a la fuerza magnetomotriz -- del campo y la adelantada la debilite.

b) Máquina Saturada.- Cuando la máquina está saturada, cometería mos un error si quisiéramos sumar los voltajes inducidos en forma independiente por cada flujo debido precisamente al efecto de saturación en la gráfica. Aquí, entonces se recomienda sumar -- las fuerzas magnetomotrices y sacar una resultante y, entonces -- si podemos encontrar en la gráfica el voltaje correspondiente.

Las fuerzas magnetomotrices, flujos y voltajes inducidos por los flujos en el arrollamiento de armadura son:

FMMS	FLUJOS	VOLTAJES INDUCIDOS
$MR = M_f + M_a$	ϕR	E
Fuerza Magnetomotriz del flujo de dispersión.	ϕl	$I_a X_l$

La ecuación de mallas como generador será entonces:

$$E = V + I_a R_a + I_a X_l \quad \text{ec. 7-4} \text{ (R)}$$

Y como motor.

$$V + E = I_a R_a + I_a X_l \quad \text{ec. 7-5}$$

Aquí, E es totalmente diferente de E_f pues E viene siendo el vol

taje inducido en el embobinado de armadura por la fuerza magnetomotriz resultante de la de campo (M_f) y la producida por la corriente de armadura (M_a) y, E_f solo es inducido por el campo.

En las figs. 7-5 y 7-6 aparecen 2 diagramas vectoriales, se sugiere al alumno, dibujar los 2 restantes.

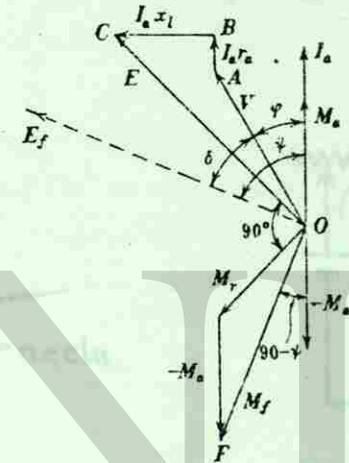


Fig. 7-5 Diagrama Vectorial de un generador

Síncrono saturado, con rotor cilíndrico corriente atrasada

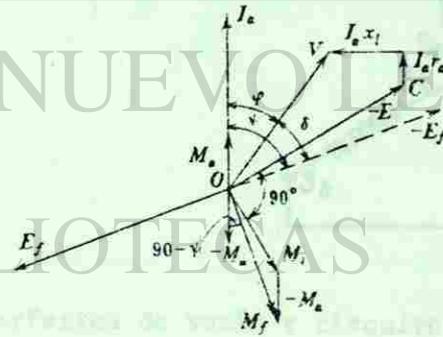
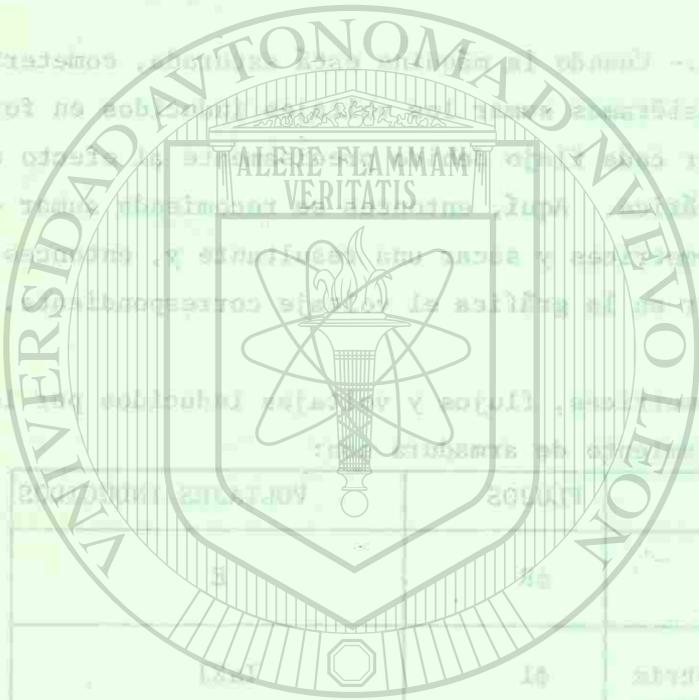


Fig. 7-6 Diagrama Vectorial de un motor síncrono saturado con rotor cilíndrico corriente adelantada.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CARACTERISTICAS DEL GENERADOR SINCRONICO

8-1 Característica de Vacío.- Esta gráfica nos muestra la relación que existe entre el voltaje inducido del generador y la corriente de campo a la velocidad nominal, cuando no tiene carga (ver - fig. 8-1).

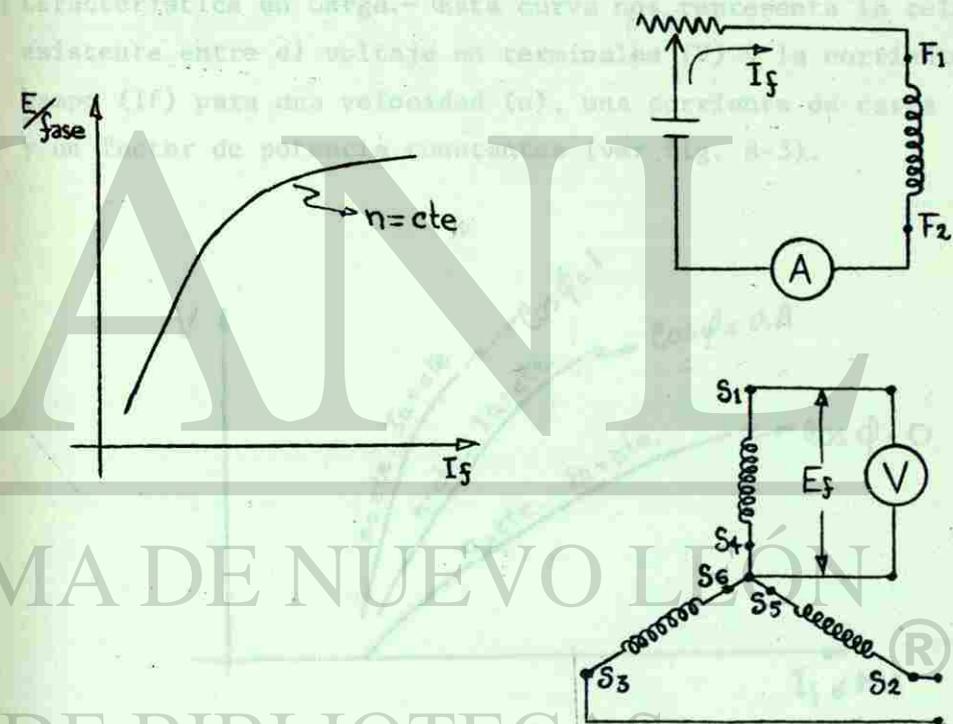
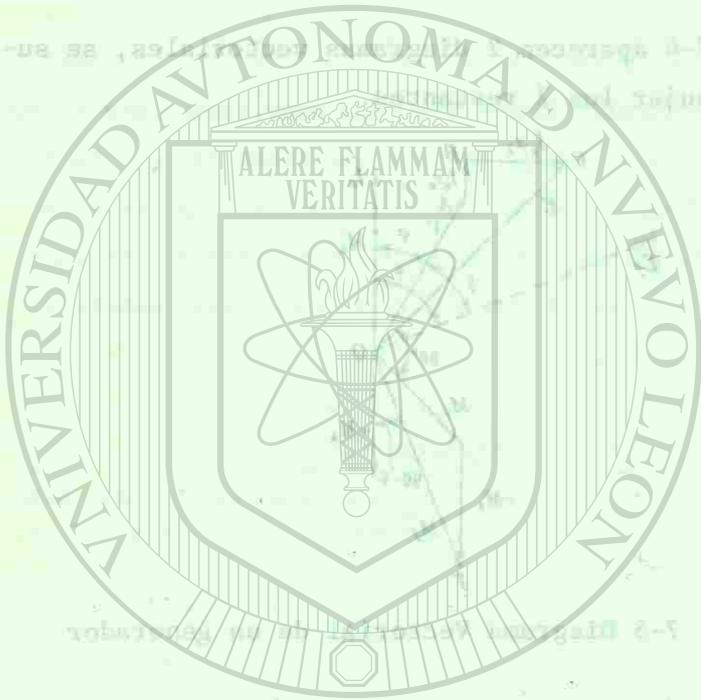


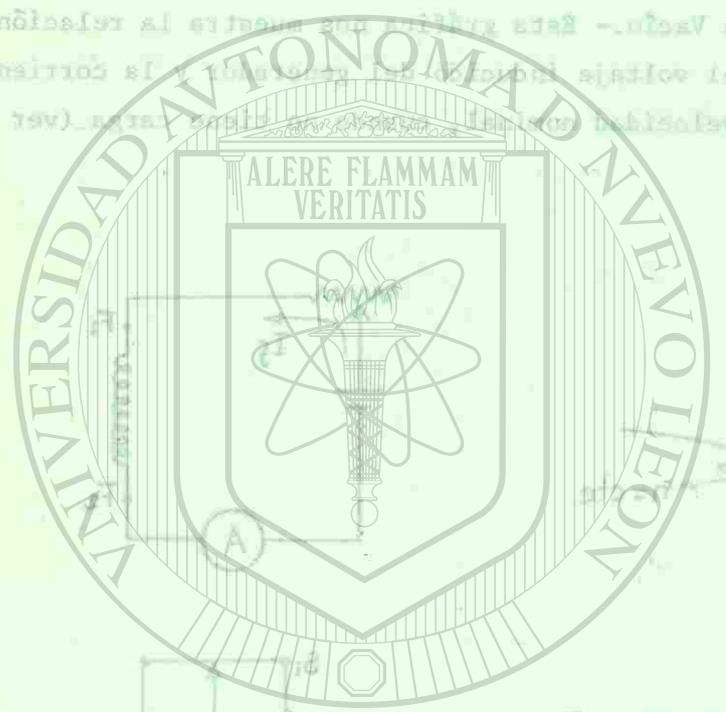
Fig. 8-1 Característica de vacío y circuito para obtenerla
Según se mostró en el capítulo 4, el voltaje inducido para un ge



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CARACTERÍSTICAS DEL GENERADOR SINCRÓNICO



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Fig. 8-1 Características de vacío y circuito para obtener según se muestra en el capítulo 4, el voltaje inducido para un

nerador dado, depende de la frecuencia y del flujo. Es decir, - al mantener constante la velocidad, la frecuencia también estará constante y el voltaje dependerá solo del flujo ($E \propto \phi$). Como - la relación entre fuerza magnetomotriz (M_f) y flujo en un circui to magnético es la curva de saturación, dicha curva representará también nuestro caso a voltaje inducido ($E_f \propto \phi$) contra corrien te de campo ($I_f \propto M_f$), por eso a la característica de vacío se - le nombra también la curva de saturación.

8-2 Característica en Carga.- Esta curva nos representa la relación- existente entre el voltaje en terminales (V) y la corriente de - campo (I_f) para una velocidad (n), una corriente de carga (I_a) - y un factor de potencia constantes (ver fig. 8-3).

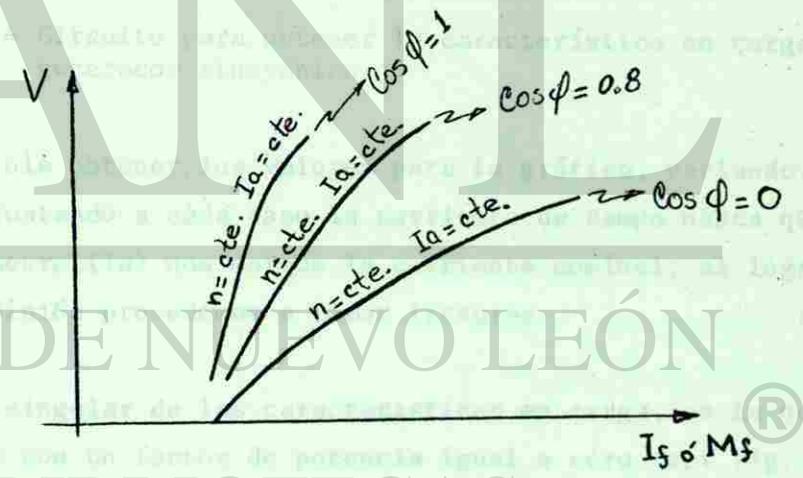
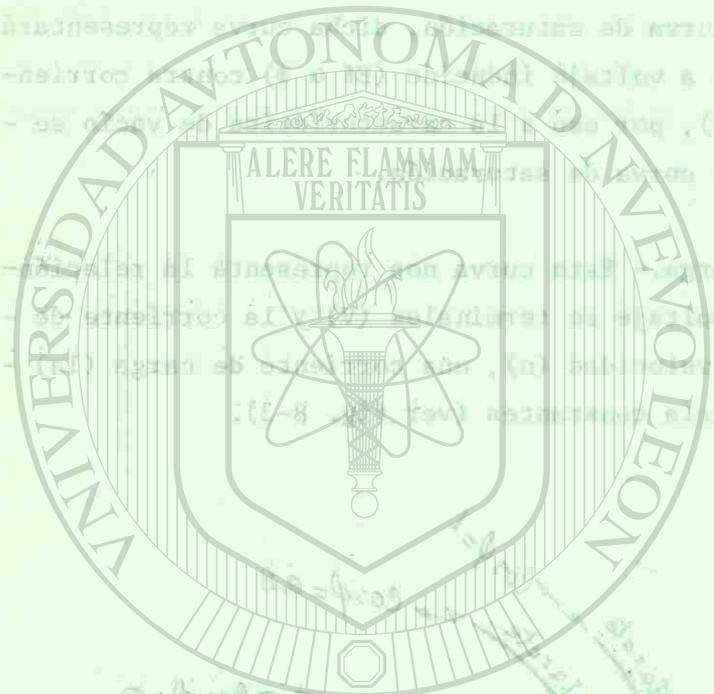


Fig. 8-3 Características en carga para diferentes factores de potencia.

El circuito con el que podemos obtener la característica en car



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

ga, aparece en la fig. 8-4, aclarando que la lectura de voltaje puede hacerse por fase o por línea (en una conexión en estrella) y por tanto, la gráfica estará dada también en voltaje de fase o de línea.

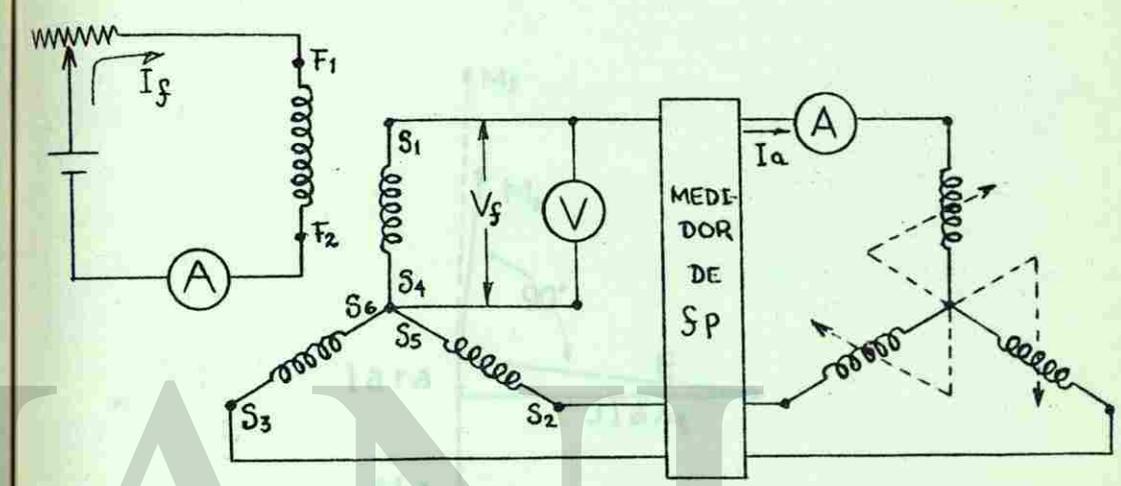
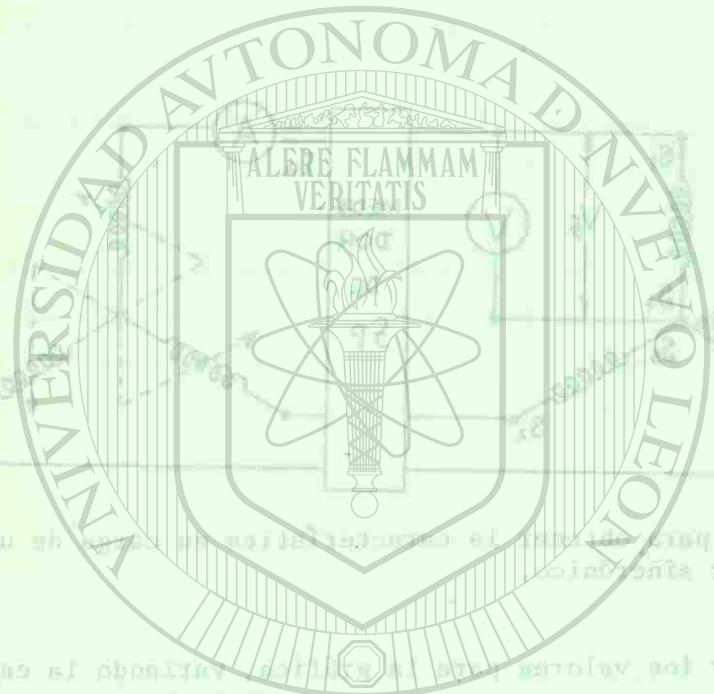
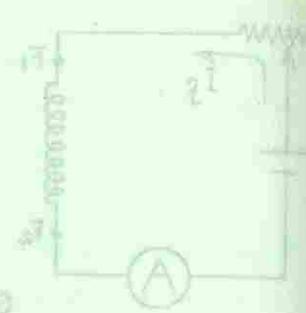


Fig. 8-4 Circuito para obtener la característica en carga de un generador sincrónico.

Es posible obtener los valores para la gráfica, variando la carga y ajustando a cada paso la corriente de campo hasta que el amperímetro (I_a) nos marque la corriente nominal; al lograr esta condición procedemos a tomar lecturas.

La más singular de las características en carga, es la que se obtiene con un factor de potencia igual a cero (ver fig. 8-3), y es importante precisamente porque nos proporciona datos para la obtención del Triángulo de Potier. Esta característica se obtiene aplicando a la máquina carga inductiva pura, sin embargo, para obtener el punto más bajo de la curva ($V=0$) deben cor-

El aparato en la fig. 8-4, solamente que la lectura de voltaje puede hacerse por fase a por fase (con una conexión en estrella) y por tanto, la reacción entre cada bobina en voltaje de fase de línea.



BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

tocircuitarse las terminales. En este caso, como la reactancia del flujo de dispersión de la máquina es mucho mayor que la resistencia de armadura, la máquina se considera prácticamente -- con carga inductiva pura (ver fig. 3-5).

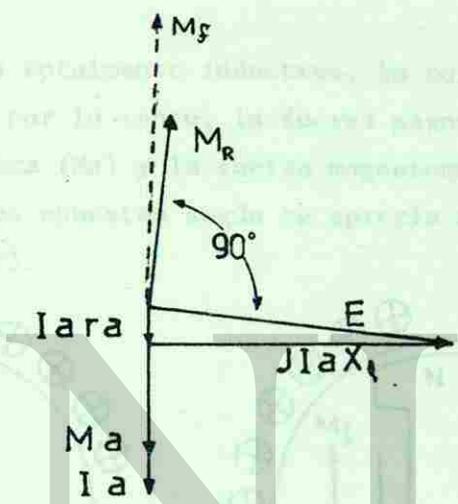
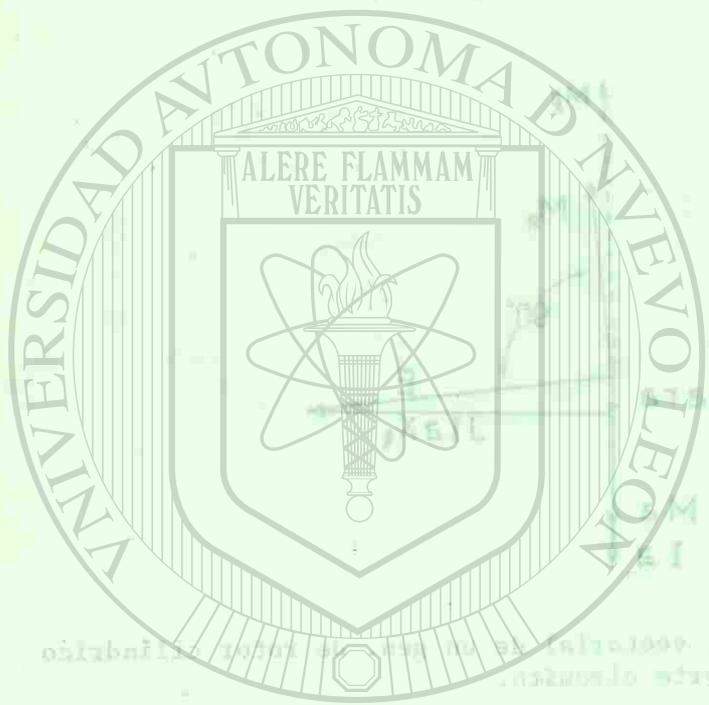


Fig. 8-5 Diag. vectorial de un gen. de rotor cilíndrico en corto circuito.

La reactancia de dispersión es aquella reactancia que multiplicada por la corriente de armadura existente, nos produce un voltaje de la misma magnitud al inducido por el flujo disperso de la máquina. Dicho en otras palabras, el voltaje que induce el flujo disperso puede ser representado con una reactancia inductiva de valor fijo (ya que el flujo se cierra a través del aire, la reactancia tendrá un valor fijo).

La dirección de la reacción de armadura (M_a) es la misma que de



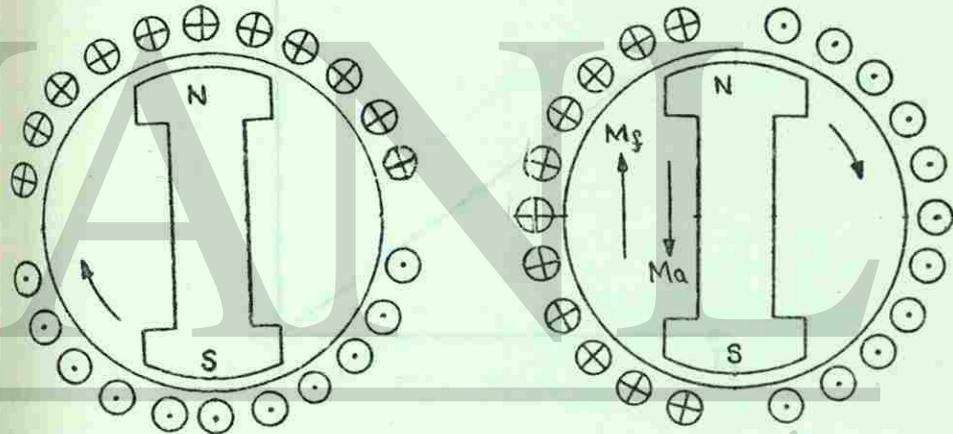
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

coincide con la terminal. En este caso, como la reactancia
del tipo de dispositivo de la máquina es mucho mayor que la re-
sistencia de armadura, la reacción se considera prácticamente
una carga inductiva (ver fig. 8-6).

la corriente de armadura (I_a). Sin embargo, el voltaje E es el-
inducido por la fuerza magnetomotriz resultante de la suma de -
la de campo (M_f) y la de armadura (M_a).

$$M_R = M_f + M_a$$

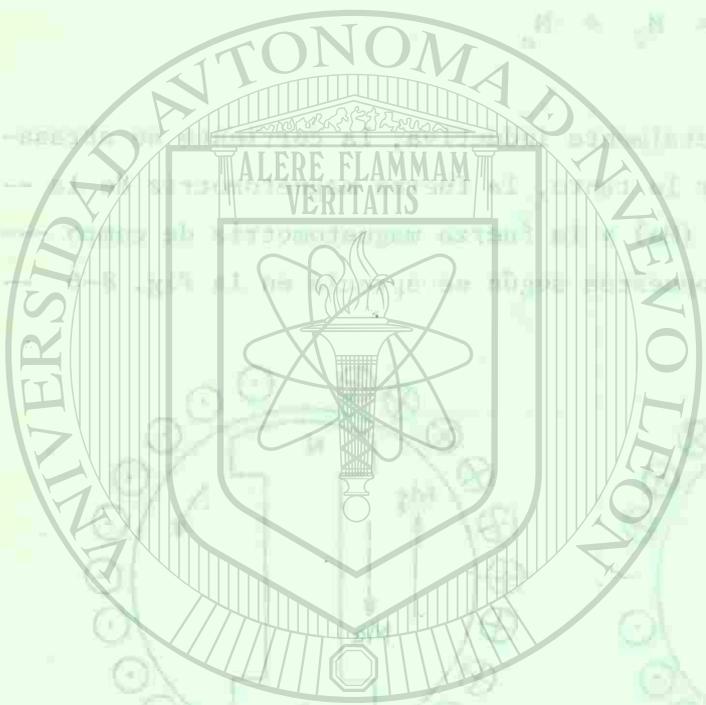
Cuando la carga es totalmente inductiva, la corriente se atrasa-
 90° del voltaje y por lo tanto, la fuerza magnetomotriz de la --
reacción de armadura (M_a) y la fuerza magnetomotriz de campo ---
tendrán direcciones opuestas según se aprecia en la fig. 8-6 --
(para un generador).



Reacción de Voltajes Inducidos Sentido de Corrientes

Fig. 8-6 Reacción de armadura en un generador con carga inductiva.

En la fig. 8-6, donde aparecen las corrientes (retrasadas 90° -
con respecto a los voltajes) se aprecia que la fuerza magnetomo-
triz de los polos va hacia arriba (sur a norte dentro de los po-
los) mientras que la corriente de los conductores va hacia aba-



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL

jo (M_a). Es decir, la máquina en corto circuito nunca se satura porque la M_r es muy pequeña.

3) Característica en Corto Circuito.- Esta característica se obtiene cortocircuitando el generador y tomando lecturas de corriente de campo y corriente de armadura. Se tabulan y se pasan a un gráfico en el cual la corriente de campo I_f aparecerá en la horizontal y la de armadura en la ordenada. Esta característica será una línea recta debido a que la máquina no se satura. Ver figura 8-7.

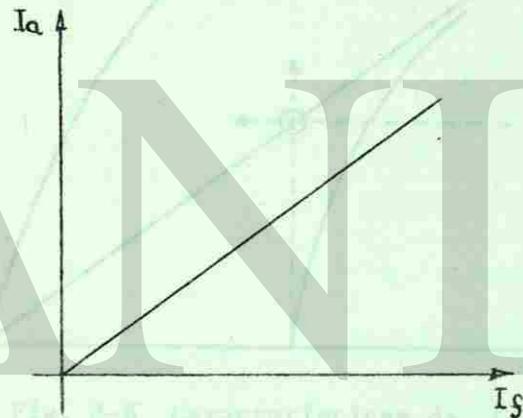
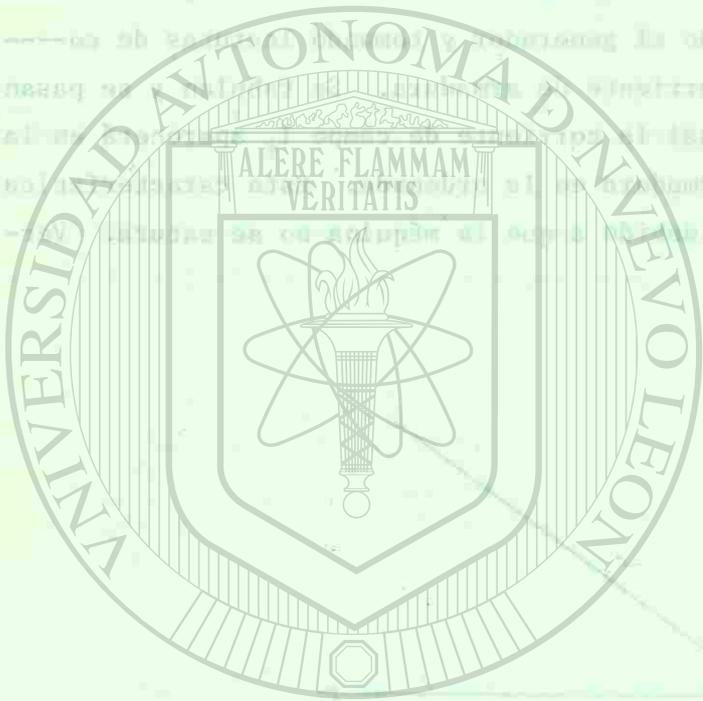


Fig. 8-7 Característica de Corto Circuito

Dado que esta característica es una línea recta se puede obtener con un solo punto y para tener menos error, este puede ser uno tal que la corriente de armadura sea un 150% del valor nominal.

Obtención de la característica en cortocircuito a partir de la $f.p. = 0$.



BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Quando se tiene ya la característica a f.p. = 0, es fácil obtener la de cortocircuito sin tener que ir al laboratorio. Esto se logra trazando una nueva ordenada en el lado derecho del gráfico y en el cual se pondrá a una escala conveniente la corriente de armadura. En el punto donde quede $I_{a \text{ nom.}}$ se traza una horizontal y en el origen de f.p. igual a cero una vertical, donde crucen estas dos líneas ahí será un punto de la característica en cortocircuito. Ver figura 8-8.

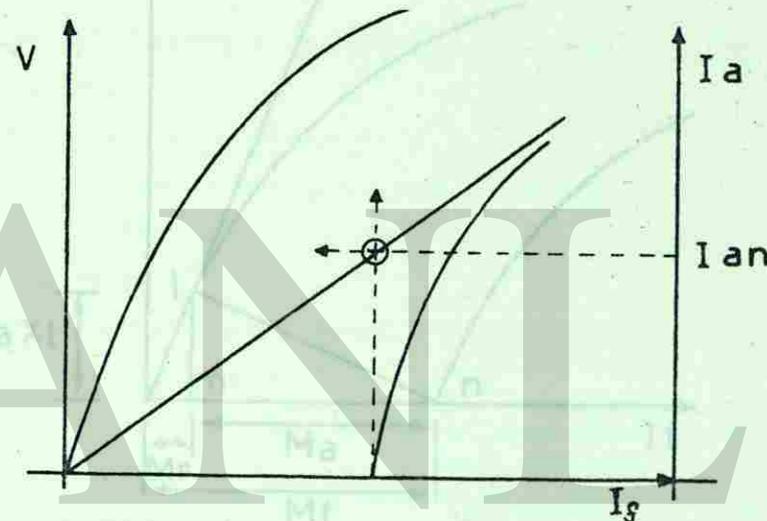
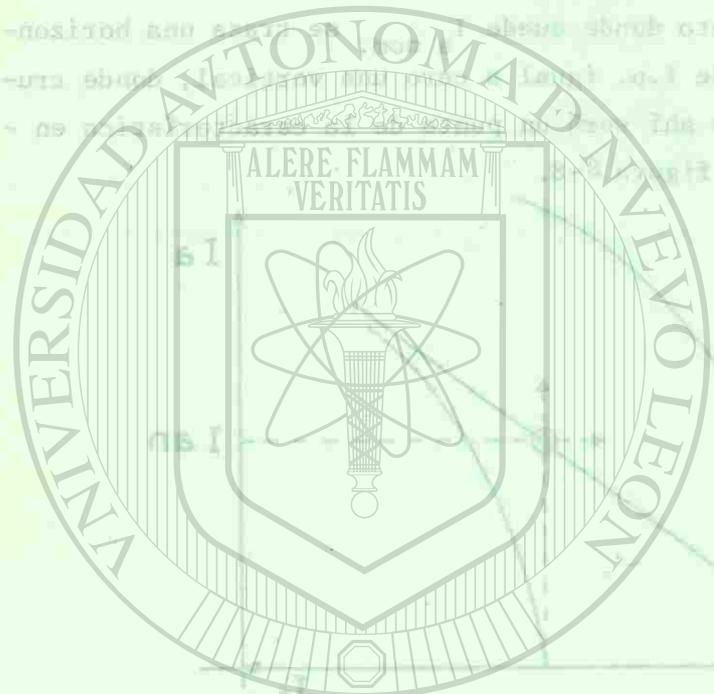


Fig. 8-8 Características de C.C. y de fp=0

Triángulo de Potier.- La ecuación de voltaje del generador sincrónico es:

$$E = V + I_a R_a + j I_a X_l$$

Aparentemente, en la ecuación no hemos tomado en cuenta la reacción de armadura, pero realmente si el voltaje E es ya el voltaje inducido por la fuerza magnetomotriz resultante (MR)-



Cuando se tiene ya la característica a f.p. = 0, se hace el otro...
 por la de cortocircuito sin tener que ir al laboratorio. Este se...
 logra trazando una nueva recta en el lado derecho del gráfico...
 y en el cual se puede a una escala conveniente la corriente de...
 armadura. En el punto donde se corta con la línea horizontal...
 tal y en el orden de f.p. = 0. Se traza una línea horizontal...
 con estas dos líneas así...
 cortocircuito. Ver fig. 8-9.

Fig. 8-9 Características de C.C. y de f.p. = 0

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

El voltaje inducido por la fuerza magnetomotriz resultante (MR) es...
 el voltaje de armadura, pero resultante el...
 en la expresión no tiene coma en cuenta la reac-

$$MR = M_f + M_a$$

Cuando la máquina está en corto circuito, (punto mas bajo de la curva de $f_p=0$), la fuerza magnetomotriz de campo y la de armadura prácticamente están en oposición por lo que la resta vectorial de ambas se convierte en una resta de magnitudes (ver fig. 8-9).

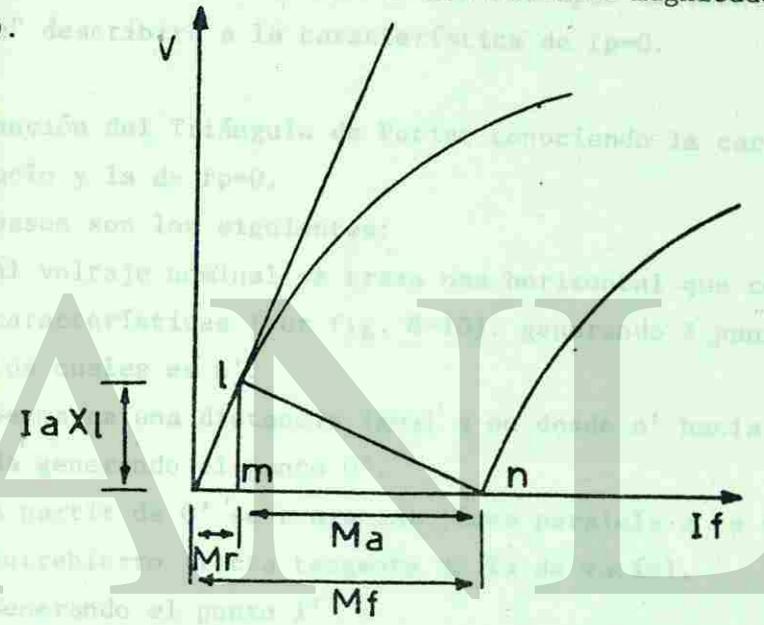


Fig. 8-9 Triángulo de Potier

Por lo tanto si M_f es la fuerza magnetomotriz del campo, al restarle M_a nos dará la fuerza magnetomotriz resultante (M_R) capaz de inducir dentro de la máquina un voltaje igual a $I_a R_a + I_a X_l$ debido a que está en corto circuito ($V = 0$). Sin embargo, como $R_a \ll X_l$. De esta forma, se dibuja el triángulo l, m, n - conocido como triángulo de Potier, que tiene como lados del mismo a la reacción de armadura (mn) y a la caída por reactancia -

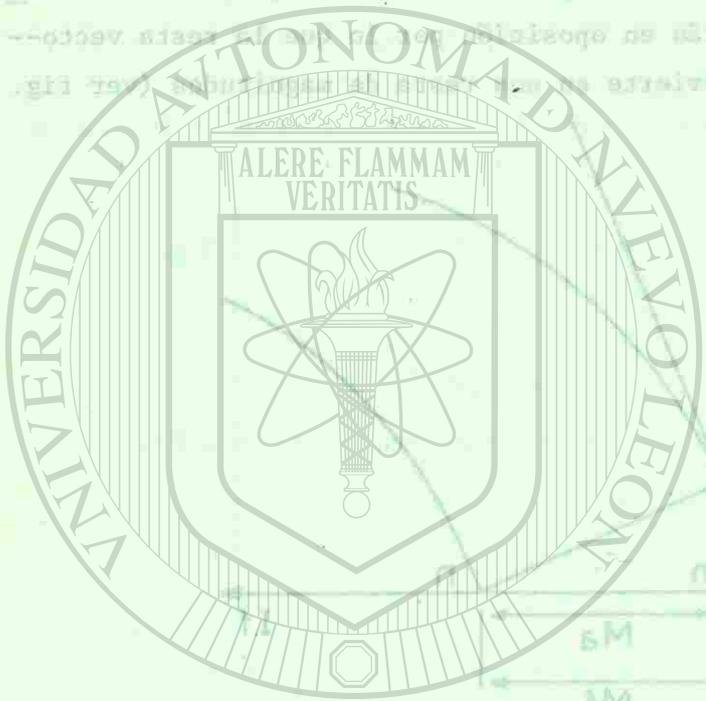


Fig. 8-9 Triángulo de Potier

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

de dispersión (Im).

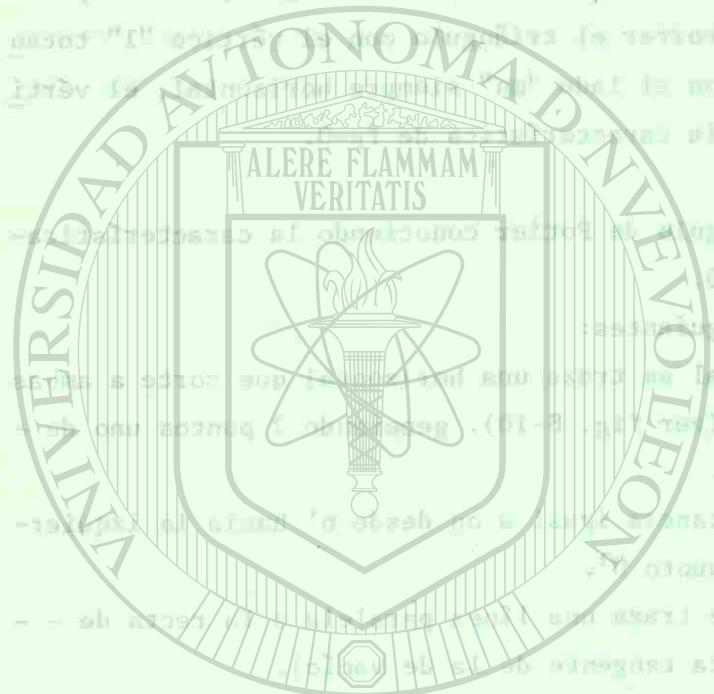
Conocida la característica de vacío y el triángulo, la de $f_p=0$ - se puede obtener al correr el triángulo con el vértice "1" tocando a la de vacío y con el lado "mn" siempre horizontal, el vértice "n" describirá a la característica de $f_p=0$.

*Obtención del Triángulo de Potier conociendo la característica de vacío y la de $f_p=0$.

Los pasos son los siguientes:

- 1.- Al voltaje nominal se traza una horizontal que corte a ambas características (ver fig. 8-10). generando 2 puntos uno de los cuales es n'.
 - 2.- Se marca una distancia igual a on desde n' hacia la izquierda generando el punto 0'.
 - 3.- A partir de 0' se traza una línea paralela a la recta de - - entrehierro (recta tangente de la de vacío). Generando el punto 1'
 - 4.- A partir de 1' se baja una vertical hasta la horizontal que trazamos primero generando el punto m'.
- Los puntos 1', m' y n' formarán el triángulo de potier.

Relación de corto circuito.- Esta relación está definida como - la corriente de campo necesaria para inducir el voltaje nominal en vacío entre la corriente de campo necesaria para producir la corriente de armadura nominal en corto circuito (ver fig. 8-11).



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

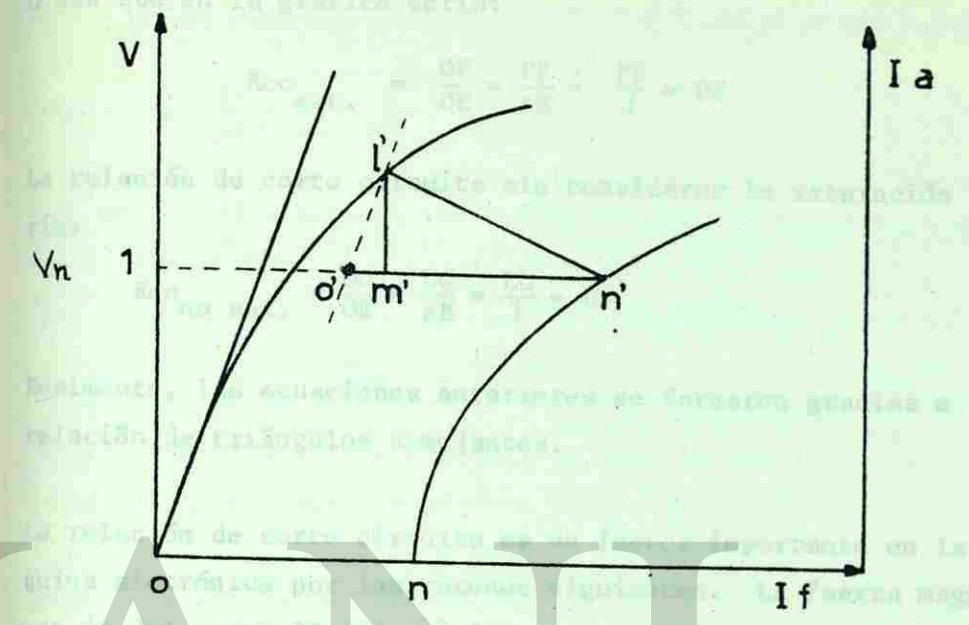


Fig. 8-10 Obtención del Triángulo

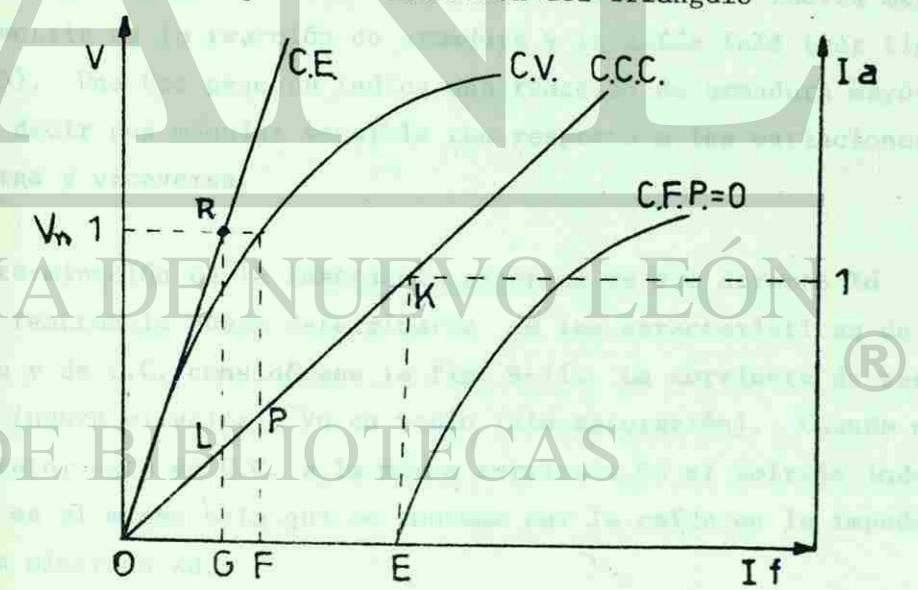
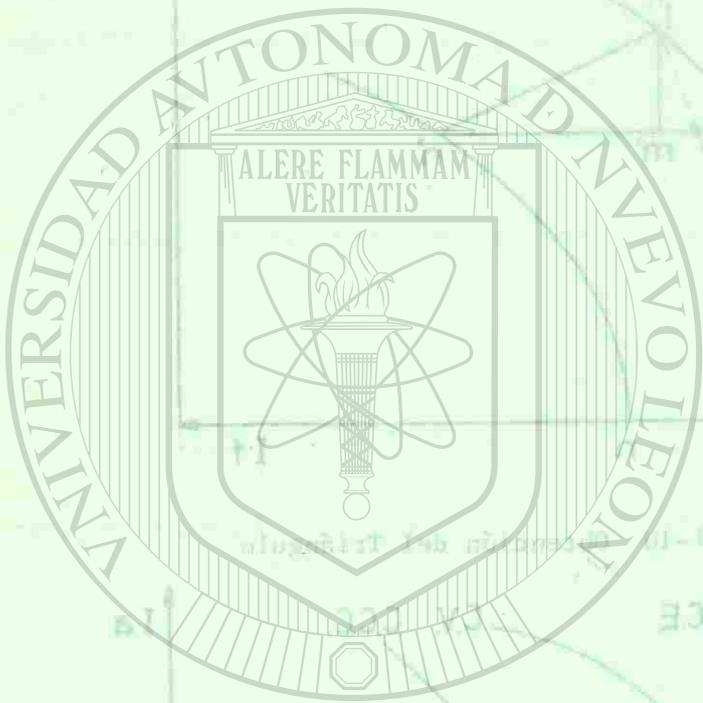


Fig. 8-11 Relación de Corto Circuito



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

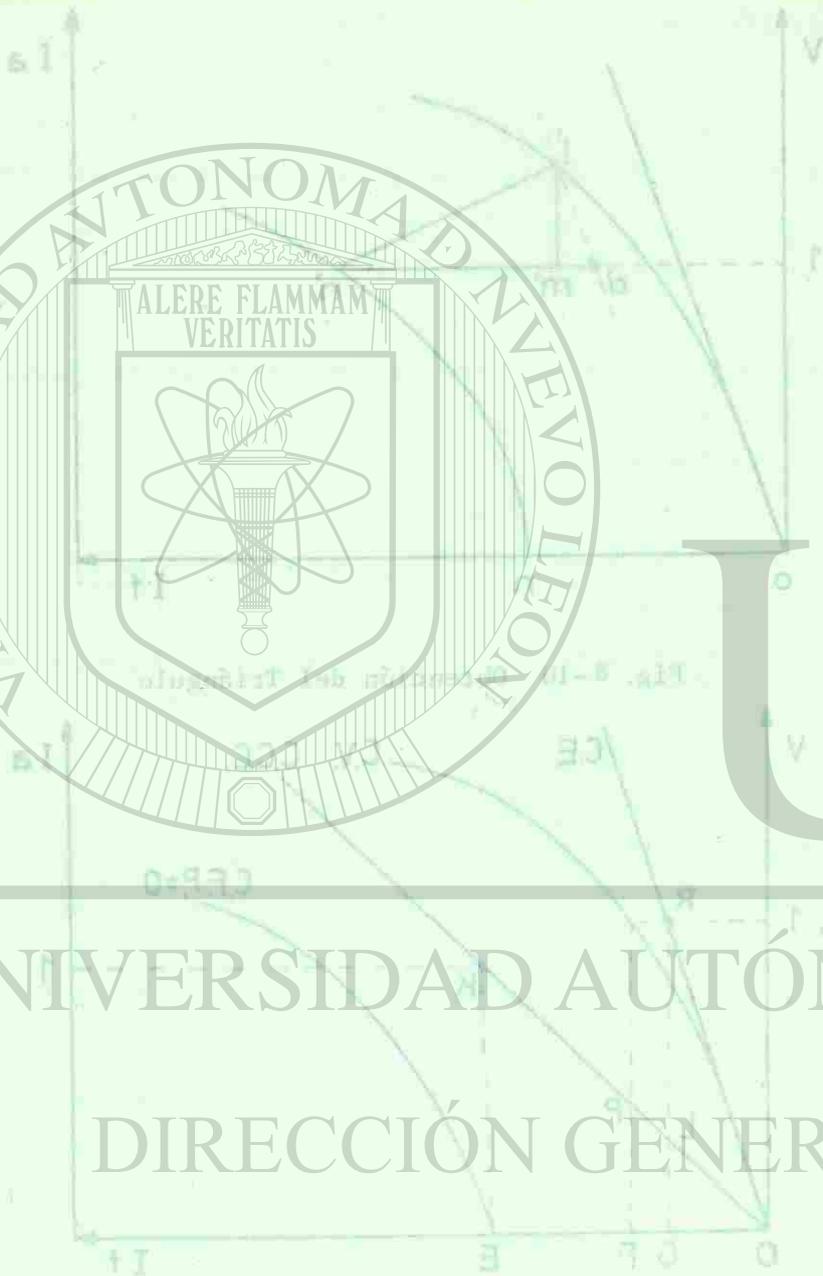


Fig. 8-11 Relación de Campo y Voltaje

O sea que en la gráfica sería:

$$R_{cc \text{ sat.}} = \frac{OF}{OE} = \frac{PF}{KE} = \frac{PF}{I} = PF$$

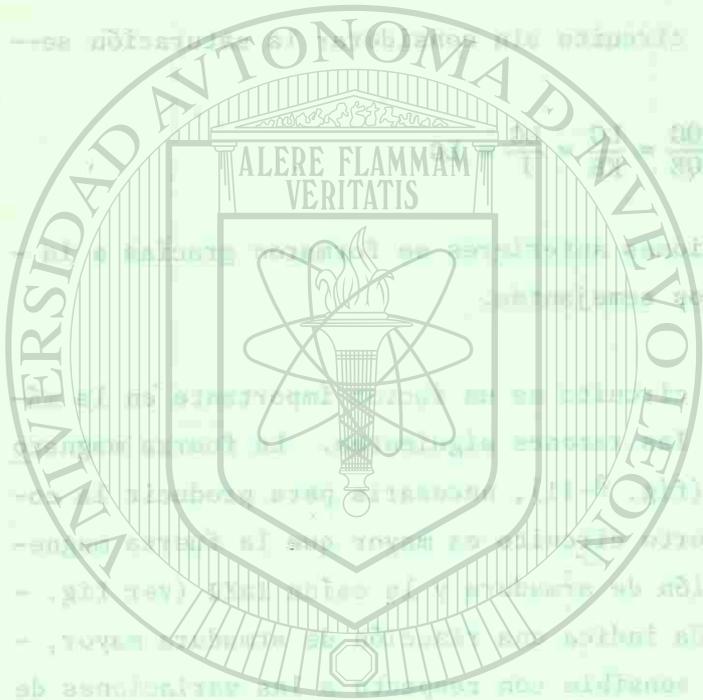
La relación de corto circuito sin considerar la saturación sería:

$$R_{cc \text{ no sat.}} = \frac{OG}{OE} = \frac{LG}{KE} = \frac{LG}{I} = LG$$

Realmente, las ecuaciones anteriores se formaron gracias a la relación de triángulos semejantes.

La relación de corto circuito es un factor importante en la máquina síncrona por las razones siguientes. La fuerza magnetomotriz del campo OE (fig. 8-11), necesaria para producir la corriente nominal en corto circuito es mayor que la fuerza magnetomotriz de la reacción de armadura y la caída $I_a X_d$ (ver fig. 8-5). Una R_{cc} pequeña indica una reacción de armadura mayor, es decir una máquina sensible con respecto a las variaciones de carga y viceversa.

Determinación de la Reactancia síncrona de eje directo X_d . Esta reactancia puede determinarse de las características de vacío y de C.C. considérese la fig. 8-11. La corriente de campo OG induce el voltaje V_n en vacío (sin saturación). Cuando el estator está en C.C. a la misma corriente OG el voltaje inducido es el mismo solo que se consume por la caída en la impedancia síncrona X_d .



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$E_f = GR = V_n = I_a X_l + I_a X_a \text{ (despreciando } R_a)$$

$$X_l + X_a = X_d$$

$$X_d \frac{V_n}{I_a} \approx \frac{V_n}{GL} \approx \frac{1}{GL}$$

como se mostró antes, GL es la relación de corto circuito no saturada por lo que:

$$X_d = \frac{1}{R_{cc}} \text{ no sat.}$$

es decir, la reactancia síncrona en P.U. es igual al inverso de la relación de corto circuito no saturada.

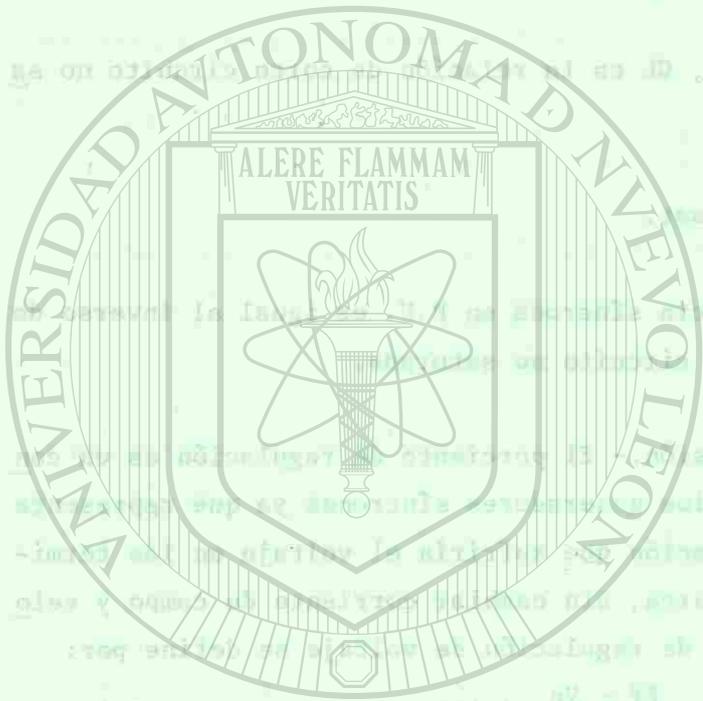
Regulación de la Tensión.- El porcentaje de regulación es un concepto importante en los generadores síncronos ya que representa el porcentaje de elevación que sufriría el voltaje en las terminales al perder la carga, sin cambiar corriente de campo y velocidad. El porcentaje de regulación de voltaje se define por:

$$\% \text{ Reg.} = \frac{E_f - V_n}{V_n} * 100 \quad \text{ec. 8-1}$$

E_f - voltaje inducido solo por I_f

V_n - voltaje en terminales a plena carga

En generadores síncronos el porcentaje de regulación de voltaje debe ir asociado con el tipo de carga aplicada ya que, para la misma potencia de salida existen diferentes regulaciones en cargas inductivas que en resistivas o capacitivas.



BIBLIOTECA UNIVERSITARIA
 FACULTAD DE INGENIERIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Existen varios métodos para determinar la regulación de un generador mediante cálculo. Este que vamos a proponer, es el recomendado por la AIEE.

- 1) Se determinan por pruebas, la característica en vacío y los 2 puntos de la característica de carga a $f_p = 0$, siendo uno de los 2 puntos a corriente nominal y la armadura en corto circuito (punto E de la fig.8-12) y el otro a corriente y voltaje nominales sobre la misma característica ($f_p = 0$) (ver fig. 8-12).

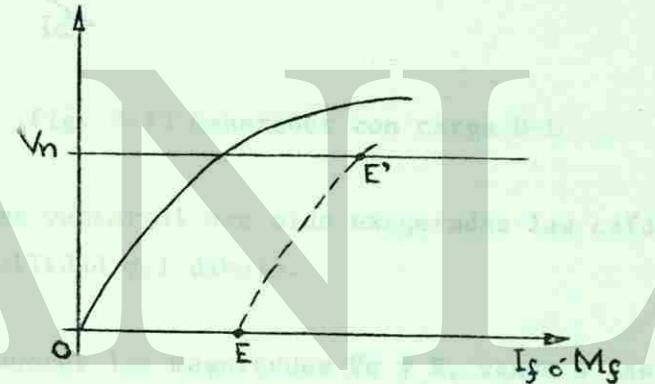
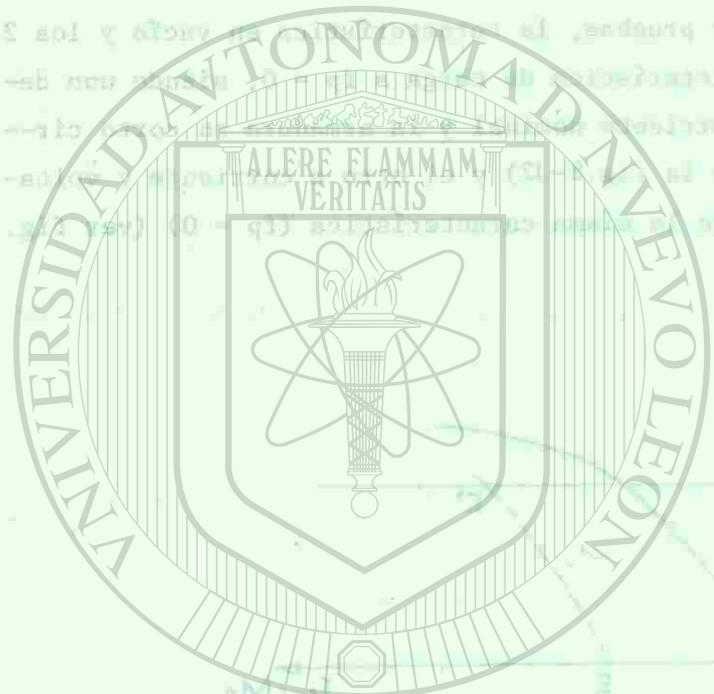


Fig. 8-12 Datos mediante prueba

A partir de esto, puede determinarse el triángulo de Potier como se explicó en otro punto de este capítulo.

Vamos a suponer una carga R-L, para concretar un diagrama vectorial. La ecuación de voltaje que podemos plantear es la siguiente:

$$E = V_n + I_a R_a + I_a X_l$$



BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Donde E representa al voltaje inducido por la F_{mm} resultante del campo y la reacción de armadura. El diagrama vectorial sería el que aparece en la fig. 8-13.

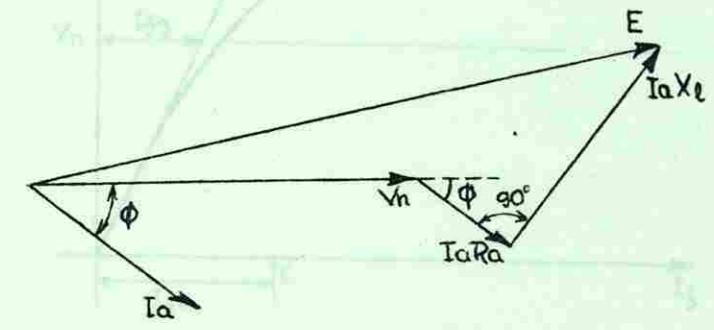


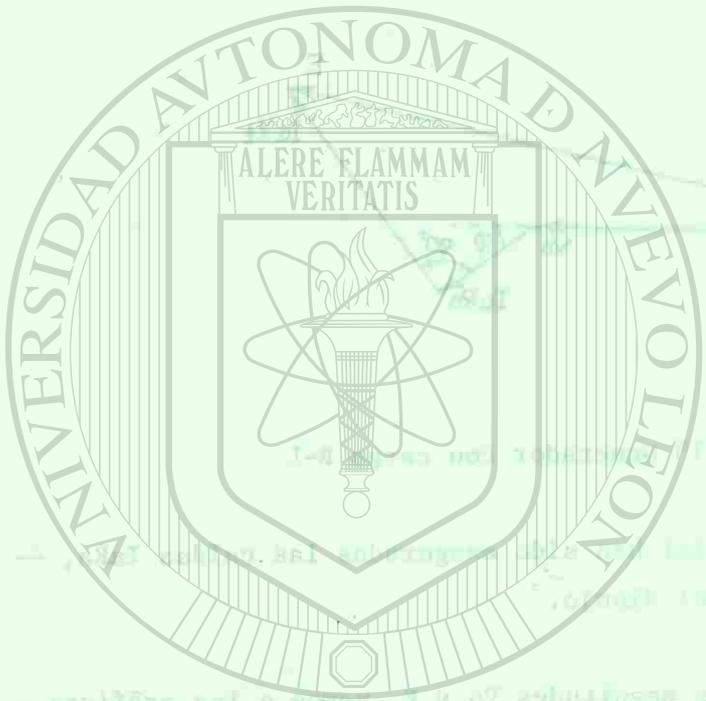
Fig. 8-13 Generador con carga R-L

En el diagrama vectorial han sido exageradas las caídas $I_a R_a$, -- $I_a X_l$ para facilidad del dibujo.

Después de conocer las magnitudes V_n y E , vamos a las gráficas -- ya conocidas y calculamos los siguientes valores de corriente de campo (ver fig. 8-14).

En seguida, conociendo tales valores característicos de corriente de campo formamos un diagrama vectorial como el de la figura- 8-15.

Resolviendo el diagrama vectorial de la fig. 8-15 encontramos -- I_{ft} que es la corriente de campo que nos va a inducir E_f (ver --



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

fig. 8-16)

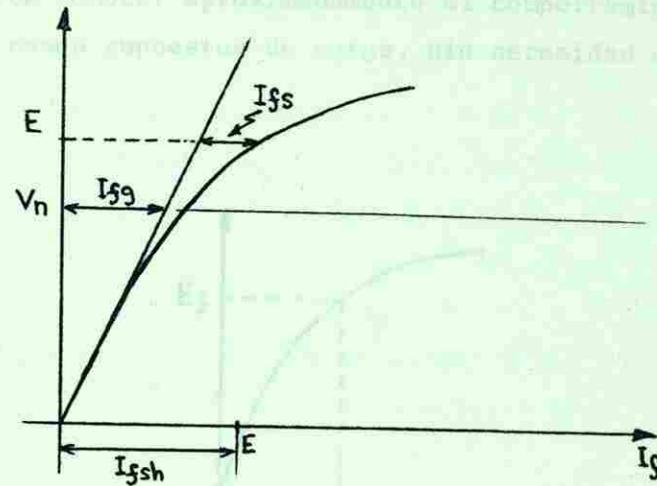


Fig. 8-14. Cálculo de I_{fg} , I_{fs} , I_{fsh}

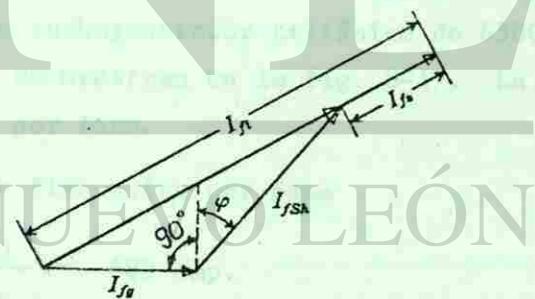
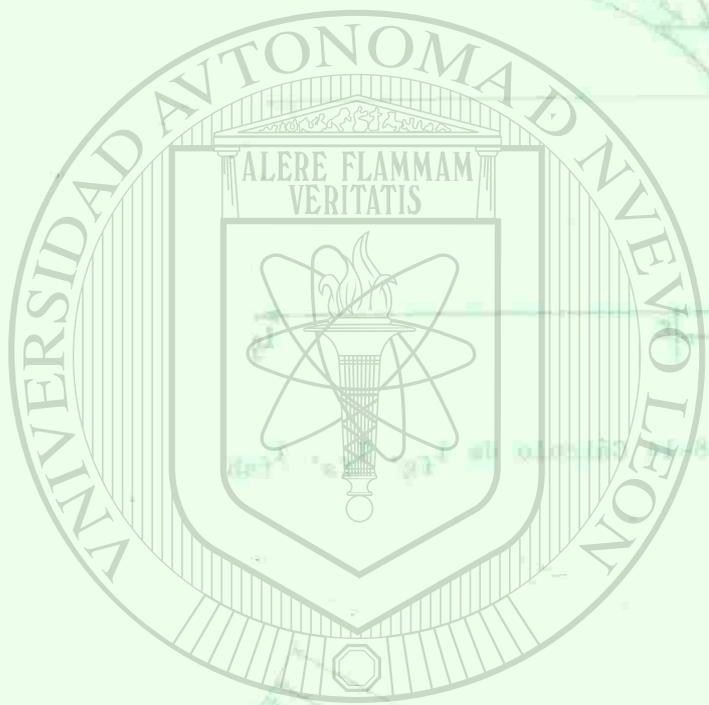


Fig. 8-15 Diag. vectorial de corrientes de campo

Y de esta forma, podremos hacer el cálculo del porcentaje de regu



BIBLIOTECA UNIVERSITARIA
 CARRILLO ALFONSINA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

lación (ver ecuación 8-1). Esta forma de cálculo de regulación nos permite conocer aproximadamente el comportamiento de la máquina en casos supuestos de carga, sin necesidad de hacer mediciones.

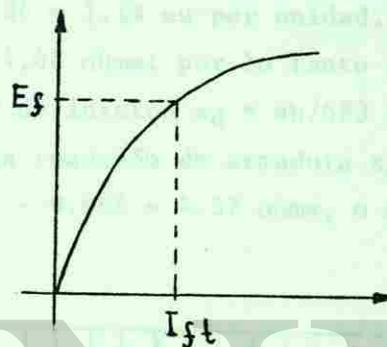


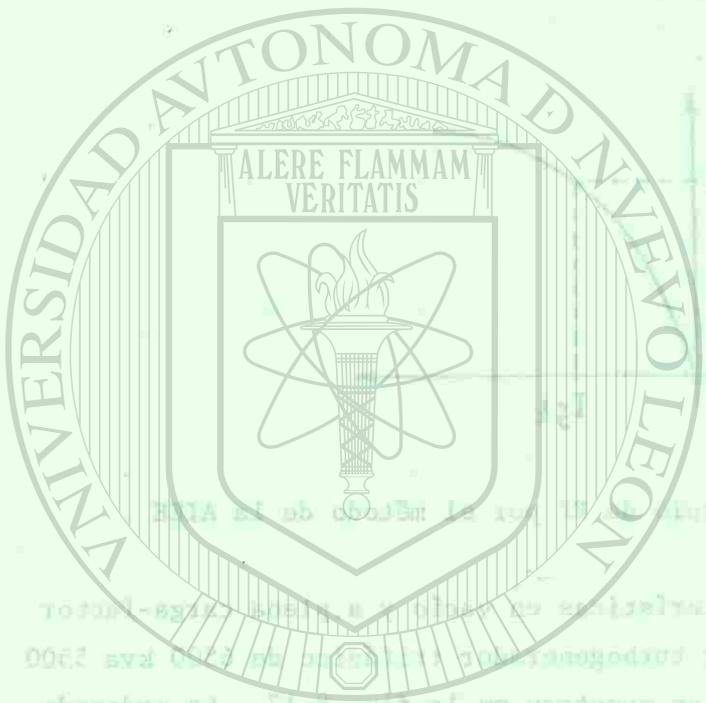
Fig. 8-16 Cálculo de E_f por el método de la AIEE

Ejemplo 8-1 Las características en vacío y a plena carga-factor de potencia cero de un turbogenerador trifásico de 6500 kva 5500 volts, conectado en Y se muestran en la fig. 8-17. La ordenada está trazada en volts por fase.

$$V_n = \frac{5500}{\sqrt{3}} = 3180 \text{ volts por fase}$$

$$I_a = \frac{6500}{\sqrt{3} \times 5.5} = 683 \text{ amp.}$$

Siguiendo los métodos conocidos, se construye el triángulo $O'l_n$, y se determina el triángulo $l_m n$ de Potier. De éste, $mn = 71$ es la reacción de armadura M_a expresada en función de los amperes del campo, $l_m = 660$ volts es la tensión de la reactancia de dis-



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

persión; por lo tanto $x_1 = 660/683 = 0.968$ ohm: La reactancia de dispersión en p.u. es $660/3180 = 0.208$. La relación de corto circuito (no saturada) RCC es $A_a/O_n = 73/87 = 0.84$, y el valor es $A_b/O_n = 0.92$ (para la saturación a tensión nominal). También de la característica de cortocircuito en la base en por unidad) la $RCC = F_o'L' = 0.84$; el valor saturado $RCC = F_oL = 0.92$. Por lo tanto $x_a = 1/0.84 = 1.19$ en por unidad. La impedancia unitaria es $3180/683 = 4,66$ ohms; por lo tanto $x_d = 1.19 \times 4.66 = 5.54$ ohms. También por definición $x_d = nh/683 = 3780/683 = 5.54$ ohms. La reactancia de la reacción de armadura $x_{ad} = x_d - x_1$ (ec. 7-3) de aquí $x_{ad} = 5.54 - 0.968 = 4.57$ ohms, o bien $4.57/4.66 = 0.98$ -p.u.

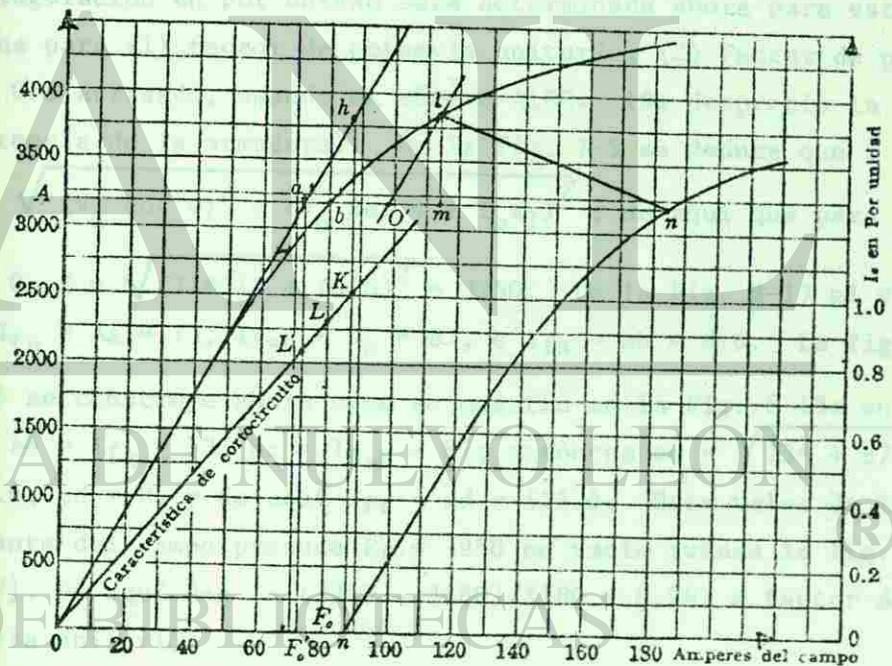
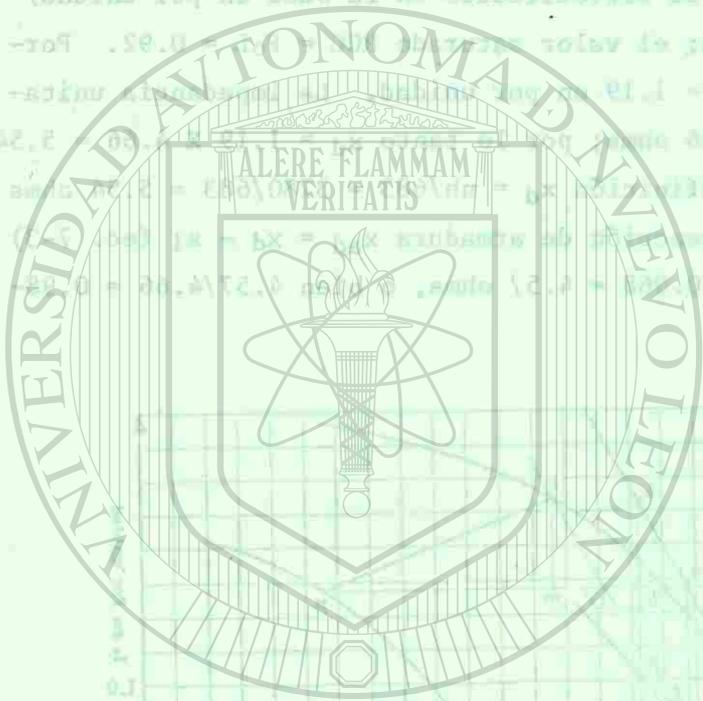
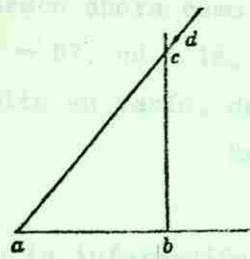


Fig. 8-17

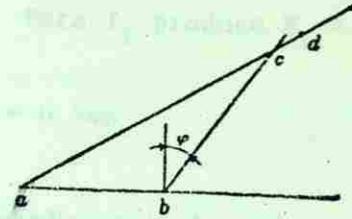


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA



(a)



(b)

Fig. 8-18

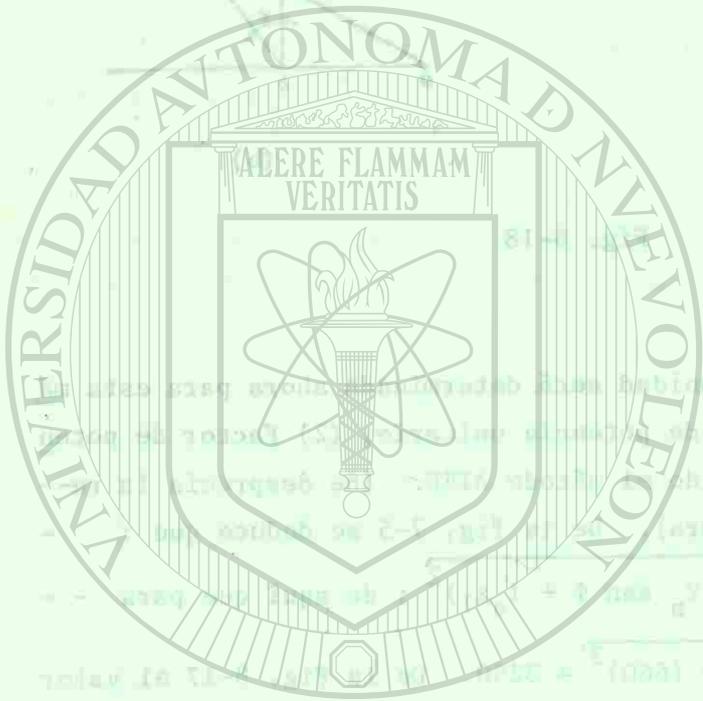
La regulación en por unidad será determinada ahora para esta máquina para (1) factor de potencia unitario, (2) Factor de potencia 0.8 atrasado, usando el método AIEE. (Se desprecia la resistencia de la armadura). De la fig. 7-5 se deduce que :

$$E = \sqrt{(V_n \cos \phi)^2 + (V_n \sin \phi + I_a x_1)^2}; \text{ de aquí que para } \phi = 0, E = \sqrt{(3180)^2 + (660)^2} = 3250.$$

De la Fig. 8-17 el valor de $I_{fg} = Aa = 73$, $I_{fsh} = O_n = 87$, e $I_{fs} = ab = 8.6$. La fig. 8-15 se construye ahora como se muestra en la Fig. 8-18a en la que $ab = I_{fg} = 73$, $bc = I_{fsh} = 87$; entonces $ac = \sqrt{73^2 + 87^2} = 113.6$, $cd = 8$, y de aquí $I_{ft} = ad = 121.6$. Este valor de la corriente del campo produce $E_f = 3950$ en vacío (véase la fig. 8-17). De aquí $\text{Reg.} = (3950 - 3180)/3180 = 0.242$ a factor de potencia unitario.

Para $\cos \phi = 0.8$ corriente atrasada

$$E = \sqrt{(3180 \times 0.8)^2 + (3180 \times 0.6 + 660)^2} = 3615 \text{ volts.}$$



(e)

De la fig. 8-17 $I_{fg} = 73$, $I_{fsh} = 87$, $I_{fs} = 16$. La fig. 8-15 a-
parece ahora como la mostrada en la fig. 8-18b. Aquí $ab = 73$,
 $bc = 87$, $cd = 16$, $ad = 159.2$ amp. Esta I_f produce $E_f = 4280$ --
volts en vacío, de aquí.

$$\text{Reg} = \frac{4280 - 3180}{3180} = 0.346$$

Con la información dada en este ejemplo es instructivo dibujar-
el diagrama vectorial. Esto se hace únicamente para factor de-
potencia 0.8 atrasado (fig. 8-19). La figura está dibujada a --
escala, así que $V = 3180$, $E = 3615$, $M_r = 100$, $M_a = 71$, $M_f = - -$
 159.2 , $\cos \phi = 0.8$.

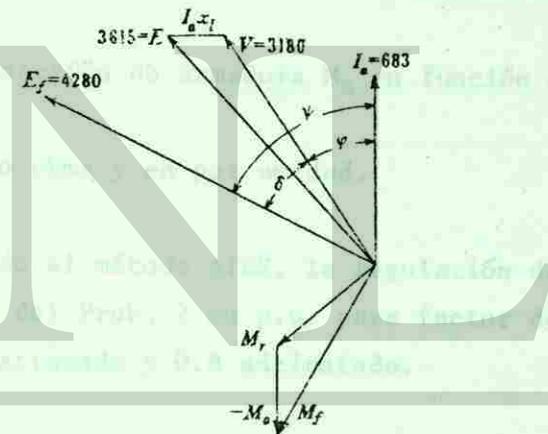


Fig. 8-19

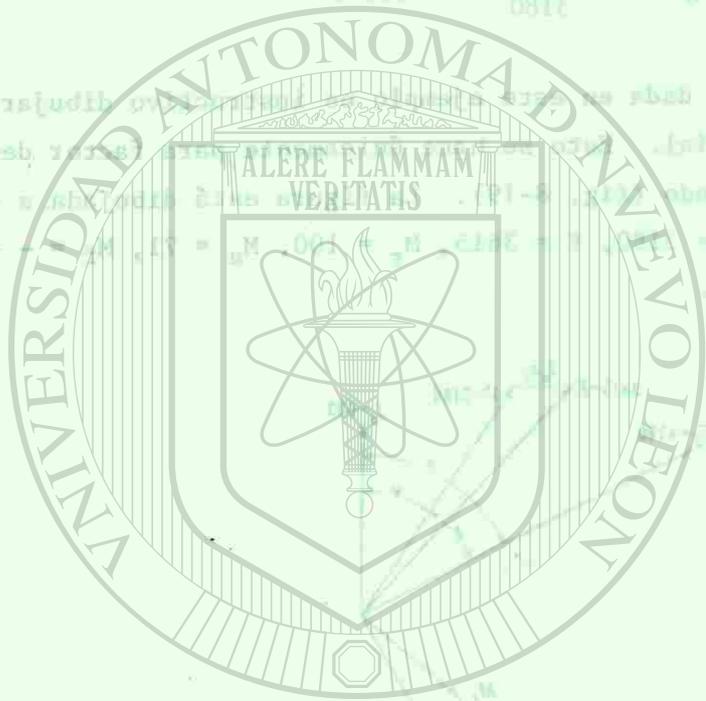
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

PROBLEMAS



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

1. Determinése para la máquina del ej. 8-1 la regulación de la -
tensión para factor de potencia 0.8 adelantado, y dibújense los-



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

diagramas de tensión y fmm.

2. Las curvas en vacío y de plena carga a factor de potencia cero para un turbogenerador trifásico conectado en Y de 12.0 kv, - 5000 kva y 60 hertz son como sigue, la tensión por-fase (resistencia de la armadura despreciable);

amp):	10	20	30	40	43.0	50	60	70	80	90	100	110
en vacío):	1750	3500	5120	6360	6700	7260	7860	8280	8580	8780	-	-
plena	-	-	-	-	0	1080	2720	4250	5380	6180	6750	7080
arga):												

(a) Constrúyase el triángulo de Potier y determínese x_l en ohms. y en por-unidad.

(b) Determínese la reacción de armadura M_a en función de los amperes del campo.

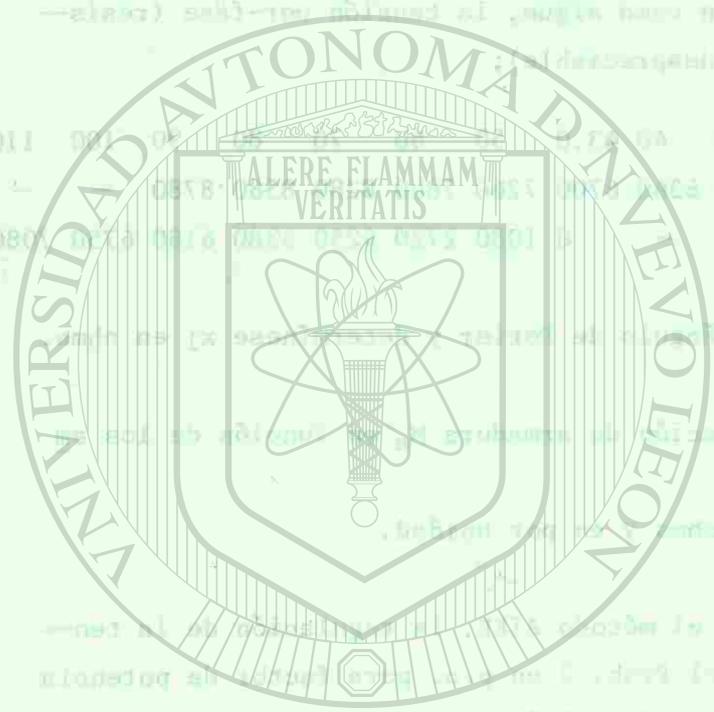
(c) Determínese x_d en ohms y en por unidad.

3. Determínese, usando el método AIEE, la regulación de la tensión para la máquina del Prob. 2 en p.u. para factor de potencia unitaria y para 0.8 atrasado y 0.8 adelantado.

4. Trácese para la máquina del Prob. 2 la característica de cortocircuito y determínese la RCC saturada y no saturada.

5. Las características en vacío y a plena carga factor de potencia cero de un turbogenerador enfriado por hidrógeno trifásico - de 23 500 kva, 13 800 volts, 60 hertz, 2 polos, 0.85 f.p. atrasado están dados abajo en valores en p.u.

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA
CARILLA ALFONSINA



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Características en vacío

I_f :	0.10	0.20	0.40	0.60	0.80	1.0	1.2	1.4	1.6
V(en vacío):	0.13	0.23	0.45	0.69	0.87	1.0	1.09	1.15	1.21

Característica factor de potencia cero

I_f :	1.2	1.3	1.4	1.6	1.7	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6
V(plena carga)	0.015	0.13	0.25	0.49	0.61	0.69	0.83	0.92	0.99	1.25

Amperes unitarios del campo = 185

Tensión unitaria = 13 800

Despréciase la resistencia de la armadura.

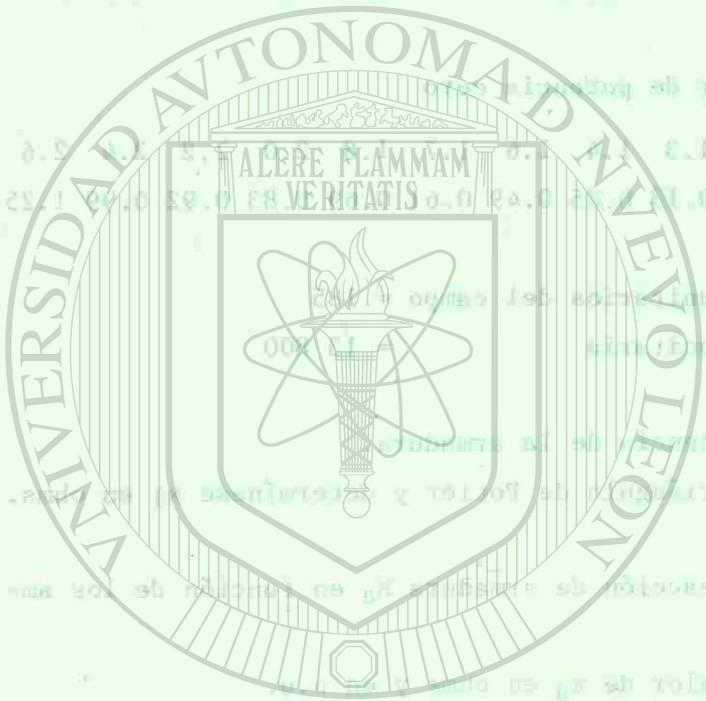
- (a) Constrúyase el triángulo de Potier y determínese x_1 en ohms. y en p.u.
- (b) Determínese la reacción de armadura M_a en función de los amperes del campo.
- (c) Determínese el valor de x_d en ohms y en p.u.

6. Determínese para la máquina del Prob. 5 la regulación de la tensión para f.p. 0.8 atrasado y f.p. 0.8 adelantado, usando el método AIEE.

Dibújense los diagramas vectoriales de fem y fmm. ®

7. Determínese la RCC no saturada para la máquina del Prob. 5

8. Un turbogenerador trifásico enfriado por hidrógeno de 70 600-



BIBLIOTECA UNIVERSITARIA
CARILLA ALFONSIANA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

kva, 13 800 volts, 60 herts, 2 polos, 0.85 de f.p. atrasado tiene características idénticas en vacío y plena carga, factor de potencia cero, que las del Prob. 5, en base en p.u. No obstante, para este generador.

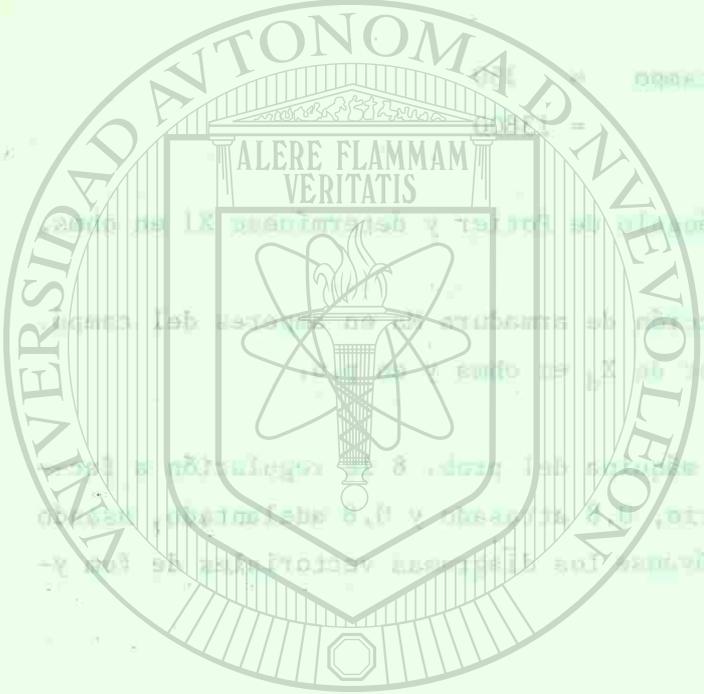
Amperes unitarios del campo = 350

Tensión unitaria = 13800

- (a) Constrúyase el triángulo de Potier y determínese X_l en ohms. y en p.u.
- (b) Determínese la reacción de armadura M_a en amperes del campo.
- (c) Determínese el valor de X_d en ohms y en p.u.

9. Determínese para la máquina del prob. 8 la regulación a factor de potencia unitario, 0.8 atrasado y 0.8 adelantado, usando el método AIEE. Constrúyanse los diagramas vectoriales de fem y fmm.

... 13 800 voltios, 60 hercios, 1 polo, 0.85 de l.p. atarado lra-
... de un tipo de bobinado idéntico en todo y plena carga, factor de -
... potencia cos φ, que sea del tipo 2, en base en p.u. No obstante,
... para cada generador.



... de un tipo de bobinado idéntico en todo y plena carga, factor de -
... potencia cos φ, que sea del tipo 2, en base en p.u. No obstante,
... para cada generador.

(a) Constatarse el tipo de bobinado y determinar el tipo de bobinado
y en p.u.
(b) Determinar la resistencia de armadura y en p.u. del generador
(c) Determinar el valor de la resistencia de armadura y en p.u. del generador
... para la máquina del tipo 2. 8 regulada a la
... de potencia máxima, 0.85 de l.p. y 0.85 de l.p. y
... según IEE. Constatarse los tipos de bobinado y

BIBLIOGRAFIA

MAQUINAS DE CORRIENTE ALTERNA
MICHAEL LIWSCHITZ-GARIK
CLYDE C. WHIPPLE

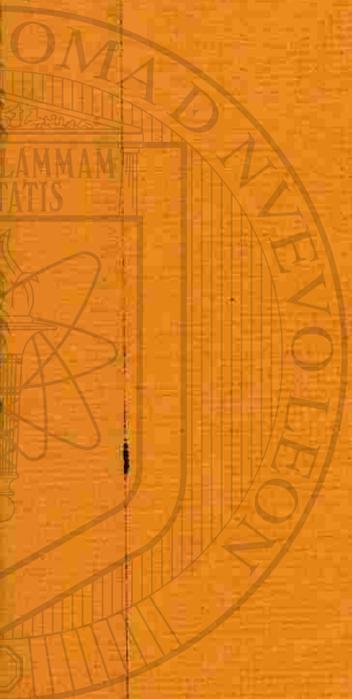
MAQUINAS ELECTRICAS - 2
M. KOSTENKO Y L. PIOTROVSKY

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA
CARILLA ALFONSINA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS





U A N L

SIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO

CCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECA