



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN

28  
29j

MAQUINAS SINCRONAS EN SISTEMAS  
ELECTRICOS

T E S I S

PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

QUE PRESENTAN

PETRA MEDEL ORTEGA

GUSTAVO MERCED MAR GONZALEZ



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# C O N T E N I D O

PAG.

INTRODUCCION ----- 1

## CAPITULO I

### PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

I-1 PRINCIPIO DE INDUCCION ELECTROMAGNETICA ----- 7

I-2 FUERZA QUE ACTUA SOBRE UN CONDUCTOR SITUADO EN UN  
CAMPO MAGNETICO----- 11

I-3 LEY DE FARADAY DE INDUCCION ELECTROMAGNETICA ----- 15

I-4 LEY DE LENZ ----- 18

I-5 GENERADOR BASICO DE C.A. ----- 26

I-6 DESCRIPCION GENERAL DE UNA MAQUINA SINCRONA ----- 33

I-7 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA MAQUINA SINCRONA- 35

I-8 TIPOS DE GENERADORES DE C.A. ----- 38

## CAPITULO II

### CARACTERISTICAS DE CONSTRUCCION

II-1 DISEÑOS FUNDAMENTALES DE MAQUINAS SINCRONAS ----- 45

II-2 DEVANADOS DE INDUCIDO ----- 58

II-3 DEVANADOS DE INDUCIDO DE LA MAQUINA SINCRONA DE CO  
RRIENTE ALTERNA ----- 62

II-4 CLASIFICACION TEORICA DE LOS DEVANADOS DE INDUCIDO-	73
II-5 DEVANADOS CON NUMERO DE RANURAS FRACCIONARIO -----	79
II-6 ANALISIS ARMONICO -----	85
II-7 REACTANCIA DE LAS MAQUINAS SINCRONAS -----	89
II-8 CALCULO APROXIMADO DE LAS REACTANCIAS -----	99

### CAPITULO III

#### PRUEBAS BASICAS

III-1 PRUEBAS BASICAS APLICADAS A LAS MAQUINAS SINCRONAS	
a) ENSAYO EN VACIO -----	107
b) ENSAYO DE CORTO CIRCUITO -----	108
c) ENSAYO DE CALENTAMIENTO MEDIANTE LECTURAS DE TEMPERATURA -----	111
d) ENSAYO DE CALENTAMIENTO DESPUES DE LA INSTALA CION -----	112
e) ENSAYO DE CALENTAMIENTO POR EL METODO INTERMI TENTE -----	112
f) ENSAYO DE CALENTAMIENTO A PLENA CARGA HACIENDO VARIAR EL ANGULO DE ACOPLAMIENTO -----	113
III-2 METODO PARA LA MEDICION DE PERDIDAS	
a) PRUEBA DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO -----	114

b) PRUEBAS DE CORRIENTE DIRECTA -----	117
c) PRUEBAS DE IMPULSO-----	120
d) PRUEBAS DE ALTA TENSION DE C.A. -----	122

### III-3 PROTECCION

a) PROTECCION CONTRA INCENDIOS -----	124
b) PROTECCION CONTRA SOBRETENSIONES -----	125

## CAPITULO IV

### ELEMENTOS DE UNA CENTRAL ELECTRICA ( C. HIDRAULICA )

IV-1 CAMARA DE TURBINAS -----	127
IV-2 TUBO DE ASPIRACION -----	137
IV-3 CANAL DE DESAGUE -----	140
IV-4 CASA DE MAQUINAS -----	141
IV-5 CENTRALES SUBTERRANEAS -----	151

## CAPITULO V

### SINCRONIZACION

V-1 SINCRONIZACION DEL ALTERNADOR -----	162
V-2 CONEXIONES " DELTA " E "Y" -----	165
V-3 SINCRONIZACION DE ALTERNADORES MONOFASICOS -----	172

V-4 REACCION DE LA CORRIENTE SINCRONIZANTE ENTRE ALTER NADORES MONOFASICOS -----	178
V-5 REPARTO DE CARGA ENTRE LOS ALTERNADORES -----	186
V-6 SINCRONIZACION DE ALTERNADORES POLIFASICOS -----	186

CAPITULO VI

ESTABILIDAD

VI-1 CARACTERISTICAS Y DIAGRAMAS VECTORIALES DE LAS MA QUINAS SINCRONAS ( REGULACION ) -----	195
VI-2 ESTABILIDAD DE LAS MAQUINAS SINCRONAS, ESTADO DE REGIMEN -----	197
VI-3 ESTABILIDAD TRANSITORIA DE LA MAQUINA SINCRONA ---	199
VI-4 DEFINICIONES E ILUSTRACIONES DE TERMINOS -----	201
VI-5 SISTEMAS MULTIMAQUINAS -----	212
VI-6 ANALOGIA MECANICA DE EL SISTEMA DE ESTABILIDAD----	213
VI-7 EFECTOS MALOS DE INESTABILIDAD -----	220
VI-8 CRITERIO DE AREA IGUAL PARA LA ESTABILIDAD -----	223
VI-9 APLICACION DEL CRITERIO -----	233
 C O N C L U S I O N E S -----	 238

## INTRODUCCION

Iniciaremos el estudio de un tema que es agradable para quien desea conocer diversos aspectos prácticos mínimos de - ¿ Qué es ?, ¿ Qué utilidad tiene en la vida práctica ?, ¿ Cómo funciona ?. Además de agradable, es útil para aquel que manifiesta interés por conocer o recordar situaciones en la vida práctica o quizás mejorar aún más su capacidad técnica o manual que ocasionalmente podrían sernos de gran ayuda en la vida diaria.

Como ciertos datos históricos, diremos que la fecha del descubrimiento de la electricidad se remonta a unos 2 500 años o sea a la época de los griegos. Se efectuó poco progreso en la ciencia de la electricidad, hasta que no fue descubierta la celda básica a fines del siglo XVIII, hasta entonces, no existía una fuente conveniente de energía eléctrica. En 1 800, Alessandro Volta construye la primera batería eléctrica práctica conocida como pila voltaica.

Las fuentes de energía, producen electricidad convirtiendo alguna otra forma de energía en fuerza eléctrica. Las fuentes de energía producen energía eléctrica originando cargas eléctricas.

cas, opuestas en dos o tres terminales. La diferencia de potencial o fuerza electromotriz ( fem ) entre las terminales, hace que la corriente eléctrica se mueva hacia la carga que está conectada a la fuente.

Las fuentes de energía más comunes son: la batería, el termopar, la celda fotovoltaica y el generador. Todas suministran un voltaje y una corriente eléctrica, pero cada una de ellas lo hace convirtiendo diferentes formas de energía. La batería convierte la energía química; El termopar, la energía calorífica; La celda fotovoltaica, la energía luminosa; y el generador, la energía mecánica.

Nuestro centro de atención, será en este caso un dispositivo que llamaremos generador de C. A. o alternador.

Básicamente un generador produce electricidad por la rotación de un grupo de conductores dentro de un campo magnético, - por lo tanto, la energía que entra a un generador es la energía mecánica, necesaria para hacer que giren los conductores, esta energía puede provenir de motores diesel, gasolina, o bien de - turbinas de vapor, motores eléctricos, agua corriente y hasta - de reactores atómicos. De hecho todo lo que puede hacer girar



a un eje, puede ser la energía que entre a un generador eléctrico. A la salida del generador, se obtiene la fem que se induce en los conductores cuando éstos se mueven a través del campo magnético, como un generador requiere de un campo magnético para funcionar, también podría definirse como un mecanismo que convierte la energía mecánica en eléctrica por medio de un campo magnético o por inducción magnética.

Desde el punto de vista de la cantidad total de potencia producida, los generadores constituyen la más importante fuente de energía utilizada actualmente en el mundo, ninguna otra fuente práctica de energía, puede producirse en tan grandes cantidades de potencia eléctrica como la que producen los generadores, ya sea en corriente continua ( CC ) o corriente alterna ( CA ). Sin embargo, esto no quiere decir que los generadores constituyen la mejor fuente de energía, ya que a diferencia de las baterías, no se puede usar en los casos en que se requiere una fuente de energía portátil. Además, a menudo resultan antieconómicos cuando se trata de producir poca potencia.

La secuencia que llevaremos para abordar la tecnología del generador, será de la siguiente manera: Primero tendremos un análisis introspectivo de los principios de funcionamiento de un

generador de CA, o sea, estudiaremos las reglas básicas que regulan el principio fundamental de un electroimán, precediendo con características de construcción, donde trataremos de visualizar la estructura y acomodo de partes móviles y fijas, tanto mecánicas como eléctricas y los arreglos que deben seguir los embobinados, para tener una idea de lo que es una prueba de rutina en un alternador y su aprovechamiento para localizar posibles fallas - actuales o futuras dependiendo del tipo de construcción; continuaremos con sus pruebas típicas. Posteriormente daremos un bosquejo de como se clasifican los sistemas de generación en plantas generadoras hidroeléctricas, dando una idea de lo que es, el muy importante concepto de capacidad instalada y la interrelación existente entre diversas plantas de generación, así como un breve estudio de partes componentes.

Teniendo lo anterior como concepto básico, podremos entonces analizar como están repartidos diferentes grupos de generadores funcionando a la vez en sincronía mediante sencillas reglas de control para tal efecto.

Finalmente, abordamos un tema que por su importancia y pocas veces tratado en la casi mayoría de temas afines, no se toca, y esto es la estabilidad de un sistema eléctrico que es vital pa

ra evitar esfuerzos inecesarios en todo grupo o sistema de gene  
ración y en cambio brindar la eficiencia de funcionamiento ne-  
cesaria para evitar derroches mecánicos, eléctricos y/o económi-  
cos.

Esperamos que éste grupo de conocimientos pueda resultar -  
positivos y favorecer al lector.

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

## I-1 PRINCIPIO DE INDUCCION ELECTROMAGNETICA

### LINEAS DE FUERZA:

Un campo magnético se acostumbra representar por líneas con tinuas llamadas líneas de fuerza, cuyo sentido en cualquier pun- to del campo es el de la fuerza que actúa sobre un polo norte si tuado en dicho punto, por lo tanto las líneas de fuerza salen de un polo norte y entran a un polo sur.

### INDUCCION ELECTROMAGNETICA:

Cuando el flujo electromagnético abrazado por una bobina su fre una variación, se genera o induce en ella una fuerza electro- motriz ( fem ) que es proporcional a la rapidéz con que varía - el flujo. En una bobina de una sola espira, se induce la ten- sión de un volt cuando el flujo abrazado por la espira varía a - razón de  $10^8$  maxwell por segundo.

### VALOR DE LA FEM INDUCIDA:

En la figura I-1, "N" y "S" son respectivamente los polos - de un imán, y "Ø" representa el sentido del flujo magnético que-

pasa de un polo a otro. Cuando la espira "A" se desvía en "t" segundos de la posición 1, donde el flujo abrazado por ella es " $\Phi$ ", a la posición 2 donde el flujo es cero, el valor de la fem inducida en la bobina es " $E$ " =  $(\Phi/t)^{-8}$  volts.

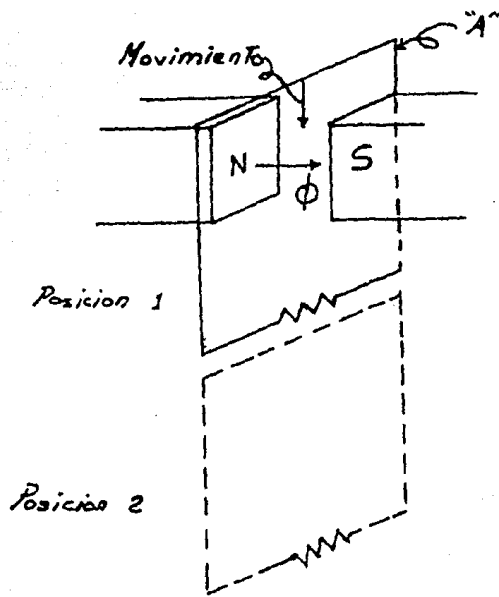
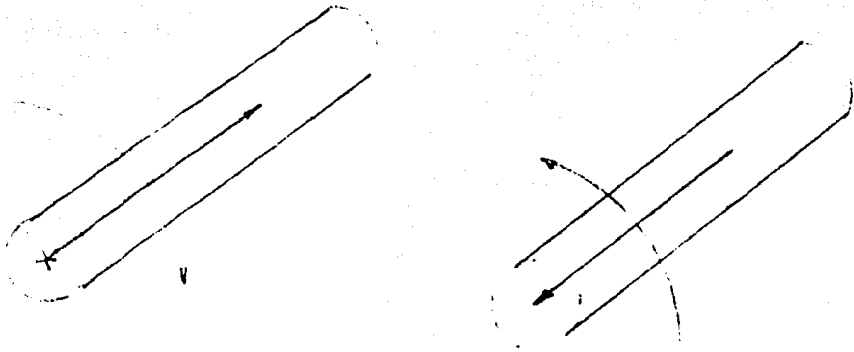


figura I-1

## SENTIDO DE LA FEM INOUCIDA:

El sentido de la fem inducida, puede deducirse facilmente con ayuda de la regla que dice: " el sentido de las líneas de fuerza alrededor de un inductor recorrido por una corriente - que se aleja de una persona que observa el extremo de dicho conductor, es igual al sentido de giro que las agujas del reloj". Es fácil recordar ésta regla si nos fijamos en que cuando un -- tornillo normal se hace girar según el movimiento de las agujas del reloj ( sentido de flujo ), el tornillo se aleja de la persona ( la corriente se aleja de la persona ), ésta concepción - de los sentidos de la corriente y el flujo puede aplicarse tanto si se trata de un generador de C.D. o C.A., como de un motor y es mucho más fácil de recordar y aplicar que la regla de la - mano derecha de Fleming.

En la fig. 1-2a se muestra que el sentido de la corriente - opuesta al observador, se indica por la cola de la flecha, las líneas de fuerza tienen el mismo sentido que el movimiento de - las manecillas del reloj. En la fig. 1-2b el sentido de la co - rriente hacia el observador, se indica por la punta de la fle - cha. La línea de fuerza tiene sentido contrario al movimien - to de las agujas del reloj.



a) El sentido de la corriente opuesta al observador, se indica por la cola de la flecha. Las líneas de fuerza tienen el mismo sentido que el movimiento de las agujas del reloj.

b) El sentido de la corriente hacia el observador, se indica por la punta de la flecha. La línea de fuerza tiene el sentido contrario al movimiento de las agujas del reloj.

Figura I-2

En la fig. I-3, se ve cuando el conductor "XY" se mueve hacia abajo, resulta envuelto por el flujo que va cortando en un sentido que es contrario al movimiento de las agujas del reloj, por lo tanto, el sentido de la corriente en el circuito exterior, debe ser de "Y" a "X". Aquí se debe hacer observar que lo que se induce es una fem, y que solamente circulará corriente cuando se cierre el circuito, la magnitud de ésta corriente dependerá de la



fem inducida y de las características de dicho circuito.

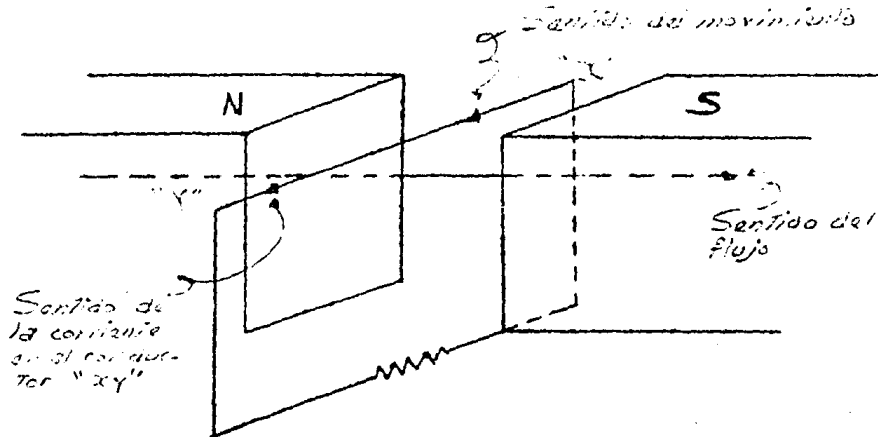


Figura I-3

## I-2 FUERZA QUE ACTUA SOBRE UN CONDUCTOR SITUADO EN UN CAMPO MAGNETICO

Un conductor de " $L$ " cm. de longitud, perpendicular a un campo magnético de " $B$ " gauss, y recorrido por una corriente de " $I$ " - amper está sometido a la acción de una fuerza de  $BLI/10$  dinas, cuyo sentido se puede determinar por la regla del parrafo anterior, ésta acción se comprende facilmente fijándose en lo que sigue: - las líneas de fuerza del campo magnético procedente del mismo polo de un imán, tienden a repelerse mutuamente, mientras que al --

mismo tiempo, cada línea tiende a hacer que la longitud de su recorrido hasta el polo opuesto sea lo más corta posible. Esto dá por resultado la dispersión de las líneas de fuerza en el espacio, lo cual puede observarse fácilmente haciendo visibles estas líneas colocando un imán debajo de un papel y espolvoreando la parte superior de éste con limaduras de hierro. Al orientarse las limaduras sobre el papel señalarán la distribución de las líneas de fuerza.

Recíprocamente, las líneas de fuerza de polaridad opuesta, es decir, que circulan en sentido contrario, se atraerán mutuamente. De ésta forma, si por un conductor situado en un campo magnético y perpendicular a las líneas de fuerza, no circula corriente alguna, tampoco estará sometido a la acción de ninguna fuerza.

Pero si se hace circular una determinada corriente por dicho conductor, éste resultará envuelto por líneas de fuerza cuyo sentido dependerá del sentido en que circule la corriente. Entonces sobre el conductor se hará presente una fuerza que será proporcional a la magnitud del campo magnético y a la intensidad de la corriente en el conductor; si ésta fuerza es superior a la que mantiene al conductor en su lugar, éste se moverá. En la

fig. I-4 las líneas horizontales representan las líneas de fuerza de un campo magnético cuyo polo norte está a la izquierda, y el sur a la derecha. El conductor está recorrido por una corriente cuyo sentido viene indicado por la flecha; Esta corriente origina alrededor del conductor, las líneas de fuerza representadas -- por círculos y del sentido que indican las flechas. En la parte superior del conductor, las líneas de fuerza del campo magnético y las debidas a la corriente en el conductor tienen el mismo sentido, y por lo tanto se repelen, originando sobre el conductor una fuerza que tiende a moverlo hacia abajo. En la parte inferior del conductor, las líneas de fuerza del campo y las que rodean éste último tienen sentidos opuestos, y por lo tanto se atraen en ejerciendo sobre el conductor una fuerza que también va dirigida hacia abajo. En este caso tenemos el funcionamiento como motor.

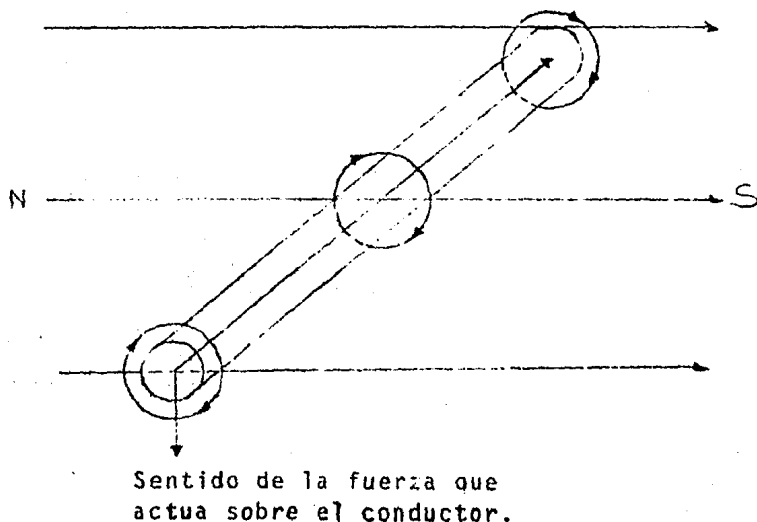


Figura I-4

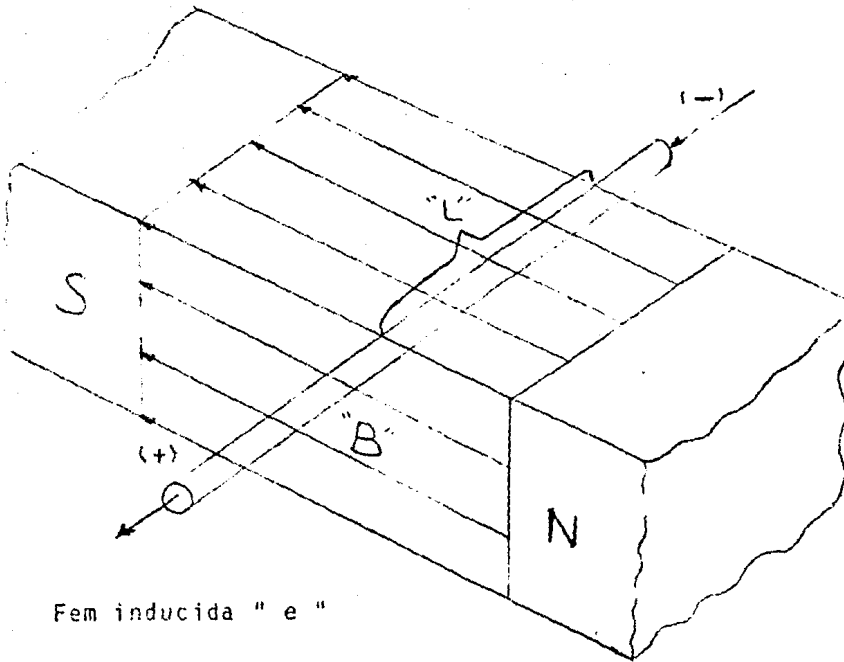
Si se suprime la corriente en el conductor, no será necesario ningún esfuerzo para mover mecánicamente el conductor hacia abajo, y al hacerlo éste resultará envuelto por las líneas de fuerza que va cortando en un sentido que es opuesto al de las manecillas del reloj, y por lo tanto se inducirá en el conductor una fem dirigida hacia el observador. Si ahora se conecta un circuito exterior al conductor aparecerá una corriente del mismo sentido que la fem que la origina. Esta corriente creará unas líneas de fuerza que rodearán al conductor en sentido contrario al movimiento de las agujas del reloj. La acción de estas líneas de fuerza sobre las líneas de fuerza del campo es tal que originan en el conductor una fuerza dirigida hacia arriba y que por lo tanto se opone a la fuerza mecánica aplicada al conductor. Ésta fuerza mecánica obliga al conductor a cortar el flujo del campo magnético, induciéndose una fem capaz de suministrar una determinada corriente al circuito exterior. En este caso tenemos el funcionamiento como generador. Resulta pues que si se hace circular por un motor una corriente de una fuente exterior el motor girará en un sentido determinado ( que dependerá del campo magnético externo y del sentido de la corriente ), siempre que la potencia suministrada sea la suficiente. Si luego se suprime la carga mecánica, se desconecta la fuente exterior de energía eléctrica y se acciona la máquina mecánicamente, haciéndola girar

en el mismo sentido, la corriente que circulará por la máquina al conectarla a un circuito exterior apropiado ( una resistencia por ejemplo ) será de sentido opuesto al de la corriente que absorbía funcionando como motor.

### I-3 LEY DE FARADAY DE INDUCCION ELECTROMAGNETICA

Antes del descubrimiento de Faraday, fue generada una tensión en un circuito por medio de un dispositivo de naturaleza química análogo a una pila seca. La contribución singular del descubrimiento de Faraday fue la generación de una tensión debida al movimiento relativo entre un campo magnético y un conductor de electricidad. Faraday denominó a esta tensión, " tensión inducida", debido a que solo se produce cuando existe un movimiento relativo entre el conductor y el campo magnético, sin contacto físico entre ellos.

El principio de inducción electromagnética puede comprenderse con el siguiente diagrama:



Fem inducida " e "

CONDUCTOR DE LONGITUD "L" QUE SE MUEVE A TRAVEZ DE UN CAMPO MAGNETICO "B" GENERANDO UNA FEM.

FIGURA I-5

El enunciado general de la ley de Faraday, puede expresarse así. El valor de la tensión inducida en una sola espira de hilo, es proporcional a la velocidad de variación de las líneas de fuerza que la atraviesan.

Lo anterior, se puede expresar cuantitativamente con la si

guiente ecuación:

$$E_{med} = \frac{\emptyset}{t} \text{ abvolts} + \frac{\emptyset}{t} \times 10^{-8} \text{ volts.}$$

En la que " Emed " es la tensión media generada en una sola espira ( volts/espira ).

"  $\emptyset$  " es el número de maxwells o líneas de fuerza magnética concatenadas con la espira.

" t " es el tiempo en segundos en que son concatenadas  $\emptyset$  líneas "  $10^{-8}$  " es el número de líneas que una sola espira debe concatenar cada segundo a fin de inducir una tensión de 1 volt.

#### FACTORES QUE AFECTAN LA MAGNITUD DE LA FEM INDUCIDA

En las máquinas eléctricas rotatorias, la variación de concatenación de flujo, no queda claramente o no es fácilmente medible en cada espira individual a causa de la rotación, por consiguiente es más conveniente expresar esta velocidad de variación en relación con la densidad de flujo media ( supuesta constante ) y la velocidad relativa entre este campo y un conductor único que se --desplaza a través de él. En la fig. I-1 ( paginas anteriores ), para el conductor de longitud activa "L", la fem inducida instantánea puede expresarse como:

$$e = BLv10^{-8} \text{ volts}$$

En la que " B " es la densidad de flujo en gauss (líneas/cm<sup>2</sup>) " L " es la longitud de la parte activa del conductor que concatena el flujo en cm. o pulgadas, " v " es la velocidad relativa entre el conductor y el campo, en cm./seg. o plg./seg. En unidades inglesas la ecuación anterior puede expresarse:

$$e = .1/5 BLv 10^{-8} \text{ volts.}$$

En la que B está dada en kilolíneas

L " " en pulgadas

v " " en pulgadas/segundos

#### I-4 LEY DE LENZ

Los sentidos de la fem inducida y la corriente que circula por el conductor, establecen una relación definida con el cambio de la concatenación de flujo que las induce. Esta relación recibe el nombre de Ley de Lenz, que establece lo siguiente: " En todos los casos de inducción electromagnética, la tensión inducida tenderá a hacer circular en un circuito cerrado una corriente en sentido tal que su efecto magnético se oponga a la variación que-



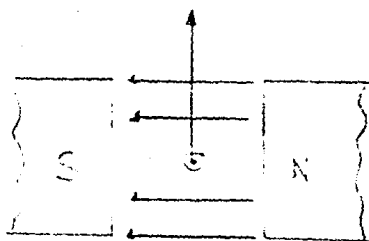
la ha engendrado. "

La anterior exposición de la Ley de Lenz implica tanto una causa como un efecto que se opone a la causa. La causa implicada no es necesariamente el movimiento del conductor que resulta de una fuerza mecánica, sino más bien una variación en la concatenación de flujo. El efecto implicado es una corriente ( debida a una tensión inducida ) cuyo campo se opone a la causa, por lo tanto, en todos los casos de inducción electromagnética, siempre que tiene lugar una variación en la concatenación de flujo, es inducida una tensión que tiende a establecer una corriente en un sentido tal que produzca un campo que se oponga a la variación del flujo que concatenan las espiras del circuito. Considerado desde este punto de vista, surge un concepto de la Ley de Lenz que satisface todos los casos de fem inducida, incluso la acción de los transformadores y los motores de inducción así como la fem inducida en los motores de corriente continua y generadores.

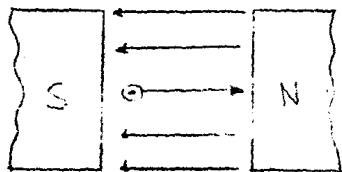
#### SENTIDO DE LA TENSION INDUCIDA. REGLA DE FLEMING

Cuando un conductor se desplaza hacia arriba como se indica en la fig. I-6c desde la parte inferior derecha hasta la parte superior izquierda, de modo que  $\theta$  sea menor de  $90^\circ$ , la tensión in

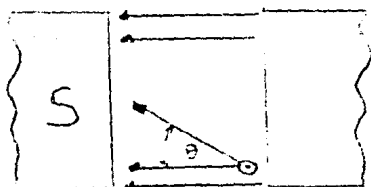
ducida " e " tendrá el mismo sentido y polaridad que el indicado - en la fig. I-6d, en la que  $\theta$  es mayor de  $90^\circ$ . Puesto que  $\text{sen } \theta$  es po sitivo para ángulos comprendidos entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$ , la " e " de la e cuación  $e = BLv \text{ sen } \theta$  es positiva en todas las direcciones que for men con "B" ángulos entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$ , o sea todo movimiento del con ductor hacia arriba. Análogamente, si la fuerza aplicada al con ductor tiende a moverlo hacia abajo como se indica en la fig. I-8d, el sentido de la tensión inducida será opuesto al indicado en la - fig. I-7, ya  $\theta$  es negativo para ángulos entre  $180^\circ$  y  $360^\circ$ ,  $\theta$  de la ecuación  $e = BLv \text{ sen } \theta$  es negativo para todas las direcciones en - general hacia abajo. Si el campo magnético se invierte, las pola ridades se invertirían. Por lo tanto la referencia básica para la polaridad y para el ángulo  $\theta$  es la dirección del campo magnético.



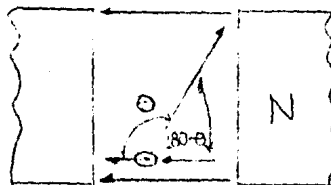
a) Conductor que se mueve nor malmente al flujo magnético



b) Conductor que se mueve pa ralelamente al flujo mag nético.



c) Conductor que se mueve formando un ángulo cualquiera con el flujo magnético

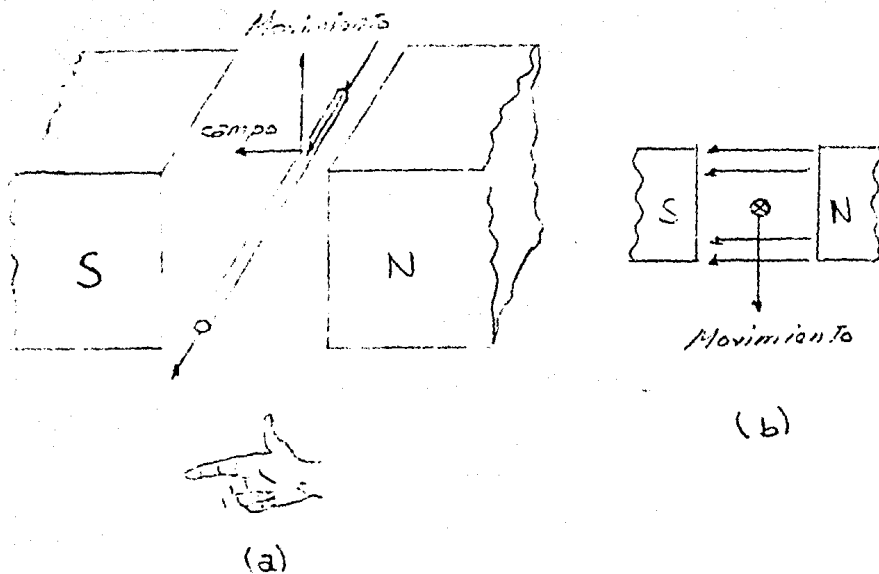


d) Conductor que se mueve formando un ángulo cualquiera con el flujo magnético.

EFFECTO DE LA VARIACION DE LA CONCATENACION DE FLUJO SOBRE LA FEM INDUCIDA EN UN CONDUCTOR.

Figura I-6

La relación entre los sentidos de la fem inducida, el campo magnético y el conductor, se representa con la regla de Fleming - que puede verse en la fig. I-7a. Cuando se trata de corriente convencional ( de sentido contrario al flujo de electrones ), para determinar el sentido de la fem generada, puede determinarse por la regla de Fleming de la mano derecha. ( ver fig. I-7).



REGLA DE FLEMING DE LA MANO DERECHA PARA DETERMINAR EL SENTIDO DE LA FEMINDUCIDA

Figura I-7

La regla de Fleming de la mano derecha presupone que el campo es fijo y el conductor se mueve con respecto al campo fijo ( de referencia ). Puesto que la tensión inducida depende del movimiento relativo entre el conductor y el campo, puede aplicarse en el -

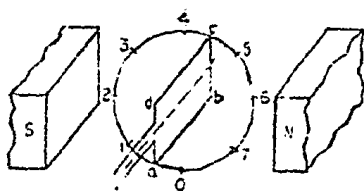
caso de un conductor fijo y un conductor móvil, pero suponiendo -- que el conductor se mueve en sentido opuesto. Puesto que el pul-- gar en la fig. I-7a. indica la dirección del movimiento relativo , hacia arriba solo del conductor, el sentido de la fem inducida en la fig. representaría el movimiento hacia abajo del campo respecto al conductor inmóvil. Utilizando el pulgar para representar el mo-- vimiento del conductor, el dedo índice para representar el sentido del campo magnético y el dedo medio para representar la fem induci-- da, se puede verificar el sentido de la fem inducida en la fig. I-7b que es opuesto al de la fig. I-7a a causa de que se ha invertido su sentido.

#### FEM SENOIDAL GENERADA POR UNA BOBINA QUE GIRA EN UN CAMPO MAGNETICO A VELOCIDAD CONSTANTE

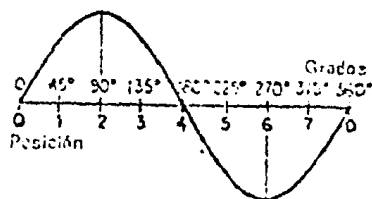
Si la bobina de una sola espira de la fig. I-8 gira en un cam-- po magnético uniforme a velocidad constante, la fem inducida en un lado determinado de la bobina, variará al ocupar la bobina las posi-- ciones de " 0 " a " 7 ", como se indica en la fig.

Utilizando el lado " ab " como referencia, nótese que cuando-- éste lado de la bobina se encuentra en la posición " 0 ", indicada en la fig. I-8a, la fem inducida en la bobina es cero, ya que el -

conductor " ab " ( y el conductor " cd " lo mismo ) se mueve paralelamente al campo magnético y por tanto no experimenta variación en la concatenación del flujo, cuando el conducto " ab " se desplaza a la posición " l ", girando en el sentido de las agujas del reloj, corta al campo magnético uniforme con un ángulo de  $45^\circ$ . La fem inducida que se mueve hacia arriba con respecto a una carga externa, será positiva y alcanzará el 70.7% aproximadamente de la tensión inducida máxima.



(a) Posiciones instantáneas de rotación a velocidad constante.



(b) Fem en las posiciones respectivas.

### FEM GENERADA POR UNA BOBINA QUE SE MUEVE EN UN CAMPO UNIFORME

Figura I-8

La variación de tensión, puede verse graficamente en la fig. I-8b, en la que la fem es positiva en la posición " l " y tiene el valor dado aproximadamente. Cuando la bobina alcanza los  $90^\circ$

( posición 2 ), el conductor " ab " representa el máximo de concatenación de flujo, ya que está moviéndose perpendicularmente al campo magnético, por lo que representa el máximo valor positivo indicado en la fig. anterior, la posición 3, que corresponde a  $135^\circ$  de rotación, establece una fem en el lado de la bobina idéntico al producido en la posición " 1 " (  $\text{sen } 135^\circ - \text{sen } 45^\circ$  ) con polaridad positiva ya que el conductor aún se está moviendo hacia arriba, pero la variación en la concatenación de flujo se produce a menor velocidad que en la posición 2. Cuando el conductor " ab " alcanza los  $180^\circ$  ( posición 4 ), la fem inducida de nuevo es cero, ya que no varía la concatenación de flujo cuando un conductor se mueve paralelamente al campo magnético. En la posición 5 corresponde a  $225^\circ$ , la fem inducida en el conductor " ab " se invierte ya que el conductor " ab " se --mueve ahora hacia abajo en el mismo campo magnético uniforme. La fem inducida aumenta hacia un máximo negativo de  $270^\circ$  ( posición 6 ), y finalmente disminuye al pasar por la posición 7 hasta cero en la posición cero.



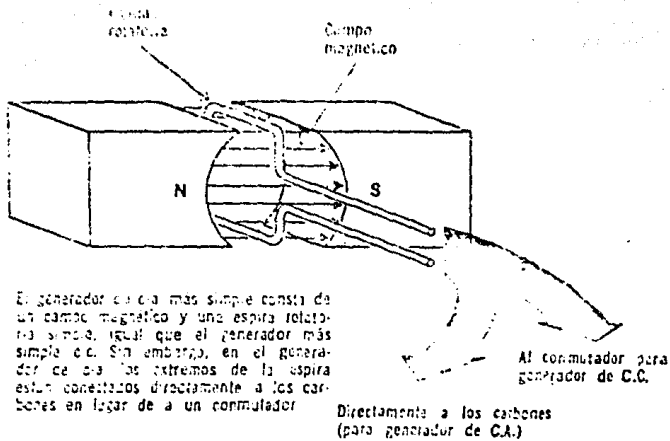


CA se convierte entonces en CC por la acción del conmutador y las escobillas. El conmutador cambia de CA a CC cambiando la conexión de escobillas de un extremo a otro de la bobina rotatoria, cada vez que el voltaje inducido en la espira invierte su polaridad. Esta interrupción se efectúa de tal manera que una escobilla siempre está en contacto con el extremo positivo de la espira, en tanto que la otra escobilla siempre está en contacto con el extremo negativo de la espira. Por lo tanto, el voltaje existente entre las escobillas, que es voltaje de salida del generador es de CC.

Si se eliminara el conmutador, uniendo cada escobilla conectada permanentemente con un extremo de la espira rotatoria, el voltaje que hay entre las escobillas sería exactamente el voltaje existente entre los extremos de la bobina. Como se sabe, éste es un voltaje de CA. Así pues, eliminando el conmutador y conectando permanentemente, en alguna forma, las escobillas a extremos opuestos de la espira, el generador básico de CC se puede convertir en un generador simple de CA.

Naturalmente, los extremos de la espira, no pueden conectarse directamente a las escobillas, debido a que los extremos deben girar libremente con la espira; si no pudieran girar li-

brevemente, las escobillas deben estar conectadas permanentemente a los extremos de la bobina sin interferir en su capacidad de girar. ( ver fig. I-10 ).



El generador de c.a. más simple consta de un campo magnético y una espira rotatoria simple, igual que el generador más simple de c.c. Sin embargo, en el generador de c.a. los extremos de la espira están conectados directamente a los carbones en lugar de a un conmutador

Directamente a los carbones  
(para generador de C.A.)

Figura I-10

## ANILLOS ROZANTES

En un generador de CA, no se requiere convertir de CA a CC de manera que en lugar de conmutador, todo lo que se necesita, es un medio para comunicar el voltaje inducido en las escobillas. Esto se logra instalando anillos metálicos en los extremos de la bobina rotatoria, cada anillo se ajusta a un extremo de la bobina y ambos anillos giran al girar la bobina. Estos anillos se llaman anillos rozantes.

Cada anillo rozante, está permanentemente conectado al extremo respectivo de la bobina rotatoria, de manera que el voltaje inducido en la bobina aparece entre los anillos. Las escobillas están unidas a los anillos rozantes, haciendo contacto eléctrico con ellos. Así pues, cada escobilla está siempre en contacto con el anillo rozante correspondiente, el cual a su vez, está permanentemente conectado a un extremo de la bobina. El resultado es que entre las escobillas se origina un voltaje de CA inducido en la bobina y éste puede transmitirse a un circuito externo. ( ver fig. I-II ).

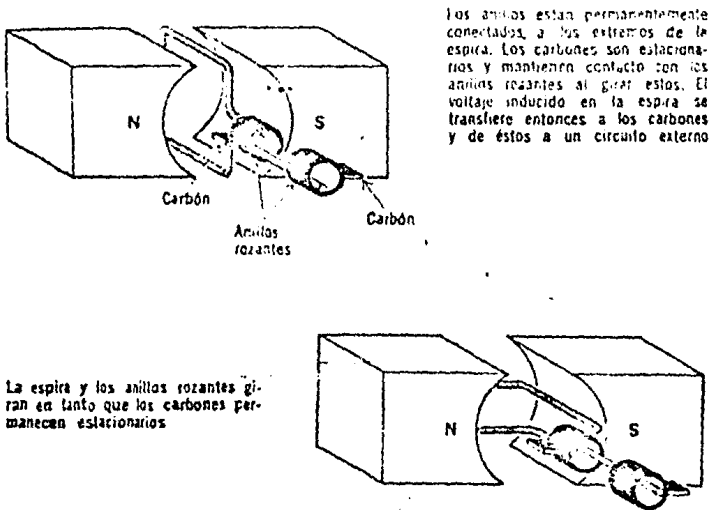


Figura I-II

## AUMENTO DEL NUMERO DE POLOS

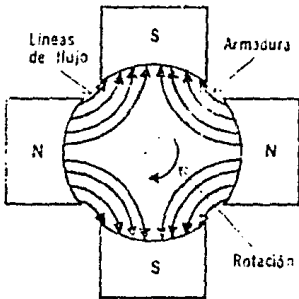
El voltaje de salida de un generador simple de CA, es máximo cuando los lados de la espira pasan frente a los centros de los polos. La razón es que en éstos puntos, los lados de la bobina cortan el número máximo de líneas de flujo. Si se usaran cuatro polos en lugar de dos, el voltaje de salida seguiría alcanzando un valor máximo cuando los lados de bobina pasaran - - frente a los polos. Sin embargo, como el número de polos se ha duplicado, el voltaje sería máximo cuatro veces durante cada ro

tación completa de la espira, en lugar de dos veces como ocurre en el caso de un generador de dos polos.

Si entre los polos existen espacios iguales, esto significa que se genera un ciclo de cada onda sinusoidal en el voltaje de salida cada vez que la espira se transporta  $180^\circ$ , o sea, la mitad de una rotación. Por lo tanto, la frecuencia del voltaje de salida de CA es lo doble de la velocidad de rotación de la espira. Por ejemplo, si la espira gira 30 veces en un segundo, la frecuencia del voltaje es de 60 ciclos por segundo ( cps ).

Debe ser obvio que, para determinada velocidad de rotación, cuanto mayor número de polos se tenga, más alta será la frecuencia del voltaje del generador. Una relación general entre la velocidad de rotación de una sola espira, el número de polos y la frecuencia, puede establecerse de la manera siguiente: La frecuencia es igual al número de pares de polos. Así pues, si se usan seis polos y la espira gira diez veces por segundo, la frecuencia del voltaje de salida es 10 por 3, o sea, 30 cps. Nótese que lo que se usa para determinar la frecuencia, es el número de pares de polos y no el número de polos individuales.

En un generador de cuatro polos, los lados de la espira cortan el máximo número de líneas de flujo cuatro veces durante cada rotación completa de la espira.



Los cuatro puntos de voltaje máximo ocurren cuando los lados de la espira pasan por los centros de los cuatro polos.

En un generador de cuatro polos, se generan dos ciclos del voltaje de salida para cada rotación completa de la espira.

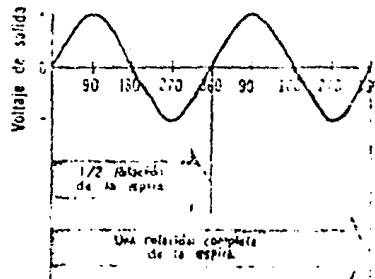


Figura I-12

## I-6 DESCRIPCION GENERAL DE UNA MAQUINA SINCRONA

Una máquina síncrona, consta de un circuito magnético, circuitos eléctricos y soportes mecánicos. El circuito magnético consta de un número par de polos magnéticos que alternativamente son norte y sur; En general, es necesario solamente considerar un solo par de polos para estudiar las características eléctricas de una máquina síncrona.

### TIPOS FUNDAMENTALES DE MAQUINAS DE CA

Hay dos tipos fundamentales de máquinas de CA:

a) Síncronas y b) asíncronas, éstas últimas se denominan usualmente máquinas de inducción, y se subdividen en máquinas sin colector y máquinas con colector.

En una máquina síncrona existe una relación entre la velocidad del campo y la frecuencia de la línea o red de suministro de energía eléctrica, es decir:

$$f = n/p \quad \text{ó} \quad n = fp$$

Siendo "p" el número de pares de polos de la máquina

"n" la velocidad del campo

"f" la frecuencia de la línea de suministro de energía

El generador síncrono se excita con CC alimentada al arrollamiento de excitación localizado en polos concentrados del rotor.

El motor síncrono se excita con CC alimentada al rotor y CA al estator. Esta excitación de CA se toma de una máquina llamada excitadora. También se construyen máquinas síncronas con imanes permanentes, llamadas de reluctancia o de inducción con una frecuencia dada "f", la velocidad "w" depende de la carga y por lo tanto.

$$f \neq pw$$

donde "w" es la velocidad del rotor.

En una máquina de inducción el campo magnético lo crea una CA suministrada a la máquina por una fuente ó red de CA.

Tanto las máquinas síncronas como las asíncronas de rotor-devanado son de funcionamiento reversible, es decir, pueden fun

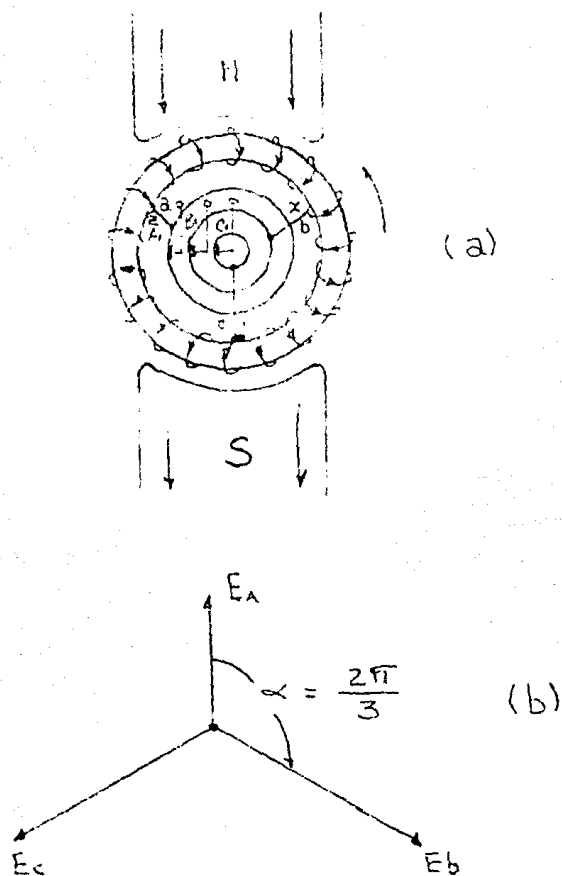


cionar como motores o como generadores. Las síncronas se utilizan principalmente para la producción de potencia de CA en las centrales de energía eléctrica.

A diferencia de las máquinas síncronas, las asíncronas se utilizan principalmente como motores.

#### I-7 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA MAQUINA SINCRONA

El principio de funcionamiento de la máquina síncrona es esencialmente el mismo que el de una máquina de CC con la diferencia de que en el generador síncrono no es necesario rectificar la fem del inducido, por consiguiente una máquina síncrona no tiene conmutador. La fig. I-13 representa la disposición básica de un generador bipolar con inducido de anillo.



CIRCUITO FUNDAMENTAL DE UN GENERADOR  
TRIFASICO SINCRONO

Figura I-13

Para obtener la forma más sencilla de un generador síncrono trifásico

con ésta disposición, es necesario elegir en la periferia del inducido tres puntos, "a", "b", "c", separados angularmente entre sí  $\alpha = \frac{2\pi}{3}$  y conectarlos a tres anillos rozantes respectivos montados sobre el eje de la máquina y aislados de éste y entre sí, para establecer las conexiones entre ellos y un circuito de recolección de CA, mediante un sistema de escobillas "A", "B", "C", en contacto con los anillos y los bornes o terminales "A", "B", "C". En éste caso tenemos un inducido con tres arrollamientos o devanados conectados en delta o estrella a-x, b-y, c-z. Cuando el inducido gira en un campo magnético, en los arrollamientos a-x, b-y, c-z, se inducen las fems  $E_A$ ,  $E_B$ ,  $E_C$ , éstas están desplazadas entre sí un ángulo  $\alpha = \frac{2\pi}{3}$  y su frecuencia es  $f = p\omega$ . Si la carga está equilibrada en el circuito, la máquina crea un sistema trifásico de corrientes equilibradas  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  y en el caso general, las corrientes de las respectivas fases están desplazadas con respecto a la fem de su arrollamiento, un ángulo  $\theta$  terminado por la naturaleza de la carga. Se demuestra que tal sistema de corrientes, produce un campo magnético cuya onda fundamental gira con respecto al inducido con una velocidad  $n = f/p$  en sentido contrario al de rotación del inductor.

De acuerdo con el principio de reversibilidad, la máquina puede funcionar así mismo como motor síncrono si se le alimenta-

con energía eléctrica de un circuito trifásico al estator.

En el caso general, se puede establecer un sistema de "m" - fases si se toma en una máquina bipolar "m" puntos uniformemente-espaciados en la periferia del inducido ( $\alpha = 2\pi/m$ ) y se les conecta a un circuito de CA por medio de "m" anillos rozantes montados sobre el eje y "m" escobillas, debajo de las cuales se deslizan - los anillos.

#### I-8 TIPOS DE GENERADORES DE C.A.

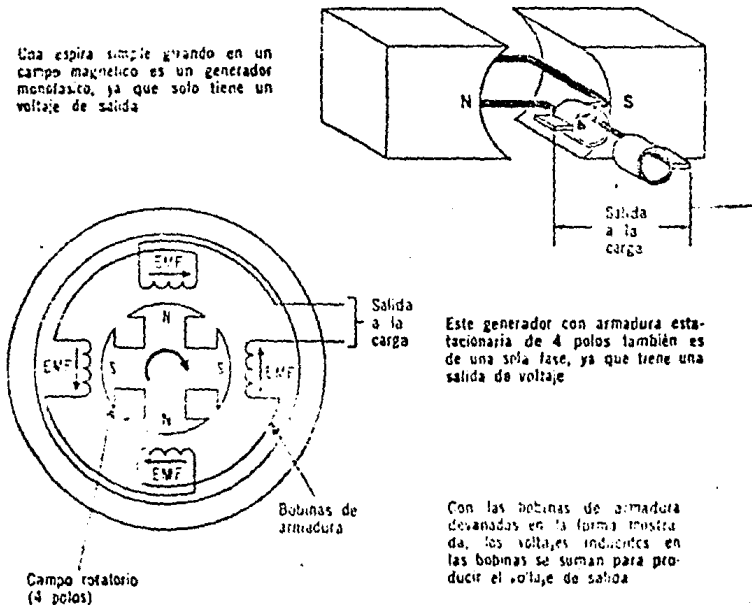
##### GENERADORES DE C.A. MONOFASICOS

hasta ahora, la armadura de los generadores de C.A. ha sido representada por una sola espira. El voltaje inducido en esta - espira sería muy pequeño; pero en realidad la armadura consta de numerosas bobinas, cada una con más de una espira. Las bobinas están devanadas de manera que cada uno de los voltajes en las espiras de cualquier bobina se suman para producir el voltaje total de la bobina. Las bobinas se pueden conectar de varias maneras, según el método específico que se use para darle las características deseadas al generador.

Si todas las bobinas de armadura se conectan en serie aditiva al generador, tiene una salida única. La salida es sinusoidal y -

en cualquier instante es igual en amplitud a la suma de voltajes inducidos en cada una de las bobinas. Un generador con armadura devanada en esta forma es un generador de una fase o monofásico. Todas las bobinas conectadas en serie, constituyen el devanado de armadura en la práctica, muy pocos generadores de C.A. son monofásicos, ya que puede obtenerse una mayor eficiencia conectando las bobinas de armadura mediante otro sistema.

Ver figura I-14

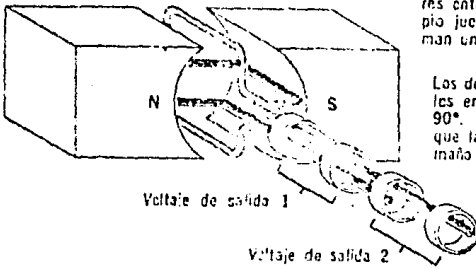


## GENERADORES DE C.A. BIFASICOS

En un generador bifásico, las bobinas de armadura están devanadas de manera que el generador tenga dos voltajes de salida separados que difieren en fase por  $90^\circ$ . Un generador simple bifásico de espira rotatoria consta de dos espiras perpendiculares entre sí; cada espira está conectada a su propio juego de anillos rozantes. Cuando el voltaje inducido en cada espira es máximo, el voltaje en la otra es cero y viceversa. Por lo tanto, los voltajes obtenidos en los anillos rozantes difieren  $90^\circ$  en fase.

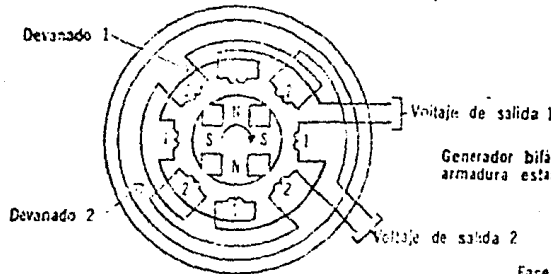
Las bobinas de armadura de un generador bifásico real con una armadura estacionaria, se dividen en dos devanados monofásicos. espaciando cada bobina de los dos devanados de manera que los voltajes inducidos en ambos estén defasados  $90^\circ$ . Ver fig. siguiente ( Fig. - I-15)

Generador de espira rotatoria de dos fases



Las espiras rotatorias perpendiculares entre sí, cada una con su propio juego de anillos rozantes, forman un generador de dos fases

Los dos voltajes de salida son iguales en amplitud y están adelantados 90°. Esto, naturalmente, supone que las espiras son del mismo tamaño



Generador bifásico con armadura estacionaria

Al girar el campo, induce el voltaje máximo primero en un devanado y luego en el otro. Las bobinas de los devanados están espaciadas de manera que existe una diferencia de 90° entre los voltajes inducidos en los dos devanados

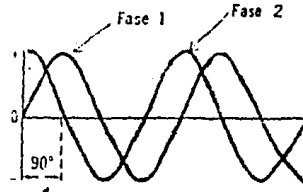


Figura I-15

### GENERADORES DE C.A. TRIFASICOS

Básicamente, los principios de un generador trifásico, son los mismos que los de un generador bifásico, excepto que se tienen tres devanados espaciados igualmente y tres voltajes de salida defasado 120 grados entre sí. A continuación se ilustra un generador simple trifásico de espira rotatoria, incluyendo las formas de onda. Físicamente, las espiras adyacentes están sepa-

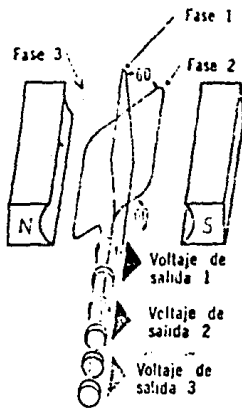
radas por un ángulo equivalente a 60 grados de rotación. Sin embargo, los extremos de la espira están conectados a los anillos-rozantes de manera que la tensión 1 está adelantada 120 grados con respecto a la tensión 2; y la tensión 2, a su vez, está adelantada 120 grados con respecto a la tensión 3.

También se muestra un diagrama simplificado de un generador trifásico de armadura estacionaria. En este diagrama, las bobinas de cada devanado se convinan y estan representadas por una sola. Además, no aparece el campo rotatorio. La ilustración muestra que el generador trifásico tiene tres devanados de armadura separados, defasado 120 grados.

A continuación se muestra la figura.



Generador trifásico de espira rotatoria



Un generador trifásico produce tres voltajes iguales desfasados  $120^\circ$

Generador trifásico de armadura estacionaria

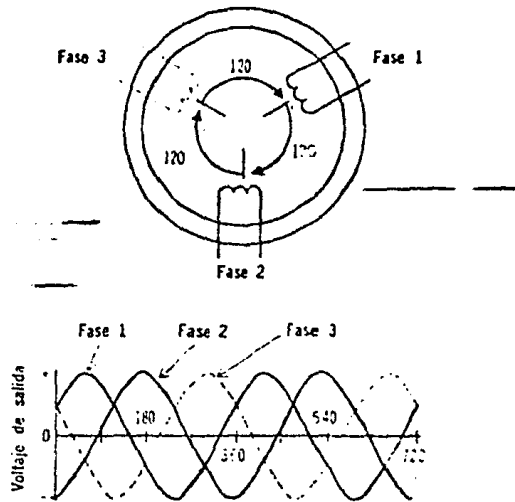


Figura I-16

## II CARACTERISTICAS DE CONSTRUCCION

## II-1 DISEÑOS FUNDAMENTALES DE MÁQUINAS SINCRONAS

La disposición de las partes esenciales de una máquina síncrona con polos fijos e inducido giratorio, solo es posible en la práctica para máquinas de poca potencia. En las de alta y media potencia, esta disposición es completamente inadecuada porque el contacto entre las escobillas y los anillos rozantes sería inseguro con tensiones altas.

Una larga experiencia en la construcción y en el funcionamiento de las máquinas síncronas ha demostrado que la construcción más práctica y económica es aquella en la que los elementos fundamentales de la máquina están situados de manera que los polos excitados por la CC, están colocados en la parte giratoria de la máquina denominada rotor, mientras que el inducido de CA está colocado en la parte fija llamada estator, por consiguiente, en las explicaciones que siguen, nos referimos siempre a este tipo de máquina.

En lo que respecta al diseño, existen dos tipos fundamentales de máquinas síncronas a saber, a) El de polos no salientes, es decir máquinas de polos que no sobresalen ( fig. II-1a y b ) de polos salientes, es decir máquinas en que los polos sobresalen ( fig. II-1b ).

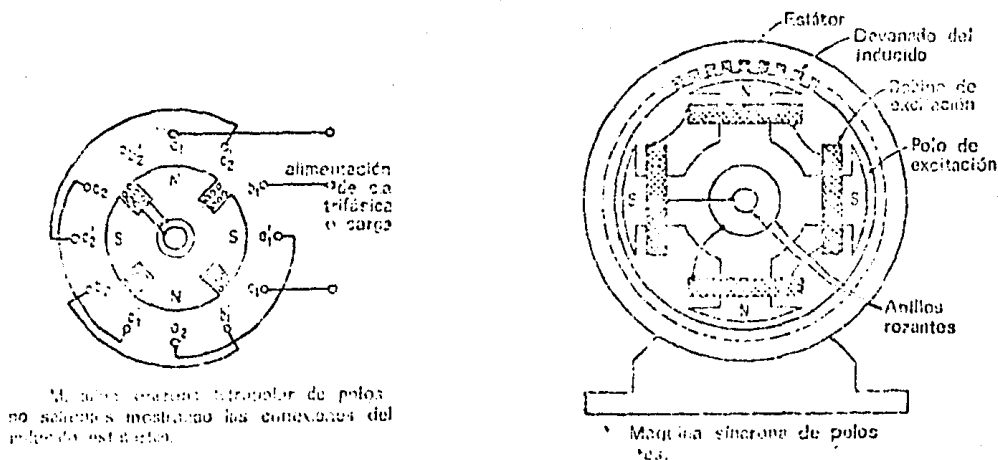


Figura II-1

El que el diseño sea de uno u otro tipo depende de la velocidad de rotación. Las máquinas de alta potencia tienen una velocidad periférica del rotor muy alta ( tabla II-1 ) que por razones de resistencia mecánica, mejor acomodación y esfuerzo del arrollamiento de excitación, este está distribuido en toda la superficie del rotor, es decir, construido como tipo de polos no salientes.

Los generadores síncronos suelen ser impulsados por turbinas de vapor ó hidraulicas. En el primer caso, el generador síncrono se llama turbogenerador y en el segundo hidrogenerador.

Las turbinas de vapor, son máquinas de la clase de alta velocidad y, de acuerdo con ello, los generadores se construyen como máquinas de polos no salientes. En cambio, los hidrogenadores son - máquinas de polos salientes, puesto que las turbinas hidráulicas, son máquinas de baja velocidad. También se construyen de polos - salientes en generadores síncronos impulsados por motores de combustión interna y en motores síncronos y condensadores, pero en - los casos en que es necesario que los motores síncronos funcionen a alta velocidad ( por ejemplo para impulsar un turbocompresor), se construyen, lo mismo que los turbogeneradores como máquinas de polos no salientes.

#### DISEÑO DE MAQUINAS SINCRONAS DE POLOS SALIENTES

El diseño de eje horizontal, es el ordinario para las máqui- nas de polos salientes y se emplea en la gran mayoría de motores- síncronos y para los generadores destinados a ser acoplados a los motores de combustión interna y en muchos casos también para los- generadores de velocidades muy bajas ( 200 rpm y más ).

Los hidrogenadores de baja velocidad y alta potencia ins- talados en las centrales hidroeléctricas, están construídos con e- je vertical acoplado al eje de la turbina hidráulica situada deba

jo del generador. También se construyen con eje vertical los motores para grandes bombas de agua.

Las máquinas síncronas de polos salientes difieren conside-  
rablemente en cuanto a construcción de las máquinas de polos no-  
salientes, por ejemplo en un turbogenerador de 1 00000 kw. la lon-  
gitud del rotor "L" excede del diámetro interior "D" unas seis -  
veces ( tabla II-1) mientras que los hidrogeneradores de alta ve-  
locidad, pueden tener diámetros hasta de 15m. y una relación de  
0.15 a 0.20

Datos de turbogenerador trifásico 50 c/s,  $2p=2$

P MW	U kV	Factor de po- tencia (cos φ)	D cm	l cm	v <sub>a</sub> m/seg	δ cm	A A/cm	B <sub>δ</sub> wb/m <sup>2</sup>	η %	G t	Sistema de refrigeración	
											Arro- llamien- tos de estator	Arro- llamien- tos de rotor
12	6.3	0.8	73	140	12.4	2.5	483	0.875	96.6	39	Aire	Aire
15	6.3	0.8	67	270	136.3	2.6	622	0.860	97.2	67	Aire	Aire
60	16.5	0.8	103	253	146	5.0	917	0.927	93.3	136	Hidró	Hidró
100	18.75	0.85	112.8	310	157	6.4	1.675	0.971	98.37	175	Hidró	Hidró
150	20	0.85	132.5	420	163	8.0	1.375	0.952	98.47	220	Agua	Hidró
225	20	0.85	150.5	500	163	2.5	1.400	0.945	98.55	253	Agua	Hidró
300	20	0.85	140.5	675	176.5	16.5	1.705	0.933	98.57	310	Agua	Agua

Tabla II-1

## PRINCIPIO FUNDAMENTAL DEL DEVANADO DE MAQUINAS DE C A

Actualmente los arrollamientos o devanados de las máquinas de CA, son de dos capas y tienen muchas analogías con los devanados de inducido de dos capas de las máquinas de CC, y por lo tanto, se pueden construir utilizando estos devanados de inducido. Se tienen para el estudio de la técnica de construcción de devanados, por suma consecutiva de vectores de los armónicos fundamentales de las fem en todas las secciones de bobina de acuerdo con su secuencia u orden de sucesión en el circuito del devanado que se cierra sobre si mismo. Con un par suficiente ( teóricamente infinitamente grande ) de ranuras y secciones de bobina, el poligono de potencial es una circunferencia "0" con "2a" ramas o circuitos en el devanado del inducido de CC en "a" circunferencias superpuestas, en este caso, parte de la circunferencia corresponde a una sección determinada de arrollamiento cerrado.

partiendo de éste concepto, se puede comprobar que la manera más sencilla de obtener un devanado de CA, es basandose en el arrollamiento de CC de dos capas cerrado ordinario cuando en cada sección constituye un poligono completo de potencial, se saca un número de devanados o tomas correspondientes al número de fases de la máquina. Los puntos equipotenciales de éstas deriva--

ciones, deben ser conectadas entre sí y entonces cada fase tendrá un número de pares de ramas paralelas "a" igual al número de pares de ramas paralelas al devanado de CC inicial.

La fig. II-2 representa la circunferencia de potencial de un arrollamiento de CC y las conexiones de circuito a efectuar, uniendo los anillos de contacto a una rama en el caso de sistema trifásico, ya que en éstas máquinas el devanado del inducido, debe sustituir un arrollamiento de CC cerrado, unido en un lado al colector, y en el otro a los anillos rozantes.

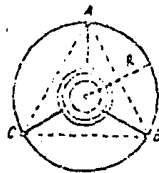


Figura II-2

Un devanado análogo, es el arrollamiento del inducido de una máquina de CA trifásica con colector, consistiendo la única diferencia en que el arrollamiento está dividido en secciones correspondientes a las diferentes fases, no por medio de derivaciones conectadas a los anillos de contacto, sino por medio de esco-



billas, que hacen contacto con el colector.

Los lados de los triángulos "ABC" de la fig. II-3a y II-3b representan simultáneamente las tensiones de línea y fase, ya -- que los arrollamientos de fase están conectados en triángulo -- ( delta ).



Figura II-3

La longitud de los arcos "AB" entre los puntos contiguos de conexión en las figuras anteriores, corresponde a la suma algebraica de las fem de 1 sección de fase del devanado dado y la -- cuerda respectiva "AB" corresponderá a su suma vectorial, la cual de la tensión entre los anillos ó escobillas "A" y "B".

La relación entre la suma vectorial de las fuerzas electromotrices existentes en las secciones de fase del arrollamiento y la suma algebraica de estas fem es una medida o valor de mérito -- del arrollamiento y se le denomina factor de distribución

En este caso para  $m=3$  y un número muy grande de ranuras, tenemos:

$$K_{p_{\infty}} = \frac{\text{cuerda AB}}{\text{arco AB}} = \frac{R \sqrt{3}}{1/3 \cdot 2\pi R} = \frac{3 \sqrt{3}}{2\pi} = 0.827$$

En el caso general si la máquina tiene "m" fases (fig.II-b) para un número muy grande de ranuras tenemos:

$$K_{p_{\infty}} = \frac{2 \text{ sen } \pi/m}{1/m \cdot 2\pi R} = \frac{\text{sen } \pi/m}{\pi/m}$$

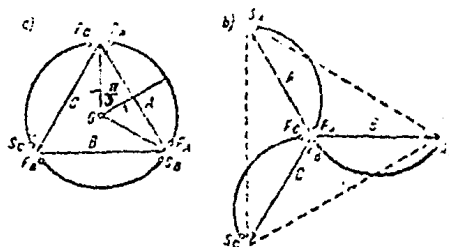
con "m" = 6 tenemos:

$$K_{p_{\infty}} = \frac{(6) \text{ sen } 30^{\circ}}{\pi} = \frac{3}{\pi} = 0.925$$

Así pues, en un arrollamiento trifásico, la fuerza electromotriz de cada fase disminuye 17.3% en comparación con la suma algebraica de las fem de los elementos de fase de un devanado, mientras en un devanado hexafásico, disminuye solo el 45%. De aquí - que los inducidos de máquinas polifásicas con colector y de los - convertidores se construyen a veces como máquinas hexafásicas.

Los arrollamientos de fase representados en la fig. II-3a - pueden ser conectados en estrella si se divide el devanado del inducido de CC en tres partes ( fig. II-4a ) suponiendo "2a" = 2, - en este caso la tensión de línea aumenta  $\sqrt{3}$  ( solo se tiene en - -

cuenta el primer armónico ), pero la utilización del devanado y el valor de relación de distribución, permanecen invariables como antes, es decir  $Kp_{\infty} = 0.827$  ( fig. II-4b ).



TENSION DE UN DEVANADO TRIFASICO CON ZONA DE FASE DE 120 GRADOS PARTIENDO DE UN DEVANADO DE INDUCIDO DE CC CORTADO.

Figura II-4

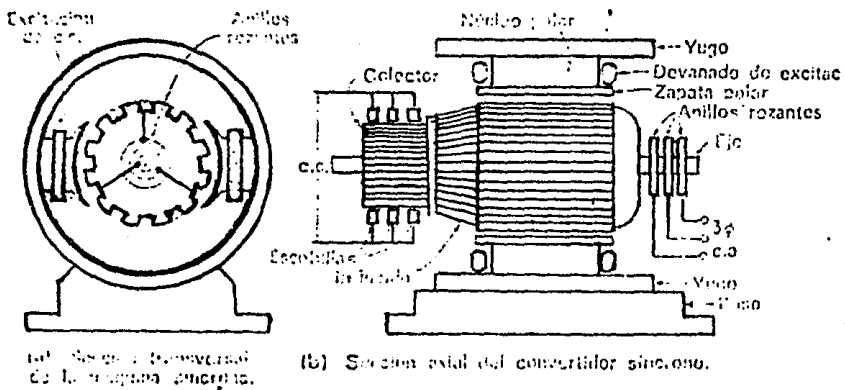
Se obtienen mejores resultados con devanados trifásicos si el polígono de fem, se divide en 6 zonas ( fig. II-5a ) para que las fuerzas electromotrices de las medias fases opuestas ( por - ejem. "A" y "X" ) actúen concurrentemente en el circuito, la mitad de una media fase "A" debe ser conectada al extremo de la media fase "X" (fig. II-5b ). En un devanado uniformemente distribuido ( número de ranuras  $Z=\infty$  ) obtenemos una relación de distri-



Un devanado real, se confecciona con un número infinito de ranuras "Z". Para que todas las medidas fases de un devanado - con una zona de 60° sean idénticas y para obtener un devanado si métrico de la manera más sencilla posible, el número de ranuras de una zona, es decir, el número de ranuras por polo y por fase  $q = \frac{Z}{Z P_m}$  debe ser un número entero. Estos devanados se denominan de número entero de ranuras por polo y fase y se adoptan u niversalmente. En los capítulos siguientes, trataremos de ellos principalmente. Los devanados con "q" fraccionario los estudiaremos aparte. El devanado se compone de bobinas análogas a las de secciones de devanado del inducido de máquina de CC en el caso general, una bobina se puede componer de un número de espiras conectadas en serie con aislamiento común a la carcasa o bastidor. Cada zona de 60°, incluye un grupo de bobinas de varias secciones conectadas en serie. Una fase incluye grupos de bobinas desplazadas entre sí en la periferia de la armadura 180° eléctricos. El número de grupos de bobinas de cada fase en este tipo de devanado obtenido con arrollamientos de inducido de CC de dos capas es igual al número de polos 2p. Estos grupos pueden ser conectados en serie y en paralelo de acuerdo con el prin cipio expuesto.

## CONSTRUCCION DE LA MAQUINA SINCRONA DE INDUCIDO MOVIL

Tanto en la máquina síncrona de inducido móvil como en la máquina de CC, se utiliza el mismo tipo de estator, el devanado del inducido ( rotor ), se saca al exterior a travez tanto de anillos rozantes como de un colector, como se indica en la sección transversal ( fig. II-6 ) una máquina como esta, funciona--ría o bien como motor o bien como un generador síncrono de inducido móvil, según si la corriente de entrada es CA polifásica o monofásica en los anillos rozantes, CC en las escobillas del - generador. Este tipo de máquina encuentra su aplicación más im portante en el convertidor síncrono o rotatorio indicado en la-fig. II-6



Máquina eléctrica, del tipo de inducido móvil y rotor de excitación saliente

Figura II-6

## CONSTRUCCION DE LA MAQUINA SINCRONA DE INDUCIDO FIJO

La construcción de la máquina síncrona de inducido móvil e inducido fijo, es relativamente limitada ya que en un inducido móvil se mide que las ranuras se hacen más profundas de "a" a "a", y de "b" a "b", ( fig. II-7 ), los dientes del inducido - resultan más estrechos, y por lo tanto más débiles, por lo que no es recomendable ya que en este tipo de inducido, los dientes pueden estar sometidos a elevadas fuerzas centrífugas.

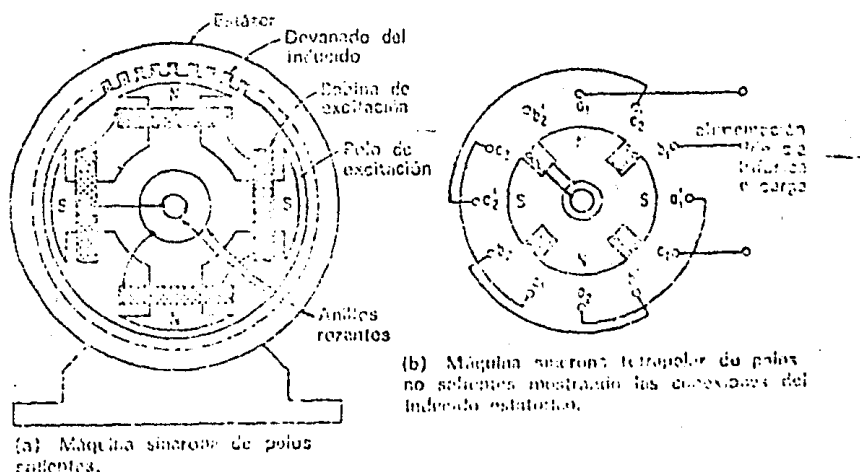


Figura II-7

En la máquina síncrona de inducido fijo, el devanado de excitación, es alimentado mediante una fuente de CC a través de dos anillos rozantes y el inducido se conecta directamente a una fuente polifásica de CA ó a una carga

Si el inductor ( estator ) se conecta a una alimentación de CA monofásica o polifásica, la máquina funcionará como motor -- síncrono, y el rotor girará a una velocidad síncrona en sincronismo con el campo giratorio que establece el devanado del estator determinado por el número de polos y la frecuencia de alimentación. Si el rotor se hace girar a una velocidad síncrona mediante un motor primario, la máquina funcionará como alternador, ya sea monofásico o polifásico según las conexiones del inducido.

## II-2 DEVANADOS DE INDUCIDO

Los devanados de inducido, tanto si están en el rotor como en el estator siempre son del tipo liso y están distribuidos uniformemente en ranuras situadas en la periferia del inducido - adyacentes al entrehierro. En esencia, hay dos tipos según el tipo de cierre o reentrada del devanado. Devanados de circuito abierto, utilizados generalmente en la máquina de C.A.

Independientemente del tipo o aplicación, la mayoría de los devanados del inducido, consisten en unas bobinas preformadas como se indica en la Fig. II-8 que están alojadas en las ranuras del inducido y conectadas de manera que determinen un devanado completo.



Cada bobina consta de muchas espiras de fino hilo, cubierto de seda, algodón o esmalte. El número de conductores "z" - en una bobina determinada será el doble del número de espiras que constituyen la bobina, o sea dos conductores por espira.

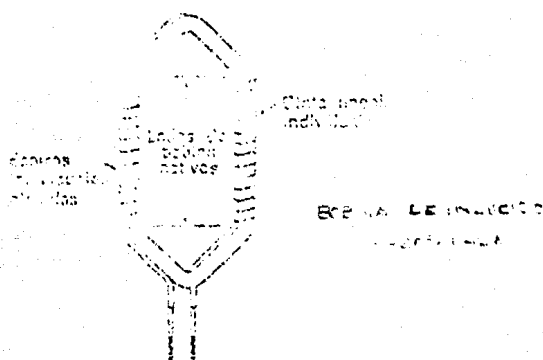


Figura II-8

En general, las bobinas de inducido abarcan  $180^\circ$  eléctricos o sea desde el centro de un polo determinado hasta el centro de un polo de polaridad opuesta que sin embargo puede ser físicamente adyacente, como se indica en las figs. II-9a y II-9b. Si una bobina abarca  $180^\circ$  eléctricos, se denomina de paso diametral, en tanto que una que abarca menos de  $180^\circ$  eléctri--

cos se denomina bobina de paso fraccionario.

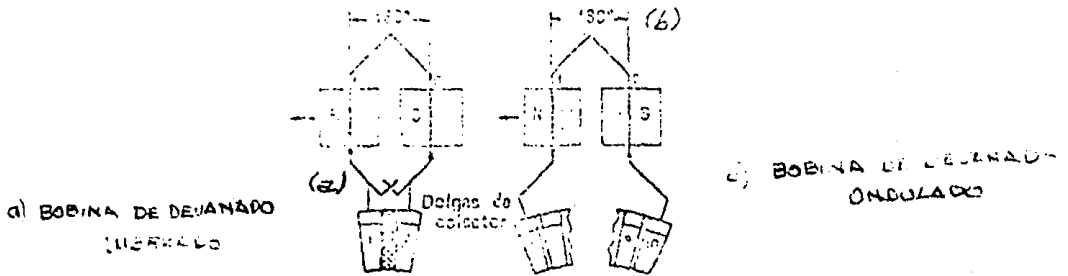


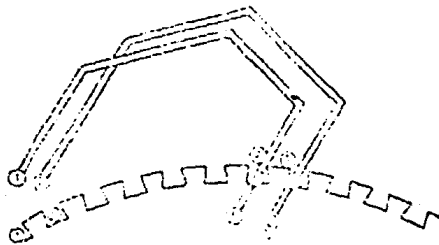
Figura II-9

Un arrollamiento en el inducido con paso fraccionario recibe el nombre de Devanado de cuerdas.

Por ejem. una bobina que abarca  $180^\circ$  eléctricos tendrá un factor de paso "p" de  $\frac{150^\circ}{180^\circ} = 0.833$  o sea 83.3%

La mayoría de devanados de inducido son devanados de doble capa, dos lados de bobina alojados en una ranura. Un lado de bobina "p" se sitúa en el fondo de una ranura, como se indica en la fig. II-10, para la bobina "1" en la que el lado derecho de la bobina está alojado y el otro no lo está, el segundo lado de la bobina, no se introduce hasta que todas las demás bobinas del inducido se han alojado en las partes inferiores de

las ranuras. El propósito de éste procedimiento es el de asegurar tanto la resistencia contra las fuerzas centrífugas, como una igualdad casi perfecta en las dimensiones, formas y peso de todas las bobinas.



Devanados de cable capa.

Figura II-10

#### DEVANADOS IMBRICADO Y ONDULADO

Para garantizar que las fem inducidas en los lados de bobina conectados en serie se adicionarán entre sí, se utilizan -- dos conexiones de terminales: conexiones de devanado ondulado y devanado ondulado, mostrados en la fig. II-9, los cuales solo se diferencian en la forma en que los extremos de la bobina se conectan al colector. En el devanado ondulado, las conexiones en serie de los lados de bobina entre escobillas se -- crean después de varias vueltas a lo largo del inducido hasta -- completar una rama entre escobillas, por lo tanto, empezando --

en la delga "1", la bobina "1" entra en la ranura superior "1" bajo un polo norte, entonces se dirige a la ranura superior -- "6" situada bajo el polo sur adyacente hasta la delga "10", a continuación, la bobina "2" entra en la ranura "11" enfrenteada al polo norte siguiente ( fig. II-11 ), y a la ranura "16" en frenteada al polo sur que sigue a la delga "20" y así sucesivamente, por lo tanto, la bobina "1" está en serie con la bobina "2", y a diferencia del devanado imbricado, éstas bobinas conectadas en serie, se encuentran bajo pares de polos distintos.

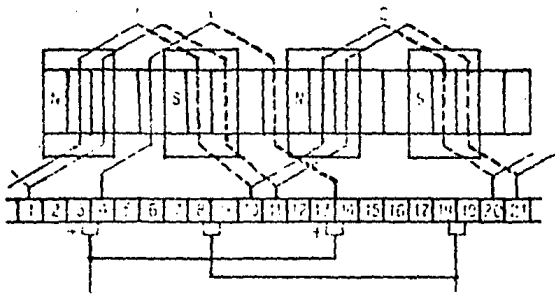


Figura II-11

### II-3 DEVANADOS DE INDUCIDO DE LA MAQUINA SINCRONA DE CORRIENTE ALTERNA

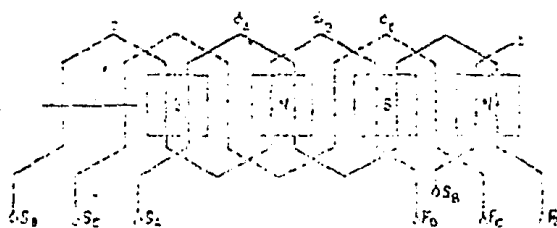
La máquina de CA puede usar devanados cerrados ( reentrantes ) o abiertos, pero la mayoría de aplicaciones utilizan de-

vanados abiertos. En los devanados de la máquina de CA de tipo abierto se utilizan bobinas preformadas con forma de diamante, ya sean del tipo ondulado o bien del tipo imbricado.

Si todas las bobinas colocadas en todas las ranuras de un inducido estatórico se conectan en serie, el devanado de la máquina síncrona de CA es un devanado monofásico. Si en las ranuras del devanado estatórico se colocan los devanados separados y aislados conectados en serie y mecánicamente desplazados entre sí, el devanado de la máquina síncrona de CA es un devanado bifásico y así sucesivamente.

En la fig. II-12, se muestra un devanado trifásico muy simplificado. El principio y el final de todas las bobinas en la fase "A" se designan respectivamente " $S_A$ " y " $F_A$ ", la fase "A" se designa mediante una línea continua en la figura, la fase "B" mediante una línea discontinua y la fase "C" mediante una línea de puntos. Nótese que cada devanado no empieza o acaba bajo el mismo polo. Si se supone que los polos en el rotor se mueven hacia la izquierda como se indica, entonces el movimiento relativo de los conductores del inducido, tienen lugar hacia la derecha produciendo una secuencia de fases "ACBACBA", etc. Si la distancia entre dos puntos adyacentes correspondientes en

los polos, es de  $180^\circ$  eléctricos, puede observarse que la distancia entre el lado de la bobina al principio de "A" y al principio de "C" es aproximadamente de  $120^\circ$  eléctricos, por lo tanto, el extremo polar primero en el sentido de marcha de un polo norte que se mueve hacia la izquierda, inducirá tensiones idénticas en los correspondientes lados de las bobinas A, C, B, respectivamente, defasados en  $120^\circ$  eléctricos.



Devanado en devanado de media bobina concentrada  
relativo a una ranura por polo por fase (un lado de  
bobina por terminal)

Figura II-12

Según la regla de Fleming de la mano derecha, dado el movimiento del conductor anterior con respecto al campo, un polo norte inducirá una tensión correspondiente desde el final hasta el principio de las bobinas, desplazado como se indica en la fig. II-13. Nótese que la fase "B" está retrasada con respecto a la fase "A"  $240^\circ$  eléctricos o adelantada con respecto a la fase "A" con  $120^\circ$  eléctricos.

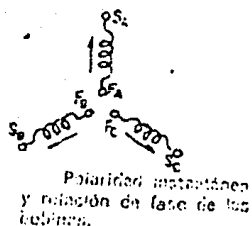
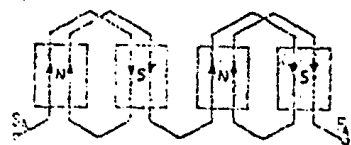


Figura II-13

## DEVANADOS DE MEDIA BOBINA Y BOBINA COMPLETA

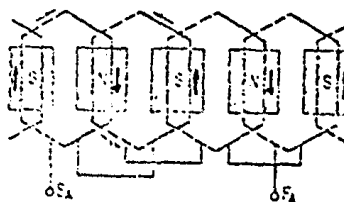
Al igual que en las máquinas de CC, los devanados de las máquinas síncronas de CA suelen ser del tipo de doble capa y bobina completa indicada en la Fig. II-14c. El nombre devanado de doble capa de bobina completa, deriva del hecho de que hay dos lados de bobina ( una bobina por ranura ). La fig. II-14a muestra el devanado imbricado de una sola capa de media bobina y - las figs. II-14b y II-14c, muestran un devanado imbricado de doble capa de bobina completa.



(a) Devanado imbricado de media bobina en corriente monofásica, dos ranuras por polo/fase (un lado de bobina por ranura).



(b) Capa simple y capa doble.



(c) Devanado imbricado de bobina completa, concentrado, de dos capas, monofásico, una ranura por polo-fase (dos lados de bobina por ranura).

Figura II-14

## DEVANADOS DE CUERDAS O DE PASO FRACCIONAL

Los devanados de paso fraccional, cuando se utilizan en inducidos de máquina síncronas de CA además de ahorrar cobre, reducen los armónicos de fmm ( fuerza magnetomotriz ) producidas por el devanado del inducido y reducen los armónicos de la fem. inducidos en el devanado sin reducir la magnitud de la onda fundamental de la fem.

En el caso de una máquina que emplee una bobina de paso diametral como la indicada en la fig. II-12, los lados de bobina abarcan una distancia exactamente igual al paso polar de  $180^\circ$  eléctricos, como resultado las fem inducidas en una bobina están en fase como se indica en la fig. II-15a.

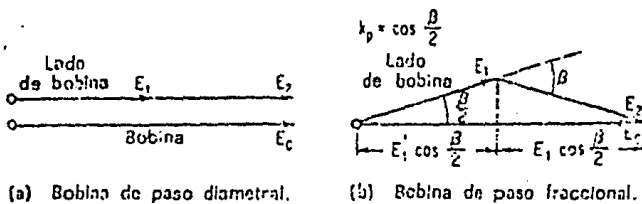


Figura II-15

El factor de paso  $k_p$  de una bobina de paso diametral, es -



la unidad, y la tensión total en la bobina  $E_c$  es:  $2E_1 \cdot K_p$  o  $2E_1$ .

En el caso del devanado de doble capa indicado en la fig. - II-14c puede observarse que el ancho de bobina de una sola bobina, es menor que el ancho polar de  $180^\circ$  eléctricos. La fem inducida en cada lado de bobina no está en fase, por lo que la tensión resultante  $E_c$  sería menor que la suma aritmética de cada lado de bobina o sea inferior a  $2E$ . Es evidente que  $2E_1$  - debe multiplicarse por un factor que es menor que la unidad o - sea  $2E_1 K_p$ , para producir la tensión apropiada en la bobina  $E_c$ . Para que ésto sea válido, el factor de paso es:

$$(1) K_p = \frac{E_c}{2E_1} = \frac{\text{suma vectorial de los dos lados de bobina}}{\text{suma aritmética de los dos lados de bobina}}$$

Si se supone que las fem inducidas de las dos bobinas  $E_1$  y  $E_2$  están defasadas entre sí un ángulo  $\beta$ , como se indica en la fig. II- 15b, entonces el ángulo formado por  $E_1$  y la tensión resultante en la bobina  $E_c$  es, según la ecuación (1)

$$E_c = 2E_1 \cos \frac{\beta}{2} = 2E_1 K_p$$

$$\text{y por consiguiente: } K_p = \cos \frac{\beta}{2}$$

En la que  $\beta$  es  $180^\circ$  menos el número de grados eléctricos abarcados por la bobina.

Ya que  $\beta$  es el ángulo suplementario del abarcado por la bobina el factor de paso  $K_p$  también puede expresarse como  $K_p = \text{sen } \frac{p^\circ}{2}$  en donde  $p^\circ =$  ancho de bobina en grados eléctricos.

### FACTOR DE DISTRIBUCION DE ZONA DEVANADOS DISTRIBUIDOS

Los devanados concentrados, debido a que todos los lados de bobina de una fase dada, se concentran en una sola ranura bajo un polo determinado.

Cuando las ranuras se distribuyen a través del inducido de manera uniforme, el devanado que se introduce es un devanado distribuido. Un devanado distribuido imbricado, es el que aparece en la Fig. II- 14a. Nótese que dos bobinas en la zona de fase "A" están desplazadas entre sí. Las tensiones inducidas en cada una de éstas bobinas, estarán desplazadas en el mismo grado en que han sido distribuidas las ranuras, por lo que la tensión total inducida en cualquier fase será la suma vectorial de las tensiones de cada bobina individual. Las cuatro tensiones de cada bobina individual indicadas en la Fig. II- 14a, aparecen en la Fig. II-16 representadas vectorialmente y desplazadas en un cierto ángulo  $\alpha$ , el número de grados eléctricos entre ranuras adyacentes. Las tensiones  $E_{c_1}$ ,  $E_{c_2}$

etc.  $m$  son las tensiones de cada bobina individual, y " $n$ " el número de bobinas de cada zona de fase determinada. El factor de zona o de distribución por el que debe multiplicarse la suma aritmética de las tensiones de cada bobina individual a fin de proporcionar el vector suma es:

$$K_d = \frac{E_0}{nE_c} = \frac{\text{suma vectorial de las fem de bobina por fase}}{\text{suma aritmética de las fem de bobina por fase}}$$

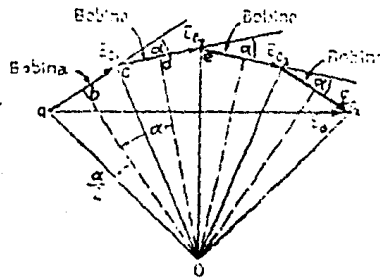
En la construcción de la fig. 11-16, se han trazado perpendiculares al centro de cada una de las tensiones de las bobinas individuales hasta el centro común de radios, sirve para indicar que  $\alpha/2$  es el ángulo "boa". La tensión en el lado de bobina "ab" es igual a  $(oa) \sin \frac{\alpha}{2}$ . Para " $n$ " bobinas en serie por fase, la cuerda es también  $2 (oa) \sin n \frac{\alpha}{2}$  y el factor de distribución o de zona es:

$$K_d = \frac{E_0}{nE_c} = \frac{20 \bar{a} \sin n \frac{\alpha}{2}}{(n) 20 a \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin (n \frac{\alpha}{2})}{n \sin (\frac{\alpha}{2})}$$

En la que " $n$ " es el número de ranuras por polo por fase (ranuras/polo-fase); " $\alpha$ " es el número de grados eléctricos entre ranuras adyacentes.

Cuando el paso de bobina es diferente del paso polar, las fem engendradas en los dos lados de bobina, o sea en las dos secciones conectadas en serie de un grupo de bobinas correspondientes a una misma fase, tendrán un ángulo de diferencia de fase  $\beta$  que es el mismo ángulo ( en grados eléctricos ) con que -

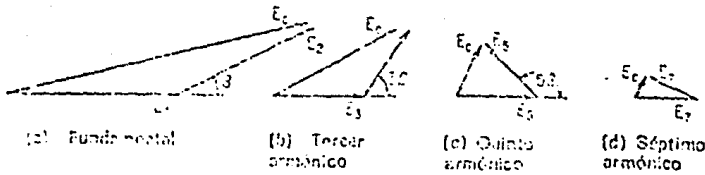
se diferencian el paso de bobina y el paso polar. Se introduce así como factor diferencial, de valor con  $B/2$  para la curva fundamental y los  $m B/2$  para la armónica de orden  $m$ , que llamamos factor de paso  $K_p$ . Sus valores están representados en la Fig. II-17.



$$K_d = \frac{E_d}{nE_c} = \frac{\sin\left(\frac{n\alpha}{2}\right)}{n \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

Determinación del factor de distribución.

Figura II-16



Efecto del paso fraccionario sobre las tensiones armónicas generadas.

Figura II-17

### FACTOR DE OBLICUIDAD

Cuando el devanado del rotor es oblicuo respecto al del estator, o viceversa, la tensión generada se reduce por un factor semejante al factor de distribución. Esta reducción se demuestra por la siguiente fórmula:

$$\text{Factor de oblicuidad} = \frac{\text{sen } K \frac{\lambda}{2}}{K \frac{\lambda}{2}}$$

Donde K es el orden de la armónica y  $\lambda$  es el ángulo eléctrico de la oblicuidad.

### FACTOR DIFERENCIAL DE FASE

La suma de dos fem de dos fases de un alternador implica una acción diferencial exactamente de la misma fase que la que hay entre dos secciones conectadas en serie de los devanados de paso fraccionario. En una máquina trifásica conectada en estrella el ángulo es de  $60^\circ$ , que equivale a dos tercios del paso; El factor diferencial de fase para la curva fundamental, y para todas las armónicas de orden impar que no sean múltiplos de tres es: 0.866, mientras que para las armónicas que son múltiplos de tres vale cero ( fig. II-17 ). Por medio de una combinación del paso de la sección y la acción diferencial de fase,

puede impedirse la aparición en la curva de tensión de cualquier armónica que esté presente en la curva de campo.

VALORES DE LOS FACTORES DE DISTRIBUCION  
O FACTORES DIFERENCIALES DE DEVANADO

Ver la siguiente tabla ( tabla II-2 )

Factores de distribución o factores diferenciales de devanado  $k_b$  para las curvas fundamentales y para las distintas armónicas de orden impar hasta la 27.<sup>a</sup>, correspondientes a diversos números de ranuras por polo  $N_{sp}$ . Secciones de 60° — trifásico

$N_{sp} =$	3	6	9	12	15	18	21	24	$\infty$
$m = 1$	1.00	+0.966	+0.960	+0.958	+0.957	-0.956	+0.956	+0.956	+0.955
$m = 3$	1.00	-0.797	-0.667	-0.653	-0.647	-0.641	-0.642	+0.641	+0.637
$m = 5$	1.00	-0.279	-0.218	+0.205	+0.200	+0.197	+0.196	+0.191	+0.191
$m = 7$	1.00	-0.269	-0.177	-0.155	-0.149	-0.145	-0.144	-0.141	-0.136
$m = 9$	1.00	-0.707	-0.333	-0.279	-0.248	-0.236	-0.229	-0.225	-0.212
$m = 11$	1.00	-0.966	-0.177	-0.128	-0.109	-0.102	-0.097	-0.095	-0.087
$m = 13$	1.00	-0.966	-0.218	-0.128	+0.102	+0.091	+0.086	+0.083	+0.073
$m = 15$	1.00	-0.707	-0.567	-0.279	+0.200	+0.173	+0.159	-0.149	+0.127
$m = 17$	1.00	-0.269	-0.269	-0.155	-0.102	-0.084	+0.074	-0.070	+0.056
$m = 19$	1.00	-0.269	-0.269	-0.205	-0.109	-0.081	-0.072	-0.066	-0.050
$m = 21$	1.00	-0.707	-0.667	-0.653	-0.248	-0.173	-0.117	-0.127	-0.091
$m = 23$	1.00	-0.966	-0.218	-0.658	-0.149	-0.091	-0.072	-0.064	-0.041
$m = 25$	1.00	-0.966	-0.177	-0.658	+0.200	+0.102	+0.075	+0.063	+0.038
$m = 27$	1.00	-0.707	-0.333	-0.653	+0.647	-0.236	+0.159	+0.127	+0.071

$k_b$  para secciones de 90° — bifásico o tetrafásico

$N_{sp} =$	2	4	6	8	10	12	14	16	$\infty$
$m = 1$	1.00	+0.924	+0.919	+0.906	+0.905	+0.904	+0.902	+0.902	+0.902
$m = 3$	1.00	-0.383	-0.333	-0.318	+0.312	-0.308	+0.306	-0.304	-0.301
$m = 5$	1.00	-0.383	-0.244	-0.212	-0.200	-0.194	-0.190	-0.188	-0.180
$m = 7$	1.00	-0.924	-0.214	-0.189	-0.159	-0.149	-0.143	-0.141	-0.129
$m = 9$	1.00	-0.924	-0.265	-0.189	-0.143	+0.128	+0.119	+0.114	-0.100
$m = 11$	1.00	-0.383	-0.222	-0.212	+0.143	+0.119	+0.107	+0.109	-0.082
$m = 13$	1.00	-0.383	+0.924	-0.318	-0.159	-0.119	-0.102	-0.092	-0.070
$m = 15$	1.00	-0.924	-0.155	-0.306	-0.200	-0.128	-0.102	-0.089	-0.060
$m = 17$	1.00	-0.924	-0.214	-0.306	-0.312	+0.149	+0.107	+0.088	+0.053
$m = 19$	1.00	-0.383	-0.214	-0.318	-0.305	+0.194	+0.148	+0.092	+0.047
$m = 21$	1.00	-0.383	+0.333	-0.212	-0.305	-0.308	-0.143	-0.109	-0.043
$m = 23$	1.00	-0.924	+0.922	-0.189	-0.312	-0.304	-0.190	-0.111	-0.039
$m = 25$	1.00	-0.924	+0.922	-0.189	-0.200	-0.304	+0.306	+0.149	+0.036
$m = 27$	1.00	-0.383	+0.333	-0.212	-0.159	-0.308	-0.306	-0.188	-0.023

Tabla II-2

## DEVANADOS DE INDUCIDO

## II-4 CLASIFICACION TEORICA DE LOS DEVANADOS DEL INDUCIDO.

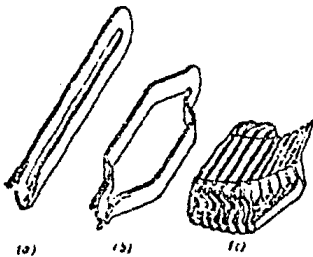
- a) Conexión de las cabezas de bobina, concéntrico o imbricado.
- b) Forma de las cabezas de bobinas, trapezoidales, de barril.
- c) Número de capas, esto es, número de lados de bobina por ranura, una o dos.
- d) Tipo de ranuras, abiertas, cerradas o semicerradas.
- e) Número de fases, una dos o tres.
- f) Conexión de las máquinas trifásicas, "Y" o " $\Delta$ ".
- g) Extensión de una sección o fase, 60 o 120 grados para máquinas trifásicas, 120 a 180 grados para máquinas monofásicas.
- h) Ranuras por polo, número entero o fraccionario.
- i) Paso del devanado, paso entero o fraccionario.
- j) Número de circuitos.
- k) Espiras por bobina.
- l) Valor de la oblicuidad, desde cero hasta el paso de una ranura.

## CLASIFICACION PRACTICA DE LOS DEVANADOS DE INDUCIDO

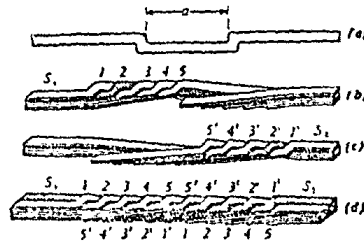
Para que sea completa la clasificación, es necesaria la ante

rior clasificación teórica, que puede hacerse un resumen mucho más sencillo.

a) El devanado corriente, tiene las características indicadas anteriormente con letra bastardilla, esto es, es un devanado en dos capas, trifásico, conectado en "Y", imbricado, con ranuras abiertas, secciones que abarcan  $60^\circ$  y bobinas romboidales sin oblicuidad. Los números de ranuras por polo, de circuitos y de espiras por polo, así como el paso de devanado, deben escogerse de modo que den el voltaje y forma de onda que se desee. Otros factores, como las reactancias, pueden influir en la elección del devanado ( fig. II-18 )



(5) Forma usual de una bobina de estator (llamada también "bobina estirada" o "bobina romboidal"). a) Después de bobinada. b) Después de estirada a su forma definitiva. c) Después de haber sido colocada en el estator de un alternador



(6) Transposición de las láminas en un conductor tipo Hoebel. a) Lámina acodada U-pleca. b) Grupo de conductores componentes. c) Grupo complementario de conductores. d) Conductor completo

Figura II-18

b) Igual que el inciso a), excepto en que es un devanado de simple capa, conectado en " $\Delta$ ", este tipo se usa solamente-



como un medio de obtener voltajes que no podrían obtenerse con un devanado de doble capa conectado en "Y" ( fig. II-19 ).

c) Las bobinas de tipo trapezoidal no se usan en Europa de forma tan extensa como en América, para máquinas de gran tamaño.

d) En máquinas muy pequeñas, se usa un devanado de bobinas de tipo trapezoidal o tipo condentrico dispuesto en forma de corona o de "rosquilla", alojado en ranuras semicerradas, análogo a los devanados usados en los motores de inducción pequeños.

#### SUBDIVISION Y TRANSPOSICIONES

Las corrientes parásitas en un conductor macizo, llegan generalmente a ser importantes cuando los conductores tienen un grueso mayor de 2.5mm. aproximadamente. En consecuencia, cuando los conductores son de mayor peso, se recurre a subdividirlos, no obstante, mas allá de un determinado grueso de conductor, no es suficiente la subdivisión, ya que las corrientes parásitas que resultan al acumularse la corriente en las láminas más cercanas al entrehierro, llegan a tener importancia. La presencia de éstas corrientes parásitas se debe a que en las -

capas más alejadas del entrehierro, se engendra un voltaje menor. La solución es transponer las láminas en forma que se engendren voltajes iguales en cada una de ellas. A continuación se describen cuatro tipos de transposición comunmente usados.

a) La transposición de Roebel, indicada en la figura II-18b puede expresarse como quepan dos láminas en la anchura de la ranura. Efectúa una rotación completa de las posiciones de las láminas respectivas, y ordinariamente se extiende de una manera uniforme a lo largo de la longitud total de la ranura.

b) Separando las láminas en grupo y separando después conexiones, después debidamente los grupos en serie ( grupos en serie ) de una bobina con los anteriores de la bobina contigua, puede equilibrarse bastante bien el voltaje de los diferentes grupos de láminas.

Esta transposición por conexiones en las cabezas de dos bobinas, se usa solamente en general cuando es suficiente equilibrar dos o tres grupos de láminas, ya que es mecánicamente difícil aislar mayor número de grupos en las conexiones de las cabezas de bobina.

c) Para bobinas con muchas espiras, puede usarse un tipo -

de transposición que fuerza 180° el conductor en un punto conveniente de las cabezas de bobinas, invirtiéndose así todas las posiciones de todas las láminas.

d) Un tipo de transposición por muestras, adecuado para conductores que en anchura tengan solamente una lámina, ligeramente mayor que la mitad de su anchura, en los puntos donde deban pasarse unas a otras.

#### ELECCION DEL NUMERO DE RANURAS POR POLOS

El uso de 3, 6, 9 y 12 ranuras por polo, necesita una atención especial, ya que generalmente se producen grandes pulsaciones del flujo debido a los dientes, con el siguiente valor de F.I.T./ ( factor de influencia telefónica ). Las excepciones se refieren a los casos en que el F.I.T., no es importante como ocurre en las máquinas pequeñas, en las que tienen un gran entrehierro o las de devanado o polos oblicuos. Aunque se hayan tomado las dos últimas precauciones, el F.I.T. es aun mayor que con un devanado de número de ranuras fraccionario. Otro número de ranuras por polo que necesitan una atención especial son los de  $4 \frac{1}{2}$  y  $7 \frac{1}{2}$ .

Un paso de bobina reducido, disminuye el espacio axial necesario para las cabezas de la bobina, así como el tamaño de la misma. Aumenta sin embargo, el flujo necesario para obtener un voltaje en bornes determinado. El paso de las máquinas bipolares, está generalmente muy por debajo de la unidad, mientras que en las máquinas de poca velocidad no difiere mucho ésta. Fig. II-19

#### ELECCION DEL NUMERO DE CIRCUITOS Y DE ESPIRAS POR BOBINA

Estos factores, se relacionan ya que es posible cambiar el número de conductores por espira cuando están paralelo en la misma proporción, sin variar el voltaje de la máquina. El número verdadero de espiras, es en realidad, el número de espiras por bobina dividido por el número de circuitos en paralelo. Generalmente el número de circuitos en paralelo, se elige de manera que resulte el número más adecuado de espiras por bobina, a fin de que esta sea mecánicamente robusta y que no tenga conductores demasiado gruesos que precisen la transposición.

#### LA OBLICUIDAD

La oblicuidad del inducido o del inductor, se usa muy a menudo en los motores para eliminar puntos muertos o variaciones del par, al arrancar el motor partiendo de la posición de reposo.

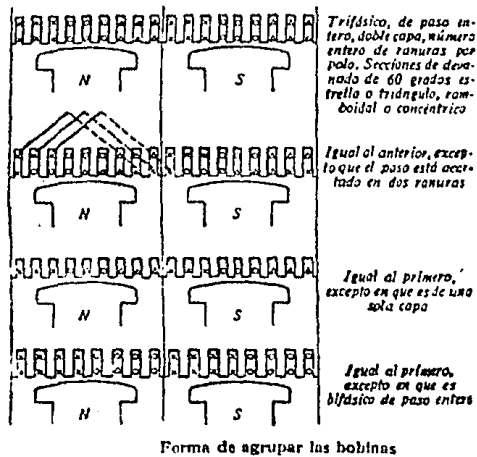


Figura II-19

## II-5 DEVANADOS CON NUMERO DE RANURAS FRACCIONARIO

Con el fin de normalizar el punzonado de las chapas y reducir el factor de influencia telefónica, la mayoría de las máquinas se construyen con un número fraccionario de ranuras por polo. En estos devanados es necesario que las secciones correspondientes a una fase, bajo varios polos, sean conectados en serie, y habrá así más de una bobina de más de una fase que en otras. De esta forma, el devanado no se repite en cada polo, sino en un grupo de polos, que se ha llamado "grupo repetible". Si el número de ranuras por polo y fase se expresa por un número entero más una fracción menor que la unidad, el número entero será el número de bobinas en la mayor de

las secciones correspondientes, a una fase y este mismo número entero, mas uno, será el número de bobinas en la mayor de ellas.

El numerador de la fracción es el número de las secciones mayores que corresponden a un grupo que se repite. En la tabla siguiente, se indican las combinaciones de ranuras posibles con las que pueden obtenerse devanados equilibrados con número de ranuras posibles fraccionario.

El devanado equilibrado con un número de ranuras fraccionario, se pone más fácil de manifiesto por medio de las tablas de las figuras II-20a y b que muestran las conexiones para un grupo repetible de un devanado de  $4 \frac{2}{7}$  ranuras por polo y otro de  $3 \frac{3}{5}$ , respectivamente, el número de espacios horizontales del diagrama es igual al número de ranuras de un grupo repetible. El número de ranuras de un grupo repetible. El número de espacios horizontales desde un símbolo al siguiente, es igual al número de polos de un grupo repetible.

Devanados con número de ranuras fraccionario, que pueden equilibrarse cuando el número de ranuras es divisible por la constante correspondiente

Número de polos	Constante		Número de polos	Constante		Número de polos	Constante	
	Bifásico	Trifásico		Bifásico	Trifásico		Bifásico	Trifásico
2	4	3	50	4	3	98	4	3
4	8	3	52	8	3	100	8	3
6	4	9	54	4	31 (*)	102	4	9
8	16	3	56	16	3	104	16	3
10	4	3	58	4	3	106	4	3
12	8	9	60	8	9	108	8	31 (*)
14	4	3	62	4	3	110	4	3
16	32	3	64	128 (*)	3	112	32	3
18	4	27	66	4	9	114	4	9
20	8	3	68	8	3	116	8	3
22	4	3	70	4	3	118	4	3
24	16	9	72	16	27	120	16	9
26	4	3	74	4	3	122	4	3
28	8	3	76	8	3	124	8	3
30	4	9	78	4	9	126	4	27
32	64 (*)	3	80	32	3	128	256 (*)	3
34	4	3	82	4	3	130	4	3
36	8	27	84	8	9	132	8	9
38	4	3	86	4	3	134	4	3
40	16	3	88	16	3	136	16	3
42	4	9	90	4	27	138	4	9
44	8	3	92	8	3	140	8	3
46	4	3	94	4	3	142	4	3
48	32	9	96	64 (*)	9	144	32	27

Itinerante se construyen máquinas con este número de polos.

Nota. Constituye una práctica general usar solamente un número par de ranuras en las máquinas trifásicas, aunque sea posible equilibrar un devanado con un número impar de ranuras. Se hace así por razones constructivas y para impedir la posibilidad de un desequilibrio magnético.

TABLA II-3

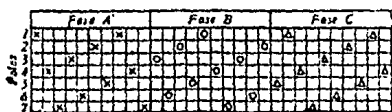
BOBINAS MUERTAS

Pueden suprimirse algunas bobinas del circuito del inducido, durante la construcción de la máquina, a fin de facilitar el uso de chapas punzonadas normales o para facilitar la obtención de características de funcionamiento que no podrían obtenerse por el ajuste del factor de paso. También pueden retirarse de las máquinas en servicio, para permitir su funciona-

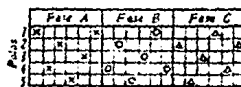
miento, si se han averiado una o mas bobinas. El número de bobinas eliminadas, debe ser el mismo en cada uno de los circuitos en paralelo. Sin embargo, no hay necesidad de que todas las fases, sean tratadas de la misma forma, a menos que sea esencial un equilibrio exacto del voltaje, que las corrientes de tierra sean excesivas o que la máquina esté conectada en triángulo.

### LOS DEVANADOS MONOFASICOS

Son generalmente devanados trifásicos en los que no se utiliza una fase. Son pues máquinas normales con devanados normales y con la fase sobrante colocada en su sitio. Algunas veces se suprimen las bobinas de la tercera fase y en las máquinas pequeñas, se emplea un devanado concéntrico especial.



(27) Diagrama de un devanado con número de ranuras fraccionario, para 44, ranuras por polo (puede usarse para 60 ranuras y 14 polos, 120 ranuras y 28 polos, etc.). El diagrama da el siguiente agrupamiento de bobinas:  
AABCCABBCAABCCABCCABCCABCC



(28) Diagrama de un devanado con número de ranuras fraccionario, para 110, ranuras por polo (puede usarse para 168 ranuras y 14 polos, 72 ranuras y 20 polos, etc.). El diagrama da el siguiente agrupamiento de bobinas:  
AAABCCABCCABCCABCC

FIGURA II-20



En todas las máquinas monofásicas, excepto en las muy pequeñas, es necesario un devanado amortiguador de poca resistencia, a fin de reducir las pulsaciones de flujo, que de otra forma se producirían por la reacción monofásica del inducido, y también para disminuir la reactancia verdadera del inducido.

No debe perderse de vista, que al par de las máquinas monofásicas tiene una pulsación inherente, de frecuencia doble que la de la máquina. El ruido que de ello resulta y la vibración son apreciables en las máquinas pequeñas, y en las máquinas grandes puede obligar a la construcción de cimentaciones especiales o aún el montaje del estator sobre resortes.

#### DEVANADOS BIFASICOS.

Difieren de los devanados trifásicos, sólo en el agrupamiento de las bobinas del estator, como se indica en la fig. II-19

#### DEVANADOS DOBLES

Se usan algunas veces, para simplificar los problemas de capacidad de ruptura de los interruptores y los relacionados con la estructura de las barras. La construcción mecánica de estos devanados es sencilla, ya que se usan bobinas normales, modifi-

cando solamente las conexiones frontales, pero en el proyecto eléctrico debe tenerse en cuenta: 1) La reacción no equilibrada del inducido que puede producir un calentamiento del rotor, cuando los dos devanados no están igualmente cargados; 2) La reactancia mutua entre los devanados; 3) La situación de la reactancia en caso de fallos, y 4) El efecto de factor de paso sobre la reactancia. Generalmente, el factor determinante, es la necesidad de mantener un elevado valor de la reactancia mutua bajo las condiciones de saturación.

### EL CIRCUITO MAGNETICO.

#### CALCULO DE LAS CARACTERISTICAS MAGNETICAS

La fig. II-21 representa una característica magnética en vacío, típica. La parte inferior de esta curva es una línea recta porque representa solamente los amper-vuelta, necesarios para hacer pasar el flujo a través del entrehierro, ya que a una tensión baja, los amper-vuelta para el entrehierro son despreciables, comparándolos con los del entrehierro. La línea recta tangente a la parte inferior de la curva se llama por este motivo "Línea de entrehierro". La diferencia entre esta línea y la parte superior de la curva es motivada por la saturación en el hierro. Para calcularla es conveniente disponer de las curvas de imanación o saturación del hierro que se emplee.

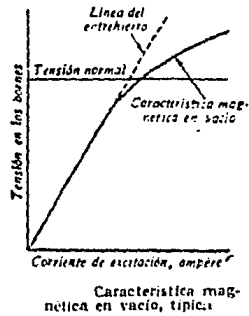


Figura 11-21

## II-6 ANALISIS ARMONICO

A continuación, se expone un método bastante exacto de obtención del análisis armónico de cualquier curva de campo corriente.

Es el método llamado "de los doce puntos", simplificado - para usarlo con ondas simétricas que no tengan armónicas de orden par ésto es, que sean simétricas a la línea central de medio período y en las cuales el semiperíodo negativo es idéntico al semiperíodo positivo.

1er. paso. Se miden las ordenadas de la curva en seis puntos uniformemente distribuidos, como se indica en la fig. -

II-22, tomando como unidad el valor máximo de la curva de campo

2° paso. Se multiplican los valores de estas ordenadas por los factores de las armónicas que se desean, como se indica en las ecuaciones que siguen.

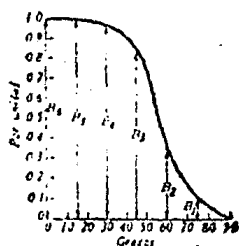
3er. paso. Los valores de  $C_n$  para la armónica enésima son, referidos a la unidad:

$$C_1 = 0.0866B_1 + 0.162B_2 + 0.236B_3 + 0.289B_4 + 0.323B_5 + \dots + 0.1672B_6$$

$$C_3 = 0.236B_1 + 0.334B_2 + 0.236B_3 + 0 - 0.236B_5 - 0.1672B_6$$

$$C_5 = 0.323B_1 + 0.1672B_2 - 0.236B_3 - 0.289B_4 + 0.0866B_5 + 0.1672B_6$$

$$C_7 = 0.323B_1 - 0.1672B_2 - 0.236B_3 + 0.289B_4 + 0.0086B_5 - 0.1672B_6$$



Ordenadas para el análisis armónico

Figura II-22

## COMPORTAMIENTO DE LAS ARMONICAS BAJO LA CARGA

Cuando una máquina se carga, el comportamiento de las armónicas depende en gran manera de las características de impedancia de la carga y de la frecuencia de la armónica. En pocos casos se han producido condiciones semejantes a la resonancia y se han presentado voltajes mucho mayores que los que existían en vacío.

Los efectos de las armónicas, debidos a la carga, proceden de dos causas principales: 1) el cambio de la forma del campo producido por la reacción del inducido, de la que resulta un cambio de las armónicas debido a los efectos de saturación y una producción de armónicas debido a las oscilaciones que la reacción del inducido produce en el campo; 2) regulación de las armónicas que viene determinada por la impedancia relativa de la máquina y del sistema a la frecuencia de la armónica. Ordinariamente, la primera causa aumenta las armónicas engendradas en la máquina, mientras que la segunda disminuye la magnitud de las armónicas realmente engendradas, así los dos fenómenos tienden a neutralizarse hasta cierto punto. En un artículo de Doherty y Nickle se estudia el comportamiento de las armónicas bajo carga. Este artículo, se refiere solamente al comportamiento de las armónicas bajo carga; no puede aplicarse

a las armónicas debido a las ranuras.

#### DEFINICION DEL FACTOR DE DESVIACION DE UNA ONDA ( 1 )

La norma A.S.A. C-50-1943, párr. 3221, establece lo siguiente:

" El factor de desviación de la onda de voltaje, en los bornes de las máquinas sincrónicas, a circuito abierto, no debe -- ser mayor de 0.1, a menos que se especifique otra cosa. El factor de desviación.( 1 ) En un artículo de Bedell, " Non-harmonic Alternating Currnts" ", Trans. A.I.E.E.; 1927, pág. 649, -- puede encontrarse un estudio general de las armónicas de las máquinas. En la bibliografía anexa, se brinda información. De -- una onda es la relación entre la diferencia máxima de las ordenadas de la onda y las correspondientes ordenadas de la onda sinuseidal equivalente, y la ordenada máxima de esta última, suponiendo que ambas ondas esten superpuestas de tal forma, que esta diferencia máxima se haga tan pequeña como sea posible".

## II-7 REACTANCIAS DE LAS MAQUINAS SINCRONAS

### APLICACION DE LAS REACTANCIAS

En una máquina síncrona, se consideran varias reactancias diferentes por cuatro razones: 1) Son necesarias diferentes -- reactancias porque los circuitos amortiguadores de la máquina - hacen que su modo de funcionar sea distinto durante intervalos de - tiempo muy cortos (estado subtrancitorio), durante intervalos de tiempo cortos (estado transitorio), y en estado de regimen permanente. 2) Una mayor complicación se añade por el hecho de que el circuito magnético en el eje del polo, es diferente del circuito magnético en el eje entre dos polos, lo que produce la aparición, para la mayor parte de las reactancias, de dos valores, correspondientes uno al eje del polo ( eje - - principal ) y otro que está en cuadratura con él. Ambos valores se emplean en los cálculos de presición cuando se usa, en las máquinas sincrónicas, la teoría de las " dos reacciones ", en lugar de la teoría usual " Del rotor cilíndrico ", en la -- que solo se usa el valor de la reactancia en dirección del eje 3) La tercera causa de considerar diversas reactancias, es que la mayoría de los estudios sobre la estabilidad del sistema o cortos circuitos, requiere el uso de las componentes simétri--cas, de modo que las reactancias de las máquinas sincrónicas - pueden separarse en sus componentes directas, inversas y homo-

polares. 4) El cuarto factor, es la saturación que en una máquina ordinaria, puede afectar apreciablemente la mitad de las reacciones anteriores.

#### SIMBOLOS PARA LAS DIVERSAS REACTANCIAS.

Se han normalizado, usandose el signo prima para las reacciones transitorias; segunda, para las subtransitorias; el subíndice  $d$ , para los valores en dirección del eje. Sin embargo, si no se emplea ningún subíndice, se sobreentiende que se refieren a la dirección del eje; el subíndice que se usa para los valores en cuadratura con el eje; los subíndices dos y cero se usan respectivamente, para los componentes inversa y homopolar de las reactancias, cuando no se usan, se supone que los valores corresponden a la componente directa, y por ahora se supone que todos los valores de las reactancias se refieren a valores por debajo de la saturación, a menos que se indique lo contrario. Otros subíndices que se usan son:  $o$  para circuito abierto,  $i$  para el inducido,  $l$  para la dispersión,  $e$  para la externa, y  $p$  para la de Potier.

#### UN OSCILOGRAMA TIPICO DE UN CORTO CIRCUITO BRUSCO

Puede verse en la fig. II-23 que representa un corto circuito trifásico, partiendo de pleno voltaje y sin carga, La falta, en este caso, ocurrió en un momento tal, que produjo el despla-



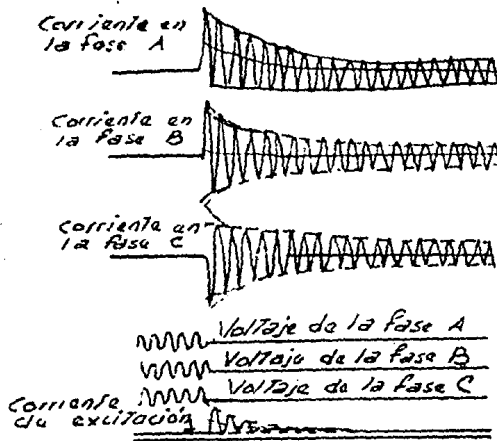
zamiento completo de una onda de corriente, y las otras dos es tán por consiguiente, desplazados por igual. Debe hacerse observar, que el eje de la corriente desplazada decae a cero después de un intervalo de tiempo.

Este desplazamiento a componente de corriente continua, es tá producido por el flujo del estator concadenado con el devanado del inducido en el instante del corto circuito. Ya que según un principio fundamental, el flujo abrazado no puede cambiar instantaneamente, este flujo encadenado, disminuye lentamente y superpone una corriente continua transitoria a la corriente del inducido, y también una corriente alterna transitoria a la corriente de excitación, mientras se va desvaneciendo.

Fijándose en las componentes simétricas de las ondas de corriente, se observa una rápida disminución de la corriente, durante los tres primeros períodos. Esta es la componente sub--transitoria de la corriente, que es producida por el flujo a--brazado por los devanados amortiguadores, en el caso de máquinas de polos salientes, ó por las corrientes parásitas en la superficie del rotor, en el caso de las máquinas de rotor ci--lindrico.

La componente transitoria de la corriente, es la prolongada y lenta disminución de la corriente que se extiende hasta casi el final del oscilograma y que termina cuando la corriente alcanza su valor constante.

Esta componente, es debida al flujo abrazado por el devanado inductor. La reactancia transitoria determina la corriente que debe cortar un disyuntor para eliminar un defecto y la reactancia subtransitoria, más la componente de la corriente continua, se usa para determinar la corriente de cresta, a fin de poder calcular los esfuerzos electromagnéticos máximos en las barras colectoras. Como los disyuntores ordinarios requieren varios periodos para abrir el circuito, la corriente subtransitoria ya ha desaparecido cuando dispara un disyuntor normal. Cuando dispara un disyuntor normal. Cuando se tiene en cuenta la reactancia subtransitoria para determinar la potencia de ruptura de los disyuntores, se aplican factores de decremento para tener en cuenta la disminución de las corrientes transitorias.



Oscilograma típico de un corto circuito trifásico repentino

Figura II-23

#### FACTOR " X " " Y " PERMEANCIA.

El método más apropiado para describir las reactancias es considerar cada una de ellas como el producto de un " factor X " y una permeancia. La permeancia  $\lambda$  es función de las dimensiones de los circuitos de hierro y cobre de la máquina, y no varía al cambiar las inducciones y corrientes de la máquina. El factor X, sin embargo, depende solamente de la tensión y corriente de trabajo de la máquina. Es el factor que convierte la permeancia en reactancias por unidad o por ciento, y es el mismo para todas las reactancias de una máquina dada.

### REACTANCIA DE DISPERSION $X_1$

Es una reactancia que puede definirse, pero no puede medirse, es la reactancia debida al flujo producido por el devanado inducido que no atraviesa el entrehierro, y puede dividirse en dispersión de las cabezas de bobinas y dispersión en las ranuras.

### REACTANCIA SUBTRANSITORIA $X''$ d.

Es igual a la suma de la reactancia de dispersión y de la reactancia debida al flujo del inducido que atraviesa el entrehierro y penetra en el rotor hasta el devanado de jaula de ardilla, en las máquinas con polos laminados, o hasta la superficie de las corrientes amortiguadoras, en los rotores cilíndricos de los turbogeneradores. Cuando no existe devanado en jaula de ardilla y los polos son laminados, el cambio inicial del flujo, penetrará hasta el devanado inductor, de modo que las reactancias transitoria y subtransitoria serán iguales, excepto para el efecto de los remaches de polo, que puede despreciarse, etc. Las condiciones subtransitorias duran de 1 a 5 períodos para una frecuencia de 50 ó 60 hz.

### LA REACTANCIA TRANSITORIA $X'd$ .

Rige las características de la máquina durante el intervalo que sigue al desvanecimiento de las corrientes amortiguadoras en la superficie del rotor o en el devanado amortiguadoras en la superficie del rotor o en el devanado amortiguador, pero antes de que hayan desaparecido las corrientes amortiguadoras en el devanado inductor. Así la reactancia transitoria es igual a la suma de la reactancia de dispersión y de la reactancia de dispersión y de la reactancia debida al flujo producido por el inducido que penetra en el rotor hasta el devanado inductor. Las condiciones transitorias tienen una duración desde, aproximadamente, 10 a 100 ó 200 períodos, para una frecuencia de 50 hz.

### LA REACTANCIA SINCRONA $X_d$

Es la reactancia en estado de régimen permanente, después de haber desaparecido todas las corrientes amortiguadoras en el devanado inductor. Su efecto sobre las condiciones de trabajo, se considera a menudo como un efecto de magnetizante, mejor que como un efecto de reactancia, ya que puede imaginarse como una fuerza magnetomotriz, que las corrientes del estator oponen a las corrientes de excitación.

### LAS REACTANCIAS EN CUADRATURA $X_q''$ , $X_q'$ y $X_q$ .

Son semejantes a las reactancias en dirección en el eje de polo, excepto que las permeancias que en ellas se encuentran, son el resultado de cuando el flujo del estator penetra por la punta de un polo, lo atraviezan y sale por la punta del otro. ( La permeancia en dirección del eje del polo se encuentra con el flujo del estator que atravieza el entrehierro por el eje - de un polo, después pasa por el eje de un polo al siguiente y vuelve a entrar al estator desde este polo ). Ya que en general no hay devanados de excitación en el eje en cuadratura, no hay tampoco corrientes en el eje ( amortiguadores ) de cuadratura, no hay tampoco corrientes amortiguadoras transitorias, y la reactancia transitoria en cuadratura es igual a la reactancia sincrónica en cuadratura.

### LA COMPONENTE INVERSA DE REACTANCIA $X_2$

Es la reactancia que se encuentra cuando se aplica al estator de la máquina en movimiento, la componente inversa del voltaje. Ya que la componente inversa del flujo gira en sentido opuesto al del rotor, corta a este en una frecuencia doble de la normal, y es, por consiguiente, una reactancia subtransitoria en lo que respecta al rotor, ya que las corrientes amortiguadoras en el devanado en jaula de ardilla o en la superficie

del rotor cilíndrico, provocan que el flujo penetre mas adentro. La componente inversa de la reactancia se toma generalmente como un valor medio entre las reactancias subtransitorias en dirección del eje y en cuadratura.

#### LA COMPONENTE HOMOPOLAR DE REACTANCIA $X_0$

En la reactancia real, cuando una corriente a frecuencia nominal entra simultaneamente por los tres bornes de la máquina y sale por el neutro de la misma.

Esta reactancia, es aproximadamente igual a la reactancia de dispersión en una máquina con bobinas en el estator de paso entero, ya una pequeña reactancia en dispersión en una máquina con bobinas en el estator de paso entero igual a dos tercios. Para otros pasos, la reactancia varía entre estos límites.

#### LA REACTANCIA DE POTIER $X_p$ .

Es una reactancia cuyo valor numérico esta comprendido entre los dos de las reactancias transitoria y subtransitoria. No es una reactancia constante, ya que varía con la corriente y el voltaje, no se emplea para el cálculo de los sistemas, como

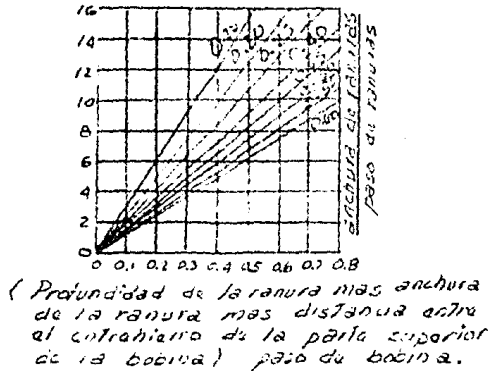
la mayor parte de las demás reactancias, sino para el cálculo de las corrientes de excitación, cuando solamente se dispone de la característica a circuito abierto o de las características a circuito abierto y con factor de potencia cero.

#### LA SATURACION DE LAS REACTANCIAS.

Varía con el voltaje, la corriente y la carga. Las reactancias a las cuales se aplica generalmente un factor de saturación, son la reactancia transitoria y la reactancia sincrónica. La primera se reduce por saturación, en una máquina típica en un 5 a 20%, y la segunda cuando se satura, tiene un valor de sólo un 50 a 80% del valor no saturado, y se le denomina algunas veces " Reactancia equivalente ", en vez de reactancia sincrónica saturada. Las reactancias transitorias, saturada y no saturada, se llaman a veces " valores o voltaje nominal y corriente nominal de la reactancia transitoria " indicando así que son los valores efectivos cuando se pone en corto la máquina ( el circuito ), respectivamente, al voltaje nominal o a un voltaje suficientemente bajo para limitar la corriente transitoria al valor de la corriente nominal de la máquina. Las demás reactancias tienen también valores saturados, pero generalmente no difieren de valores no saturados mucho y su uso no es



frecuente. Véase la Fig. ( 11-24 ).



## PERMEANCIA DE LAS RANURAS

Figura II-24

### II-8) CALCULO APROXIMADO DE LAS REACTANCIAS

Las fórmulas aproximadas que siguen, sirven para máquinas trifásicas normales conectadas en " Y ", con tres secciones -- por polo, esto es secciones de 60° por fase. Se dan en forma tal que pueden emplearse en máquinas ya construídas, siempre -- que al inspeccionarlas se puedan obtener los siguientes valores:

1. Amperes nominales del estátor.
2. Kilovoltamperes nominales.
3. Profundidad de las ranuras en centímetros.
4. Anchura de las ranuras en centímetros.

5. Paso de ranuras en centímetros
6. Paso polar en centímetros.
7. Número de polos.
8. Velocidad nominal ( v/min. )
9. Paso de las bobinas del estator en centímetros
10. Entrehierro mínimo en centímetros.
11. Espiras por bobina en el estator.
12. Número de circuitos en paralelo en el estator.
13. Longitud en centímetros desde el entrehierro hasta la parte superior del lado superior de la bobina.
14. La longitud bruta del Núcleo en centímetros ( total, excepto los refuerzos extremos ).

Para máquinas conectadas en triángulo, pueden usarse las mismas fórmulas, teniendo en cuenta que la corriente nominal es tatórica, debe multiplicarse por  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  para obtener la corriente en estrella equivalente.

Una razón para expresar las fórmulas en la forma aproximada siguiente, es que dan así una idea mas clara de las variables importantes que la que dan las fórmulas más exactas, pero más complicadas.

Calcúlese primero:

Amperes x espiras por bobina x  $\text{sen } \frac{\text{paso de bobina}}{\text{paso polar}}$

---

No. de circuitos en paralelo x paso de ranura en el estator en  $\text{cm} \times 10^3 =$  kiloamperes conductores por cm. x factor de paso.

Hállase después :

$$\frac{Kva \times 10^5}{D^2 L \times v/\text{min.}} = \frac{Kva \times \pi \times 10^5}{(\text{paso polar} \times \text{polos})^2 \times \text{longitud bruta del núcleo} \times v/\text{min.}} = \text{factor de utilización.}$$

y tendremos :

$$X = 0.0295 \left( \frac{\text{Kiloampéres conductores por cm} \times \text{factor de paso}}{\text{factor de utilización}} \right)^2$$

Este factor X debe usarse con  $\lambda_i$  [ = permeancia de la ranura]-  
 $\lambda_e$  [ = permeancia de las cabezas de bobina -  
 ( fig.sig.),  $\lambda''$  ( permeancia de amortiguamiento = aprox. de 3 a  
 6 ),  $\lambda_a$  (= permeancia del entrehierro =  $2.03 \times \text{paso polar}/\text{entre-$   
 trehierro real ), y  $\lambda'$  [ = permeancia transitoria ( fig.sig. )  
 para obtener las diferentes reactancias correspondientes, de -  
 esta forma:

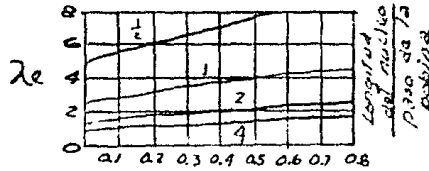
$$\text{Reactancia de dispersión} = X_e = X ( \lambda_i + \lambda_e )$$

$$\text{Reactancia subtransitoria} X''_d = X ( \lambda_i + \lambda_e + \lambda'' )$$

Reactancia transitoria =  $X_d = X (\lambda_i + \lambda_e + \lambda')$

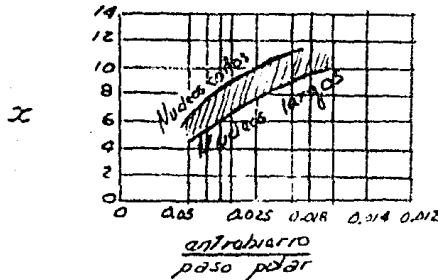
Reactancia sincrónica =  $X'd = X (\lambda_i + \lambda_e + \lambda_a)$

Nota: El paso polar, el paso de ranura y el paso de bobina deben medirse todos sobre el mismo diámetro.



(Profundidad de la ranura más anchura de la ranura más distancia desde el entrehierro a la parte superior de la bobina) Paso polar.

Permeancia de las cabezas de bobina del estator.



Permeancia transitoria

Veáse en la tabla No. 11-4 Las reactancias típicas de los alterna

TIPOS DE MÁQUINA	$X_d$	$X_2$	$X_d'$	$X_2'$	$X_d''$	$X_2''$	$X_L$	$X_o$
Turbogeneradores bipolares de rotor cilíndrico -----	1.1	1.05	0.16	1.05	0.09	0.09	0.09	0.015-0.05
Turbogeneradores de cuatro polos rotor cilíndrico -----	1.2	1.15	0.22	1.15	0.14	0.14	0.14	0.03-0.09
Generadores sincrónicos -----	1.80	1.10	0.40	1.10	0.27	0.30	0.28	0.05-0.20
Generadores y motores con polos salientes, con amortiguadores (de más de 16 polos) -----	1.1	0.05	0.37	0.05	0.27	0.30	0.28	0.05-0.22
Generadores y motores con polos salientes, con amortiguadores (de menos de 16 polos) -----	0.15	0.63	0.32	0.63	0.22	0.25	0.24	0.05-0.20

Veáse la tabla No. 11-5, Las constantes de tiempo típicas, en - seg.

	$T_d$	$T_d'$	$T_d''$	$T_d'''$
<b>TURBOGENERADORES</b>				
50 000 KVA -----	0.20	6.0	0.8	0.04
5 000 KVA -----	0.05	3.5	0.5	0.04
500 KVA -----	0.03	1.7	0.3	0.04
<b>GENERADORES DE POLOS SALIENTES</b>				
50 000 KVA -----	0.20	8.5	2.0	0.04
5 000 KVA -----	0.10	3.5	1.0	0.04
500 KVA -----	0.05	2.5	0.5	0.04
50 KVA -----	0.02	1.0	0.2	0.04

Pueden reducirse a la constante de tiempo transitoria a circuito abierto  $T'd_0$ , que expresa la proporción en que aumenta o disminuye la corriente de excitación cuando el circuito del estator está abierto y la resistencia exterior del circuito de excitación es cero; la constante de tiempo transitoria en corto - circuito  $T'd$ , que expresa la proporción en que desaparece la -- componente transitoria de la corriente del estator después de - un corto circuito brusco, con resistencia nula; la constante de tiempo subtransitoria  $T''d$ , que expresa la proporción en que desaparece la componente subtransitoria bajo las mismas condiciones; y la constante de tiempo del inducido  $T_a$ , que expresa la - proporción en que desaparece la componente de corriente continua de la corriente del inducido, bajo las mismas condiciones.

## III PRUEBAS BASICAS

### III-1 PRUEBAS BASICAS APLICABLES A LAS MAQUINAS SINCRONICAS

Las máquinas de gran potencia, se ensayan casi universalmente mediante un método el cual usa solamente una fracción de la potencia que se necesitaría con la prueba directa. Este método de la impedancia sincrónica, trata de determinar la resistencia efectiva del inducido para así encontrar valores adecuados de las tensiones internas del alternador mediante ensayos de vacío y de corto circuito del alternador.

La resistencia efectiva del inducido por fase, se calcula por el ensayo de corto circuito., Fig. III-1. ( El inducido - conectado en estrella ). Se usa una fuente de baja tensión de C.C. y el método de Voltímetro-Amperímetro en lugar de una - - fuente de C.A., y un Vatímetro. Se usa corriente continua porque el método de C.A. incluiría pérdidas de acoplamiento en la estructura de los polos de excitación y en el hierro de alrededor, obteniendose valores engañosos. La resistencia en cortocircuito por fase es:

$$RCC = \frac{I}{2} \frac{\text{Lectura del voltímetro}}{\text{Lectura del Amperímetro}} = \frac{V}{Ax2}$$

La resistencia de C.A. por fase se obtiene multiplicando la resistencia de C.C. por un factor que varía entre 1.2 y 1.8



según la frecuencia, la calidad del aislamiento. El tamaño y potencia etc. Para calcular la resistencia efectiva por fase en C.A. usaremos el factor 1.5.

a) " Ensayo en vacío "

Se obtiene una curva de magnetización ( en vacío ) con excitación independiente del alternador, funcionando a la velocidad síncrona o velocidad nominal. Se conecta un amperímetro de C.C. en el circuito de excitación para registrar la intensidad de excitación que será máxima y se conecta un voltímetro de C.A. en bornes de dos terminales cualesquiera del estator para registrar la tensión de línea VL. Se toma un número suficiente de lecturas empezando con intensidades de excitación cero, tanto por debajo como por encima del codo de la curva, en cada paso, se registran la intensidad de excitación  $I_f$  y la tensión generada por fase. Egp. ( o sea  $\frac{V_L}{1.73}$  ). Y se dibuja una curva de saturación como la de la siguiente figura.

GENERADOR SINCRONO

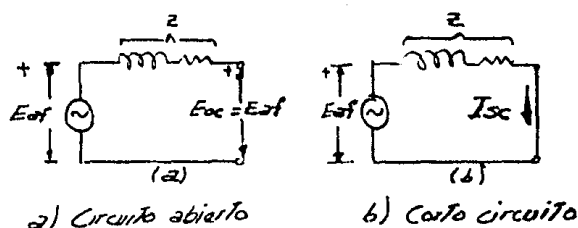
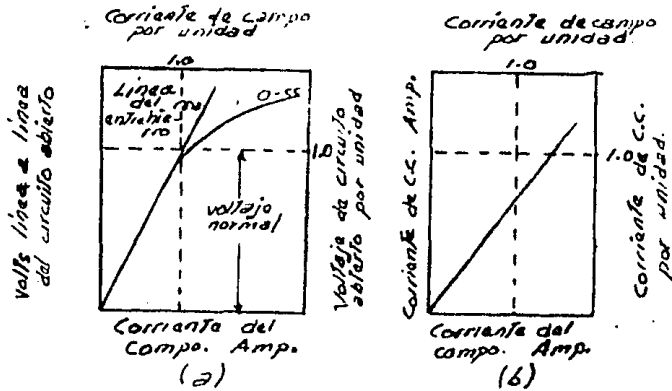


Figura III-1



- a) Característica de circuito abierto  
 b) Característica de corto circuito

Figura III-2

Como en el caso de la curva de magnetización en C.C., los resultados deben ser tomados en un sentido para evitar bucles secundarios de histeresis.

#### b) " ENSAYO DE CORTO CIRCUITO "

La característica de corto circuito, se toma conectando amperímetros en la línea para registrar la corriente de línea (Incluso aunque el alternador esté conectado en triángulo ).

La intensidad de excitación, se ajusta a cero, y el alternador-

se lleva a su velocidad, se toman lecturas de la intensidad de excitación de C.C. respecto a la intensidad en el inducido de corto circuito, de C.A. Resultando en la gráfica de tensión - generada por fase vs. corriente de excitación según fig. III-2 se hace notar que esta curva es totalmente lineal; ya que estando cortocircuitadas las líneas a cargas y por lo tanto la tensión en bornes es cero. Toda la tensión generada por fase -  $E_{gp}$ , es necesaria para vencer la caída interna de impedancia.  $I_a Z_s$  por fase y como  $Z_s$  es casi constante, mientras la intensidad de corto circuito varía directamente con la tensión generada y la intensidad de excitación necesaria para producirla - ( por debajo de la saturación ). Como la impedancia interna tiene una carga de bajo F.P. extremadamente inductivo, el efecto desmagnetizante, es tal que reduce el flujo de excitación y la tensión generada también en una considerable cantidad. Así pueden usarse corrientes de excitación bastante elevadas sin producir corrientes de corto circuito normalmente excesivas.

Cuando la intensidad de corto circuito por fase en el inducido es igual a la corriente de plena carga o nominal, y cuando la velocidad y frecuencia del alternador corresponden a sus respectivos valores nominales, se se eliminara el corto -- circuito y se mantuviera constante la intensidad de excitación,

y o la excitación necesaria para producir la intensidad de corto circuito. Pero esta misma excitación produciría una ten- - sión generada en vacío de  $E_{gp}$ , correspondiente al punto C.C. Como la tensión en bornes es cero podemos escribir:

$$E_{gp} = I_a Z_p \quad \text{ó} \quad Z_p = \frac{E_{gp}}{I_a}$$

Donde  $I_a$  es la intensidad a plena carga o nominal por fase  
 $E_{gp}$  = Es la tensión en vacío abierto producida por la misma in- - tensidad de excitación, que originó la corriente nominal de -- circuito por fase.

$Z_p$  = Es la impedancia síncrona por fase.

De aquí se desprende que para las distintas ecuaciones pa- ra la regulación de tensión se establece en función de las caí- das de tensión producidas por la Resistencia efectiva del indu- cido por fase y por la reactancia síncrona por fase, por consi- guiente:

$$X_s = \overline{Z_p} - \overline{R_a}$$

Donde:  $X_s$  = Reactancia síncrona por fase.

$Z_p$  = Impedancia síncrona por fase ( Por corto cir- cuito )

$R_a$  = Resistencia efectiva del inducido por fase - ( determinada por el ensayo de resistencia - en C.C. )

Estas pruebas de corto circuito y circuito abierto, se hacen cuando no es posible hacer un ensayo de calentamiento con factor de potencia cero. Si la prueba a circuito abierto se hace a tensión nominal y la prueba en corto circuito a la corriente nominal, el aumento de la temperatura del estator a plena carga será aproximadamente la suma de los dos aumentos sobre la temperatura ambiental real, haciendo la corrección apropiada por la elevación de temperatura producida por el rozamiento del aire de ventilación.

#### C) ENSAYO DE CALENTAMIENTO MEDIANTE LECTURAS DE TEMPERATURA.

Una vez parada la máquina, después de haber funcionado con carga, se efectúa registrando a intervalos el tiempo y la temperatura, y trazando después la curva de temperaturas en función del tiempo, que se extrapela hasta el tiempo cero, o sea, el momento en que se suprimio la carga de la máquina. De esta forma es posible obtener las temperaturas finales de las bobinas del rotor, de las extremidades polares o de otras partes giratorias cuyas temperaturas solo pueden medirse cuando la máquina está parada. En el caso en que la temperatura del núcleo, se mida sobre la parte exterior del núcleo del estator, las temperaturas obtenidas después de parada la máquina, a me-

nudo resultan más elevadas que las obtenidas mientras la máquina, a menudo resultan más elevadas que las obtenidas mientras la máquina gira, ya que el calor almacenado en el centro del núcleo tiene posibilidad de transmitirse hacia la superficie, lo que eleva la temperatura de ésta, la temperatura más elevada que puede leerse, se considera como la temperatura del núcleo.

#### d) ENSAYO DE CALENTAMIENTO DESPUES DE LA INSTALACION

Este es un método para el ensayo de calentamiento de las máquinas potentes y consiste en hacerlas funcionar con carga de la red, después de ser instaladas en la central, de este modo, se obtiene el funcionamiento al factor de potencia nominal en vez del factor de potencia cero, pero no puede hacerse después de su instalación, de modo que las modificaciones son difíciles, y es más difícil de calibrar y obtener el equipo de prueba y aparatos de medida que en la fábrica. Otro inconveniente es que en algunos sistemas, puede ser difícil mantener la carga y el factor de potencia a un valor constante.

#### e) ENSAYO DE CALENTAMIENTO POR EL METODO INTERMITENTE

Debe hacerse haciendo funcionar alternativamente la máquina o en circuito abierto y en corto circuito, el tiempo de cada alternancia debe escogerse de forma que durante  $\frac{1}{2}$  de hora ó

½ hora, las pérdidas totales en el hierro, las pérdidas totales en el hierro, las pérdidas totales en el inducido y las -- pérdidas totales en el inductor, expresadas todas en watt-ho-- ras, sean iguales para las calculadas a plena carga.

f) ENSAYO DE CALENTAMIENTO A PLENA CARGA HACIENDO VARIAR  
EL ANGULO DE ACOPLAMIENTO

Puede hacerse cuando se dispone de dos máquinas síncronas idénticas. Esto es posible porque la potencia en el eje de una máquina síncrona depende más del ángulo de desplazamiento del eje que de la excitación del inductor. Cuando se efectúa un ensayo de ésta clase, la carga se regula variando el ángulo de acoplamiento de los dos motores, y el voltaje, las corrientes circulatorias y el factor de potencia se determinan por las corrientes de excitación de las dos máquinas. Una de las máquinas debe funcionar necesariamente como motor, y la otra como generador. A no ser que la fuente de energía tenga potencia suficiente para suministrar los kilovoltamperes reactivos, la corriente inductiva de una máquina, debe ser suministrada como corriente capacitiva por la otra. En otras palabras, si una máquina está sobreexcitada, la otra debe estar subexcitada.

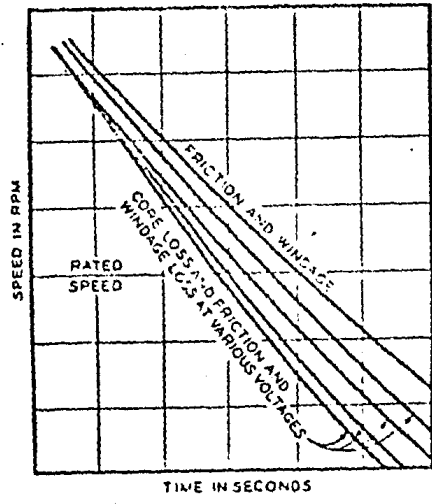
### III-2 METODOS PARA LA MEDICION DE LAS PERDIDAS

El método general y casi universal para medir las pérdidas de una máquina síncrona, consiste en emplear un pequeño motor de arrastre de potencia aproximadamente igual a la que se necesita para suministrar las pérdidas que deben medirse. Midiendo la potencia absorbida por el motor de arrastre y calculando la potencia suministrada por el eje del mismo ( valiéndose de las pérdidas del motor comprobadas en condiciones semejantes ), conoceremos la potencia absorbida por la máquina síncrona. Otro método de ensayo es el método de RETARDACION o de desacele<sup>r</sup>ación, en el que las pérdidas de la máquina síncrona se consideran proporcionales a la rapidez de variación de velocidad. Este método es más difícil y menos exacto que el del motor de arrastre, excepto cuando se trata de máquinas con gran factor- $WR^2$ , y, en consecuencia se usa solamente para las grandes máquinas en las que no es ventajoso usar un motor de arrastre.

#### LA PRUEBA DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

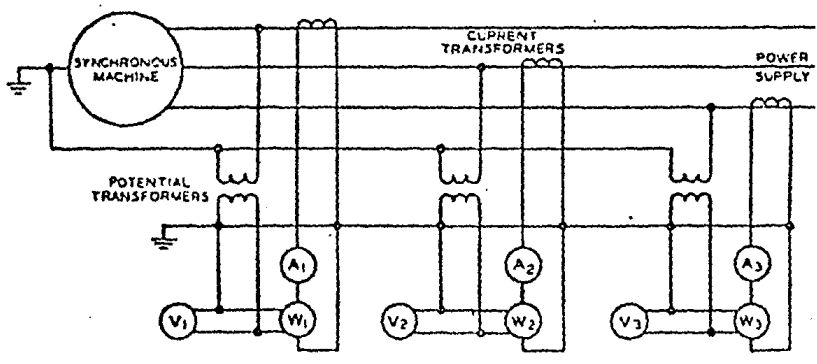
Se efectúa muy frecuentemente con un probador de aislamiento " Megger ", que según el tipo, aplica una corriente continua de 500, 1 000 ó 2 000 volts, e indica la resistencia de aislamiento en ohm o megohm. La resistencia de aislamiento es





Typical retardation curves

3) *Curvas Típicas de retardación*



Connection diagram—three-wattmeter method of measuring power

Figura III-3



## b) PRUEBAS DE CORRIENTE DIRECTA

PRUEBAS DIELECTRICAS. El propósito que se persigue en las pruebas dieléctricas es cerciorarse de que el aislamiento de la máquina en cuestión, es capaz de soportar las cargas de voltaje que se le han de imponer durante la operación en condiciones -- normales y, posiblemente también anormales.

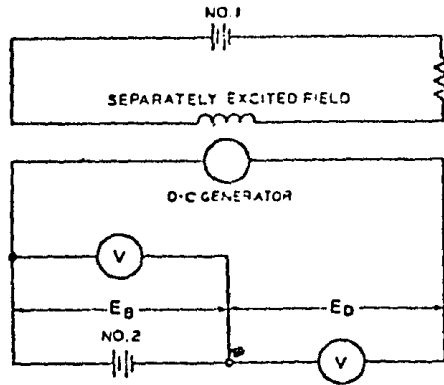
La aplicación del alto voltaje de corriente directa que se necesita para la ejecución de la prueba dieléctrica encierra se rios peligros, ya que el alto voltaje de esta corriente puede - causar la perforación o el deterioro del aislamiento, sino que - también puede provocar quemaduras intensas en el laminado de la máquina misma; porque la capacidad necesaria para la prueba de máquinas grandes es tal, que en caso de una falla, el arco que - se forma es seguido por el desarrollo de energía en grandes pro - porciones. A pesar de ésto, el riesgo que implica la prueba -- tiene en muchos casos menor importancia que un paro prolongado - como consecuencia de una falla de aislamiento durante el proce - so de trabajo, al impulsar alguna maquinaria de importancia vi - tal.

El voltaje de prueba aplicable a máquinas nuevas, o a las - bobinas de máquinas cuyos devanados y materiales aislantes, han

sido revisados en su totalidad y que está especificado por los estándares del AIEE y ASA, equivale al doble de voltaje de régimen más 1000 volts sostenido durante 60 seg., exceptuando -- los devanados del campo magnético de los motores síncronos, a los que se les aplica un voltaje de prueba 10 veces mayor que el voltaje de la excitatriz, pero no menor de 1 500 volts. Para máquinas en uso, o para máquinas reparadas, no se han prescrito estándares ; pero en la practica, se ha establecido la aplicación de voltajes de prueba de corriente alterna equivalentes al 65 y 75% del voltaje de prueba para devanados nuevos. El porcentaje menor, se emplea para embobinados más viejos.

Durante los años recientes se ha ido generalizando el empleo de corriente directa de alto voltaje para pruebas. Esta, tiene numerosas ventajas sobre la corriente alterna para la -- práctica de pruebas. La capacidad necesaria, es pequeña y el efecto de la prueba para localizar el aislamiento debilitado , es comparable al de la prueba con la corriente alterna. La unidad que se utiliza, es mucho más pequeña que el transformador de pruebas, el equipo que se requiere para la revisión de máquinas grandes en corriente directa, puede transportarse con comodidad en un automóvil, mientras que para el transporte del transformador es necesario un camión grande.

El dispositivo es el del sistema electrónico y consiste básicamente en un circuito de rectificación de alto voltaje. Instrumentos especiales se encargan de medir la corriente y el voltaje. Otra ventaja de primordial importancia es que, en caso de una falla del aislamiento durante la prueba, no resultarán quemaduras en los núcleos de hierro a consecuencia de la baja capacidad de potencia que se emplea. El equipo de prueba, se conecta a la red de alumbrado de 60 ciclos. Se han establecido valores de prueba, en los que se ha aplicado un voltaje de corriente directa 60% mayor que el empleado por lo general en pruebas hechas con corriente alterna. Probablemente se ha generalizado en la actualidad el método de prueba a base de corriente directa, ya que el equipo correspondiente es mucho menos costoso, sobre todo si se le compara con el valor de un transformador de pruebas, con capacidad suficiente para probar el embobinado de máquinas grandes, mientras que el mismo dispositivo de corriente directa sirve para probar el devanado de las máquinas hasta las más grandes.



Speed measurement by direct-current generator

Figura III-5

### C) PRUEBAS DE IMPULSO

Debido a que todo el equipo estará sometido durante su operación a sobrevoltajes, causados por descargas, operaciones de maniobra ( switcheo ), etc., es necesario hacer sobre dicho equipo pruebas que indiquen la capacidad de estos para soportar los sobrevoltajes durante su operación normal.

Las pruebas no reproducirán las condiciones de operación exactamente, pero pueden arrojar un criterio basado en experiencias acumuladas para saber que tan satisfactorio puede ser el servicio esperado de un equipo.

La prueba normalizada en la actualidad para demostrar la -

capacidad de un equipo eléctrico a sobrevoltajes, es la de la Comisión Internacional de Electrotecnia ( IEC ), que recomienda una onda de 1.2/50  $\mu$ seg. Esta onda reproduce la mayoría de los efectos más severos por sobrevoltajes, debido a descargas atmosféricas, un frente de onda rápido que da una distribución de voltaje no lineal, y una larga cola de onda que conduce a reflexiones de voltaje que produce altos voltajes en algún equipo.

La onda normalizada de prueba de la IEC de 1.2/50  $\mu$ seg., - ha sido usada por muchos años, considerando que la principal causa de sobrevoltajes en el equipo eléctrico, eran las descargas; sin embargo, en los últimos años con el incremento de voltaje en los sistemas, los sobrevoltajes por operaciones de maniobra han venido a incrementar los problemas.

Como existe un gran rango de ondas de voltaje por operaciones de maniobra, no ha sido normalizada una forma de onda para determinar la capacidad de un equipo para soportar los voltajes por switcheo, entonces la prueba en este caso, está basada en una onda de 1.2/50  $\mu$ seg, y la capacidad para soportar sobrevoltajes por switcheo en un equipo eléctrico, se ha estimado - entre 75 y 85% del valor de 1.2/50  $\mu$ seg.

La dificultad en la especificación de una onda de switcheo para prueba, se puede observar en los siguientes diagramas;

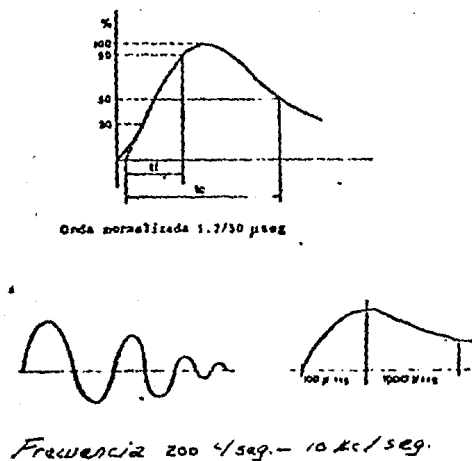


Figura III-6

#### d) PRUEBAS DE ALTA TENSION DE CORRIENTE ALTERNA

En la fábrica, especifica C.F.E. que las bobinas sean probadas cuando menos a tres veces la tensión nominal entre fases de la máquina por minuto con C.A.

Con el embobinado completo montado en fábrica, se le debe aplicar una tensión de  $2 V_{nom} + 1\ 000$  Volts a 60 Hz.

Cuando se monta en la Central el generador y antes de entrar en servicio nuevo, estando seco y con pruebas de Megger a



ceptables, se probará al 85% del valor de fábrica por minuto.

Es posible efectuar esta prueba con corriente directa en vez de corriente alterna con un factor de conversión de 1.7

O sea si se prueba con corriente directa el valor de corriente alterna, deberá multiplicarse por 1.7

Para pruebas de fábrica de C.A.: para el rotor, deben ser de 10 veces la tensión de excitación sin que sea menor de 1500 volts.

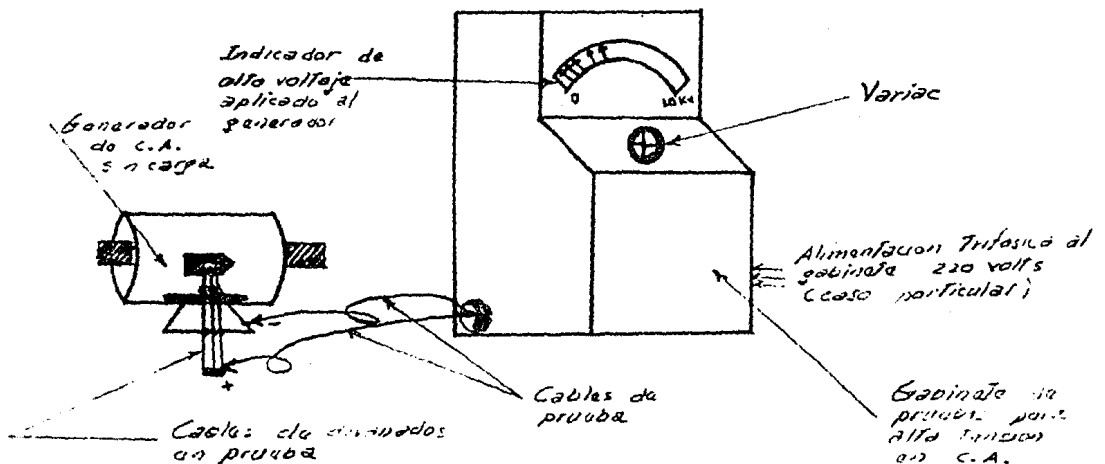


Figura III-7

## III-3 PROTECCION

## a) PROTECCION CONTRA INCENDIOS

Muchos turbogeneradores de gran potencia, y algunos generadores hidráulicos y condensadores síncronos, tienen tuberías de agua en el interior de las tapas, dispuestas para rociar -- con agua las cabezas de bobina y los extremos del entrehierro. El funcionamiento de la válvula de admisión de agua, se hace -- generalmente a mano, pero puede ser automático. Algunas veces se emplea vapor en vez de agua. Un segundo método de protec-- ción contra incendios, que ha sido empleado en numerosas máqui-- nas modernas de todos los tipos, es el uso del ANHIDRIDO CARBO-- NICO. Su admisión en la máquina, se hace en general automática-- mente cuando funciona la protección diferencial de la misma, o algunas veces al funcionar un relé térmico en el conducto de -- salida del aire. La primera acción que se produce después del funcionamiento del relé, es una admisión muy rápida de anhídri-- do carbónico en cantidad suficiente ( aproximadamente 50% ) pa-- ra proporcionar una atmósfera que no permita que la combustión continúe. La acción que sigue, es la admisión lenta del anhí-- drido carbónico suficiente para mantener esta mezcla durante -- todo el período de desaceleración de la máquina. Si la máqui-- na no es del sistema de ventilación en circuito cerrado, pue-- den disponerse unas compuertas en las bocas de entrada y sali--

da de los conductores de aire, que se cierran automáticamente, antes de admitir el anhídrido carbónico.

#### b) PROTECCION CONTRA SOBRETENSIONES

La protección contra sobretensiones en las máquinas sincro<sub>nas</sub>, se consigue en parte con el uso de pararrayos sobre el -- sistema. Existe, sin embargo, el problema primordial de rebajar el frente de cualquier onda entrante, de modo que no pueda producirse una tensión peligrosa entre los bornes de la bobina, esto se consigue mediante el uso de condensadores en los bor-- nes de la máquina, tanto los condensadores como los pararrayos usados en la protección de la máquina, son calculados y dimensionados para este servicio y pueden diferir de los mismos dis<sub>positivos</sub> empleados con otros fines.

IV ELEMENTOS DE UNA CENTRAL ELECTRICA  
CENTRAL HIDRAULICA

## CENTRAL HIDRAULICA

Los elementos de que se constituye una central hidráulica- para la generación de energía eléctrica son:

- a) Camara de turbinas
- b) Tubo de aspiración
- c) Canal de desagüe
- d) Casa de máquinas

Cada uno de éstos elementos activos, tiene un papel tan importante y tan ligados entre sí, que al prescindir de uno , se alteraría todo el sistema en alguna medida. A continuación se trata con especial cuidado cada apartado anteriormente señalado.

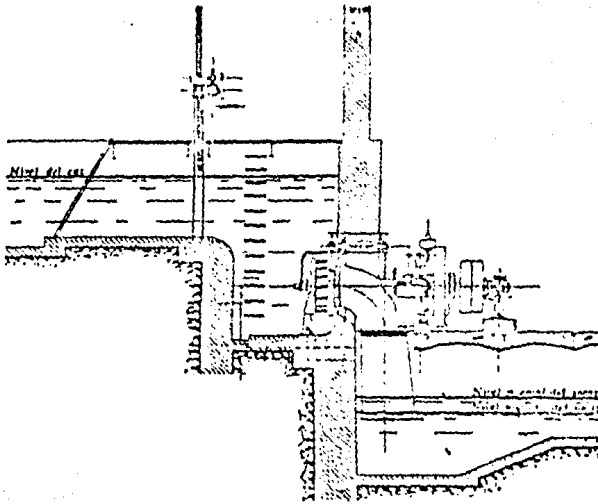
### IV-1 CAMARA DE TURBINAS

Se denomina camara de turbinas al espacio destinado en una central hidroeléctrica para el alojamiento de las turbinas hidráulicas.

La camara de turbinas, puede ser abierta si está en comunicación con el exterior, o cerrada en el caso contrario.

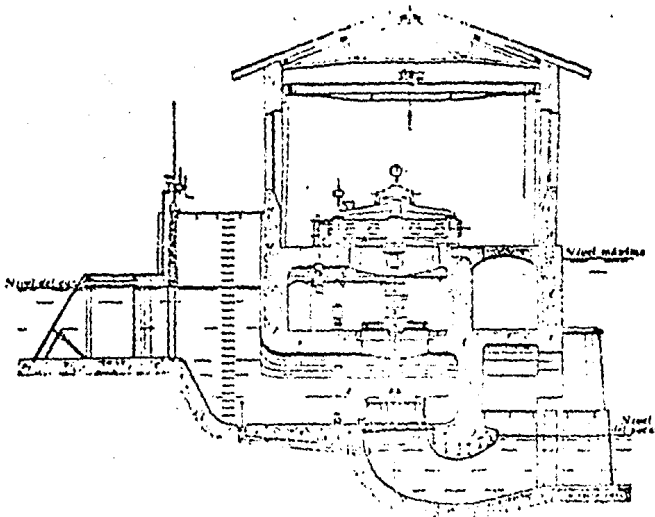
La cámara de turbinas abierta, solamente se utiliza para saltos de pequeña altura ( máximo unos cinco mts. ) En la cámara abierta, se utilizan turbinas de eje vertical ( Fig. IV-1) y turbinas de eje horizontal ( Fig. IV-2). En el primer caso, la cámara queda por debajo de la sala de máquinas y el nivel de aguas arriba queda también por debajo del piso de aquella. En el segundo caso, la cámara queda contigua a la sala de máquinas y el nivel de aguas arriba, por encima del piso de la sala de máquinas.

Debido a la poca altura de caída de agua en la cámara abierta, se utiliza la turbina de eje vertical ya que por estar el piso cerca del nivel de aguas, esta presenta un mejor aprovechamiento del espacio y eficiencia de acoplamiento, y tiene la gran ventaja a la resistencia por vibración.



—Central hidráulica con turbina Francis de eje horizontal en cámara abierta.

Figura IV-1



—Central hidráulica con turbina Francis de eje vertical, en cámara cerrada.

Figura IV-2

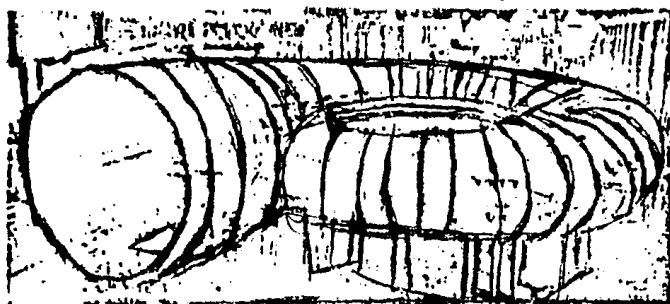
## CAMARA DE TURBINAS EN ESPIRAL

Dentro de las camaras cerradas, esta camara es la más utilizada, en esta camara se va estrechando la sección de paso a medida que vá entrando parte de ésta en la distribución de la turbina y así se puede conseguir igual velocidad en toda la longitud de la camara evitandose las vibraciones por los cambios de velocidad. Las camaras en espiral, se construyen de a cero soldado o roblonado o de ormigón armado ( ver fig. IV-3 ).

En general se puede decir que las camaras cerradas, con -- turbinas de eje horizontal se emplean sobre todo, en saltos de gran altura, tienen la ventaja de una mayor accesibilidad a -- los organos de la turbina y además queda toda la maquinaria so bre el piso de la central a la vista del personal de vigilan-- cia; finalmente, la turbina resulta más económica que la de eje vertical puesto que en esta última, el peso del rodete y -- del rotor del generador han de resistirlo los soportes cojinetes de la turbina; como consecuencia, tanto los soportes como el eje determinan un mayor precio de la unidad turbina-generador, puesto que en el caso de turbina de eje horizontal, el pe so total se repartiría entre tres o más cojinetes, de menor -- costo y de mayores garantías de funcionamiento, sin embargo, y



como hemos dicho anteriormente, las turbinas de eje horizontal requieren más espacio y por lo tanto mayor costo de instalación.



*Cámara en espiral de chapa de acero-roblonada para una turbina Francis de Escher Wyss.*

Figura IV-3

#### REPARTO DE LOS DIFERENTES GRUPOS EN LA SALA DE MAQUINAS

La disposición de la fig. IV-4a es la más sencilla, la de la Fig. IV-4b es la que proporciona mayor ahorro de la superficie pero requiere mayor anchura de la sala de máquinas y doble tubería. En las disposiciones de las figs. IV-5 y IV-6, las de

rivaciones para las tomas de agua para las turbinas, se hacen en ángulo recto, lo que representa mayor pérdida de carga. Para adoptar una de estas soluciones, habrán de tomarse en cuenta las circunstancias de instalación y terreno de que pueda disponerse sin tener que realizar grandes obras de explanación.

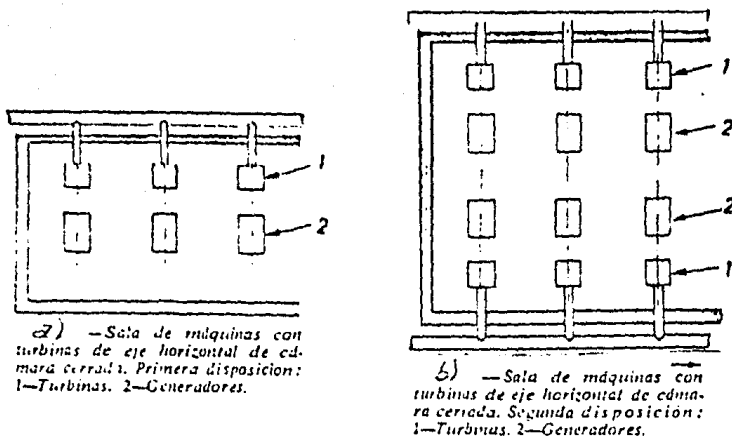
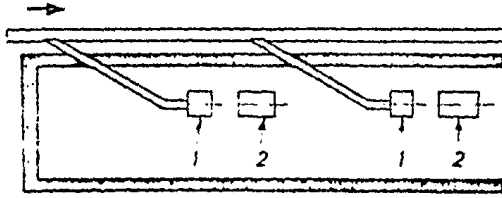
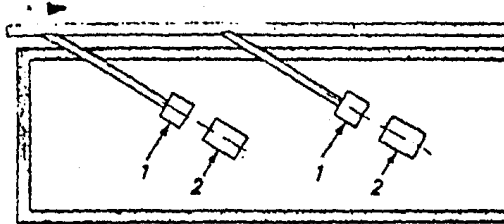


Figura IV-4



— Sala de máquinas con turbinas de eje horizontal de cámara cerrada.  
Tercera disposición: 1—Turbinas, 2—Generadores.

Figura IV-5



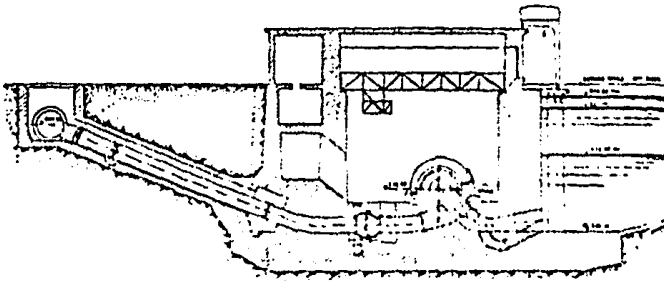
— Sala de máquinas con turbinas de eje horizontal de cámara cerrada.  
Cuarta disposición: 1—Turbinas, 2—Generadores.

Figura IV-6

### EJEMPLOS DE INSTALACION DE TURBINAS DE EJE HORIZONTAL EN CAMARA CERRADA

Por lo general y puesto que esta disposición se emplea

para grandes saltos, los tipos de turbinas más empleadas serán " Francis " y " Delton " y además, cámaras espirales de chapa de acero. En la fig. IV-7, puede apreciarse la disposición de una turbina Francis de eje horizontal de 66200 CV. A la izquierda de la turbina, está instalada la válvula esférica del cierre.

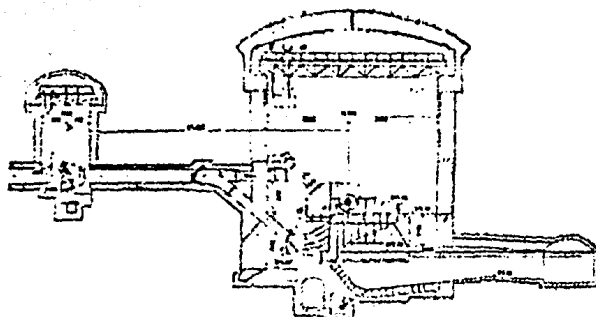


—Turbina Francis de eje horizontal, de cámara cerrada de 66200 CV, construida por Escher Wyss para la central de Rodund (Austria); a la izquierda de la turbina está instalada la válvula esférica de cierre.

Figura IV-7

En la fig. IV-8 se aprecia la disposición de turbinas dobles Delton de eje horizontal y 81200 cv. utilizadas en la central subterránea de Montpezat ( Francia ), cada rueda motriz es atacada por dos inyectores de los que el superior prolonga directamente la tubería forzada. Para resumir todo lo que he-

mos dicho en el presente espacio, observemos las ventajas e in convenientes de las turbinas de eje vertical y de eje horizontal, tanto para camaras abiertas como cerradas.



—Corte transversal de la central subterránea de Montpezat (Francia), con turbinas Pelton dobles de eje horizontal, 81.250 CV y cámara cerrada, construidas por Escher Wyss. Los órganos de obturación han sido reunidos en una galería espiral (a la izquierda de la figura).

Figura IV-8

## TURBINAS DE EJE VERTICAL

## VENTAJAS:

- a) Posibilidad de montar los generadores por encima del nivel de aguas, hasta la altura más conveniente por pequeño que sea el salto.
- b) Economía de instalación.

## INCONVENIENTES:

- a) Si la turbina ha de accionar un generador de eje horizontal, son necesarios engranajes de transmisión.
- b) Las cargas verticales correspondientes a las máquinas, han de ser sostenidas por un soporte cojinete de empuje.

## TURBINAS DE EJE HORIZONTAL

## VENTAJAS:

- a) Soportes cojinetes normales  
Transmisión directa a ejes horizontales  
Más fácil vigilancia porque todos los elementos están a la misma altura.

## INCONVENIENTES:

- a) Instalación de mayor extensión superficial, por lo tanto más caras.
- b) El agua ha de reingresar al canal de desagüe através - de uno o más codos a 90° por lo tanto, mayores pérdidas de carga.

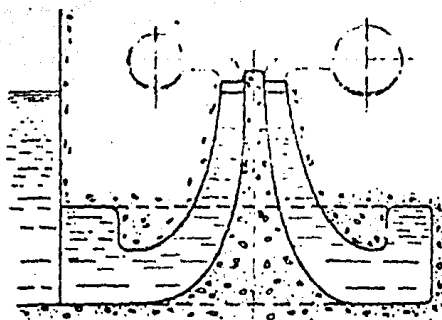
## IV-2 TUBO DE ASPIRACION

El tubo de aspiración, sirve de enlace entre la turbina y el desagüe, y para aprovechar mejor el salto entre ambos elementos. Se construye de ormigón o de chapa de acero y ha de tener una sección variable para conseguir la máxima recuperación de la energía cinética del agua a la salida del rodete de la turbina. En las turbinas Delton, no tiene importancia la recuperación de la energía existente a la descarga de la rueda y además, entre el centro de la rueda y el nivel de agua del desagüe, hay una distancia que representa una proporción muy pequeña de la altura total del salto. Pero en los restantes tipos de turbinas, ( Francis, Elice, Kaplan ) la velocidad de salida del rodete es elevada y el rendimiento con descarga libre, sería muy bajo.

El tubo debe ser lo más recto posible, pero cuando la instalación no lo permite, sin un gran costo de excavación, el tubo se encorva suavemente desaguando horizontalmente dando a la salida mayor dimensión a la luz horizontal que a la vertical a bocinándolo gradualmente para disminuir la velocidad residual.

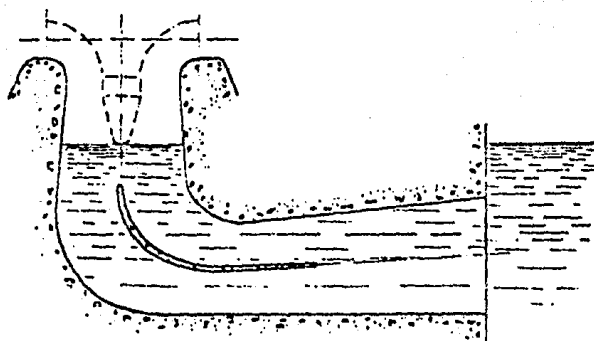
En las turbinas rápidas, al salir el agua animada de un movimiento giratorio en la dirección del eje del rodete, se producen remolinos en los cambios de dirección que reducen la sección de desagüe del tubo. Con objeto de evitar este inconveniente que reduce el rendimiento de la instalación, se disponen hidroconos ideados para las turbinas de eje vertical; El más empleado es el hidrocono Moody ( Fig. IV-9 ). Algunos fabricantes no emplean el hidrocono, sino la disposición representada en la Fig. IV-10, en la que los tabiques colocados en el tubo, guían los filetes líquidos en dirección de éste, cortando así la trayectoria que llevan a la salida del rodete.





— Sección de un hidrocono Moody.

Figura IV-9



— Sección de un hidrocono Volth.

Figura IV-10

## CANAL DE DESAGUE

## IV-4 CASA DE MAQUINAS

En la casa de máquinas de una central hidroeléctrica, se montan los grupos eléctricos para la producción de energía eléctrica, así como la maquinaria auxiliar para su funcionamiento, las disposiciones adoptadas para la casa de máquinas son variadísimas y dependen de las circunstancias y condiciones del aprovechamiento hidroeléctrico.

Según la disposición de la casa de máquinas, podemos clasificar las centrales en:

- a) Centrales al exterior
- b) Centrales subterráneas

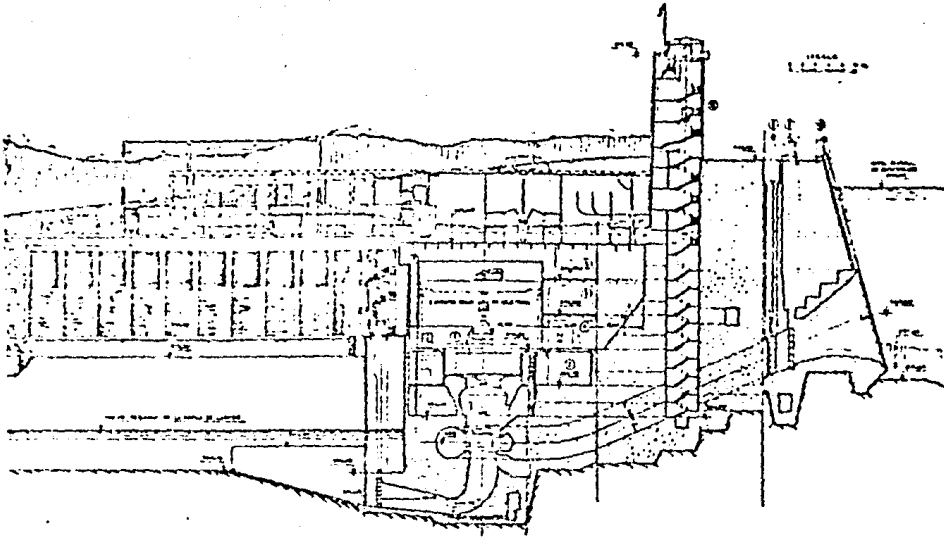
## CENTRALES AL EXTERIOR

Constan esencialmente de una nave donde se instalan los grupos generadores y de uno o varios edificios anexos para la instalación de los transformadores, maquinaria auxiliar y aparatos para corte, protección y seguridad. Los edificios generalmente, se construyen de ormigón en masa o armado y a veces en mampostería, piedra o ladrillo. Conviene que estas centrales estén cerca del punto en que las aguas derivadas tengan que

reingresar en el río.

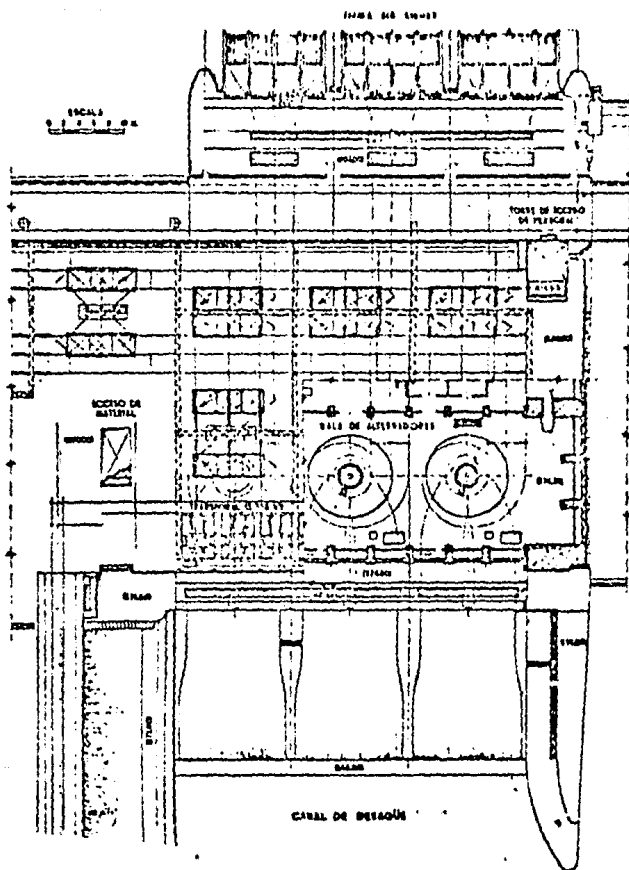
En los saltos obtenidos exclusivamente con las presas del embalse, lo más corriente es situar la casa de máquinas cerca de la presa y hacer la toma de agua desde esta tubería y al nivel suficientemente inferior al máximo del embalse, con objeto de aprovechar el caudal almacenado en él para regular el consumo de energía en la central.

Muchas veces, el edificio de la central forma conjunto con la presa y entonces se denomina centrales de pie de presa. Un ejemplo de este tipo de central, se observa en la Fig. IV-11, que es una sección transversal y en la fig. IV-12 que es la -- planta de esta central.



— Sección transversal de la central de pie de presa de Villalcampo, sobre el río Duero (Iberduero S.A.): 1— Torre de toma de agua. 2— Piso intermedio. 3— Piso de turbinas. 4— Cuadro, celdas, servicios auxiliares y taller. 5— Máquinas y servicios. 6— Acondicionamiento de aire. 7— Salida de barras a 13.600 V. 8— Compuertas de toma. 9— Ataguas y grúa de toma. 10— Limpiarejillas. 11— Pórtico de 20 Tons. en ataguas de turbinas. 12— Torre de servicios y acceso de personal.

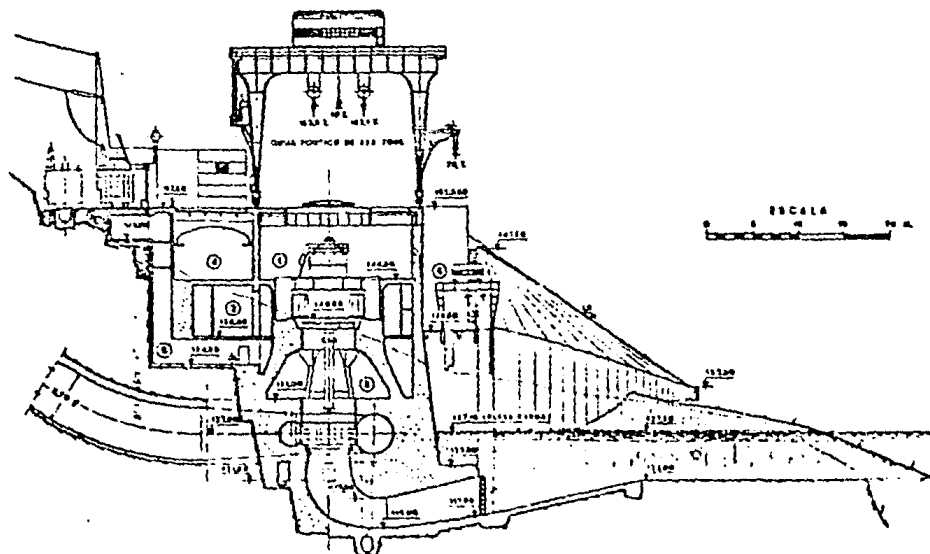
Figura IV-II



— Planta de la central de pie de presa de Villalcampo, sobre el río Duero (Iberduero S.A.).

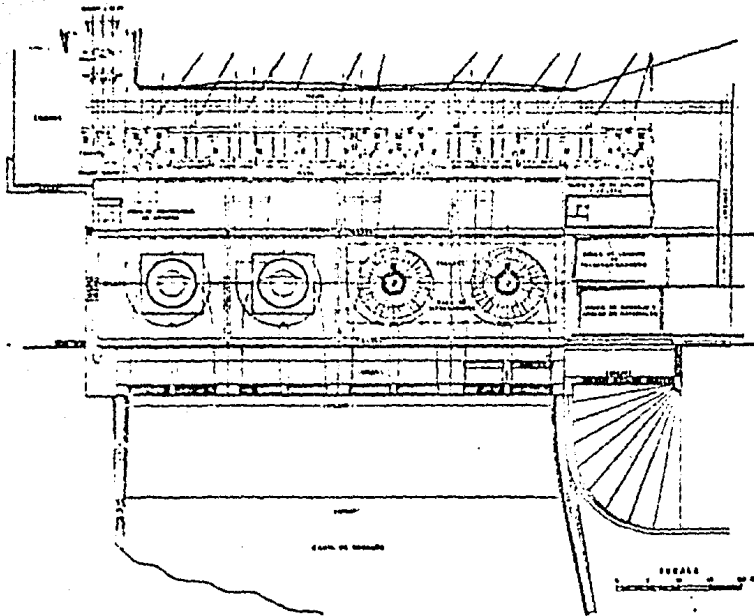
Figura IV-12

Otra forma de situar la casa de máquinas, cuando por razones de terreno así lo requieran, es situarla de forma que el canal de desagüe sea de corta longitud. Esta es la disposición adoptada en una central sobre el río Duero (por ejemplo) la cual se muestra en su sección transversal en la fig. IV-13 y en la Fig. IV-14 que muestra la planta de esta central, constituida por cuatro turbinas Francis de eje vertical y potencia unitaria de 75000 KVA. La casa de máquinas está situada en roca viva a orillas del Duero. Las tuberías forzadas que conducen el agua hasta las turbinas son de 5.7 mts. de diametro.



— Sección transversal de la central de Saucelle, sobre el río Duero (Iberduero S. A.): 1—Nave de alternadores 2—Piso intermedio. 3—Piso de turbinas. 4—Caudal, celdas, servicios auxiliares. 5—Salida de barras a 15.5 kV. 6—Grúa pórtico de 20 Tons para atagada.

Figura IV-13



—Planta de la central de Saucelle, sobre el río Duero (Iberduero S. A.).

Figura IV-14

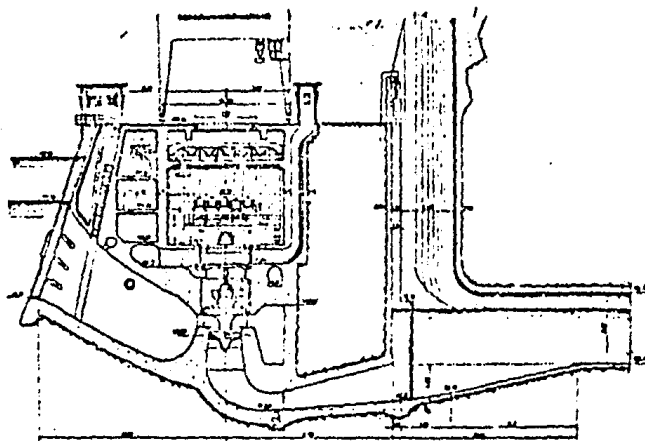


En otras ocasiones, por las condiciones del terreno o por circunstancias de tipo económico, ha de situarse la central de forma que las tuberías forzadas son cortas, mientras que los canales de desagüe son de gran longitud.

A causa de ocuparse todo el cause del río con el aliviadero de la presa, y ser ordinariamente escarpadas las laderas, se sitúa la central aguas arriba de la presa en la margen izquierda del embalse, del que toma directamente las aguas, las cuales se devuelven al río, por medio de dos canales de descarga en túnel que cortan la curva que describe el río, esta solución tiene la ventaja de eliminarse la chimenea de equilibrio. Véase la Fig. IV-15 y IV-16 las secciones transversal y longitudinal respectivamente; central que ha sido excavada totalmente en la ladera del río. Está constituida por dos turbinas Kaplan de eje vertical y potencia unitaria de 22730 cv. que accionan dos generadores de 20000 KVA. Estos generadores, están acoplados a barras de 15 KV. y un solo transformador de 22KV.

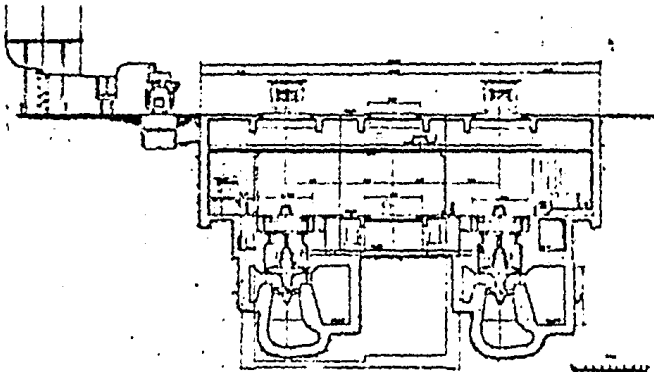
En algunas ocasiones, la casa de máquinas ha de estar situada lejos del aprovechamiento hidroeléctrico; esto sucede casi siempre en los saltos de gran altura, en estos casos, la casa de máquinas debe situarse de modo que la rotura de las tuberías forzadas no puedan afectarla, en lo que se refiere al alud de -

agua que, según las circunstancias podría llegar al edificio - con los consiguientes perjuicios. Por esta razón, la casa de máquinas, no debe situarse como en la Fig. IV-17 porque la proyección de las tuberías cae sobre la planta del edificio, sino como se indica en la Fig. IV-18 donde no sucede tal cosa.



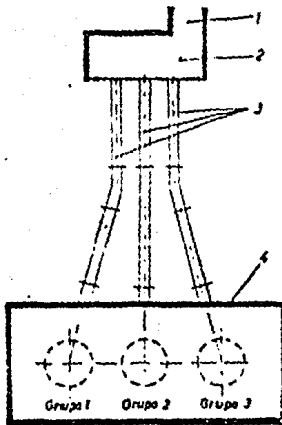
-Sección transversal de la central de San Pedro, sobre el río Sij (Saltos del Sij S. A.).

Figura IV-15

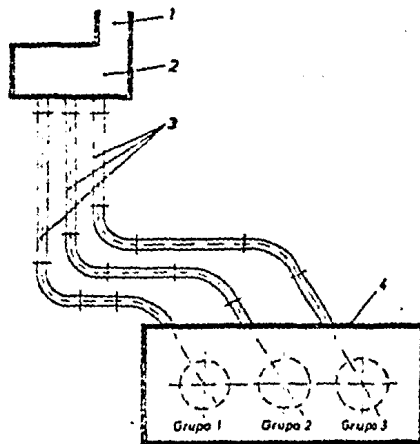


-Sección longitudinal de la central de San Pedro, sobre el río SL  
(Saltos del Sur S. A.).

Figura IV-16



— Situación defectuosa de la casa de máquinas de una central hidráulica, respecto a las tuberías de presión: 1—Canal de derivación, 2—Cámara de presión, 3—Tuberías de presión, 4—Casa de máquinas.



— Situación correcta de la casa de máquinas de una central hidráulica, respecto a las tuberías de presión: 1—Canal de derivación, 2—Cámara de presión, 3—Tuberías de presión, 4—Casa de máquinas.

Figuras IV-17 y IV-18

## IV-5 CENTRALES SUBTERRANEAS

Llamadas también centrales en caverna, no existen edificios al exterior; la casa de máquinas está excavada en el interior de la montaña o en bajo el lecho del río, el parque de distribución, está situado al exterior y los cables procedentes de la central son instalados en pozos especiales en los que generalmente, se disponen también escaleras, ascensores etc., para uso del personal de servicio.

Las razones que pueden aconsejar la instalación de una central subterránea son varias, generalmente de orden económico, aunque a veces influye el factor militar ( para asegurar el suministro de energía ) ya que la central queda fuera de la acción de los bombarderos.

Una de las ventajas mayores de la central subterránea es el salto; la central subterránea permite disponer la tubería forzada y las chimeneas de equilibrio en el interior de la roca, haciendo trabajar a ésta, descargando en parte el trabajo de la tubería que puede de ésta manera tener menor espesor que si estuviera instalada al exterior. Las chimeneas de equilibrio para disminuir el golpe de ariete, pueden tener menores -

dimensiones ya que la tubería forzada es de menor longitud. Otras ventajas de las centrales de caverna son: Disminución de costos de expropiación de terrenos, el absoluto abrigo contra las avenidas de agua en el canal y contra las diferencias de temperatura etc.

#### DESVENTAJAS.

a) Dificultad para habilitar grandes espacios para la casa-de máquinas. Este inconveniente se puede reducir mediante los grupos turbina-generador, de eje vertical que siempre ocupa menos espacio en planta.

b) Dificultad para el acceso de maquinaria durante el montaje y reparación y para el acceso de personal de servicio. Por lo general han de preverse costosas construcciones para estas vías de acceso, en forma de túneles, pozos etc.

c) Posibilidad de filtraciones de agua, através de los pozos de acceso de personal, de las paredes y techo de la central etc.

d) Dificultades psicológicas en el personal de servicio que

puede quedar afectado por claustrofobia.

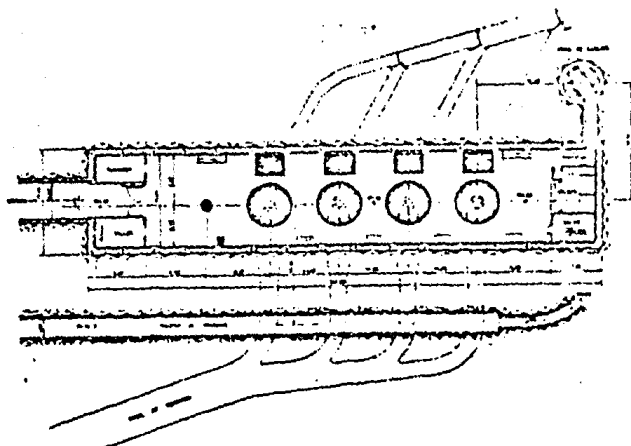
e) Este tipo de construcción subterránea, es mucho más cara que la construcción al exterior:

Costo del túnel de acceso y galerías necesarias para la instalación de los cables y para la ventilación.

A pesar de todo cada día se construyen más centrales en cavernas. Un ejemplo de la central de Aldeadávila sobre el duero con seis grupos de 170000 cv. de potencia unitaria o la del salto de Baopuente Bybey, con cuatro turbinas Francis de eje vertical y potencia unitaria de 100000 cv.

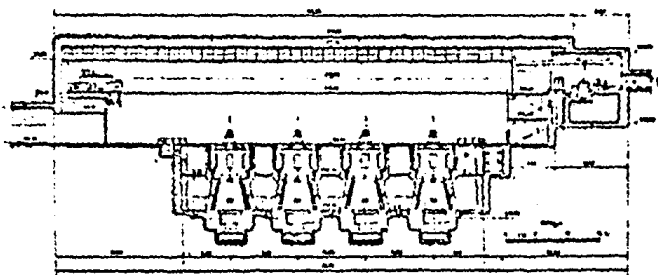
El agua llega por una tubería forzada subterránea cuyo diámetro interior oscila entre 3.7 y 4 mts. que cuenta con la acción de la roca para resistir las presiones interiores. En las figs. IV-19 IV-20, IV-21, pueden verse respectivamente la planta, la sección longitudinal y la sección transversal de ésta -- central. La fig. IV-22 ofrece una perspectiva de la sala de máquinas subterránea, en la que puede apreciarse la disposición de doble techo, en cuyo espacio intermedio se han montado los conductos de ventilación, los conductores para la instalación e

l ctrica de la central etc.



Planta de la central subterránea de Bao-Puente Bibey (Saltos del Sill S. A.).

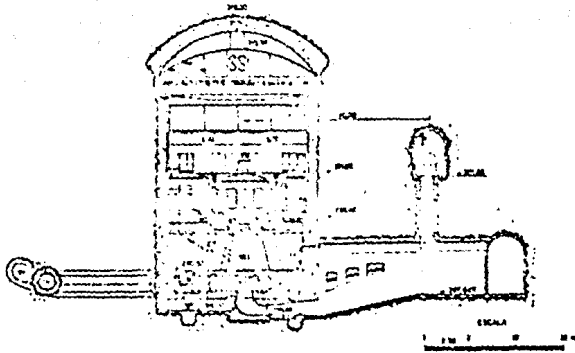
Figura IV-19



Sección longitudinal de la central subterránea de Bao-Puente Bibey (Saltos del Sill S. A.).

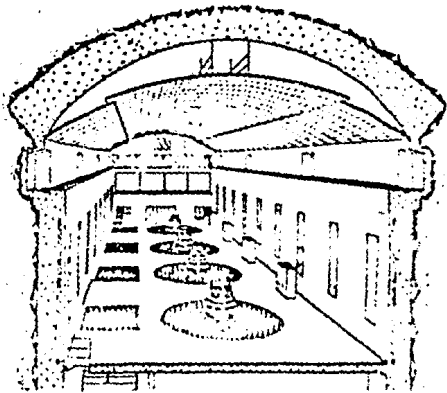
Figura IV-20





— Sección transversal de la central subterránea de Bao-Puente Bibey (Saltos del Sil S.A.).

Figura IV-21

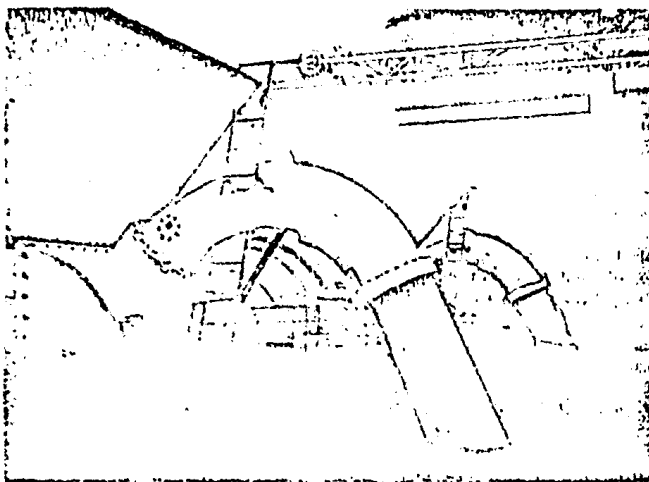


— Perspectiva de la sala de generadores de la central subterránea de Bao-puente Bibey (Saltos del Sil S.A.).

Figura IV-22

La disposición de la maquinaria en el interior de la casa-de máquinas, puede realizarse de una de estas tres formas:

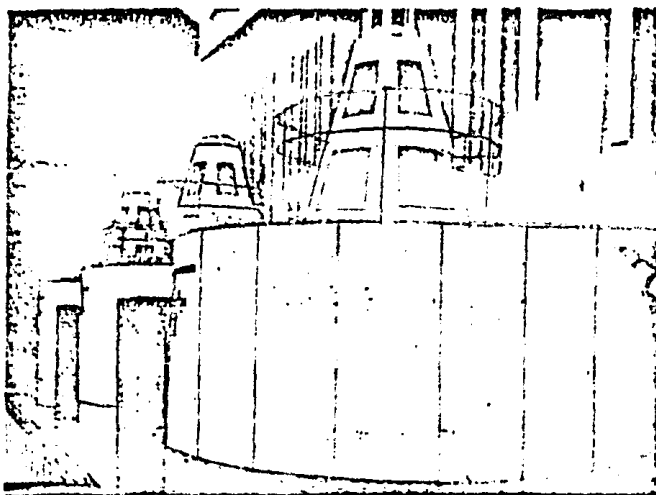
a) En un solo piso: para turbinas, generadores y excitatrices ( disposición de centrales cuyas turbinas son de eje horizontal) Fig. IV-23



— Interior de la sala de máquinas de la central de Caldas (Empresa Nacional Hidroeléctrica del Rebagoroma).

Figura IV-23

b) En dos pisos: Uno para turbinas, otro para los generadores y excitatrices; (disposición preferida para centrales de potencia media con turbinas de eje vertical (Fig. IV-24)



—Interior de la sala de generadores y excitatrices de la central sulterránea de Escalés (Empresa Nacional Hidroeléctrica del Ribagorzana).

Figura IV-24

c) En tres pisos: Para grandes y medianas potencias con -

turbinas, generadores y excitatrices de éstos generadores. Respectivamente ( fig. IV-25 ).

Como instalaciones complementarias de la casa de máquinas podemos citar:

- a) Iluminación
- b) Ventilación
- c) Transporte de maquinaria

#### ILUMINACION.

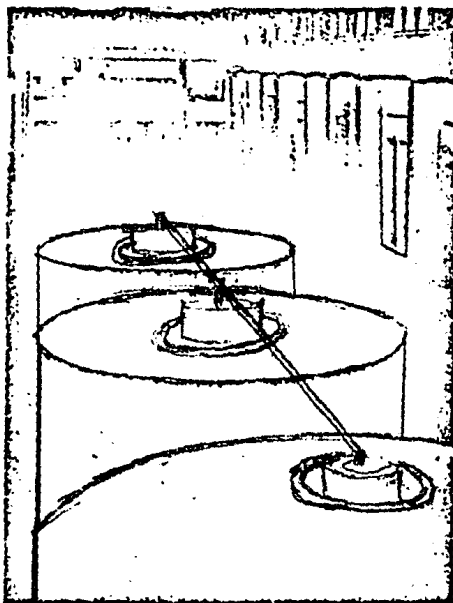
Veáse la tabla sig. ( dentro de centrales en caverna ) tabla IV-1

#### VENTILACION

Esta utilización, puede ser natural aprovechando el tiro - producido por chimeneas o aberturas dispuestas o forzadas mediante ventiladores.

#### TRANSPORTE DE MAQUINARIA

Hay que instalar un puente grua que se desplace en sentido longitudinal por medio de ruedas apoyadas en carriles a lo largo de la sala. Es conveniente que la grua pueda elevar un pe-



—Interior de la sala de excitación de la central de pie de presa de Atequinta (Empresa Nacional Hidroeléctrica del Ribagorzana).

Figura IV-25

so del 10% mayor del necesario.

	<i>Iluminación Valor mínimo</i>	<i>Iluminación Valor recomendado</i>
Salas de máquinas Cuadros de mando	200 lux 300 lux	300 lux 500 lux

valores mínimos y recomendados de iluminación  
para centrales Eléctricas

TABLA IV-1



## V-I SINCRONIZACION DEL ALTERNADOR

La frecuencia de un gran sistema de energía eléctrica, está determinada por la velocidad de rotación de varios alternadores muy potentes, todos ellos conectados mediante diversas líneas de unión a la red general. La inercia colectiva y la potencia de estos generadores es tan enorme, que ninguna carga o perturbación, puede cambiar su velocidad de rotación, por lo tanto, la frecuencia de un sistema eléctrico es notablemente estable.

Si un alternador ha de producir para un sistema eléctrico-existente, debe operar a la misma frecuencia que dicho sistema. Un sistema cuya frecuencia es de 60000 Hz. no puede recibir potencia de un alternador de 60001 Hz. tanto uno como otro debe operar a la misma frecuencia. Esto no es tan difícil de lograr como parece a primera vista, pues cuando un alternador se conecta a un sistema existente, automáticamente entran en juego fuerzas que mantienen constante su frecuencia.

La sincronización de un alternador con un gran sistema de alumbrado público llamado a veces "Omnibus Infinito", es como acoplar un engrane pequeño con otro de tamaño gigantesco y



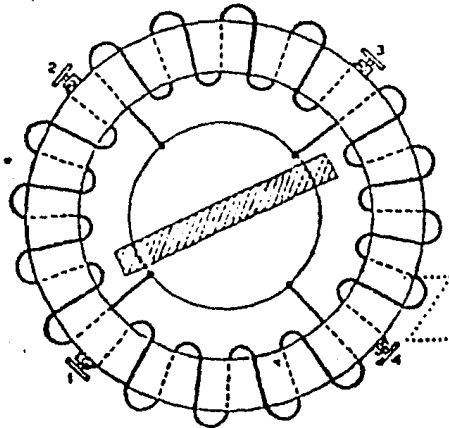
de gran potencia. Si los dientes de los dos engranes están debidamente sincronizados en el momento de contacto, el acoplamiento será suave. Sin embargo, si los dientes del engrane pequeño en el instante crítico, se producirá un choque y es posible que el engrane pequeño resulte dañado.

Para efectuar una sincronización suave de un alternador, se requiere primeramente que su frecuencia sea igual a la de la fuente. Además la secuencia de fase o rotación debe ser la misma también. Volviendo al ejemplo de los engranes, a nadie se le ocurriría acoplar dos engranes cuyos dientes de contacto tuvieran velocidades opuestas aunque de igual valor.

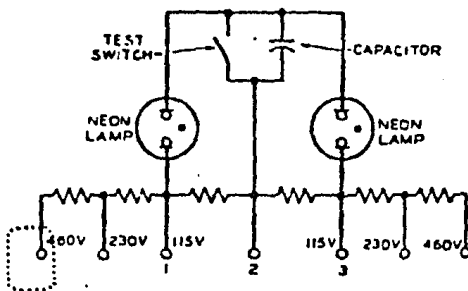
La siguiente cosa que se debe observar cuando se acoplan dos engranes, es que el diente de uno quede dentro de la ranura del otro. En términos eléctricos, esto significa que el voltaje de un alternador debe estar en fase con el voltaje de la fuente.

Por último, cuando se acoplan dos engranes, siempre se escoge un tamaño de diente que sea compatible con el engrane maestro. Desde el punto de vista eléctrico, la amplitud del voltaje de un alternador debe ser idéntica a la amplitud del -

voltaje de la fuente. Una vez que se satisfacen estas condiciones, el alternador, está perfectamente sincronizado con la red, y el interruptor que está entre ambos se puede cerrar.



Secuencimetro de fases.



Indicador de secuencia de fases con lámpara de Neón.

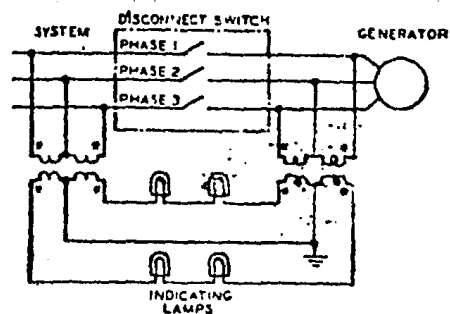


Diagrama de conexión para comparación de secuencia de fases del generador del sistema para indicación de voltaje a través de un desconectador.

## V-2 CONEXIONES DELTA E " Y "

Como ya vimos anteriormente, hay seis puntas que salen de los devanados de armadura de un generador trifásico y el voltaje de salida está conectado a la carga externa por medio de estas seis puntas. En la práctica, esto no sucede así. En lugar de ello, se conectan los devanados entre sí y solo salen tres puntas que se conectan a la carga.

Existen dos maneras en que pueden conectarse los devanados de armadura. El que se emplee uno u otro, es cosa que determina las características de salida del generador. En una de las conexiones, los tres devanados, están conectados en serie y forman un circuito cerrado. La carga está conectada a los tres puntos donde se unen los devanados. A esto se le llama conexión "delta" ( $\Delta$ ) en la otra conexión, una de las puntas de cada uno de los devanados se junta con uno de los otros dos, lo que deja tres puntas libres que salen para la conexión a la carga. A este se le llama conexión "Y".

Nótese, que en ambos casos, los devanados están espaciados 120 grados, de manera que cada devanado producirá un voltaje defasado 120 grados con respecto a los voltajes de los demás devanados.

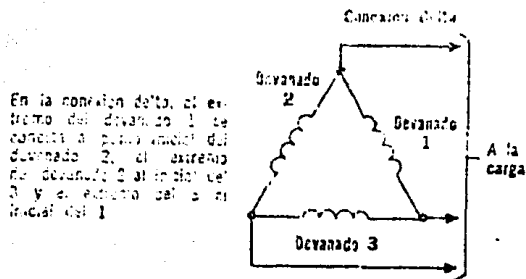


Figura V-1 (a)

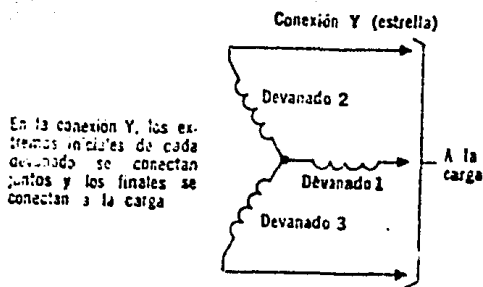
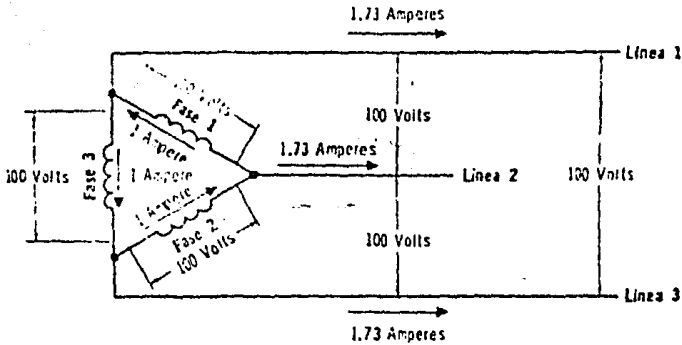


Figura V-1 (b)

## CARACTERISTICAS ELECTRICAS DE LAS CONEXIONES DELTA E "Y"

Como todos los devanados de una conexión delta están conectados en serie y forman un circuito cerrado, podría parecer - que hay una elevada corriente continuamente en los devanados, aún en ausencia de carga conectada. En realidad, debido a la diferencia de fase que hay entre los tres voltajes generados, pasa una corriente despreciable o nula en los devanados en condiciones de vacío.

Las tres puntas que salen de la conexión delta, se usa pa-  
ra conectar la salida del generador a la carga. El voltaje e-  
xistente entre dos cualquiera de las puntas, llamado voltaje -  
de la línea, es igual al voltaje generado en un devanado, que-  
recibe el nombre de voltaje de fase. Así pues, como se puede-  
apreciar en la figura, tanto los tres voltajes de fase como --  
los tres voltajes de la línea son iguales, y todos tienen el -  
mismo valor. Sin embargo, la corriente en cualquier línea es-  
 $\sqrt{3}$  o sea, aproximadamente 1.73 veces la corriente en cual  
quier fase del devanado. Por lo tanto, nótese que una con- -  
exión delta suministra un aumento de corriente pero no hay au- -  
mento de voltaje.



En una conexión delta, el voltaje de línea es igual al voltaje de fase, en tanto que la corriente de línea es igual a  $\sqrt{3}$  ó 1.73 veces la corriente de fase

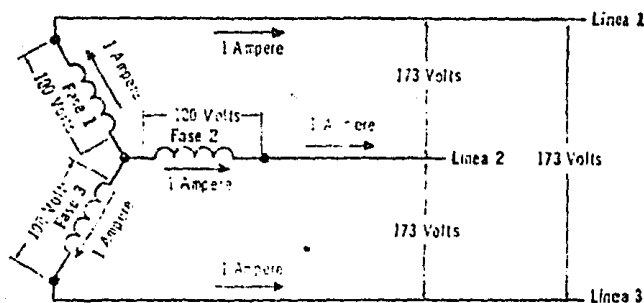
Figura V-2

La potencia tal real que produce un generador trifásico conectado en delta, es igual a  $\sqrt{3}$ , ó 1.73 veces la potencia real en cualquiera de las líneas. Sin embargo, téngase presente, - que la potencia real depende del factor de potencia (  $\cos \theta$  ) - del circuito. Por lo tanto, la potencia real total es igual a 1.73 veces el voltaje de la línea multiplicado por la corriente de línea, multiplicada a su vez, por el factor de potencia. O sea:

$$P_{\text{real}} = 1.73 E_{\text{línea}} I_{\text{línea}} \cos \theta$$

Las corrientes de voltaje y corriente de una conexión " Y " son opuestas a las que presenta una conexión delta. El voltaje

que hay entre dos líneas cualesquiera de una conexión " Y " es 1.73 veces el voltaje de una fase, en tanto que las corrientes en la línea son iguales a las corrientes en el devanado de cualquier fase. Esto presenta un contraste con la conexión -- delta en la cual, el voltaje en la línea es igual al voltaje de fase y la corriente en la línea es igual a 1.73 veces la corriente en la fase. Así pues, en tanto que una conexión delta hace posible aumentar la corriente sin aumentar el voltaje, la conexión " Y " aumenta el voltaje pero no la corriente.

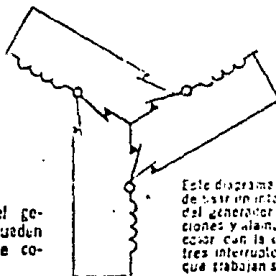


En una conexión Y, el voltaje de línea es igual a  $\sqrt{3}$  ó 1.73 veces el voltaje de fase, en tanto que la corriente de línea es igual al voltaje de fase

La potencia total real que produce un generador conectado en Y es igual a la de un generador conectado en delta. Por lo tanto, la potencia real total es igual a:

$$P_{REAL} = 1.73 E_{LINEA} I_{LINEA} \cos \theta$$

Cambiando los devanados del generador de Y a delta, se pueden cambiar las características de corriente y voltaje



Este diagrama esquemático muestra cómo se puede cambiar la configuración de un generador de Y a delta. Las posiciones y alineamiento de interruptores coinciden con la conexión delta. En la práctica, los tres interruptores están combinados de manera que trabajan simultáneamente

Figura V-3

## POTENCIA ELECTRICA GENERADA

Fijada la tensión eléctrica que el alternador puede generar, la corriente que salga del estator va a depender de la cantidad de aparatos eléctricos que tenga que alimentar el generador; pero el límite de la intensidad de corriente que puede alimentar el generador lo marcará la temperatura de las bobinas del estator, ya que la corriente calentará estas bobinas con el cuadro de la intensidad que solicita la carga.

Habiéndose fijado la intensidad de corriente máxima que el alternador puede entregar sin calentar peligrosamente las bobinas del estator ( no más de 85° C ), ésta será su corriente nominal o sea su corriente de plena carga.

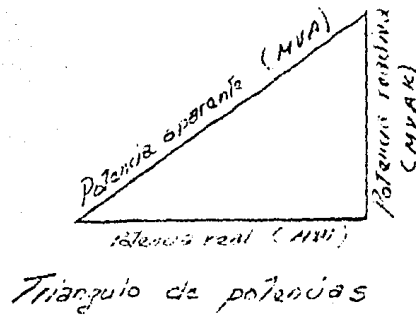
La potencia eléctrica del alternador, será el producto de la tensión nominal por la corriente nominal expresada en voltamperes ( VA ) o en kilovoltamperes ( KVA ) o sea:

Potencia eléctrica =  $V_{\text{nominal}} I_{\text{nominal}}$  ( alternador monofásico )

Potencia eléctrica =  $1.73 ( V_{\text{nominal}} I_{\text{nominal}} )$  (Alt. Trifásico )



Figura V-4



La potencia real del alternador, que es la parte de la energía real que efectivamente se aprovecha en los aparatos eléctricos, ( cargas ), se expresa en watts ( W ).

### V-3 SINCRONIZACION DE ALTERNADORES MONOFASICOS

En un sistema de generación eléctrica, donde trabajan grupos de generadores de CA simultáneamente, o sea funcionando en paralelo conectados a una misma carga ( barras ), deben cumplir con requisitos de instalación, puesta en marcha y sincronización de tales máquinas eléctricas para el mejor y máximo servicio así como seguridad que se presenten.

#### CONDICIONES NECESARIAS PARA LA PUESTA EN PARALELO DE DOS ALTERNADORES:

En esencia, los requisitos básicos para el funcionamiento sincrónico de dos alternadores son:

- a) Las características de tensión-carga de las fuentes deben ser iguales.
- b) Las polaridades de las fuentes, deben ser iguales y opuestas entre sí en cualquier instante. Además:
- c) Los valores eficaces ( CA ) de la tensión son los mismos, o sea, todas las máquinas deben tener la misma tensión e

ficaz.

- d) La tensión de todos los alternadores colocados en paralelo deben tener la misma forma de onda.
- e) Las tensiones deben estar en exacta oposición de fase - (respecto a dos alternadores o a un alternador dado y - barras )
- f) Las frecuencias de todos los alternadores en paralelo - deben ser las mismas.
- g) Las características de tensión de alternador y de velocidad del motor de accionamiento deben ser decrecientes con la carga.

El diagrama de la fig. V-5a representa una sincronización perfecta, puesto que ambas tensiones de los alternadores monofásicos son iguales y opuestas en cada instante, tienen la misma frecuencia, forma de onda y valor eficaz de la tensión CA.

En la fig. V-5b, observamos las corrientes de los dos alternadores y las tensiones también que se oponen en cada ins--

tante. Vectorialmente esta oposición que es interna o local, creada entre los dos alternadores ( Fig. V-5c ), representa una tensión resultante que debería ser cero, sin embargo prácticamente o físicamente no es cero ya que la prueba está en que se genera la tensión que se espera en los bornes o en las barras. De aquí podemos partir hacia una diferencia entre los diagramas vectoriales usados para representar tensiones en un circuito local o interno y un circuito externo, o sea la relación entre la tensión en barras y la corriente que se suministra a la carga - ( Fig. V-5d ).

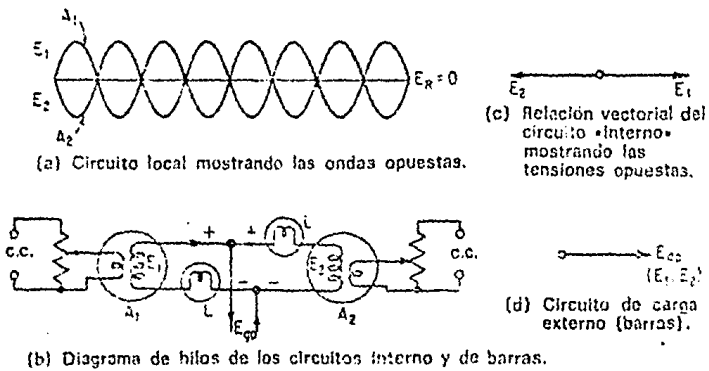


Figura V-5

Si suponemos ahora que el alternador A2 baja su frecuencia ( ver Fig. V-6 ) debido a una reducción de velocidad del motor que lo acciona y por tanto también baja su tensión, entonces - si anteriormente el alternador 1 y 2 ambos tenían sus senoides iguales pero en oposición, ahora dado que se modificó la frecuencia de A2, llega un momento en que las ondas del circuito local de ambos alternadores, se defasan algún o algunos ciclos de modo que cuando están en fase, la tensión resultante es  $E_R = E_1 + E_2$  y esta es máxima para ciertos intervalos de frecuencia.

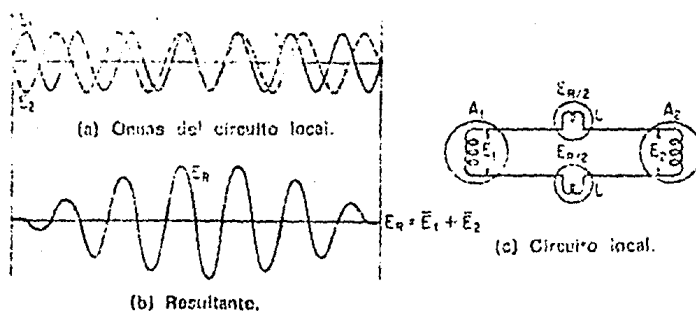


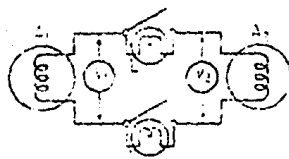
Figura V-6

Vamos ahora a conocer la sincronización de alternadores mediante el método de la lámpara apagada y la lámpara encendida. Estos métodos por igual tratan de detectar la diferencia de frecuencia entre los dos alternadores ( ver fig. V-7 ).

El método de la lámpara apagada, se consigue cuando las tensiones  $V_1$  y  $V_2$  son iguales y las lámparas están apagadas. En este instante, las dos ondas son de igual frecuencia, forma y valor eficaz de tensión, puesto que la tensión resultante  $E_R =$  cero. Ahora es posible cerrarse el interruptor poniendo en paralelo los alternadores. Existen dos desventajas en el método de sincronización a lámpara apagada: ( 1 ) puede existir una apreciable diferencia de tensión entre los dos alternadores pero que sea aún una diferencia insuficiente para hacer que las lámparas se enciendan. (2) El operador que controla el cierre del interruptor no tiene manera de saber en que ciclo o ciclos a precisión debe actuar para maniobrar el cierre, o sea, podría conectar un poco antes o un poco después.

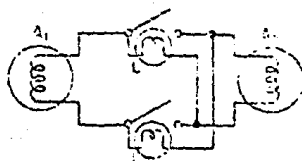
El método de la lámpara encendida ( ver Fig. V-8 ) Las desventajas anteriores se superan cuando las conexiones de las lámparas se invierten, ahora se tiene el máximo brillo cuando las ondas son exactamente iguales y opuestas ( resultando una tensión cero ), y están apagadas cuando la tensión resultante es -

máxima.



Método de sincronización a lámpara apagada.

Figura V-7



Método de sincronización a lámpara encendida.

Figura V-8

## ENTRE ALTERNADORES MONOFASICOS

Al instalar dos o más alternadores en paralelo, conectadas a una carga inductiva, capacitiva o resistiva, éstos funcionan con excitaciones y frecuencias idénticas, así como de idéntico proyecto, entonces todas las intensidades y tensiones de las máquinas, estarán en oposición entre sí, ver la Fig. V-9.

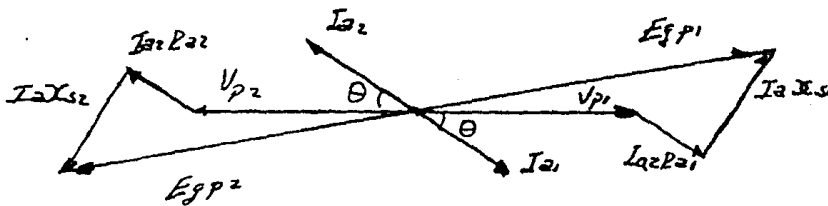


Figura V-9

También se representa el diagrama vectorial del circuito de carga o circuito externo donde si se usan dos alternadores, entonces la suma de  $I_{a1}$  e  $I_{a2}$  produce la corriente de carga  $I_L$  -- mientras la tensión de carga  $V_L$  es la misma que la tensión en bornes o tensión de fase  $V_p$  ( Fig. V-10 )



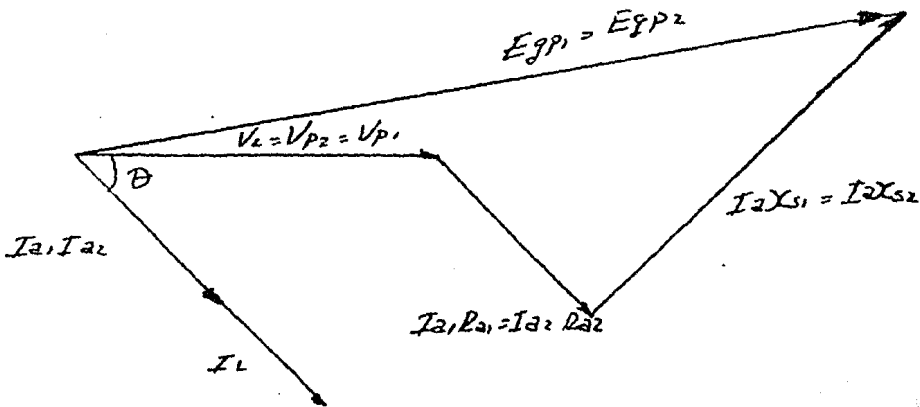


Figura V-10

Los alternadores de las figuras anteriores, están en perfecta sincronía debido a que no existe diferencia de tensión entre ellos en el instante de sincronización o como resultado de una variación de fem inducida a causa de tensiones internas debidas a la carga. Por tanto, no existe corriente sincronizante y de circulación entre los alternadores.

Sea la ecuación de la corriente sincronizante que circula entre los inducidos de los dos alternadores que intervienen y -

las barras:

( V-1 )

$$I_s = \frac{E_{gp1} - E_{gp2}}{Z_{p1} + Z_{p2}} = \frac{E_r}{(R_{a1} + R_{a2}) + j (X_{s1} + X_{s2})}$$

En donde  $I_s$  es la corriente sincronizante que circula por el inducido del alternador del circuito local entre los dos alternadores ( o el alternador y barras ) por fase.

$E_R - E_S$  es el vector diferencia entre las tensiones generadas de los alternadores por fase  $E_{gp1} = E_{gp2}$ .

$R_a$  y  $X_s$  son las reactancias del inducido y la reactancia sincrónica respectivamente para cada alternador por fase.

Puesto que la reactancia sincrónica de los alternadores es generalmente elevada, respecto a la resistencia del inducido, la corriente sincronizante se retrasa respecto a la tensión resultante  $E_r$ , en casi  $90^\circ$ .

Supongamos que la excitación en el alternador 2, representada en el diagrama vectorial de la fig. V-9 , se ha aumentado de manera que  $E_{gp2}$ , es mayor que  $E_{gp1}$ , en el circuito local --

de los dos alternadores, se originará una fem como resultante  $E_r$  como se muestra en la Fig. V-11 circulando una corriente - sincronizante  $I_s$  y como las tensiones inducidas, están exactamente en oposición de fase, entonces  $E_r$  está en fase con la - tensión mayor  $E_{gp2}$ .  $I_s$  se retrasa casi  $90^\circ$  con respecto a --  $E_{gp2}$  y a  $E_r$ , y se adelanta más de  $90^\circ$  ( $180-\theta$ ) con respecto a  $E_{gp1}$ , como podemos observar en la fig. V-11, la corriente sin cronizante solamente circula por el circuito local.

La potencia sincronizante generada por el alternador 2 co mo resultado de la mayor excitación y de circulación de  $I_s$  en el inducido es:

$$P_2 = E_{gp2} I_s \cos \theta \quad ( V-2 )$$

Donde  $\theta$  es el ángulo entre  $E_r$  e  $I_s$ , siendo la potencia po sitiva.

La potencia sincronizante producida por la corriente sin- cronizante en el alternador 1 es:

$$P_1 = E_{gp1} \cos (180^\circ - \theta) = -E_{gp1} I_s \cos \theta \quad ( V-3 )$$

Donde ( $180^\circ - \theta$ ) es el ángulo entre  $E_{gp1}$   $I_s$  e  $I_s$ , sien- do la potencia negativa.

Las anteriores ecuaciones nos hacen ver que el alternador 2 está funcionando como generador mientras que el alternador 1 actúa como motor, y como  $I_s \cos \theta$  es la misma para ambos alternadores, podemos escribir una ecuación para la verdadera ecuación de pérdida de potencia ( transformada en calor ) que debe ser accionada mecánicamente por el motor de accionamiento del alternador 2.

$$E_{gp2} I_s \cos \theta = E_{gp1} I_s \cos ( 180^\circ - \theta ) = E_r I_s \cos \theta$$

o cuantitativamente:

potencia generada = potencia motor = pérdidas

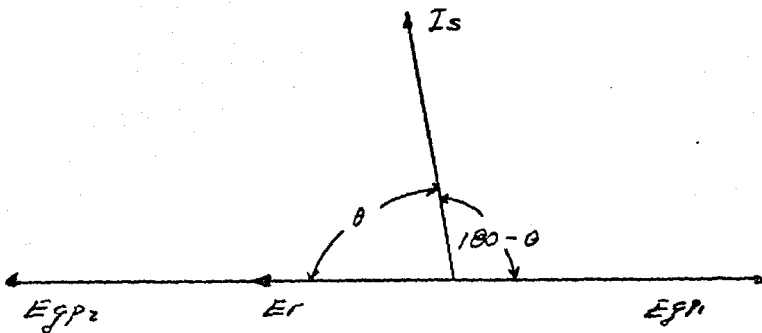


Figura V-11

Las anteriores ecuaciones de potencia sincronizante, son solo instantáneas, ya que (1) el alternador que genera la potencia sincronizante se retrasa como resultado de la mayor carga y del mayor par electromagnéticos resistentes, y (2) el alternador que recibe la potencia de sincronización avanza debido al efecto motor producido en el mismo sentido que su motor de accionamiento.

En la fig. V-12 se observa ahora que el alternador 2, está retrasado, mientras que el alternador 1 ha adelantado o avanzado de su posición original y ahora la fem resultante  $E_r$  ya no está en fase con  $E_{g2}$  en un ángulo  $\theta$ , este retraso de  $E_{g2}$  y avance de  $E_{g1}$  depende de (1) los valores relativos de  $E_{g1}$  y  $E_{g2}$  ( los cuales determinan el valor de  $E_r$  ) y (2) el valor de la corriente sincronizante que circula en ambos inducidos. En este punto se establece un equilibrio en el que ninguno de los alternadores produce potencia sincronizante ni efecto motor, puesto que el ángulo 1 es menor de  $90^\circ$  ( alt. 1 ) y el ángulo 2 es menor de  $90^\circ$  ( alt. 2 ). De acuerdo a la relación  $E_{g1} \cos \theta$  ( ángulo entre ambos ), la única potencia producida entonces es  $E_r \cos \theta$ .

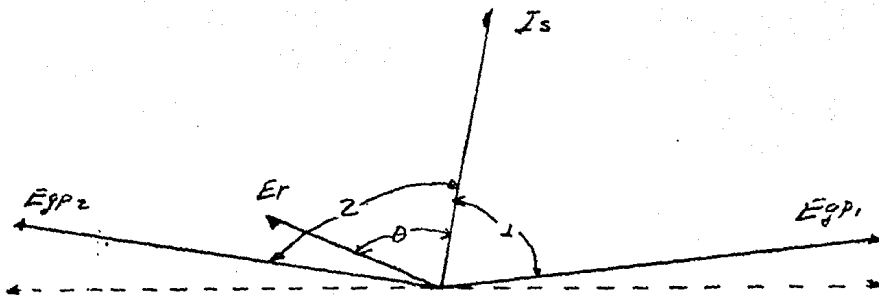


Figura V-12

En la figura V-13, la corriente de carga resultante del generador 1, se reduce, y el factor de potencia del generador 1 mejora. Al mismo tiempo la corriente de  $I$  inducido resultante del generador 2 aumenta y su factor de potencia disminuye, disminuyendo así su capacidad de suministrar corriente a la carga. En la misma figura se aprecia también un efecto estabilizador en la corriente sincronizante ya que produce una acción desmagnetizante en el alternador 2 y un efecto magnetizante en

el alternador 1.

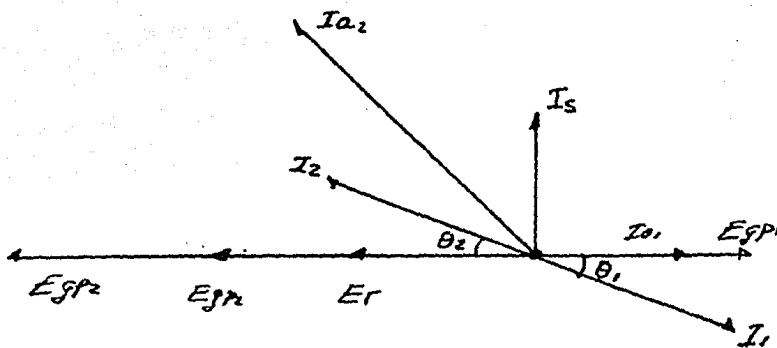


Figura V-13

Así cualquier tendencia de un alternador dado para tomar u na carga adicional como resultado de un aumento de tensión del generador, queda automáticamente estabilizado sin transferen--  
cia apreciable de carga.

## V-5 REPARTO DE CARGA ENTRE LOS ALTERNADORES

Considerando los cambios de velocidad del motor de accionamiento o la aplicación o eliminación brusca de carga, en relación con la estabilidad en paralelo, los alternadores deben tener, (1) una elevada relación entre reactancia síncrona y resistencia de inducido y (2) una impedancia total suficientemente baja para que los pequeños cambios de su ángulo de avance de fase ( $\alpha$ ) produzcan valores elevados de corriente y de potencia sincronizante.

Observar que el uso de una mayor impedancia con una carga ( $Q$ ) menor, o sea una  $\frac{X_s}{R_a}$  menor, da por resultado (1) una reducción de la potencia sincronizante, y (2) un aumento de las pérdidas a pesar de la reducción de la corriente sincronizante. Por esta razón, se prefiere una elevada relación entre reactancia del inducido y resistencia, a pesar de su efecto sobre la regulación de tensión.

## V-6 SINCRONIZACION DE ALTERNADORES POLIFASICOS

Todo lo desarrollado en relación con los alternadores monofásicos, es aplicable igualmente a los alternadores polifási-



cos, ya que todas las consideraciones y cálculos se aplican a una fase en el caso de alternadores trifásicos o polifásicos -- con únicas diferencias en el método de sincronización y el criterio de orden de sucesión de fases, el cual establece que el orden de sucesión de fases del alternador que se requiere para poner en paralelo debe ser la misma que la de las barras, o sea que la de los alternadores que funcionan ya en paralelo.

Solo existen dos ordenes posibles de sucesión de fase para un alternador trifásico, ya que solo existen dos sentidos posibles de rotación según los cuales los polos pueden pasar por delante de los arrollamientos del inducido. En la fig. V-14, se muestra el orden de sucesión de fases para dos alternadores (ABC-ABCA).

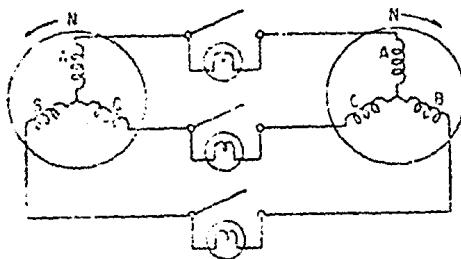
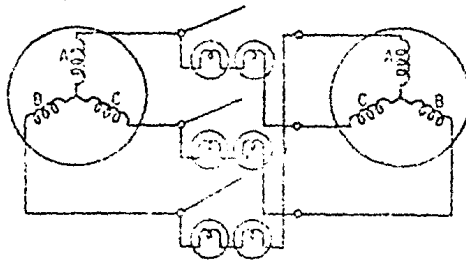


Figura V-14

El orden de sucesión de fase, puede comprobarse conectando un pequeño motor de inducción en barras y observando su giro, luego el motor se conecta en barras del alternador que quiere sincronizarse y si el sentido de giro es el mismo, la sucesión de fases es la misma. El método empleado en la Fig. anterior, es el método a lámpara apagada. Existe una posibilidad de que las tensiones tiendan a quedarse en completa oposición fase a fase así si las lámparas quedan permanentemente con un determinado brillo, indican que la máquina que se quiere conectar y las que funcionan, tienen la misma frecuencia pero que se produce una pequeña diferencia de tensión ya sea por (1) un desplazamiento fijo de fase entre las fem inducidas, o (2) una diferencia en sus tensiones de fase.

La desventaja de usar este método en alternadores polifásicos es que se encontró difícil determinar incluso para una velocidad baja de oscilación, el punto medio del período oscuro (instante en el cual los alternadores están exactamente en sincronismo y las fem están exactamente a  $180^\circ$  entre sí).

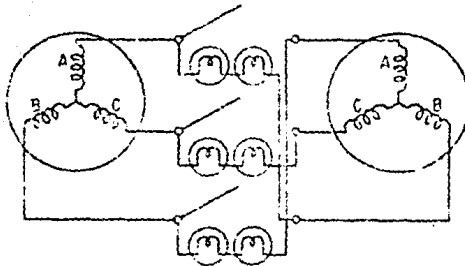
Puede usarse también el método de lámpara encendida, para indicar el instante de sincronización por el brillo máximo de las lámparas, la fig. V-15 muestra éste método.



Método a lámpara encendida.

Figura V-15

La fig. V-16, muestra un tercer método denominado método a lámpara giratoria en el cual las lámparas oscilarán dos encendidas y una apagada y dos apagadas y una encendida sucesivamente. El interruptor de sincronización se cierra cuando las dos lámparas extremas en la fig. anterior, están encendidas y la lámpara central está apagada, la desventaja de este método es que permite la sincronización en función tanto del máximo como del mínimo brillo.



Método a lámpara giratoria (dos encendidas, una apagada)

Figura V-16

### SINCRONOSCOPIOS

El sincronoscopio es un instrumento con una aguja giratoria ( que indica si la máquina que va a conectarse va lenta o rápida) y un índice fijo que señala el instante preciso de sincronización en que debe cerrarse el interruptor de puesta en paralelo. Debido a que básicamente es un dispositivo monofásico, no puede detectar el orden de sucesión de fase.

### REGLAS PARA LA PUESTA EN PARALELO PARA ALTERNADORES POLIFASICOS

- 1.- El alternador debe hacerse girar a la velocidad nominal,

y sus tensiones eficaces de línea, deben estar ajustadas a la tensión de barras con ayuda de un voltímetro.

2.- La sucesión de fases, debe comprobarse mediante un indicador de orden de sucesión de fases o unas lámparas de sincronización.

3.- La frecuencia del alternador a conectar, se compara con la frecuencia de las barras mediante un sincronoscopio o algunos de los métodos de lámparas.

Si la frecuencia de la máquina a conectar es demasiado baja, debe aumentarse la velocidad del motor de accionamiento, si es demasiado elevada, debe disminuirse dicha velocidad.

4.- El interruptor de sincronización, se cierra en el instante en que las lámparas o el sincronoscopio indica que las tensiones fase a fase son exactamente iguales y opuestas. El alternador ya sincronizado queda ahora acoplado a la red y en vacío.

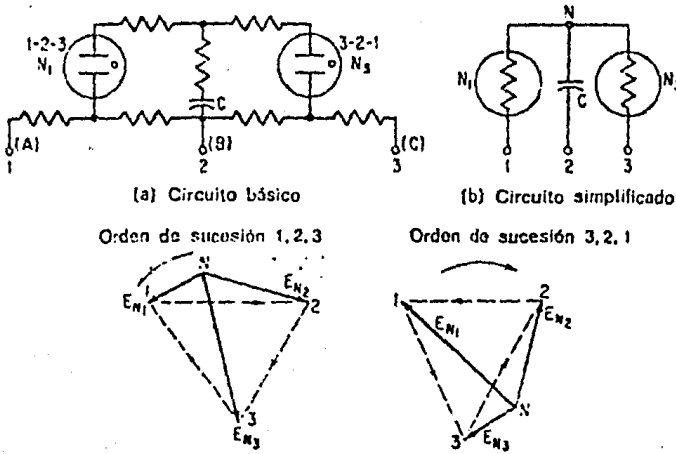
5.- Se hace que el alternador tome carga aumentando la velocidad de su motor de accionamiento.

6.- El factor de potencia el cual trabaja el alternador se regula mediante su reóstato de excitación.

7.- La tensión de barras, se regula actuando simultáneamente sobre todos los reóstatos de excitación.

### INDICADOR DE ORDEN DE SUCESION DE FASES

El circuito básico de un indicador de orden de sucesión de fases, puede verse en la Fig. V-17, consta de dos lámparas - - idénticas de neón y de un condensador conectadas en estrella - como carga trifásica desequilibrada. Las resistencias del circuito, están proyectadas de manera que crea un potencial superior o inferior al potencial de ignición de las lámparas de neón tal que para una rotación de fase (1, 3, 2 ) la carga desequilibrada produce una mayor caída de tensión entre el neutro "N" y la lámpara 1,  $E_{N1}$ . Una secuencia de fase inversa -- ( 1, 2, 3 ) iluminará la lámpara  $N_3$ , de manera parecida y apagará la lámpara  $N_1$ .



(c) Efecto de sucesión de fases en el encendido de lámparas, línea y tensiones de fase.

Figura V-17





## VI-1 CARACTERISTICAS Y DIAGRAMAS VECTORIALES DE LAS MAQUINAS SINCRONAS

### REGULACION

En la norma A.S.A. C-50, párr. 1.210, se define como sigue la regulación de los alternadores: " La regulación de un generador síncrono es el aumento de tensión que experimenta con co rriente de excitación constante, cuando al funcionar con la -- tensión y velocidad nominales, se reduce a cero la carga especificada a un factor de potencia determinado; este aumento se expresa en tanto por ciento de la tensión nominal ". Debe especificarse el factor de potencia de la carga a que se refiere la regulación.

El aumento de tensión, cuando se suprime la carga, o la -- caída de tensión, cuando esta se aplica, es imputable a tres - causas: a) La reacción de inducido; b) la resistencia de inducido; c) la reactancia de dispersión del inducido.

Un diagrama vectorial normal para determinar la caída de - tensión y la excitación, viene dado en la norma A.S.A. c-50-1943. Este diagrama, viene representado en la fig. VI-1 y los vectores usados, se identifican en la fig. VI-2. Los vectores

se han expresado como se indica, en función de la corriente de excitación, pero el diagrama de resultados casi idénticos a -- los obtenidos con estos dos diagramas serán prácticamente idén ticos si los valores de la saturación, se hubieran tomado des- pués de la reactancia de dispersión en vez de tomarlos después de la reactancia de Potier, esto es si los vectores  $E_x$  de la - fig. VI-3 se hubieran tomado iguales a la caída producida por la reactancia de dispersión  $\cdot IX_1$  y si el vector de saturación -  $I_{FS}$ , se hubiera tomado paralelo al vector  $I_{f1}$ . El diagrama -- vectorial de la Fig. 1, emplea las reactancias del campo prin- cipal y es exacto, solo para turbogeneradores o máquinas de - campo distribuido. Se usa generalmente en las máquinas de po- los salientes ya que satisface la mayor parte de las necesida- des;

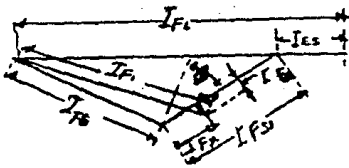


Figura VI-1

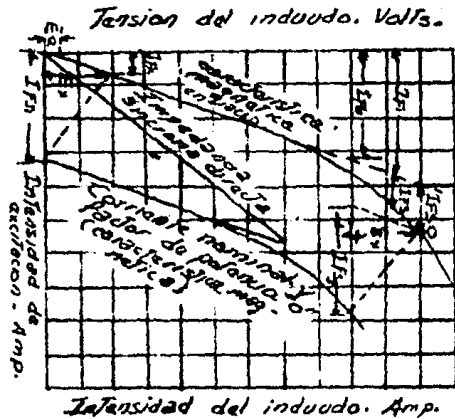


Figura VI-2



( Fig. VI-4 )

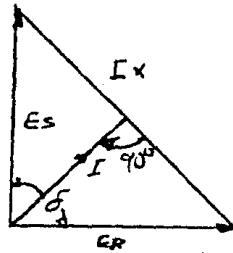


Figura VI-4

Una máquina síncrona, puede considerarse como un caso semejante, suponiendo un rotor cilíndrico y que se desprecien la resistencia y la saturación. El voltaje en los bornes  $E_1$  es igual a  $E_R$ ; el voltaje interno  $E_d$  es igual a  $E_s$ ; y la reactancia síncrona  $X_d$  es igual a  $X$ . El ángulo de desplazamiento  $\delta$  es el ángulo de desplazamiento de la máquina y aumenta al aumentar el par en el eje. Así si el par en el eje aumenta de forma que  $\delta$  exceda de los  $90^\circ$ , el par eléctrico disminuirá y la máquina saldrá de sincronismo. Este par máximo se denomina " Par de salida de sincronismo " o " Potencia límite del esta-

do de regimen " de un motor o generador síncrono. La anterior explicación sobre la reactancia, se ha hecho para poner de manifiesto que las condiciones del sistema, tales como transformadores o líneas de transmisión, influyen en su magnitud, Así es posible tener dos máquinas síncronas idénticas, que funcionen con la misma tensión en los bornes y con la misma corriente de excitación y que sin embargo, una de ellas no sea capaz de llevar su carga a causa de la reactancia de la fuente de alimentación. Este mismo fenómeno puede ocurrir cuando una línea de transmisión conecta dos grandes sistemas o conecta un sistema con una máquina síncrona.

#### ESTABILIDAD TRANSITORIA DE LAS MAQUINAS SINCRONAS. VI-3

Si una máquina síncrona funciona como un par  $T_0$  y un desplazamiento  $\delta_0$ , como indica la fig. VI-5 y el par cambia súbitamente a  $T_1$ , la máquina empieza a aumentar su desplazamiento hacia un nuevo valor  $\delta_1$ , no obstante, cuando se ha alcanzado este nuevo valor, la máquina lo rebasará con una energía -- igual a la del área  $A_1$ , que producirá un cambio en el desplazamiento y continuará hasta que el área  $A_2$  sea igual al área  $A_1$ , ( menos un pequeño amortiguamiento producido por la oscilación desde  $\delta_0$  a  $\delta_2$  ). Aún cuando tanto la ctga original  $T_0$  como la nueva carga  $T_1$  sean estables, la máquina saldrá de sincro--

nismo, si el par  $T_2$  es superior al punto máximo de la curva par desplazamiento. Debe hacerse notar que la verdadera curva par desplazamiento, no es necesariamente la curva correspondiente - al estado de régimen.

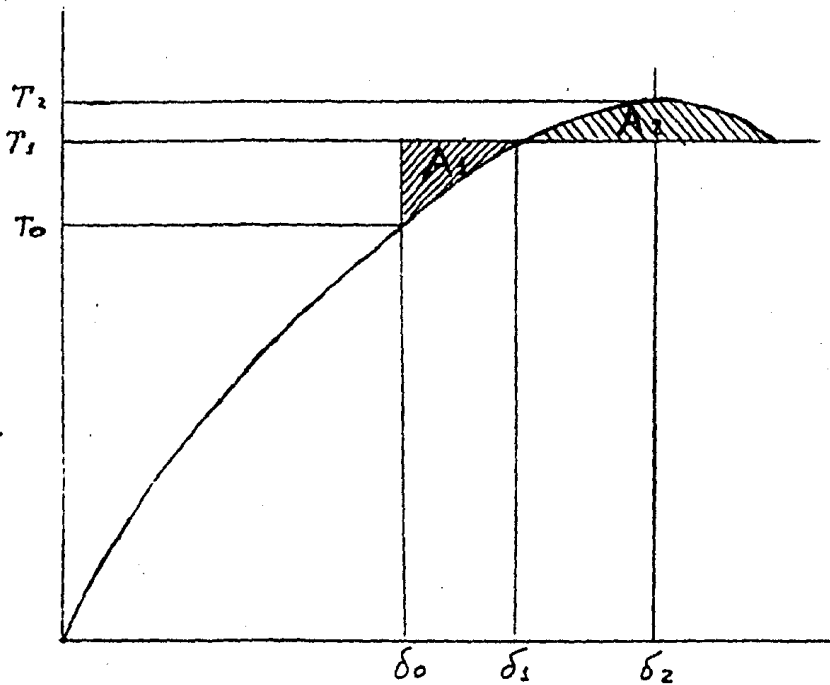


Figura VI-5

## VI-4 DEFINICIONES E ILUSTRACIONES DE TERMINOS

La estabilidad del sistema eléctrico de potencia, es un término aplicado a la corriente eléctrica de los sistemas eléctricos de potencia, denotando una condición en la cual varias máquinas síncronas del sistema permanecen en sincronismo o en " fase" con cada una de las otras máquinas.

Inversamente, inestabilidad denota una condición que envuelve pérdidas de sincronismo o falla " fuera de fase".

Considerando un sistema de potencia muy simple de la Fig.- VI-6 consistiendo de un generador síncrono suministrando potencia a un motor síncrono a través de un circuito compuesto de reactancias inductivas en serie  $X_L$ . Cada una de las máquinas síncronas pueden representarse al menos por una fuente constante de voltaje en serie con una reactancia constante. De este modo, el generador se representa por  $E_G$  y  $X_G$ ; y el motor por  $E_M$  y  $X_M$ .

Combinando las reactancias de las máquinas y la reactancia de la línea en una sola reactancia, tenemos un circuito eléctrico que consiste de dos fuentes de voltaje constante,  $E_G$  y  $E_M$  conectadas a través de las reactancias  $X = X_G + X_L + X_M$ .

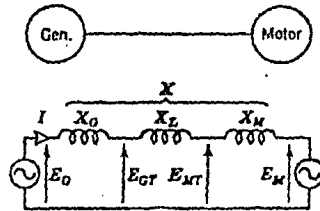


Figura VI-6

Se mostró que la potencia transmitida del generador al motor, depende de la diferencia de fases  $\delta$  de los dos voltajes,  $E_G$  y  $E_M$ , que son producidos por el flujo en el embobinado de campo de las máquinas. Su diferencia de fase es la misma que el ángulo eléctrico entre las máquinas rotatorias.

El diagrama vectorial de voltajes se muestra en la Fig. VI-7

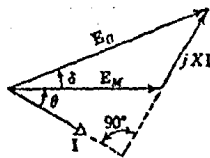


Figura VI-7



$$\text{Vectorialmente, } I E_G = I E_M + J X 'I \quad (1)$$

Donde las letras que denotan números complejos o vectores o cantidades, van acompañadas de un signo vertical paralelo a la letra.

$$'I = \frac{'E_G - 'E_M}{J X} \quad (2)$$

La salida de potencia del generador y así mismo la potencia de entrada del motor, cuando no hay resistencia en la línea, es tá dada por:

$$P = \text{Re} ('E_G 'I_G) \quad (3)$$

$$= \text{Re} ('E_G \frac{'E_G - 'E_M}{J X}) \quad (4)$$

donde  $\text{Re}$  significa " la parte real " de y  $\bar{E}_G$  significa el conjugado de  $E_G$ . Ahora hagamos.

$$'E_M = E_M \angle 0 \quad [5]$$

$$'E_G = E_G \angle \delta \quad [6]$$

$$'E_0 = E \angle -\delta \quad [7]$$

Entonces:

Sustituyendo las ecuaciones 5, 6 y 7 en la ecuación 4

$$\begin{aligned} P &= \text{Re} \left( E_G \angle -\delta \frac{E_G \angle \delta - E_M \angle 0}{X \angle 90^\circ} \right) \\ &= \text{Re} \left( \frac{E_G}{X} \angle -90^\circ - \frac{E_G E_M}{X} \angle (-90^\circ - \delta) \right) \\ &= - \frac{E_G E_M}{X} \cos (-90^\circ - \delta) \end{aligned}$$

$$= \frac{E_G E_M}{X} \sin \delta \quad [S]$$

Esta ecuación muestra que la potencia  $P$  transmitida del generador al motor varía con el seno del desplazamiento de ángulo  $\delta$  entre los dos rotores como se indica en la Fig. VI-7a

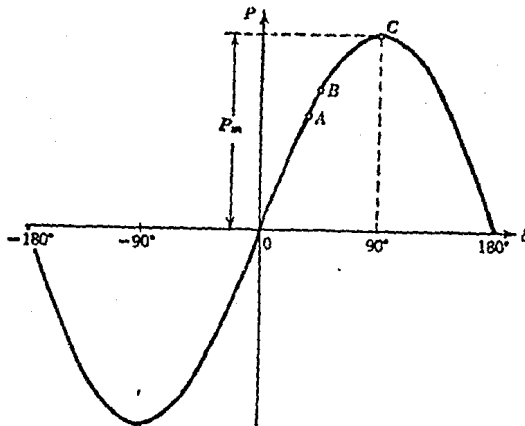


Figura VI-7a

La curva se conoce como "curva de ángulo de potencia", la potencia máxima que puede transmitirse en el estado constante con la reactancia dada  $X$  y los voltajes internos dados  $E_G$  y  $E_M$  es:

$$P_m = \frac{E_G E_M}{X}$$

y ocurre a un ángulo de desplazamiento de  $\delta + 90^\circ$ . El valor de máxima potencia puede incrementarse, por el aumento del in-

tervalo de voltaje o por la disminución del circuito de reactan-  
cias.

El sistema es estable solo si el desplazamiento de ángulo  $\delta$  es en el rango de  $-90^\circ$  a  $+90^\circ$ , en el que la pendiente  $\frac{dP}{d\delta}$  es po-  
sitiva; que es el rango en el que un incremento en el despla-  
zamiento del ángulo resulta en un incremento en la potencia trans-  
mitida. Supóngase que el sistema se opera en el estado de equi-  
librio ( constante ) en el punto A fig. VI-7a.

La entrada mecánica del generador y la salida mecánica del  
motor, si corregida para pérdidas rotacionales, será igual a la  
potencia P. Ahora supóngase que un pequeño incremento en la fle-  
cha de carga es añadida al motor.

Momentaneamente, la posición angular del motor con respecto  
al generador y asimismo la potencia de entrada al motor es in-  
cambiable; pero a la salida del motor ha sido incrementada.

Hay sin embargo un torque neto en el motor con tendencia al  
retardo, y su velocidad decrece temporalmente. Como resultado-  
es incrementado, y consecuentemente la potencia de entrada se  $\uparrow$

incrementa hasta que finalmente la entrada y la salida están de nuevo en equilibrio, y la operación equilibrada sigue a un nuevo punto "B" más alto que "A" en la curva ángulo-potencia. ( ha sido tácitamente asumido que la velocidad del generador permanecerá constante. Actualmente el generador podría tender a bajar si el gobernador de su actividad principal operara e incrementará el generador a la entrada suficientemente para balancear el incremento a la salida ).

Supóngase que la entrada del motor se incrementa gradualmente hasta el punto "C" hasta que se llega a la máxima potencia. Si ahora se añade carga en el motor, el desplazamiento del ángulo  $\delta$  se incrementará como antes, pero si lo hace así no habrá incremento en la entrada. En vez de eso habrá un decrecimiento en la entrada, a mayor incremento, la diferencia entre la salida y la entrada, retardarán al motor más rápidamente. El motor cortará fase y probablemente se atasque. Pm es la estabilidad límite en el estado continuo del sistema. Es la máxima potencia que puede ser transmitida, y el sincronismo se perderá si un intento es hecho para transmitir mayor potencia que la del límite.

Si un incremento mayor de carga se añade repentinamente, en

vez de gradualmente, el motor puede caer de fase aunque se piense que la nueva carga incrementada no excedió el límite de estabilidad para el estado de equilibrio. La razón es la siguiente:

Cuando el incremento mayor de carga es añadido a la flecha del motor; la potencia mecánica a la salida del motor es mayor que la potencia eléctrica en la entrada, y la deficiencia de entrada se suministra al decrecer la energía cinética. El motor baja marcha y un incremento del ángulo de desplazamiento  $\delta$  y un consecuente aumento de entrada resulta.

De acuerdo a lo establecido que la nueva carga no exceda el límite de estabilidad en su estado de equilibrio,  $\delta$  a el propio valor para la operación de estado de equilibrio. Cuando se llega al valor  $\delta$ , sin embargo, el motor gira despacio. Su momento angular, previene el incremento de velocidad repentina al valor normal. De aquí que continúe girando lento y el incremento de desplazamiento va más allá del valor propio. Después que este ángulo ha pasado este valor, la entrada del motor excede la salida y el torque neto es ahora un torque o par acelerado. La velocidad del motor se incrementa y aprovecha la velocidad normal. Antes que la velocidad normal sea ganada, el ángulo de desplazamiento, puede haberse incrementado tanto que el punto -

de operación en la curva de ángulo de potencia ( Fig. VI-7a) no solamente va sobre la joroba ( punto C ) sino que va todavía -- más alla del punto en que la entrada del motor decrece a un valor menor que el de salida. Si esto sucede, el par neto cambia de un par de aceleración a un par de retardo.

La velocidad que es todavía abajo de la normal, ahora decrece otra vez y continúa decreciendo hasta una pequeña parte de - cada onda de ciclo. El sincronismo está definitivamente perdido, en otras palabras el sistema es inestable.

Si sin embargo el repentino incremento en la carga no es tan considerable, el motor recobra su velocidad normal antes que el desplazamiento del ángulo llegue a ser también grande, entonces el par neto es todavía un par acelerado y causa que la velocidad del motor continúe incrementándose y de este modo llegue a ser más grande que el normal. El ángulo de desplazamiento entonces decrece y otra vez aprovecha su propio valor. Otra vez se sobre dispara este valor en inercia.

El rotor del motor oscila alrededor de la nueva posición angular del estado de equilibrio, las oscilaciones finales se - pierden porque los pares amortiguados han sido descuidados en este análisis elemental. Una noción de oscilación amortiguada,

caracteriza un sistema estable.

Con un incremento repentino dado en la carga, hay un definido sobrelímite a la carga la cual el motor llevará sin salirse de fase, este es el límite de estabilidad transitoria del sistema para las condiciones dadas. El límite de estabilidad-transitoria, está siempre abajo del estado de equilibrio en su límite de estabilidad, pero parece que más tarde este puede tener muchos diferentes valores dependiendo de la naturaleza de la magnitud de el disturbio. El disturbio puede ser un repentino incremento en la carga, como se discutió antes, o puede ser un repentino incremento en la reactancia del circuito, causado por empleo por la desconexión de una, de dos o más líneas paralelas como una operación de switcheo normal, el más severo tipo de disturbio que puede ocurrirle a un sistema de potencia, sin embargo, es un corto circuito. Asimismo, el efecto de corto circuito debe ser determinado en casi todos los estudios de estabilidad.

Un corto circuito en la línea conectada al generador y el motor completamente cortado ( eliminado ) eléctricamente el flujo de potencia entre las máquinas.

A la salida del generador, llega a ser cero en los circui-

tos de reactancia pura bajo consideración; a la entrada del motor también llega a ser cero, porque de lo más lento de acción de el gobernador del actuador principal maneja el generador, - la potencia mecánica a la entrada del generador permanece constante para quizá 3/4 de seg. También de este modo la potencia y par de la carga en el motor son funciones de velocidad - y de este modo la velocidad no puede cambiar instantáneamente - y cambia pero no más que un poco porcentaje menos y hasta la pérdida de sincronismo. La potencia mecánica a la salida del motor puede ser considerada constantemente.

Como la potencia eléctrica de ambas máquinas ha decrecido - por el corto circuito mientras que la potencia mecánica de ambas permanece constante, hay un par de aceleración en el generador y un par retardado en el motor. Consecuentemente la velocidad del generador se eleva y la del motor cae, y aparentemente el sincronismo se pierde a menos que el corto circuito - sea rápidamente removido para restaurar la potencia de sincronización entre las máquinas antes que ellas tengan movimiento - también aparte en ángulo y velocidad. Si el corto circuito está en una de las dos líneas paralelas y no está al final de la línea, o si el corto circuito es del tipo de tres fases, una línea aérea, o línea a línea, entonces alguna potencia de sin-



cronización, puede todavía ser transmitida pasada la falla, pero la amplitud de la curva del ángulo de potencia es reducida en comparación con esa condición de prefalla.

El algunos casos, el sistema será con un corto circuito -- sustancial, mientras que en otros el sistema será estable solo si el corto circuito es claro con suficiente rapidez. Aunque el sistema estable durante la falla dependerá no solo del sistema por sí mismo, sino también del tipo de falla, localización de falla y método de claro que es la secuencia abierta de dos o más interruptores, o por aperturas simultáneas.

Para cualquier colocación de estas condiciones, la pregunta es de cualquier modo, el sistema es estable dependiendo sobre que potencia se llevó antes de la ocurrencia de la falla, de este modo, para cualquier disturbio específico, hay un valor de potencia transmitida llamada " el límite de estabilidad transitoria ", abajo del cual el sistema es estable y arriba - es inestable.

El límite de estabilidad, es un medio de potencia limitada pero ésta potencia limitada de un sistema, no es siempre determinada por la cuestión de estabilidad. Así en un sistema que

consiste de un sistema de un generador síncrono suministrando potencia a una resistencia de carga, hay una potencia máxima - recibida por la carga como la resistencia de la carga, es variable. Claramente hay un límite en la potencia aquí con ninguna duda en estabilidad.

#### VI-5 SISTEMAS MULTIMAQUINAS

Si cualquier sistema actual de potencia, consiste de un generador y un motor síncrono, más sistemas de potencia tienen muchas estaciones generadoras, cada una con varios generadores de muchas cargas más de las cuales son combinaciones de motores síncronos, condensadores síncronos, motores de inducción, lámparas, calentadores y otros. El problema de estabilidad en un sistema de potencia usualmente concierne la transmisión de potencia de un grupo de máquinas a otro, como una regla, ambos grupos consisten predominantemente de generadores. Durante un disturbio de cada grupo de máquinas oscilas, más o menos juntos; que es retener aproximadamente sus posiciones angulares - relativas, aunque ésta varía grandemente con respecto a la máquina de otro grupo.

Para propósitos de análisis, las máquinas de cada grupo --

pueden reemplazarse por una máquina equivalente. Si esto está hecho, hay un generador equivalente y un motor síncrono equivalente. Si el sincronismo se pierde, las máquinas de cada grupo permanecen conjuntas aunque ellas salgan de fase con otro grupo, porque el comportamiento de un sistema de dos máquinas representa el comportamiento de un sistema multimáquinas, al menos cualitativamente y porque el sistema de dos máquinas es muy simple en comparación con el sistema multimáquinas que este representa.

El sistema de dos máquinas, es extremadamente útil en la descripción de los conceptos generales de la estabilidad del sistema de potencia y la influencia de varios factores sobre estabilidad.

#### VI-6 ANALOGIA MECANICA DEL SISTEMA DE ESTABILIDAD

Un modelo mecánico simple del diagrama vectorial de la fig. VI-7, puede construirse de dos brazos rígidos unidos de un pivote representandose los vectores  $E_G$  y  $E_M$  unidos por sus extremos por un reporte representado por el vector  $XI$ . Vease la fig. VI-8. Los largos, representan voltajes en los modelos -- justamente como se aprecia en la figura del diagrama vectorial

Las longitudes de los brazos  $E_G$  y  $E_M$  están compuestas de a cuerdo con el principio de voltajes internos. El largo del re-  
 sorte  $XI$  es proporcional a la fuerza de tensión aplicada ( por  
 simplicidad, asumimos un resorte ideal el cual regresa a cero-  
 longitud si la fuerza se modifica). De este modo la fuerza de  
 tensión puede considerarse como la representación de la co- --  
 rriente, y la elongación por unidad de fuerza del resorte, re-  
 presenta la reactancia.

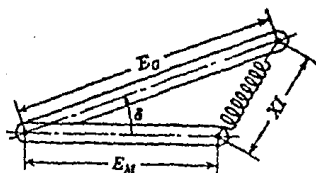


Figura VI-8

El par que se ejerce sobre un brazo por el resorte, es i--  
 gual al producto de la longitud del brazo, la fuerza de ten- -  
 sión del resorte y el seno del ángulo entre el brazo y el re--

sorte ( mayor torque es ejercido por el resorte cuando es perpendicular al brazo que cualquier otro ángulo por la misma - - fuerza de tensión ). Obviamente, los torques en los dos brazos son iguales y opuestos. El torque multiplicado por la velocidad de rotación dá la potencia mecánica transmitida de un brazo a otro.

Por conveniencia de inspección, el modelo mecánico será -- considerado como estacionario, o mas bien como rotatorio a velocidad síncrona, justamente como consideraremos el diagrama vectorial usual como estacionario. La fórmula para torque o potencia en el modelo es análogo a aquel para potencia en el diagrama vectorial nombrado; voltaje por corriente por coseno del ángulo entre ellos ( Así el XI vector está  $90^\circ$  al frente del vector I, el coseno del ángulo entre E e I es igual al seno del ángulo entre E y XI ).

La potencia de flecha de las máquinas puede considerarse - por la aplicación adicional de torques a los brazos. Un método comunmente de aplicación constante igual y opuesto de pares a los dos brazos es atacar un tambor a cada brazo y suspender un peso en forma de plato de un rodillo giratorio en un cordón y un extremo del cual está a cargo de cada tambor tal como se-

indica en la fig. VI-8.

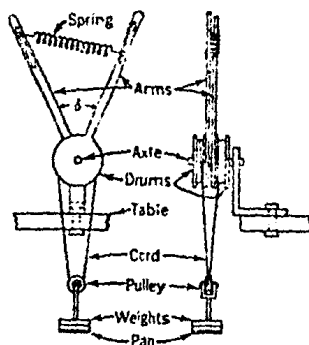


FIGURA VI-8

Como los pesos son añadidos al plato en pequeños incrementos los dos brazos del modelo gradualmente movidos aparte hasta el ángulo  $\delta$  entre ellos llega a  $90^\circ$  al que la posición -- del resorte experimenta el máximo torque. Si mayores pesos se añaden, los brazos se despegan aparte y continúa la rotación -- en direcciones opuestas hasta que el cordón ( base ) se separa de los tambores.. El sistema es estable, el límite de potencia del estado equilibrado llega al ángulo  $\delta = 90^\circ$ . Aunque -

de  $90^\circ$  a  $180^\circ$  la fuerza del resorte ( corriente ) continúa incrementándose, el ángulo entre el brazo y el resorte cambia de modo que el torque decrece.

El efecto de cambio de voltaje de la máquina, puede mostrarse por presión a los abrazadores del resorte que están al lado de los brazos.

El efecto de la estación intermedia de un condensador síncrono en incremento del límite de potencia en estado estable, puede mostrarse por adición al tercer brazo del pivote remarcado a un punto intermedio del resorte ( ver fig. VI-9 )

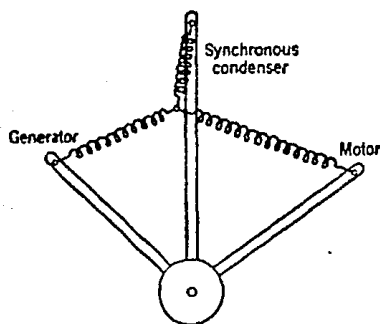


Figura VI-9

El condensador mantiene un voltaje interno compuesto. Así el condensador no tiene una flecha de entrada o salida, ningún tambor está previsto en el tercer brazo en el modelo. Con el brazo intermedio ( representando el condensador ) en lugar, el ángulo entre los dos brazos extremos ( representando el generador y motor ) puede exceder  $90^\circ$  sin estabilidad y el límite de potencia mayor que antes.

El modelo puede usarse para ilustrar estabilidad transitoria para proveer a cada brazo con una rueda volátil, tomando como los momentos combinados de inercia del brazo y la rueda es proporcional a aquel de la máquina síncrona correspondiente -- junto con su actuador principal ( o carga ). Los tambores pueden estar hechos para servir este propósito.

El ángulo entre los brazos puede exceder  $90^\circ$  durante estas oscilaciones sin pérdidas de estabilidad. Si el incremento de carga no es tan grande, los brazos colgaran aparte y continuarán para rotar en direcciones opuestas, indicando inestabilidad. Esto puede haber pasado pensando que en la carga total es menos que el límite de estabilidad del estado estable. El efecto de desconectar una de las dos líneas paralelas puede -- ser simulado por conexión de brazos por dos resortes en paralelo y entonces sucede una desconexión repentina en un resorte-



por el calentamiento de la pieza.

El efecto de una falla en la línea, puede ser simulada por acción repentina a un punto del resorte hacia el eje ( ver -- fig. VI-9a).

Los brazos, se moveran aparte y la estabilidad se perderá, los modelos de este medio han sido construidos para dar una re presentación a escala del sistema de potencia actual de tres o más máquinas, y las oscilaciones de los brazos han sido grabadas por camaras de película en movimiento, hay dificultades -- prácticas, sin embargo, en aplicación al modelo a un sistema - complicado.

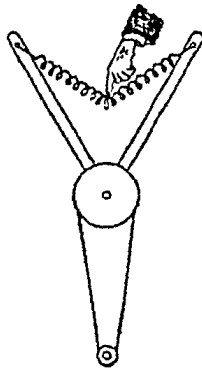


Figura VI-9a.

## VI-7 EFECTOS MALOS DE INESTABILIDAD

Cuando una máquina sale de fase con otras en un sistema, si éste es un generador, su longitud no constituye una fuente real de potencia eléctrica. Si éste es un motor, éste no desarrolla potencia mecánica a la propia velocidad. Si éste es un condensador no mantiene su propio voltaje en sus terminales. Un sistema inestable de dos máquinas consistiendo de un generador y de un motor, puede compararse a un embrague en un sistema de transmisión; la inestabilidad significa la falla del sistema como una potencia transmitida de eslabón.

Más que todo, una gran máquina síncrona fuera de fase no solamente no se usa, es peor que utilizable, porque tiene un efecto de disturbio en los voltajes. Los voltajes fluctuarán subiendo y bajando entre amplios límites, de este modo la inestabilidad, tiene el mismo efecto al servicio en los consumidores (cargas) excepto que el efecto de inestabilidad es parecida al peor efecto.

Si la inestabilidad ocurre como consecuencia de una falla franca, la falla por sí misma puede no volver a la estabilidad. Los disturbios de fluctuación de voltaje continuarán a la falla que ha sido localizada.

La máquina de un grupo de máquinas que está defasada con el resto del sistema puede regresar a fase o también desconectarse con el resto del sistema. Si en operación se ha hecho manualmente puede tomar un período de tiempo largo comparado con el tiempo requerido para corregir una falla automáticamente.

Como una regla, la mejor manera de regresar las máquinas de fallas es desconectarlas y entonces re-sincronizarlas. Relevadores de protección han sido desarrollados para abrir un interruptor a determinada posición cuando las condiciones de defase ocurran. Muchos relevadores sin embargo, no están todavía en uso.

Preferentemente el sistema de potencia estará repartido en tantas partes tal que cada parte tendrá una capacidad generadora conectada a la fuente a la carga de cada parte. Algunas sobrecargas habrán sido transportadas temporalmente hasta que el sistema esté re-sincronizado.

Ordinariamente los relevadores de protección parecen operar falsamente durante condiciones de defasamientos, de este modo - el breaker del circuito actúa de la línea de falla-no falla. Así el paro falso puede innecesariamente interrumpir el servicio

a las cargas y podrían dividir al sistema y a muchos puntos a parte que harán que la capacidad generadora de algunas partes sea inadecuada.

El camino en el diseño en el sistema, ha sido hacia el aumento de la efectividad del servicio eléctrico de potencia, de este modo, la inestabilidad ha tenido efectos en la calidad el servicio, un sistema de potencia debería diseñarse y operarse de modo que la inestabilidad sea improbable y ocurra solo raramente.

## VI-8 CRITERIO DE AREA IGUAL PARA ESTABILIDAD

Para determinar si un sistema de potencia es estable después de un disturbio, es necesario en general, inspeccionar y analizar la oscilación de las curvas. Si éstas curvas demuestran que el ángulo entre dos cualquiera máquinas tienden a incrementarse sin límite, el sistema por supuesto es inestable, si por otro lado después de todos los disturbios incluyendo -- switcheos que hayan ocurrido, los ángulos entre las dos máquinas en todos sus posibles pares, llegan a sus valores máximos y entonces decrecen, es probable aunque no cierto que el sistema sea estable.

Ocasionalmente en un sistema de multimáquinas, una de las máquinas puede permanecer en fase en la primera onda y todavía salirse de fase en la segunda oscilación porque otra máquina está en diferentes posiciones y reacciona diferentemente a la primera máquina.

En un sistema de dos máquinas bajo los principios usuales de sin amortiguamiento y voltaje constante, con reactancia transitoria, o se salen de fase en la primera oscilación o ciclo o no pasará, bajo estas condiciones se observa que la má-

quina se para con respecto a cualquier otra, lo cual es indicativo que el sistema es estable.

Hay un método gráfico simple para probar lo anterior y es conocido como " Criterio de Area Igual " para la estabilidad , que cuando se aplica se ahorra la necesidad de computar figuras gráficas de oscilaciones y valores por lo que representa - un importante ahorro de trabajo, y es aplicable a cualquier -- sistema de dos máquinas.

Si la máquina no tiene un regulador de voltaje, la corriente de campo decae a su valor original, igual a el voltaje de excitación dividido por la resistencia del circuito de campo y como decae, el eslabón de flujo también decae, el tiempo constante del descenso es del orden de 2 a 5 seg. y dura la primera oscilación del nivel de flujo, no desciende mucho en cualquier máquina que no va fuera de fase en esa onda, si la falla no es sostenida por mucho tiempo, sin embargo el eslabón de -- flujo puede ser inducido al sistema, aunque se mantenga la primera oscilación, será inestable. Así mismo si la falla es rápidamente despejada, la apertura de una línea para despejarla, permite disminuir la máxima potencia de sincronización y así - incrementar el ángulo de desplazamiento requerido para brindar

una transferencia de potencia y decrecer el valor de flujo para brindar corriente de campo.

Es razonable suponer que el sistema no será inestable para cualquier tiempo intermedio, por eso no estará probablemente - bastante bien amortiguado, reduciendo la amplitud de ondas tan rápido como decaiga el flujo.

Si la máquina tiene regulador de voltaje, los reguladores - tenderán a mantener constante el voltaje terminal para lo cual se requerirá un aumento de valores en el flujo del campo. Por el uso de reguladores de voltaje es posible mantener la estabilidad pareja en algunos instantes cuando el sistema sea inestable en base de la corriente constante de campo después de la - falla.

De la anterior discusión, puede verse que si un sistema de dos máquinas no pierde sincronismo durante la primera fase es muy probablemente estable, especialmente si las máquinas tienen reguladores de voltaje, y también la estabilidad e inestabilidad en la primera oscilación puede ser determinada con buena efectividad bajo las condiciones de entrada constante, sin amortiguamiento y voltaje constante atrazado con reactancia --

transitoria, para estas condiciones es útil el criterio de " Igual Area ".

Los sistemas de doble máquina se pueden dividir en dos tipos que serán considerados en turno: (1) aquellos que teniendo una máquina de oscilación finita con respecto a un bus, y ( 2 ) Aquellas que teniendo dos máquinas de oscilación finita con respecto a cada una.

Una oscilación de máquina con respecto a un bus infinito. La ecuación de onda de la máquina finita es:

$$M \frac{d^2 \delta}{dz^2} = P_a = P_i - P_u \quad \text{--- (1)}$$

donde:

M es la constante de inercia de la máquina finita

$\delta$  es el desplazamiento angular con respecto al bus infinito

Multiplicando cada miembro de la ecuación (1) por  $2 \frac{d\delta}{Mdt}$  :

$$2 \frac{d^2 \delta}{dz^2} \frac{d\delta}{dt} = 2 \frac{P_a}{M} \frac{d\delta}{dt} \quad \text{--- (2)}$$

$$6 \frac{d}{dt} \left[ \left( \frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = 2 \frac{P_a}{M} \frac{d\delta}{dt} \quad \text{--- (3)}$$

Ahora multiplíquese cada lado por dt, obteniendo diferencias en lugar de derivadas:

$$d \left[ \left( \frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = 2 \frac{P_a}{M} d\delta \quad \text{--- (4)}$$



Integrando :

$$\left(\frac{d\delta}{dt}\right)^2 = \frac{2}{M} \int_{\delta_0}^{\delta} P_a d\delta \quad \text{--- ( 5 )}$$

$$\frac{d\delta}{dt} = w' = \sqrt{\frac{2}{M} \int_{\delta_0}^{\delta} P_a d\delta} \quad \text{--- ( 6 )}$$

Cuando la máquina se detiene con respecto al bus infinito\*, - una condición que puede ser tomada como indicativo de estabilidad:

$$w' = 0 \quad \text{--- ( 7 )}$$

Considerando que :

$$\int_{\delta_0}^{\delta} P_a d\delta = 0 \quad \text{( 8 )}$$

esta integral se puede interpretar graficamente ( ver fig. VI-10) como el área bajo la curva de  $P_a$  argumento contra  $\delta$  entre límites  $\delta_0$ , el ángulo inicial y  $\delta$  el ángulo final  $\delta$  :

$$P_a = P_i - P_u \quad \text{--- ( 9 )}$$

La integral también puede ser interpretada como el área entre la curva de  $P_i$  contra  $\delta$  y la curva de  $P_u$  contra  $\delta$ . La curva de  $P_i$  contra  $\delta$  es la línea horizontal, así  $P_i$  es constante. La curva de  $P_u$  contra  $\delta$  conocido como una curva de ángulo de potencia, es un senoide. Si el trabajo neto es lineal y si la máquina es representada por una reactancia constante el área que será igual a cero debe consistir de una porción  $A_1$ , para lo cual  $P_i > P_u$  igual y opuesta una porción negativa  $A_2$ , para lo cual  $P_i <$

Pu. De este modo se origina el nombre de "criterio de igual - área para la estabilidad".

Nota: Un bus infinito es una fuente de voltaje constante de fase magnitud y frecuencia y no ser afectado por la cantidad de corriente dibujada de ello o como una máquina con impedancia cero e inercia infinita. Un gran sistema de potencia a menudo se toma como un bus infinito.

Las áreas  $A_1$  y  $A_2$  se puede interpretar en términos de la energía cinética.

El trabajo medio de un cuerpo rotatorio por un torque  $T$  actuando através de un ángulo  $\delta - \delta_0$  es:

$$w = \int_{\delta_0}^{\delta} T d\delta \quad \text{--- ( 10 )}$$

y éste trabajo incrementa la energía cinética del cuerpo, la potencia acelerada  $P_a$  es proporcional al torque bajo la condición hecha previamente de una velocidad constante, así el trabajo hecho por la máquina para acelerarla, el que aparece como energía cinética es proporcional al área " 1 "  $A_1$ . Cuando la potencia de aceleración llega a ser negativa y la máquina es retrazada, esta energía cinética se eleva y cuando tiene el máxi-

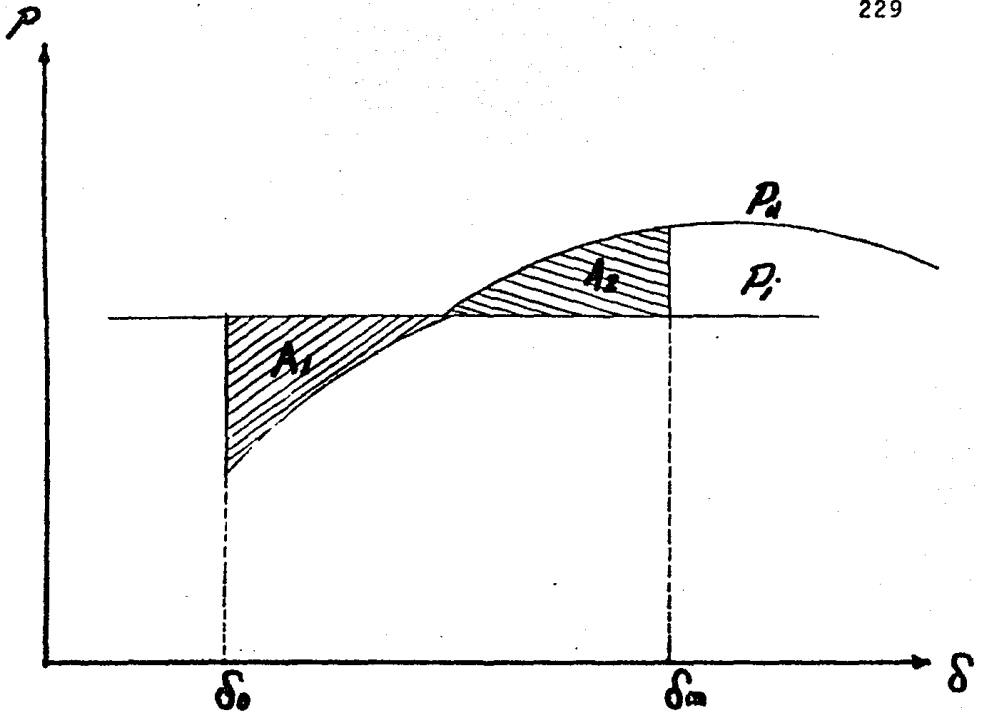


Figura VI-10

El criterio de igual area para la estabilidad.

mo de elevación, cuando  $A_2 = A_1$ , las energías cinéticas envueltas en esta configuración con ficticias, siendo calculadas en términos de la velocidad relativa mayor que la velocidad actual.

### ECUACION ANGULO-POTENCIA

Para el caso de una máquina y un bus infinito, se sigue directamente de la ecuación ángulo-potencia para una máquina de un sistema multimáquina, si permitimos tomar en cuenta (1) denota la máquina finita y si suscribimos (2) denota el bus infinito, y si ponemos  $\delta_1 = \delta$  y  $\delta_2 = 0$ .

$$P_{01} = E_1^2 Y_{11} \cos \theta_{11} + E_1 E_2 Y_{12} \cos(\theta_{12} - \delta) \\ = P_c + P_m \sin(\delta - \alpha) \quad \text{—————} \quad (11)$$

donde :

$$P_c = E_1^2 Y_{11} \cos \theta_{11}$$

$$P_m = E_1 E_2 Y_{12}$$

$E_1$  = voltaje interno de la máquina

$E_2$  = Voltaje del bus infinito

$Y_{11} \angle \theta_{11}$  y  $Y_{12} \angle \theta_{12}$  son admitancias terminales de el trabajo neto entre la máquina y el bus infinito.

$$\alpha = \theta_{12} - 90^\circ$$

La curva Angulo-Potencia es en general una presentación de una senoide, es similar al senoide simple.

$$P_u = P_m \operatorname{sen} \delta \quad \text{-----} \quad (12)$$

La presentación indicada por una distancia  $P_c$  y a la derecha por una distancia  $\alpha = \theta_{12} - 90^\circ$  como se muestra en la figura VI-11.

Nota: Para un trabajo neto consistente de reactancia inductiva y resistencia,  $\theta_{12}$  descansa entre  $90$  y  $180^\circ$ ,  $\alpha$  descansa entre  $0$  y  $90^\circ$ , y  $\theta_{11}$  descansa entre  $0$  y  $90^\circ$ . Para un trabajo neto consistente de reactancia inductiva solamente,  $\theta_{12} = -90^\circ$ ;  $\alpha = 0$  y  $\theta_{11} = -90^\circ$ .

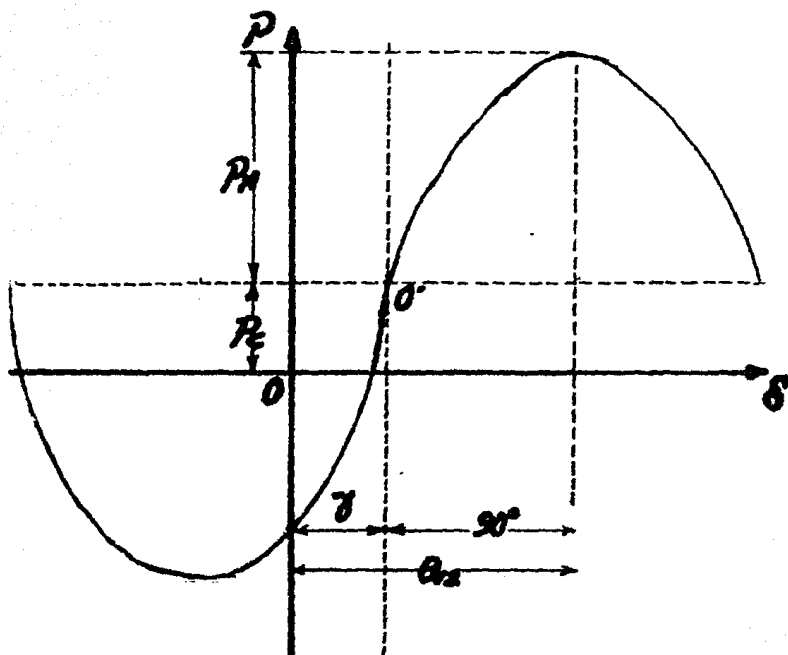


Figura VI-11

## VI-9 APLICACIONES DEL CRITERIO

El uso del método Area-Igual se ilustrará aplicándolo a dos casos simples.

- 1) Una falla sostenida en la línea
- 2) Una falla de línea franca después del lapso de un cierto tiempo por la apertura simultánea de los interruptores = ambas terminales de la línea.

Se considera que la falla ocurre en el punto "x" de el sistema simple ( ver figura VI-12 ) el cual consiste de un generador conectado através de una línea de doble circuito a un bus -

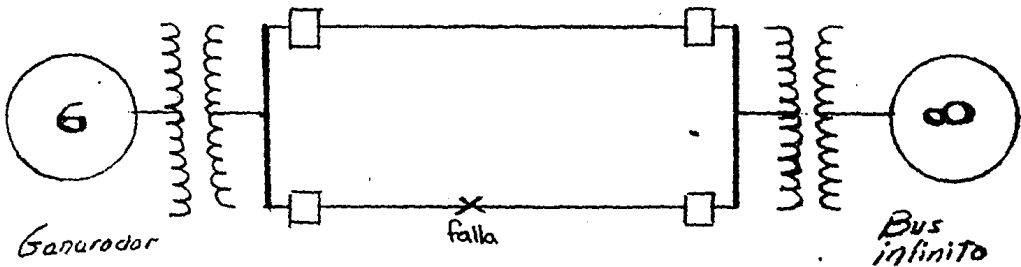


Figura VI-12

## 1) FALLA DE LINEA SOSTENIDA

Las curvas Angulo-Potencia dando a la salida del generador contra el ángulo de desplazamiento, se muestra en la Fig. VI--13 para dos condiciones: (1) Normal y (12) Falla.

La línea horizontal a la distancia  $P_i$  sobre los ejes representa la constante de entrada. El punto de operación inicial es "a" a la intersección de la entrada y curva de salida normal. El ángulo inicial de desplazamiento es  $\sigma_0$  y la velocidad inicial angular relativa es cero, cuando la falla se aplica, el punto de operación pendiente "ab" directamente abajo de "a" sobre la curva de falla de salida.



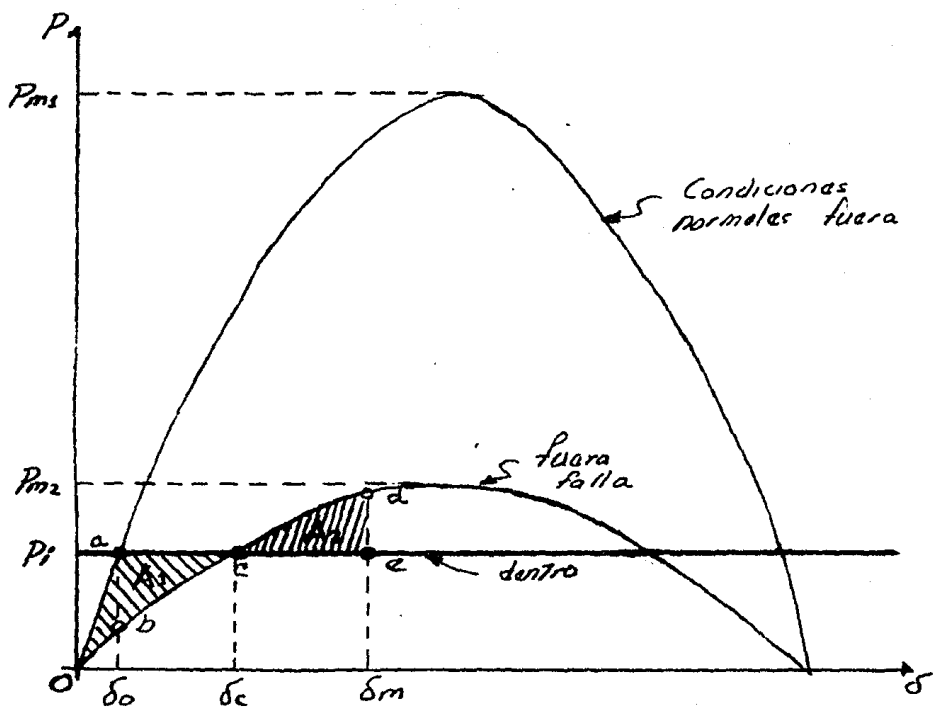


Figura VI-13

## 2) FALLA DE LINEA SUBSECUENTE VACIO

En este caso, tres curvas Angulo-Potencia, se necesitan.

- (1) Para la condición normal o prefalla con el sistema intacto.
- (2) Para la condición de falla, y
- (3) Para la post-falla o condición de vacío con falla en línea desconectada. Estas curvas se muestran en la Fig. VI-13.

Como en el caso (1), la inicial del ángulo  $\phi_0$  se determina por la intersección del ángulo de entrada y la curva de prefalla de salida ( punto "a" ). La aplicación de la falla usa el punto de operación a la inclinación de "a" a "b" en la falla - de la curva de salida, y la potencia de aceleración, causa movimiento a lo largo de la curva de "b" a "c". Se puede asumir que cuando el punto "c" se acerca, los interruptores del circuito se abren viéndose la falla. El punto de operación da un salto a "e" en la postfalla en la curva de salida viajando a lo largo de la curva a "f", donde Area  $A_2 = "defg"$  igual al -- area  $A_1 = "abcd"$ .

Con una falla franca como una falla sostenida una más alta entrada ( y salida inicial ) causará en el punto "f" un movimiento a la derecha hasta el límite de estabilidad, "f" coincidirá con "h". Todavía un valor mayor de  $P_i$  permitirá la inestabilidad.

Otro factor que podría causar que "f" se mueva a la derecha es un incremento en el tiempo provocando la falla, resultando una claridad mayor en el ángulo  $\sigma_c$ . Para cualquier inicial dada de carga hay un ángulo crítico en claro, si la claridad del ángulo actual es menor que el valor crítico. El sistema es estable, si es mayor, el sistema es inestable.

Ordinariamente, el ángulo de claridad  $\sigma_c$  no es conocido directamente; en vez de eso el tiempo de falla ( suma del tiempo de relay y el tiempo de ruptura ) es conocido. Para determinar el ángulo de claridad de un tiempo conocido de tiempo -- claro, la curva de oscilación debe determinarse arriba del -- tiempo de claridad.

Nota: Claridad idem compensación.

## C O N C L U S I O N E S

Hemos intentado através de esta tésis, brindar algunos conceptos que en su estricto origen pertenecen a la ciencia y en su enfoque y aplicación pertenecen a su vez a la tecnología. La tenacidad de personas que han brindado y se siguen preocupando por llegar más allá de lo obtenido hasta ahora en el desarrollo de maquinaria tan sofisticada como son las Plantas de Generación Eléctrica, tanto fijas ( usadas en las grandes caídas de agua u otros medios aceptados como Eólica, Maermotriz, Geotérmica Etc. ), como portátiles comunmente usadas para baja o muy bajas cargas como es alguna planta de producción petroquímica o uso casero por ejemplo. Es así como el profesional y técnico pone un grano de arena en la investigación, en la -- parte económica, en el diseño, en su construcción, en sus pruebas, en su instalación, en su puesta en marcha, en su servicio de mantenimiento, etc.

Estos factores, que sometidos a un riguroso análisis de anteproyecto inicial serán en un futuro una versión física y -- práctica de lo que tanta gente muchas veces sin darse cuenta -- va a producir con su parte. Es así como pensamos nosotros los alumnos, como parte del organigrama y en cierta medida, intenta

mos con éste trabajo ser útiles al proceso antes citado.

Podríamos agregar un poco mas al respecto: Toda iniciativa de creatividad o simplemente de modificar una parte de un sistema o en su totalidad, debe sujetarse a importantes principios o patrones relacionados enteramente con la técnica o ciencia usada.

Concretamente, nos referimos a las "Normas", así llamadas como un nombre genérico que tratan de estandarizar toda la producción existente en un país y que por así decirlo, representa el grado de adelanto de dicho país y que es sinónimo de tecnología, un país con tecnología propia es un país que ha logrado su autosuficiencia en patrones que normen su conducta de diseño, construcción, pruebas, servicio etc.

De aquí decimos que algunas normas aplicables a las máquinas síncronas, están incluídas en los códigos de pruebas IEEE, CCONNIE, NEMA, DIN, USAS, ANSI, UL, VDE y para aplicaciones especiales dado su grado continuo de utilidad, se tienen las normas propias de COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD, PEMEX ( en menor medida ), COMPANIA DE LUZ Y FUERZA DEL CENTRO EN LIQUIDACION.

Esperamos sinceramente que al leer esta obra, se critique-  
en forma constructiva, ya que todos podemos aprender de ésto.