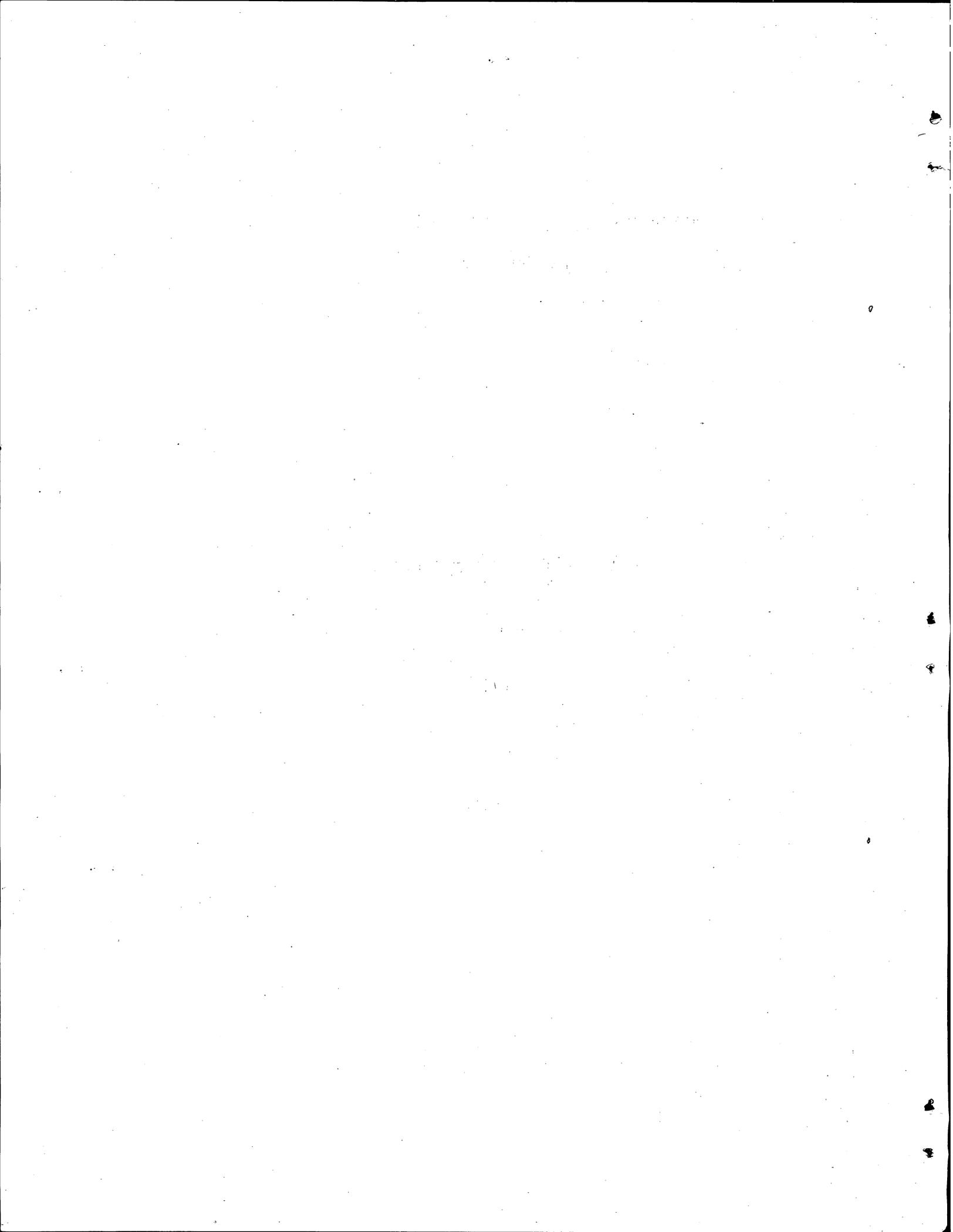


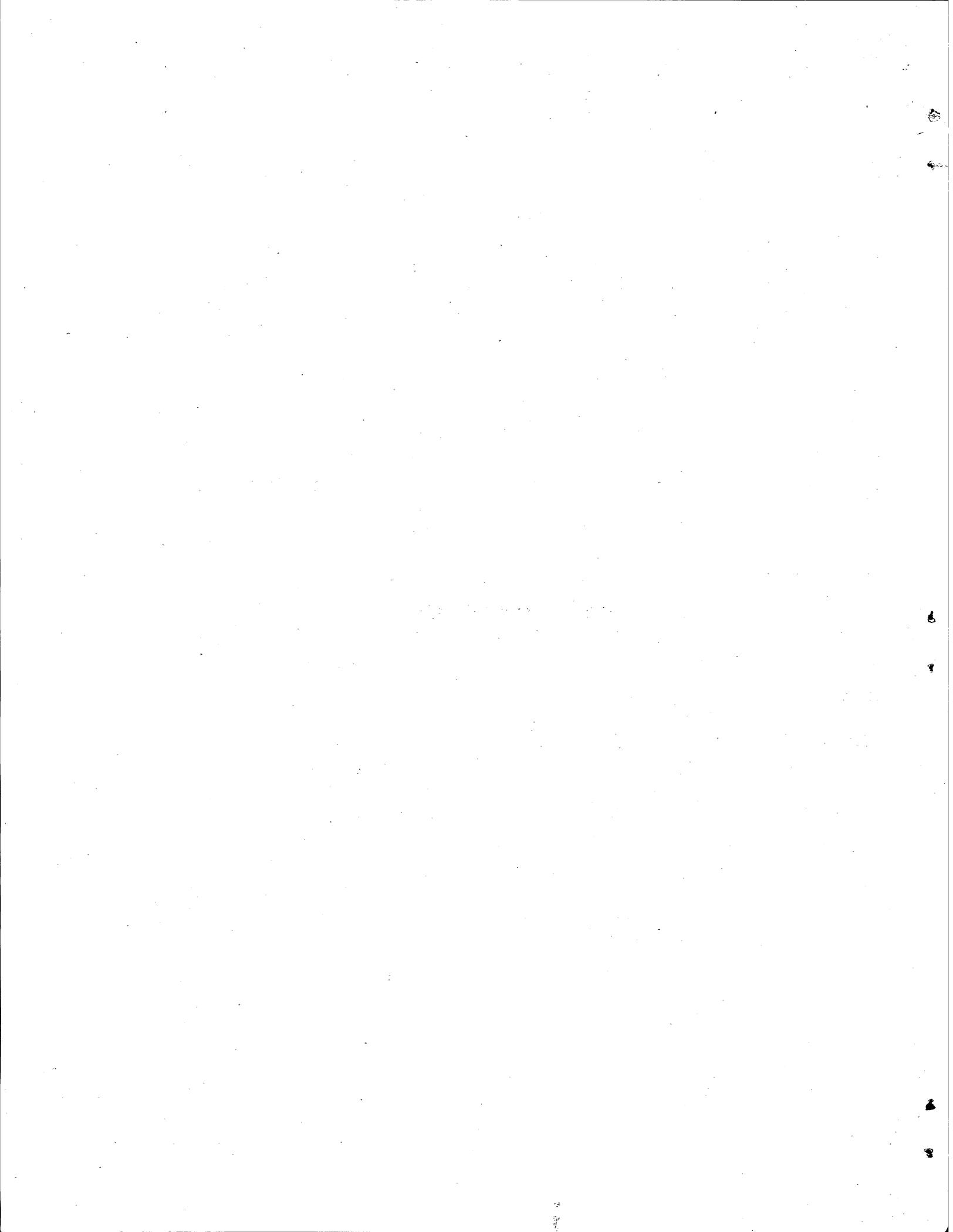
Clase 335

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



TRANSFORMADORES



S U M A R I O

Página

I. - TRANSFORMADORES.

1. -	Medición de la resistencia óhmica	5
2. -	Medición de la resistencia de aislamiento	8
3. -	Relación de transformación	9
4. -	Polaridad	15
5. -	Secuencia de fases	19
6. -	Desplazamiento angular	21
7. -	Pérdidas magnéticas y corriente de excitación	25
8. -	Pérdidas eléctricas y valor de impedancia	28
9. -	Eficiencia	30
10. -	Temperatura y métodos de dar carga	31
11. -	Pruebas dieléctricas	36
12. -	Prueba de impulso	42

II. - MOTORES DE INDUCCION.

1. -	Curvas de saturación en vacío y con el rotor bloqueado	50
2. -	Análisis del circuito equivalente	54
3. -	Curva par velocidad	76
4. -	Otras aplicaciones de los motores de inducción	79
5. -	Motores monofásicos.	88

MEDICION DE LA RESISTENCIA OHMICA

La medición de estas resistencias son de fundamental importancia para los propósitos.

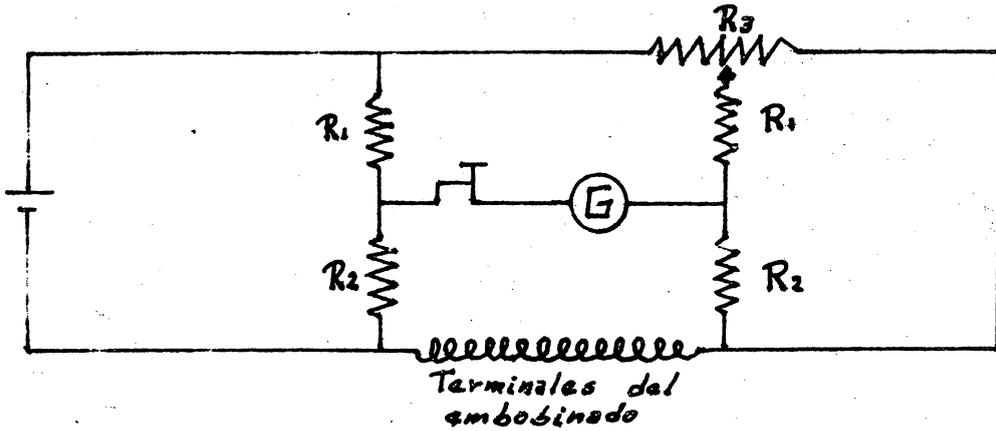
- a) Para el cálculo de las pérdidas en el cobre, ya que se empleará la ecuación $I^2 R$.
- b) Para la determinación de la temperatura de los bobinados al final de la prueba de temperatura.

Para medir la resistencia óhmica de los bobinados se emplean generalmente dos métodos: usando un puente o utilizando la caída de potencial.

El primer método consistirá en conectar ya sea el puente Kelvin para mediciones de resistencias menores de 1Ω o el puente de Wheatstone (para mayores de 1Ω) a las terminales del bobinado por medir.

Una vez realizada esta conexión, para leer la resistencia en el puente utilizado, se moverá la resistencia variable de éste hasta que el galvanómetro marque cero. Una vez obtenida esta condición se podrá leer directamente el valor de resistencia.

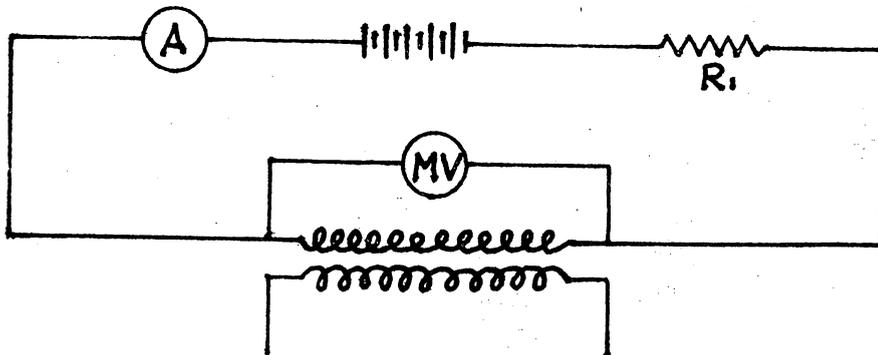
El diagrama correspondiente del puente y la conexión al embobinado por determinar su resistencia óhmica es el siguiente:



de esta forma se medirán las resistencias tanto del embobinado de alta como de baja tensión.

El método de caída de potencial es generalmente más conveniente que el del puente, para mediciones hechas en el campo. Este tendrá exclusivamente la limitación de que sólo se podrá emplear cuando la corriente nominal del embobinado del transformador es de 1 ampere o más.

La medición se hará con corriente directa y se tomarán lecturas simultáneas de corriente y de voltaje, usando las conexiones indicadas a continuación:



en las cuales estaremos usando un milivóltmetro, un ampérmetro y una resistencia R_1 para evitar que quede en corto circuito.

La resistencia deseada se calculará de las lecturas obtenidas utilizando la ley de Ohm.

$$R = \frac{\text{MV}}{\text{A}} \cdot 0.001$$

El valor de la resistencia, ya sea por uno u otro método deberá calcularse a la temperatura normal de operación, utilizando para ello la siguiente expresión:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{234.5 + T_1}{234.5 + T_2}$$

donde:

R_1 - Resistencia inicial (medida directamente)

R_2 - Resistencia a la temperatura normal de operación

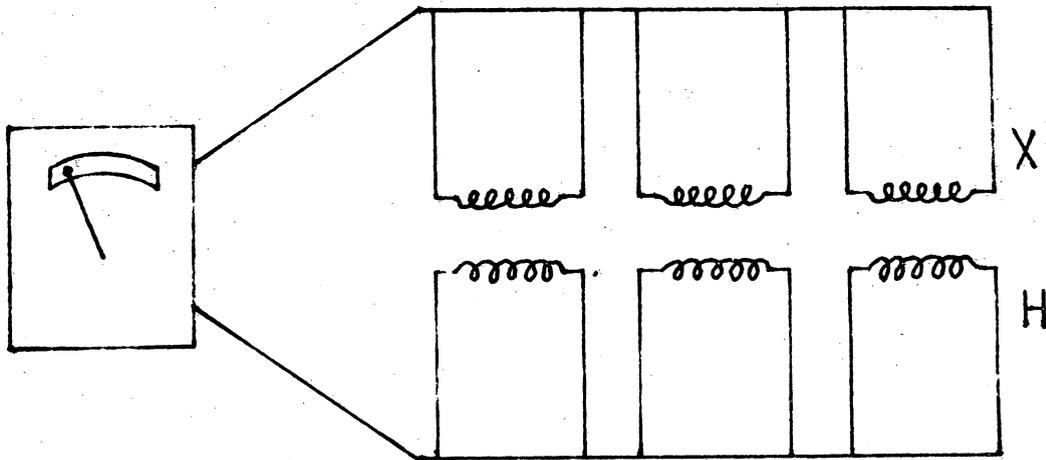
T_1 - Temperatura a la que midió la resistencia inicial

T_2 - Temperatura normal de operación.

MEDICION DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

Para realizar esta prueba se utilizará un megger con objeto de determinar la resistencia de aislamiento entre el embobinado de alta y el de baja, entre el de alta y tierra y entre el de baja y tierra.

El diagrama siguiente indica la conexión que se efectuará entre el embobinado de alta y el de baja.



Para la medición de las otras dos resistencias de aislamiento se harán conexiones similares a la anterior.

RELACION DE TRANSFORMACION

Para determinar la relación de transformación se procede como sigue:

- a) Si el transformador tiene taps o derivaciones la relación de transformación deberá determinarse para todos los taps así como para el embobinado completo.
- b) La relación de transformación deberá verificarse a un voltaje ya sea el nominal o menor, y a una frecuencia también nominal pero en este caso mayor.
- c) Los transformadores menores de una capacidad de 500W y con una corriente de excitación mayor que el 10% de la nominal, deberán ser probados solamente a voltajes y frecuencias nominales.
- d) En el caso de transformadores trifásicos, cuando cada fase es independiente y accesible será conveniente usar potencia monofásica, aún cuando también es conveniente usar potencia trifásica.
- e) Si se presenta el caso en que los embobinados de alta tensión están conectados en estrella, y el punto neutro es inac

cesible, entonces deberá ser aplicado un voltaje trifásico y el procedimiento a seguir, será similar al que se utilizó en transformadores monofásicos.

Para medir la relación de transformación son usados 3 métodos:

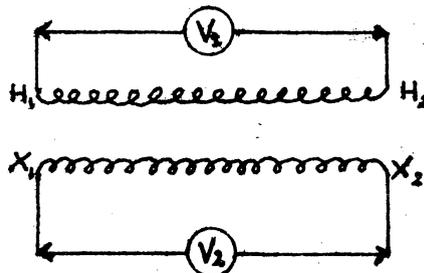
- 1.- Método de Voltmetro.
- 2.- Método de Transformador Patrón o Standard
- 3.- Método de Resistencia Variable o Potenciómetro.

- 1.- Método del Voltmetro.

Se usarán 2 voltímetros, (en el caso de trabajar en alta tensión podrán ser usados transformadores de potencial), uno para leer el voltaje en el embobinado de alta y otro nos dará la lectura de la tensión en el embobinado de baja.

Los 2 voltímetros se deberán leer simultáneamente.

El esquema siguiente nos muestra las conexiones necesarias para este método.



Un segundo grupo de lecturas se tomará con los instrumentos intercambiados y el promedio de las lecturas tomadas compensarán el error de los instrumentos.

En el caso de usar transformadores de potencial sus relaciones deberán ser de tal manera que proporcionen las mismas lecturas en los vóltmetros.

De otra manera la compensación por errores de instrumentos al intercambiar éstos no será satisfactoria y será necesario aplicar correcciones apropiadas a las lecturas de los vóltmetros.

Las pruebas deberán realizarse cuando menos a 4 diferentes voltajes, en pasos de 10% cada uno de ellas y el resultado promedio deberá tomarse como el valor verdadero. Estos varios valores deberán estar dentro del 1% de diferencia. De otra manera las pruebas deberán repetirse con otros vóltmetros.

Cuando varios transformadores de la misma capacidad vayan a ser probados el trabajo se hace más expedito, al aplicar las pruebas anteriores a una sola unidad y entonces comparar las otras unidades con la ya probada, de acuerdo con el método del transformador patrón que se analizará más adelante.

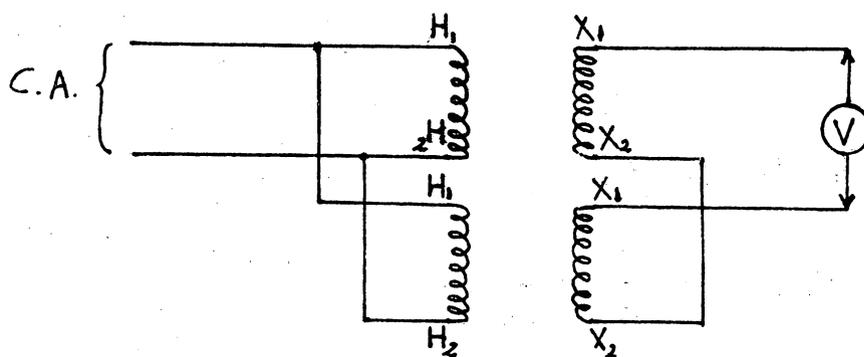
2. - Método de Transformador Patrón.

Este método consistirá en la comparación del transformador - por probar con un transformador de relación de transformación standard, efectuándose de dos formas diferentes:

- a) El transformador en prueba se excitará en paralelo con un transformador standard de la misma relación de transformación nominal, conectando los secundarios en paralelo, pero con vóltmetro o detector en la conexión entre 2 de las terminales de similar polaridad.

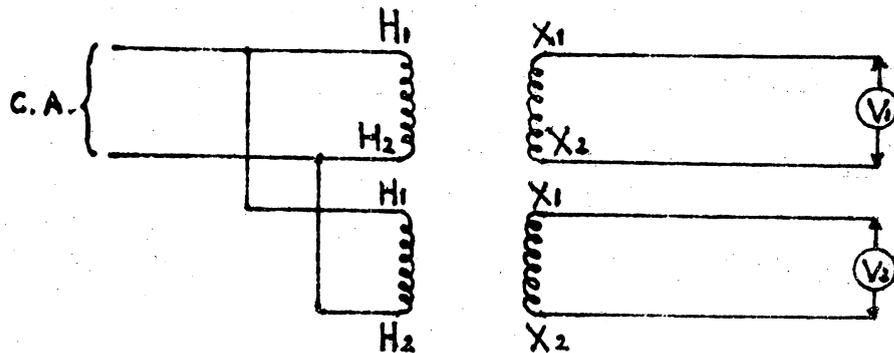
Este es el método mas preciso en virtud de que el vóltmetro o detector indicará la diferencia en voltaje.

El siguiente esquema nos muestra el método anterior.



- b) El transformador en prueba se excitará en paralelo con un transformador standard de relación conocida y 2 voltímetros se conectarán de manera de poder medir los voltajes o las tensiones en ambos embobinados secundarios. Para eliminar error de instrumentos deberán intercambiarse los instrumentos y repetir la lectura, tomando el promedio de los valores obtenidos.

La siguiente figura nos ilustra lo anterior.



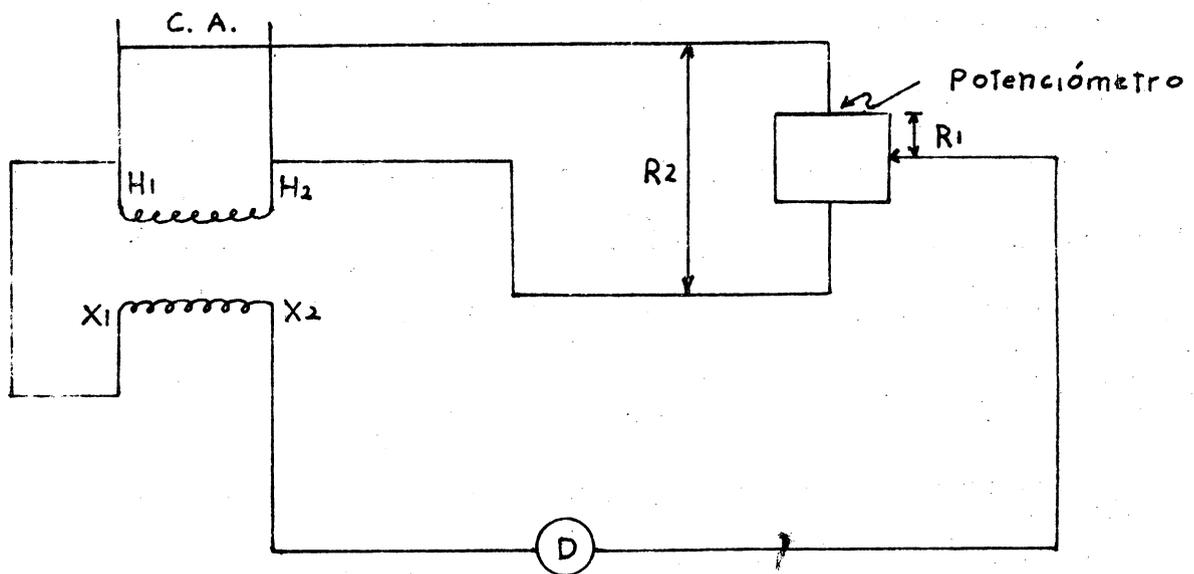
En donde $V_1 R_1 = V_2 R_2$

Por lo tanto: $R_2 = \frac{V_1}{V_2} R_1$

3.- Método de la Resistencia Variable.

Con una resistencia variable teniendo un rango adecuado y graduado de preferencia en porcentaje a su valor total, puede ser determinada la relación de transformación utilizando el diagrama mostrado:

El brazo de corredera se moverá a lo largo de la resistencia -- hasta que el detector lea cero, o marque cero, siendo la relación de la resistencia variable R_2/R_1 iguales a la relación de transformación buscada.



P O L A R I D A D

Para encontrar la polaridad en los transformadores se conocen por lo general 3 métodos que son los siguientes:

1. - Método del Transformador Patrón
 2. - Método de la Descarga Inductiva
 3. - Método de la Tensión Alterna
-
1. - Método del Transformador Patrón.

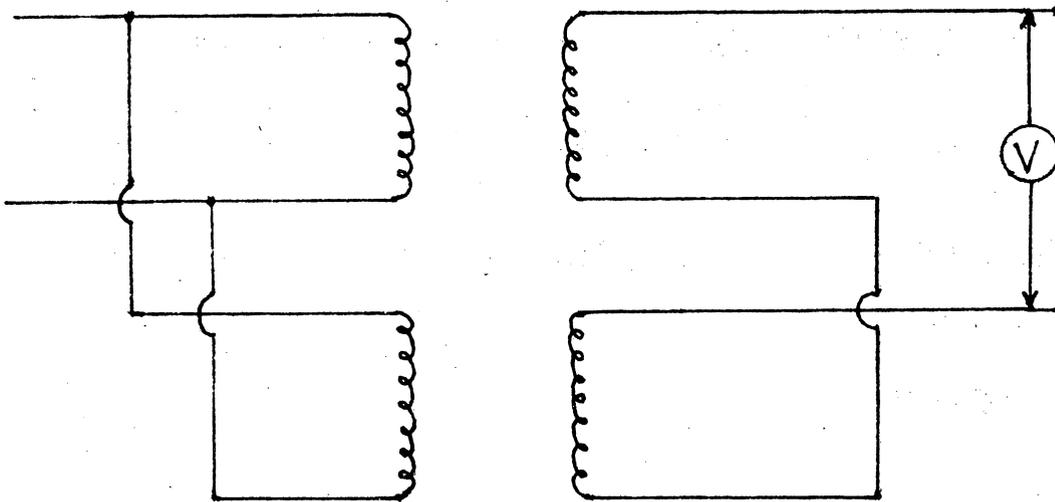
Cuando se tiene disponible un transformador de polaridad conocida y de la misma relación de transformación del transformador en prueba, se podrá verificar la polaridad del transformador en prueba al compararla con la del transformador patrón de una manera similar a la relación de transformación que se realizó utilizando un transformador patrón.

Conecte los embobinados de alta tensión en paralelo, teniendo cuidado de que la conexión sea correspondiendo los bornes terminales. Conecte también uno de los bornes del lado secundario de ambos transformadores según se indica en la figura, dejando libre los otros dos, con estas conexiones aplique un reducido voltaje al devanado de alta tensión y mida la tensión entre los dos bornes terminales que se tienen libres.

Un valor de cero o muy reducido que se puede despreciar en la lectura del vóltmetro indicará que las polaridades respectivas de ambos transformadores son iguales.

Un método similar al anterior puede ser el conectar fusibles de baja capacidad o lámparas adecuadas en los bornes en donde se tiene conectado el vóltmetro, de esta forma se tendrá una medida precautoria para evitar dañar el voltmetro si las polaridades son opuestas, y el valor de la tensión sea superior al de la escala del vóltmetro.

La representación gráfica sería:



2.- Método de la Descarga Inductiva .

Se hará circular corriente directa a través del embobinado de alta tensión conectando en sus terminales de salida un voltmetro, de manera que se tenga una deflexión positiva en la aguja del aparato.

Posteriormente se transferirán las terminales del voltmetro al lado de baja tensión teniendo cuidado de que éstas correspondan con el de alta tensión, en este momento se eliminará la excitación con el cual se inducirá un voltaje en el embobinado secundario, que causará la deflexión de la aguja del voltmetro.

Si la aguja gira en la misma dirección que se tuvo anteriormente la polaridad es aditiva, si gira en sentido contrario es sustractiva.

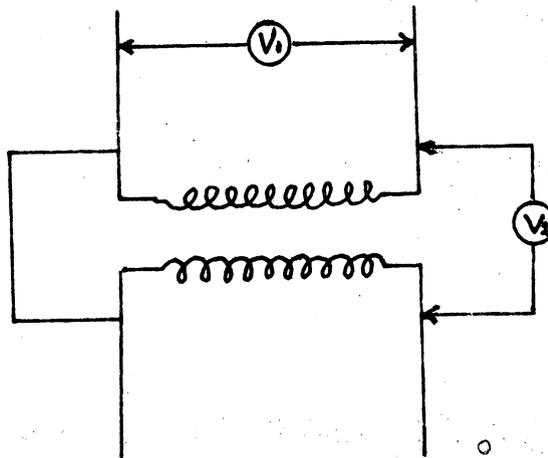
3.- Método de la Tensión Alterna.

Se conectarán los bornes terminales de la izquierda tal como se muestra en la figura y entre los bornes terminales de la derecha se pondrá un voltmetro.

Se aplicará una tensión de corriente alterna conveniente y se tomarán las lecturas del voltaje aplicado y del que se tiene en los bornes terminales de la derecha del transformador, si el voltaje V_2 es menor que el voltaje de alimentación V_1 se tendrá una polaridad sustractiva.

En el caso de que el voltaje V_2 sea mayor que el V_1 la polaridad será aditiva.

En el esquema siguiente nos ilustra lo anterior:



SECUENCIA DE FASES

Existen cuatro maneras diferentes para realizar esta prueba:

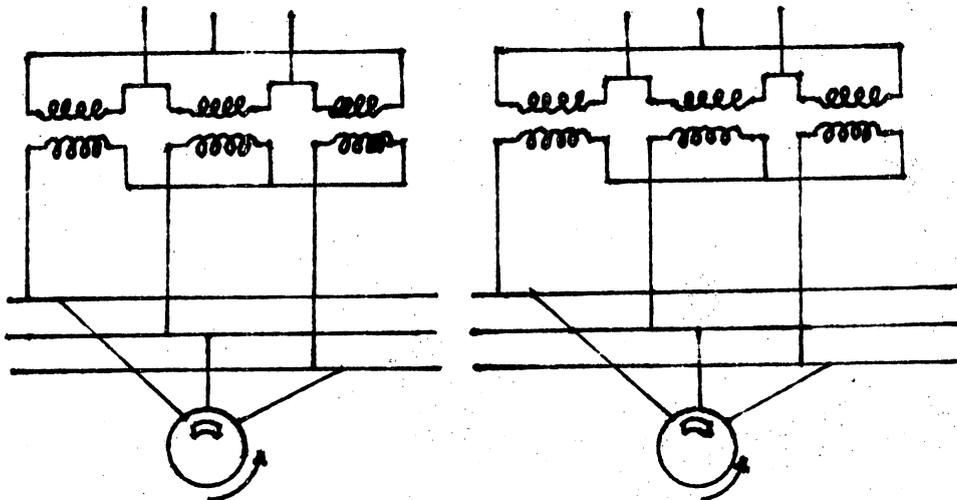
1. - Secuenciómetro
2. - Motor de Inducción
3. - Vólmetro
4. - Dos resistencias iguales y una inductancia conectadas en estrella

1. - Secuenciómetro

Este aparato trabaja con el principio de un motor de inducción, el cual se conectará a las terminales de los transformadores por trabajar en paralelo, debiendo girar en el mismo sentido cuando la secuencia de fases es igual en ambos.

En caso contrario las fases de un transformador deberán invertirse antes de conectarse con el otro.

El diagrama de conexiones es:



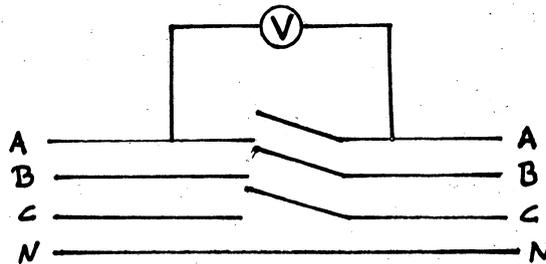
2.- Motor de inducción.

El procedimiento es enteramente igual al anterior utilizando también el mismo diagrama de conexiones.

3.- Vóltmetro.

Se conectará el vóltmetro entre las terminales de los transformadores, en el caso de que marque cero en las tres fases, se tendrá la secuencia de fases igual en ambas máquinas.

El esquema sería:



4.- Dos resistencias y una inductancia.

Estas se conectarán en la misma forma en que se conectaron el motor de inducción o el secuenciómetro. Si se usan focos como resistencias óhmicas, en uno de ellos la intensidad será mayor que en el otro. Cuando se conecta este dispositivo al segundo transformador, para una secuencia de fases igual, la misma lámpara deberá tener la mayor intensidad, en caso contrario deberán invertirse las terminales.

DESPLAZAMIENTO ANGULAR

El desplazamiento angular en los transformadores consistirá - en el ángulo formado entre la conexión de los embobinados del lado primario y la conexión de los embobinados del lado secundario.

De acuerdo con las normas del AIEE se tienen 3 grupos de -- desplazamiento angular para transformadores trifásicos y 2 grupos - para transformadores de 3 a 6 fases.

Los 3 grupos de desplazamiento angular para transformadores trifásicos, serán los siguientes:

Grupo 1: Desplazamiento angular de 0°

Grupo 2: Desplazamiento angular de 180°

Grupo 3: Desplazamiento angular de 30°

Referente a los transformadores de 3 a 6 fases, los 2 grupos de desplazamiento angular serán:

Grupo 4: Desplazamiento angular de 0°

Grupo 5: Desplazamiento angular de 30°

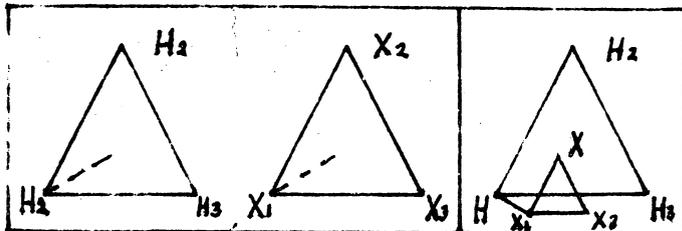
Para medir el ángulo correspondiente de desplazamiento angular supongamos que se marcan las conexiones de alta y baja tensión del -

transformador de tal manera que el orden del lado de alta H_1, H_2 y H_3 corresponda a X_1, X_2 y X_3 del lado de baja tensión. Entonces el desplazamiento angular entre los embobinados de alta y baja tensión será el ángulo formado por las líneas que pasan por el punto neutro a través del H_1 y X_1 respectivamente en el diagrama fasorial de tensiones.

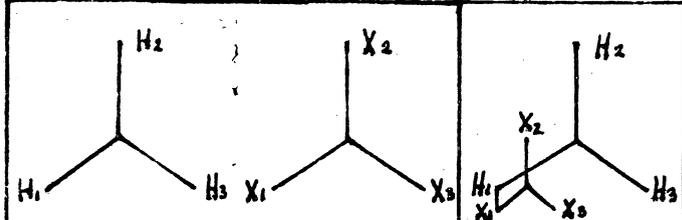
Se muestran a continuación los diagramas fasoriales de voltaje para transformadores trifásicos y para transformadores de 3 a 6 -- fases en los que se observan los diagramas para verificar las medidas de tensión así como las relaciones que deben de guardar éstas.

Desplazamiento Angular Diagrama para Verificación de mediciones

Grupo 1
Desplazam.
Angular



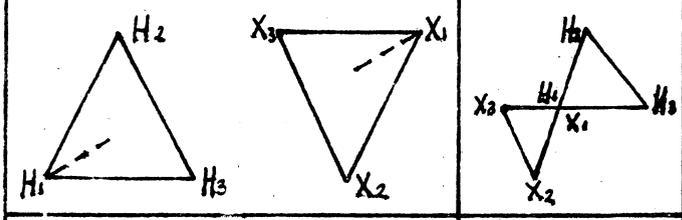
0°



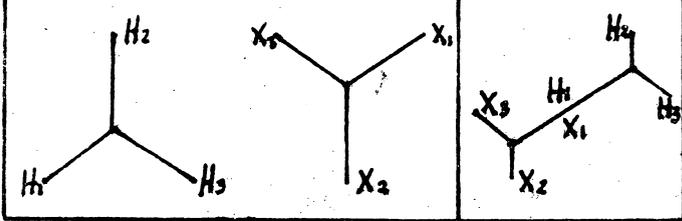
conectar H_2 a X_1 .
Medir H_2, X_2, H_3, X_3 ;
 H_1, H_2 ; H_2, X_3

Relaciones de Voltaje
(1) $H_2 X_2 = H_3 X_3$
(2) $H_2 X_2 < H_1 H_3$
(3) $H_2 X_2 < H_2 X_3$

Grupo 2
Desplazam.
Angular



0°



conectar H_2 a X_1 .
Medir H_2, X_2, H_3, X_3
 H_1, H_2, H_2, X_3

Relaciones de Voltaje
(1) $H_2 X_2 = H_3 X_3$
(2) $H_2 X_2 > H_1 H_2$
(3) $H_2 X_3 < H_2 X_2$

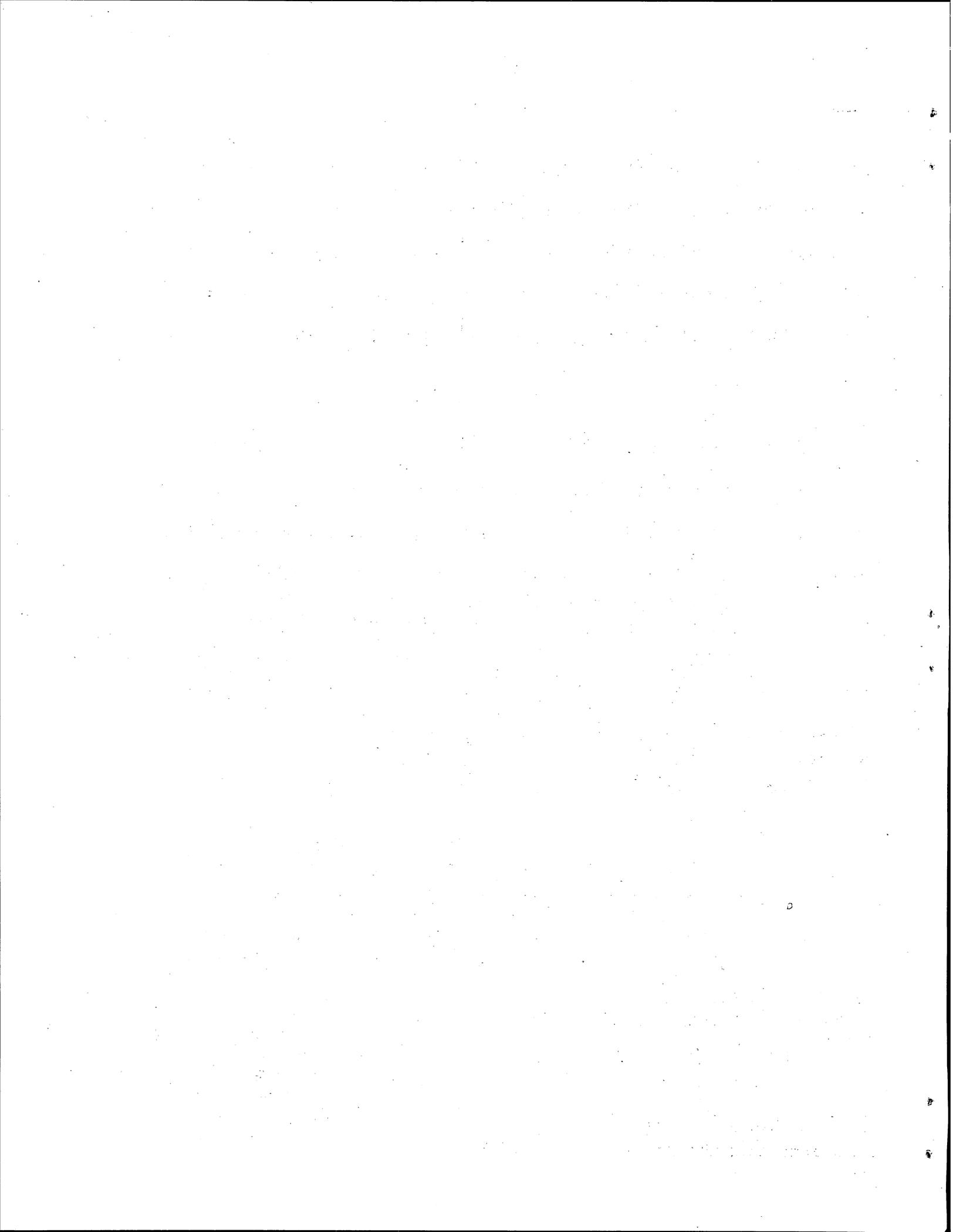
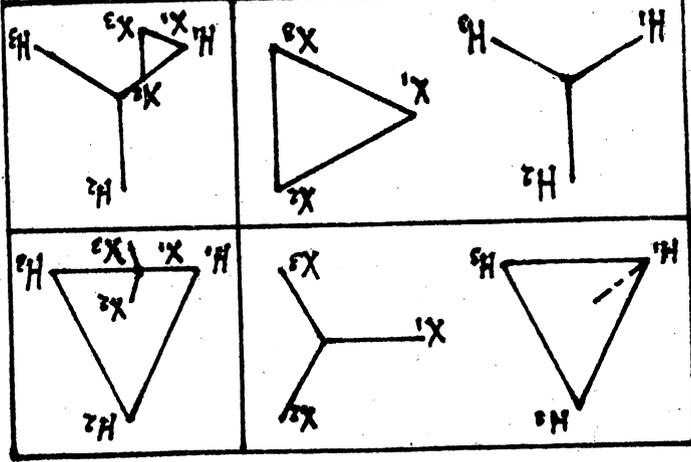


Diagrama para Verificación de mediciones Angularmente Desplazamiento

Conectar H_1 a X_1
 Medir $H_2 X_2$ $H_3 X_3$
 $H_1 H_2 X_2 H_3 X_3$

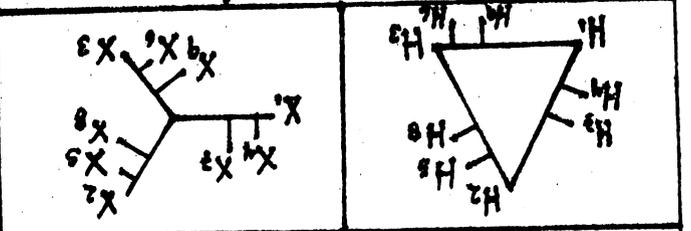
Relaciones de Voltaje

- (1) $H_1 X_2 = H_2 X_3$
- (2) $H_1 X_2 < H_1 H_3$
- (3) $H_1 X_2 < H_2 X_3$



Grupo 3
 Desplazamiento Angular 30°

Transformador que Marca y Voltaje Diagrama Vectorial para Transformador Trifásico

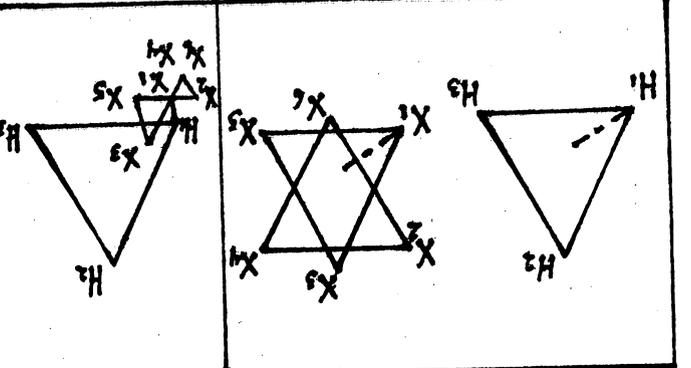


Grupo 2
 Desplazamiento Angular 30°

Conectar H_1 a $X_1 = X_2$
 Medir $H_2 X_2$ $H_3 X_3$
 $H_1 X_2 H_2 X_3 H_3 X_3$

Relaciones de Voltaje

- (1) $H_1 X_2 = H_2 X_3$
- (2) $H_1 X_2 < H_1 H_3$
- (3) $H_1 X_2 < H_2 X_3$
- (4) $H_1 X_2 = H_2 X_3$
- (5) $H_1 X_2 > H_1 H_3$
- (6) H_2

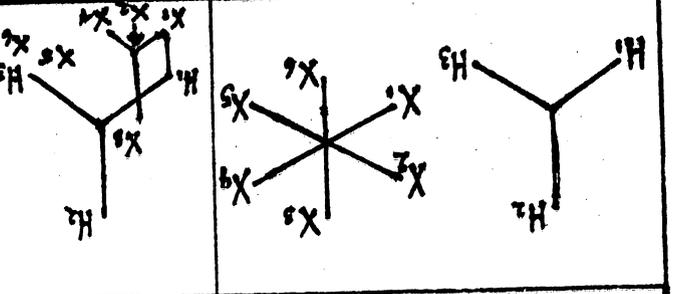


Grupo 4
 Desplazamiento Angular 0°

Conectar X_2 a $X_4 = X_5$
 Medir $H_2 X_5$ $H_3 X_5$
 $H_1 X_1 H_2 X_5 H_3 X_5$

Relaciones de Voltaje

- (1) $H_2 X_5 = H_3 X_5$
- (2) $H_2 X_5 < H_1 H_3$
- (3) $H_2 X_5 < H_3 X_5$

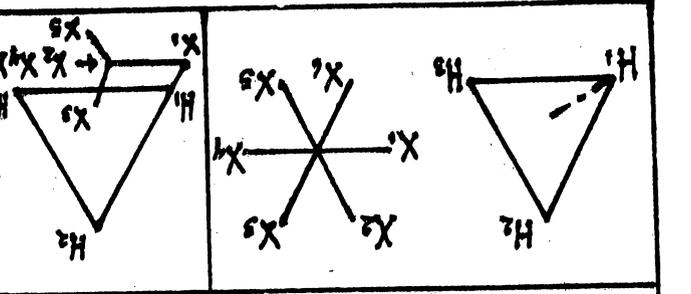


Grupo 5
 Desplazamiento Angular 0°

Conectar X_2 a $X_4 = X_5$
 Medir $H_2 X_5$ $H_3 X_5$
 $H_1 X_1 H_2 X_5 H_3 X_5$

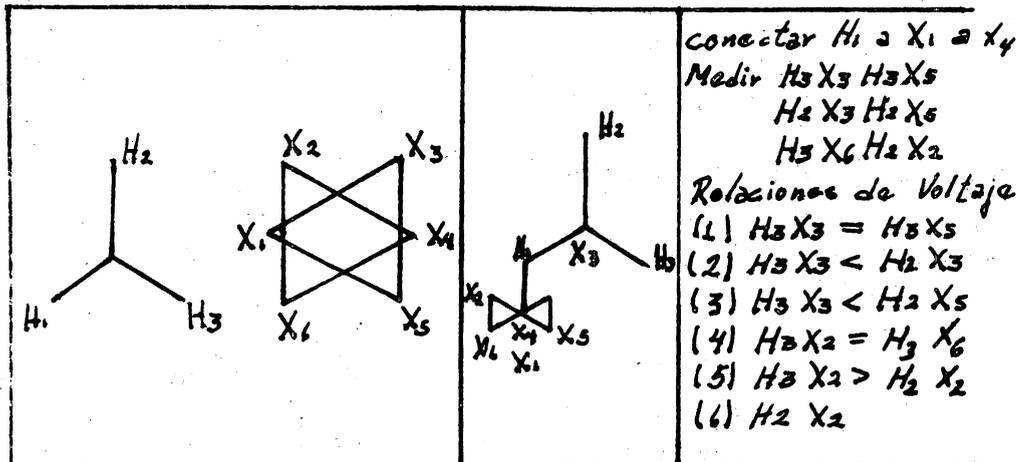
Relaciones de Voltaje

- (1) $H_2 X_5 = H_3 X_5$
- (2) $H_2 X_5 < H_1 H_3$
- (3) $H_2 X_5 < H_3 X_5$

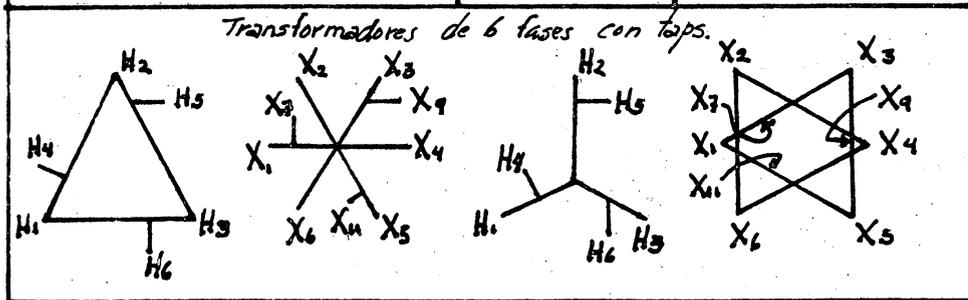


Desplazamiento Angular Diagrama para Verificación
 checar la medición de mediciones

Grupo 5
 Desplazam.
 Angular
 0°



Grupo 5
 Desplazam.
 Angular
 30°



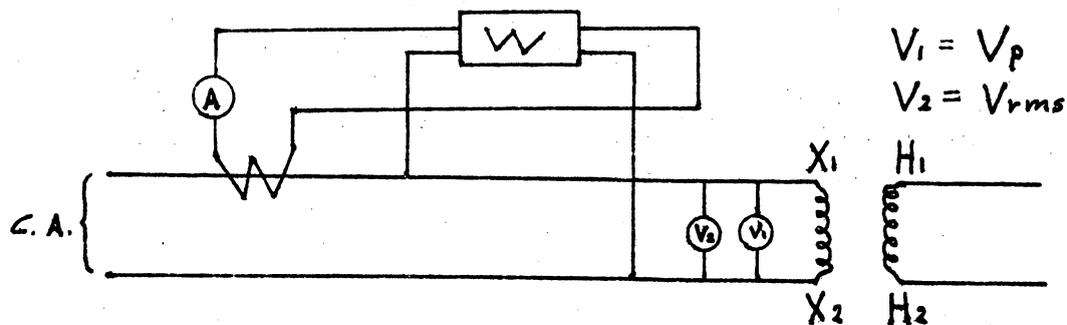
PERDIDAS MAGNETICAS Y CORRIENTE DE EXCITACION

Esta prueba se realizará tanto en transformadores monofásicos como en trifásicos. Analizaremos en primer lugar los de una fase y este análisis lo aplicaremos a los trifásicos.

En esta prueba se alimentará por el lado de baja tensión, permaneciendo el transformador en vacío, al estar en estas condiciones la corriente que circula es la de excitación.

Para su realización deberá seguirse la siguiente secuela:

- a) Se ajustará la tensión aplicada al transformador hasta igualarla a la nominal de placa.
- b) La frecuencia utilizada deberá ser la de placa.
- c) Se empleará un vóltmetro promedio para medir voltaje.
- d) El diagrama utilizado es el siguiente:



- e) Para ajustar el voltaje nominal se hará uso de regulador.

Como las pérdidas magnéticas son originadas principalmente por el efecto de histéresis que está en función de la densidad del flujo - - máximo, la cual depende del promedio del voltaje, si este promedio se ajusta para que sea igual al de una onda senoidal del voltaje deseado y se mantiene en su propio valor la medición será correcta.

El voltmetro promedio es un aparato del tipo D'Arsonval, con un rectificador de onda completa y calibrado para medir en valores equivalentes, valores de un voltmetro efectivo para la onda senoidal.

De las lecturas que se obtengan se sacará la siguiente conclusión:

$$A = I_{exc.} \text{ (corriente de excitación)}$$

$$W = P_{mag.} \text{ (pérdidas magnéticas)}$$

Esto es para un transformador monofásico.

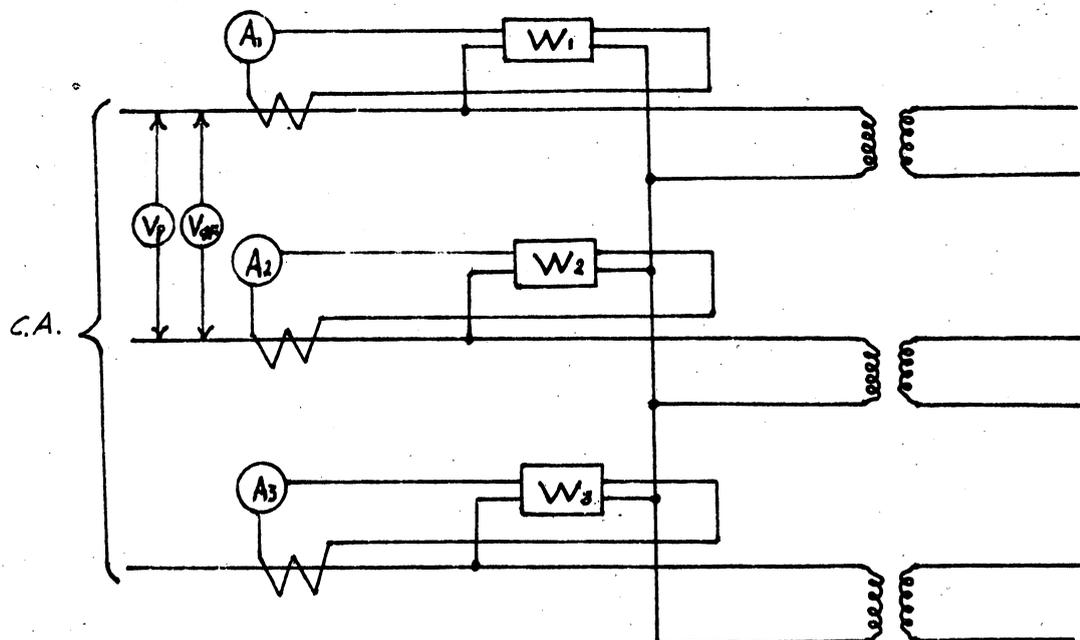
Ahora para un transformador trifásico, todo será en forma análoga, con la única diferencia que las pérdidas magnéticas será la suma de las lecturas de los tres "W" o sea:

$$P_{mag.} = W_1 + W_2 + W_3$$

La corriente será el promedio de las tres o sea:

$$I_L = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{3}$$

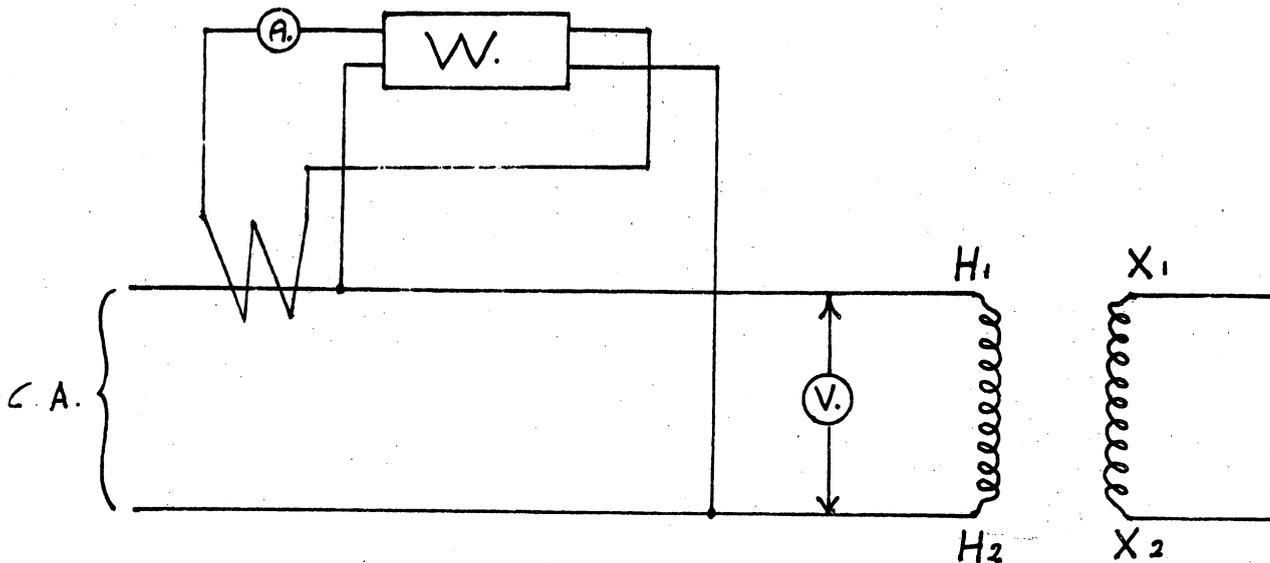
El diagrama sería como sigue:



Se observará que las pérdidas por fase no son iguales debido a la construcción del núcleo del transformador en forma de columnas - donde el flujo, estando éste en vacío, no se distribuye uniforme. En el caso de que se prueben tres transformadores monofásicos conectados entre sí, las pérdidas por fase sí serán iguales, porque en este caso los núcleos son independientes.

PERDIDAS ELECTRICAS Y VALOR DE LA IMPEDANCIA

Para la determinación de las pérdidas en el cobre de un transformador monofásico, se hará uso de un ampermetro, un voltmetro y un wáttmetro, los que se instalarán según se indica en la siguiente figura:



El secundario $X_1 - X_2$ se pone en corto circuito aplicando al primario un voltaje que haga circular la corriente nominal en el transformador.

De las lecturas obtenidas, el Wáttmetro nos dará directamente las pérdidas eléctricas y el valor de la impedancia en porcentaje estará definido por la relación:

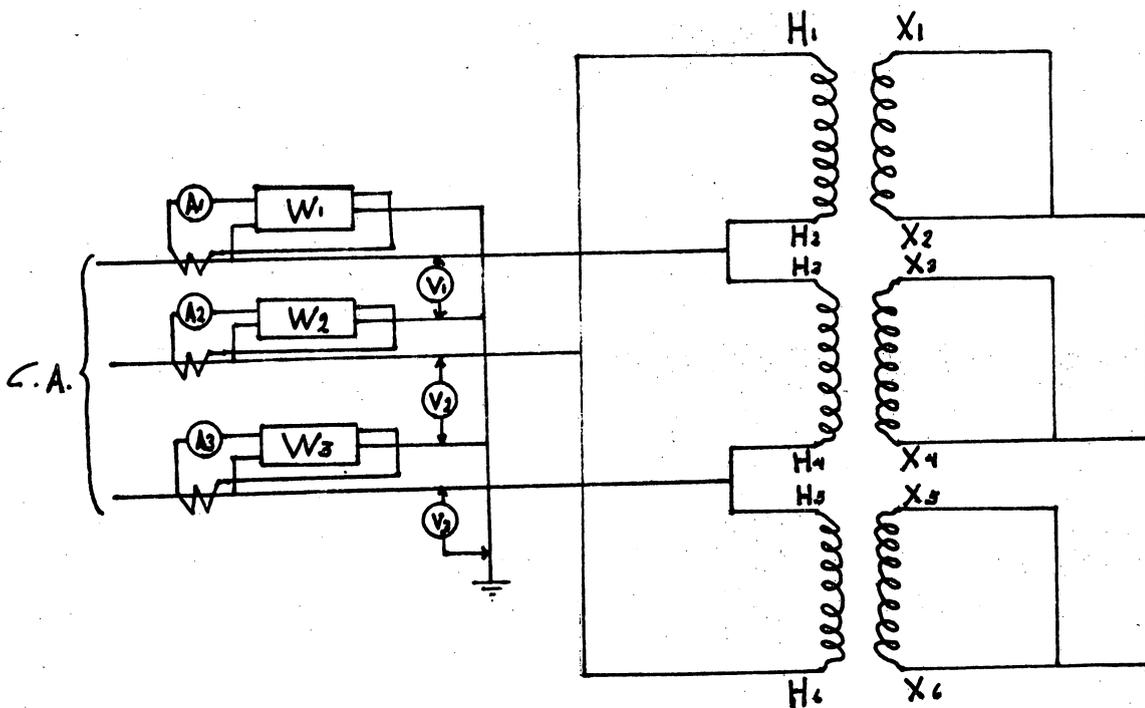
$$\% Z = \frac{\text{Voltaje Leído}}{\text{Voltaje Nominal}} \times 100$$

Para los transformadores trifásicos, se hará de una manera similar, siendo las pérdidas eléctricas la suma de las lecturas de los tres Wáttmetros, y el porcentaje de Impedancia será el promedio de los voltajes leídos entre fase y neutro sobre el voltaje nominal entre fase y neutro multiplicado por 100, o sea:

$$\text{Pérd. Eléct.} = W_1 + W_2 + W_3$$

$$\% Z = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3 V_{\text{nominal}}} \times 100$$

Su diagrama es como sigue:



E F I C I E N C I A

La eficiencia de un transformador está definida como la relación que existe entre la potencia de salida y la potencia de entrada. Esta última se determina a partir de las pérdidas eléctricas y de las magnéticas que se encontraron con anterioridad, por lo cual, la ecuación para determinar la eficiencia es como sigue:

$$\begin{aligned} \text{Eficiencia} &= \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de entrada}} \\ &= \frac{\text{Potencia de entrada} - \text{pérdidas}}{\text{Potencia de entrada}} \\ &= 1 - \frac{\text{Pérdidas}}{\text{Potencia de entrada}} \\ &= 1 - \frac{\text{Pérdidas}}{\text{Potencia de salida} + \text{pérdidas}} \end{aligned}$$

Sustituyendo en esta última ecuación tanto los valores de las per didas encontradas con anterioridad como los valores de placa del trans formador, encontramos la eficiencia buscada.

TEMPERATURA Y METODOS DE DAR CARGA

a) Curva de temperatura.

El objeto de obtener la curva de temperatura, es para verificar si la máquina en prueba está operando a su capacidad de diseño en -- virtud de que para su determinación el transformador deberá estar tra-- bajando a sus características normales. Entonces al funcionar el trans-- formador en estas condiciones la temperatura tenderá a elevarse, si - esta elevación está dentro de los límites normales, la máquina en prue-- ba estará en buenas condiciones, pero por el contrario, si sobrepasa-- estos límites la máquina estará trabajando defectuosamente dándonos la pauta para una revisión minuciosa de la misma.

Como se indicó en el párrafo anterior para efectuar la prueba de temperatura es requisito indispensable trabajar el transformador a sus condiciones normales de operación, o sea ajustado a su voltaje y corriente especificados en su placa como los normales.

El procedimiento a seguir para obtener la curva temperatura es el siguiente:

1. - Se medirán las resistencias de los embobinados tanto al princi-- pio como al final de la prueba, determinando también la temperatura - - ambiente, que por lo general es la temperatura inicial de los embobina-- dos. Con este dato se podrá calcular la temperatura final de los embo-- binados, así como su elevación de temperatura.

2.- Se colocarán termómetros y termópares en diferentes sitios característicos del transformador, tomándose lecturas de las temperaturas aproximadamente cada hora cuando la máquina se encuentra en operación.

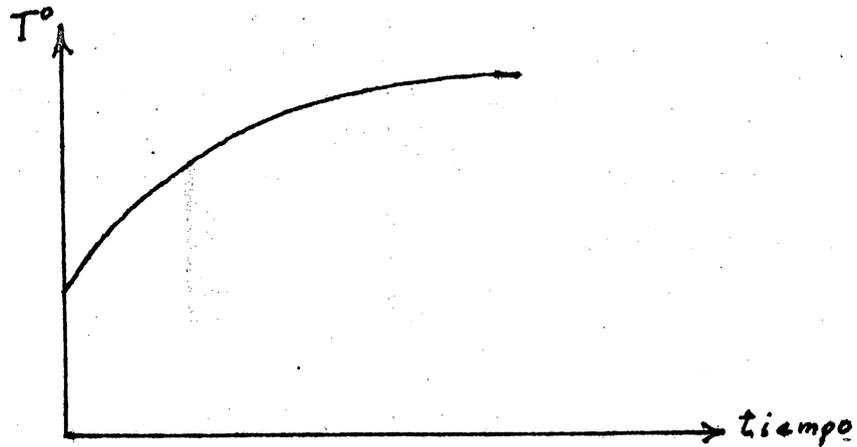
3.- Se alimentará el transformador, ajustando los valores de corriente y voltaje normales marcados en su placa.

4.- Una vez en operación el transformador, como se indicó en el inciso 2, se tomarán lecturas de temperatura contra tiempo.

5.- La prueba finalizará cuando la temperatura de los diferentes elementos se halla estabilizado en un punto determinado.

6.- Ahora como se había indicado anteriormente, si la elevación de temperatura al terminar la prueba es mayor que la normal marcada en su placa, esto nos indicará que la máquina está sobrecargada o tiene algún defecto que no le permite desarrollar su potencia nominal.

Si se toman los datos registrados de temperatura contra tiempo y se llevan ejes coordenados se podrá trazar la curva de temperatura para cada elemento en los que se acoplaron los termómetros o termópares. Dicha gráfica podrá quedar como sigue:



Para calcular la resistencia final se utilizará la siguiente ecuación:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{234.5+T_1}{234.5+T_2}$$

b) Métodos de dar carga.

Como se indicó en el punto 3 el transformador tendrá que trabajar a carga completa, para lo cual, existen diferentes métodos para proporcionarla.

Los transformadores de pequeña capacidad podrán cargarse con un reóstato, un banco de lámparas o una caja de agua.

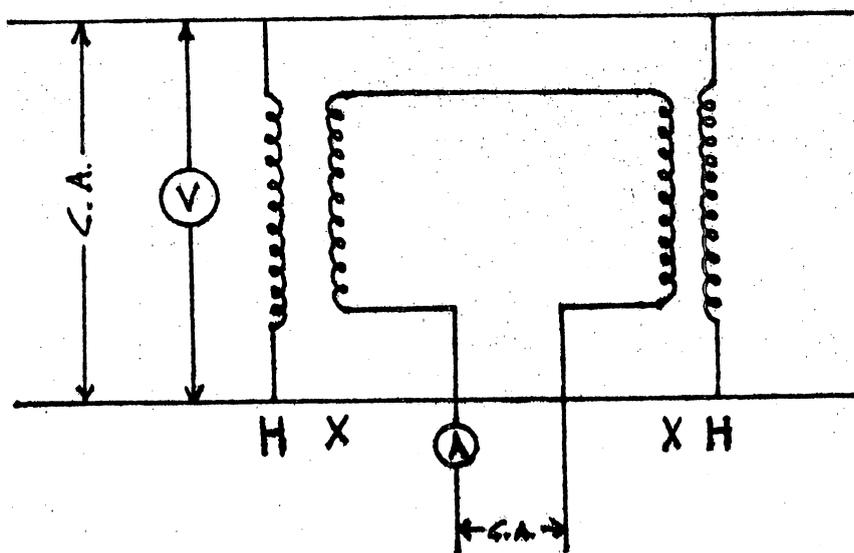
Este método es demasiado caro para transformadores de gran capacidad.

Los transformadores monofásicos podrán probarse en bancos de 2 -- transformadores, conectando en paralelo tanto los embobinados de alta como los de baja tensión y aplicando voltaje nominal a un grupo de los embobinados en paralelo. Con el objeto de hacer circular la corriente de --

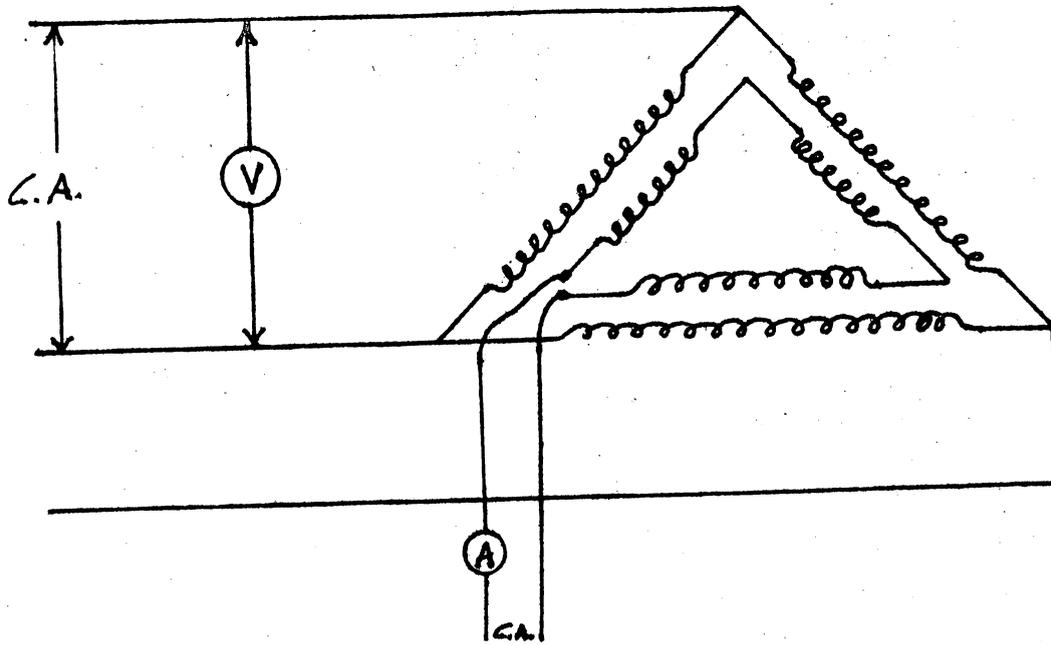
carga, las conexiones del otro par de embobinados, deberán estar abiertas en un punto y aplicar a través de dicha apertura, una tensión, cuyo valor sea suficiente para hacer circular la corriente nominal en los embobinados.

La corriente circulante deberá ser preferiblemente a frecuencia nominal.

El diagrama de conexiones es como sigue:



Un transformador trifásico podrá cargarse a si mismo, conectando tanto el embobinado de alta como el de baja en delta, según se indica en la figura:



Se aplicará un voltaje trifásico nominal para proporcionar la -- excitación a una de las deltas y con objeto de circular la corriente de carga en el transformador, se abrirá una de las esquinas de la otra delta y se aplicará, a través de la misma, un voltaje monofásico de un valor tal que haga circular la corriente nominal en los embobinados.

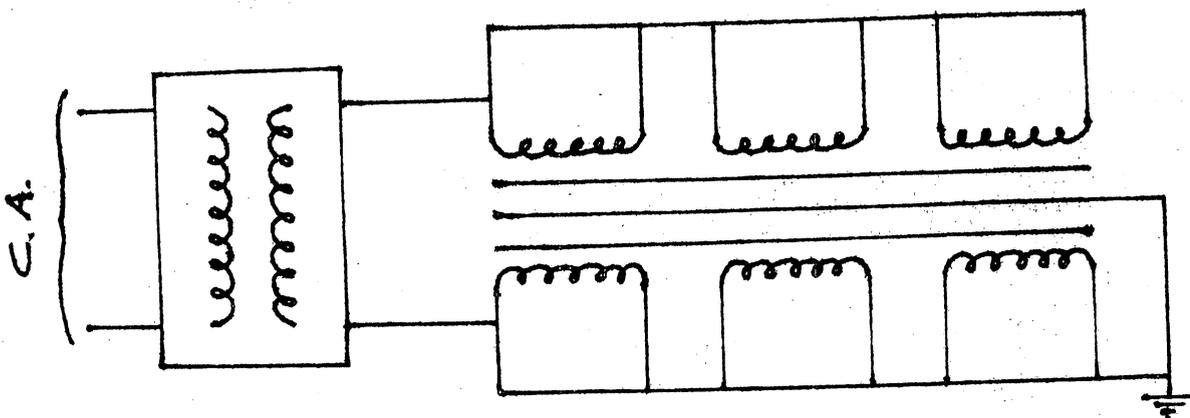
Como en el caso anterior deberá ser preferiblemente a la fre-- cuencia nominal.

PRUEBAS DIELECTRICAS

Dentro de este capítulo analizaremos los siguientes temas relacionados con las pruebas dieléctricas.

- a) Tensión aplicada
 - b) Tensión inducida
 - c) Rigidez dieléctrica del aceite.
- a) Prueba de tensión aplicada.

Los extremos terminales y los taps de conexiones del embobinado en prueba deberán conectarse entre sí, así como también con la terminal de línea del transformador probador. Todas las demás terminales y partes del transformador, incluyendo el núcleo y el tanque, deberán conectarse a tierra y a la otra terminal del transformador probador, tal como se indica en la siguiente figura:



Se podrá usar una pequeña barra de alambre para hacer la conexión entre los taps respectivos y la línea terminal, pero se deberá de tener mucho cuidado en mantener el alambre del lado de alta tensión,

bastante alejado de tierra.

El conductor de alto voltaje del transformador probador, deberá tener cuando menos un diámetro de 1/8 pulgada.

Las conexiones a tierra entre el aparato probado y el transformador probador deberán ser sustancialmente un circuito metálico.

Finalmente, todas las conexiones deberán estar mecánicamente bien unidas, sin dejar ninguna esquina puntiaguda.

No se deberá colocar una apreciable resistencia entre el transformador probador y el sujeto a prueba, sin embargo es permitido el uso de bobinas reactivas en o cerca de las terminales del transformador probador.

La duración de esta prueba deberá ser de un minuto y la tensión aplicada conforme a los valores indicados en la siguiente tabla:

VOLTAJE NOMINAL (KV)	VOLTAJE APLICADO (KV)
1.2	10
2.5	15
5.0	19
8.7	26
15.0	34
25.0	50
34.5	70
46.0	95
69.0	140
92.0	185
115.0	230
138.0	275
161.0	325
230.0	460
287.5	575
345.0	690
500.0	750

b) Tensión inducida.

La prueba de voltaje inducido se aplica al transformador para probar el aislamiento entre vueltas, capas y secciones de sus embobinados y para determinar si cualquier prueba anterior entre los embobinados y tierra los ha dañado.

Como esta prueba sobreexcita al transformador, la frecuencia del voltaje aplicado debe ser suficientemente grande con objeto de prevenir que la corriente de excitación del transformador en prueba, se eleve arriba del 30% de su corriente nominal.

Ordinariamente se utiliza el doble de la frecuencia nominal o más, o sea que para unidades de 60 ciclos por segundo, se usa una frecuencia de 120 c.p.s. en el caso de usarse una frecuencia mayor, la severidad de la prueba se incrementa anormalmente, de tal manera que la duración de esta deberá reducirse según la siguiente tabla.

Frecuencia en c. p. s.	Duración en seg.
120	60
180	40
240	30
360	20
400	18

El proceso a seguir será de la forma siguiente:

Se conectará el transformador como si fuese a trabajar en vacío, entonces se iniciará la prueba partiendo de 1/4 o menor del vol-

taje por aplicar (que por lo general es el doble del nominal), incrementando éste, continuamente, al valor deseado en no menos de 15 -- segundos. En este voltaje se dejará el tiempo especificado para que -- una vez terminado éste, se reduzca la tensión lentamente (en no más de 5 segundos) a 1/4 de valor tomado, para abrir posteriormente el circuito.

c) Rigidez dieléctrica del aceite.

Para transformadores sumergidos en aceite, éste sirve como -- medio refrigerante y como dieléctrico entre todas las piezas sumergidas en él.

La rigidez dieléctrica disminuye a medida que aumenta su índice de contaminación.

La contaminación a la que se refiere el párrafo anterior, puede ser debido a lo siguiente:

- ° Impureza en los recipientes de transporte o de almacén.
- ° Absorción de humedad por contacto prolongado con el aire ambiente.
- ° Degradación del propio aceite debido a descargas parciales.

En el caso de que el aceite muestre una baja rigidez, será necesario someterlo a un proceso de filtrado con objeto de eliminar la humedad e impurezas que se encuentran en su seno.

La prueba que nos indicará en nivel de rigidez dieléctrica consistirá en la colocación de dos electrodos planos o semiesféricos dentro de una muestra de aceite a los que se aplica una diferencia potencial cuyo valor se aumenta gradualmente hasta obtener la ruptura.

De acuerdo con las normas de prueba de rigidez dieléctrica del aceite de los transformadores, la tensión de ruptura no debe ser menor de los valores que se indican a continuación, según la copa de muestra que se utilice.

° Copa americana:

Electrodos planos de sección circular de 25.4 mm de diámetro, separados 2.54 mm: 30KV.

° Copa VDE:

Electrodos de casquete esférico con un diámetro de la esfera de 50.8 mm., un diámetro del casquete de 36.0 mm., separados 1.02 mm.: 20 KV.

Para efectuar la prueba se llena la copa lentamente hasta un nivel de 2 cms. arriba del borde superior de los electrodos, colocando ésta en transformador de prueba. Por lo que respecta a la temperatura ambiente, no debe ser menor de 20 grados centígrados.

Después de 2 o 3 minutos de haber llenado la copa, se comienza a aplicar la tensión incrementándola a razón de 3 KV/ segundo hasta

que ocurra la ruptura. La ruptura hará operar el interruptor de seguridad del transformador de prueba, abriendo la alimentación del mismo.

Una vez determinada la tensión de ruptura, se vacía la copa y se llena nuevamente con otra porción de muestra, determinando nuevamente la ruptura.

En el caso de que el valor de la tensión de ruptura de las dos pruebas esté arriba del valor de aceptación, el aceite se considerará bueno y no se requerirá más pruebas.

Si cualquiera de los valores resultara por debajo de la aceptación, entonces se requerirán otras tres pruebas de la muestra.

Con los valores de las cinco pruebas se obtendrá la diferencia entre el mayor y el menor y se multiplicará por tres, si el valor obtenido es mayor que el inmediato superior al valor mínimo, la estadística es insuficiente y habrá que efectuar otras cinco pruebas.

El promedio de los 10 resultados será la tensión de ruptura de la muestra. Si no es así bastará con el promedio de las primeras cinco pruebas.

PRUEBA DE IMPULSO

La prueba de impulso consiste en la aplicación instantánea de varias tensiones que deberán seguir un determinado orden; la primera deberá tener un valor de cresta del 50 al 70 % del valor de la onda completa, las dos siguientes aplicaciones serán de onda cortada, y se terminará con una aplicación de onda completa.

Pueden usarse tanto ondas positivas como negativas, las ondas de polaridad negativa se preferirán para los transformadores sumergidos en aceite en cambio, las de polaridad positiva se usarán para transformadores tipo seco, o llenados con compound.

La prueba de impulso se aplica a una terminal en un determinado tiempo, independiente al tiempo empleado en su aplicación a las otras terminales. Esta se aplica a cada terminal de línea y en el caso de tener el neutro accesible, también se descargará a través de él.

Las terminales de los embobinados que no se estén probando deben ser derivadas a tierra o protegidas por medio de un apartarrayos. También se pueden conectar a tierra a través de una resistencia de línea, de una magnitud apropiada para limitar el voltaje dentro de los límites prescritos. Esta condición es aplicada al neutro de cualquier transformador diseñado para operación con neutro aislado y a todas las terminales de línea de un autotransformador. Cabe indicar también, que todos los transformadores diseñados para operación con neutro a tierra, son probados con el neutro solidamente conectado a tierra.

Los diagramas que se utilizan para cuando se tienen conexiones delta o estrella son los siguientes:

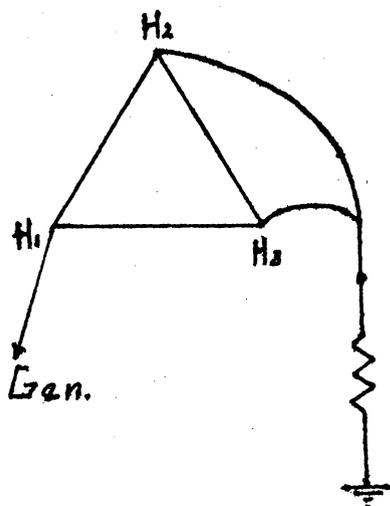


Fig 1

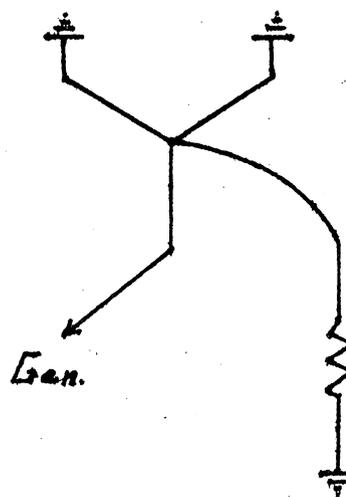


Fig 2

La figura 1 nos representa la conexión que se utiliza para probar los bornes de alta tensión, teniendo por supuesto los de baja tensión - conectados firmemente a tierra (el lado de baja tensión no está indicado). La figura 2 nos representa la conexión utilizada para probar los - diferentes bornes de baja tensión (como en el caso de la figura 1 no están representados los bornes de alta tensión, pero se sobreentiende que deben ir conectados a tierra).

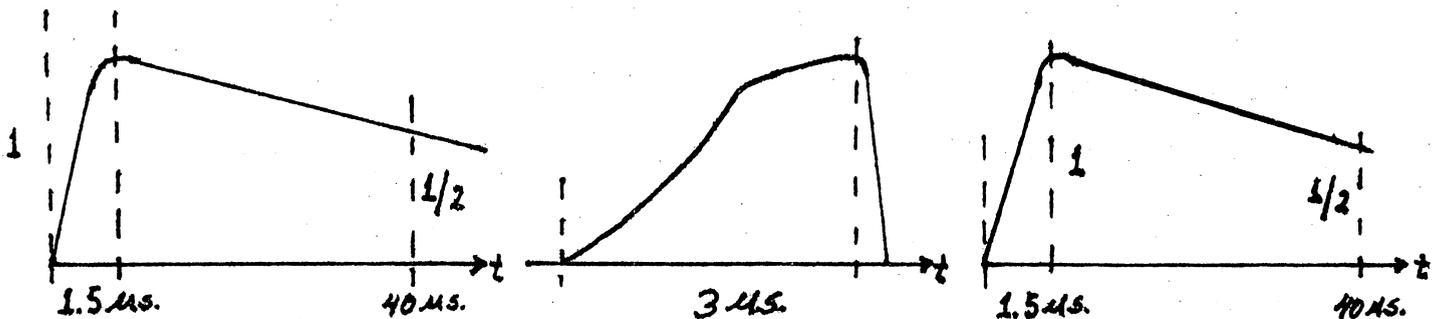
Una vez hechas las conexiones indicadas con anterioridad se procede a la prueba en sí. Se alimentará al generador con determinado voltaje de carga el cual está en relación con el voltaje de descarga sobre el transformador. (Esta carga dura entre los 15 y 20 segundos en los generador-

res pequeños y en los grandes se prolonga hasta 45 ó 60 segundos). -
Una vez pasado este tiempo de carga, se accionará la descarga sobre el transformador.

Se registrarán para su estudio las diferentes formas de onda en un oscilografo (por lo general se fotografian). Como se indicó en un principio estas serán:

- a) Onda reducida
- b) Onda cortada
- c) Onda completa

Las formas de onda son como se indican:



Onda reducida

Onda cortada

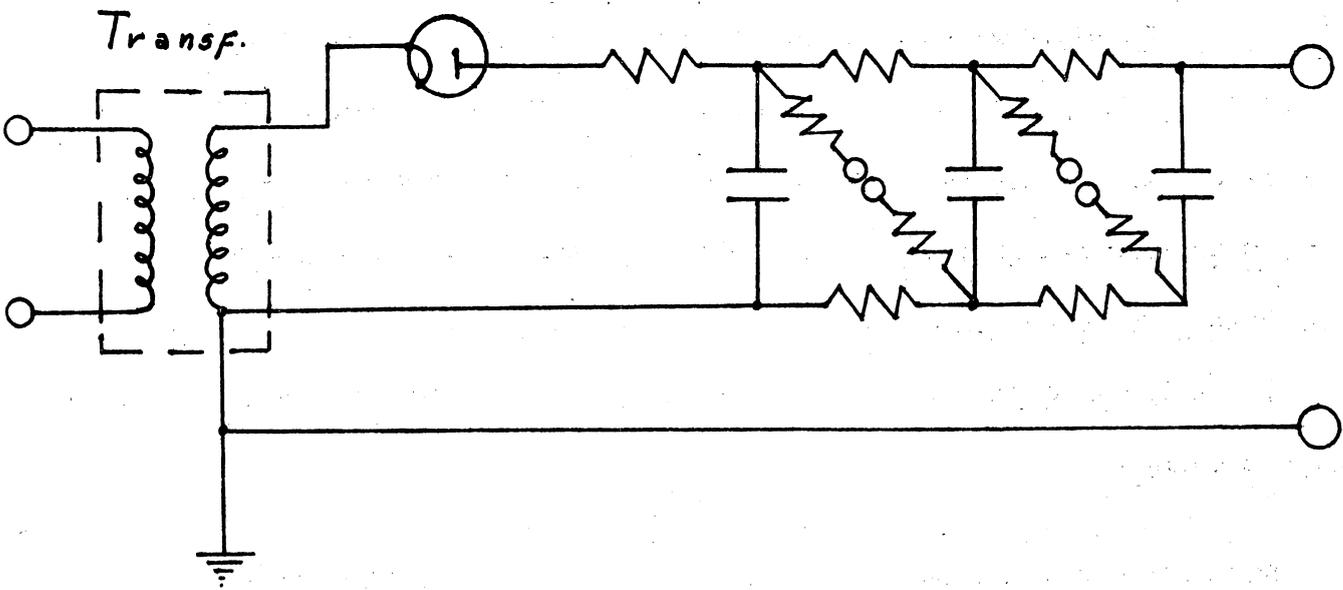
Onda completa

En el eje de las abcisas se representa el tiempo en microsegundos y en el eje de las ordenadas la altura de onda en pulgadas o cm. Tanto el tiempo como la altura están en función del oscilografo utilizado dependiendo de la abertura de onda en el eje vertical y de los -

voltaje y de tiempo.

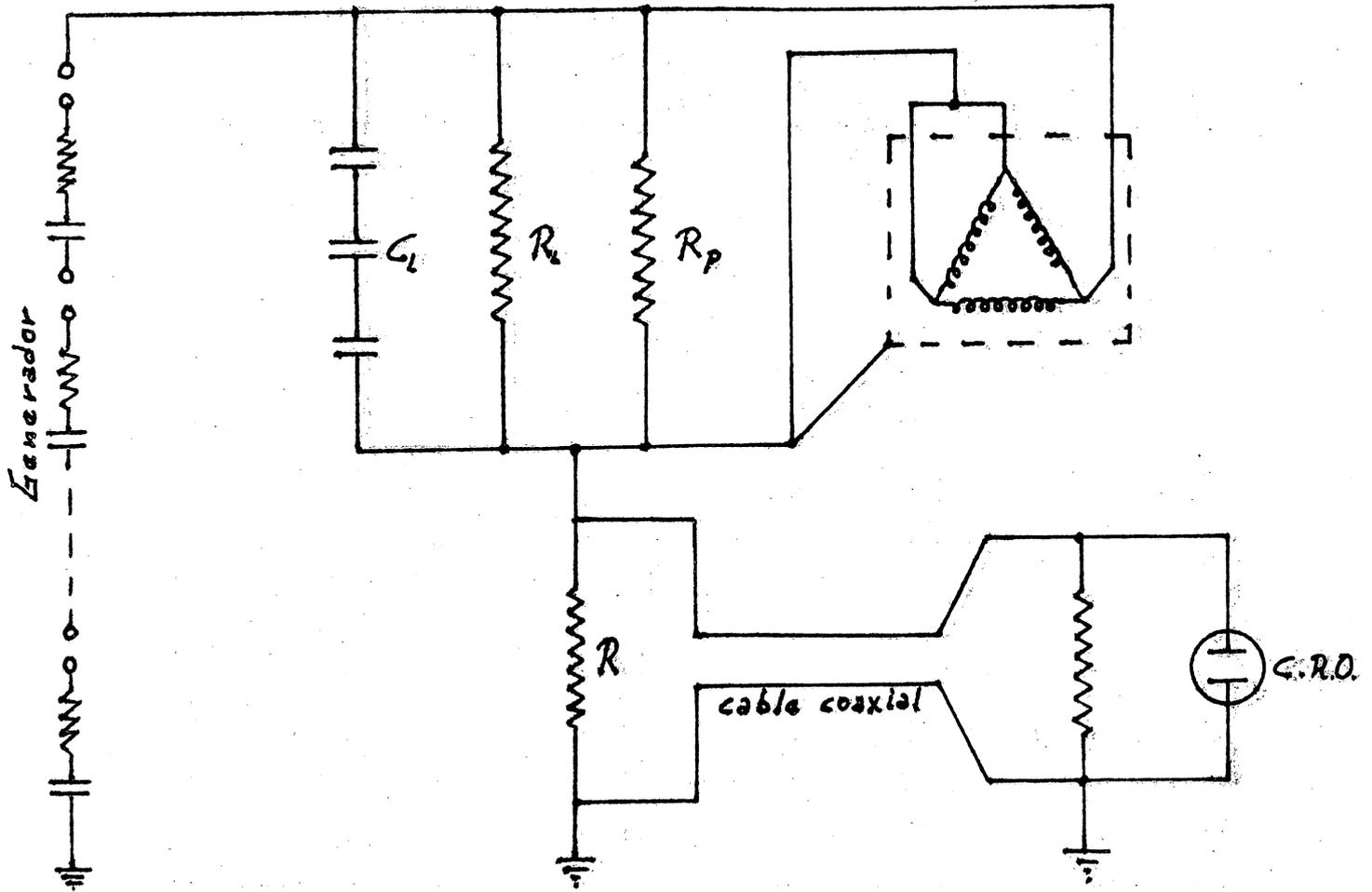
A continuación se representa un circuito ilustrativo del generador de impulso:

Rectificador



Se observa el paralelismo de los capacitores en el periodo de carga y cuando están en serie en el tiempo de descarga.

Un diagrama más completo de la descarga es:



- C.R.O.- Oscilógrafo de rayos catódicos.
- C_L .- Capacitor Bajo.
- R_L .- Resistencia baja .
- R_P .- Resistencia de potencial.
- R .- Resistencia de medición.

Finalmente los valores de la tensión de descarga para los diferentes voltajes nominales son los que se indican en la siguiente tabla:

Prueba de impulso
onda cortada.

Voltaje nominal KV.	Nivel básico de impulso. KV.	KV.	Tiempo mínimo de descarga. mc.
1.2	45	54	1.5
2.5	60	69	1.5
5.0	75	88	1.6
8.7	95	110	1.8
15	110	130	2.0
25	150	175	3.0
34.5	200	230	3.0
46	250	290	3.0
69	350	400	3.0
92	450	520	3.0
115	550	630	3.0
138	650	750	3.0
161	750	865	3.0
230	1050	1210	3.0
287.5	1300	1500	3.0
345	1550	1780	3.0
500	1675	1930	3.0

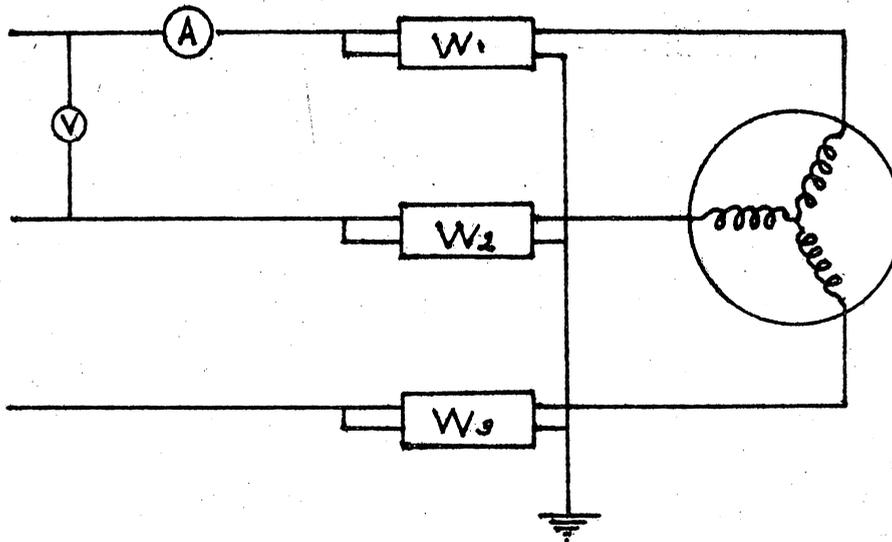
MOTORES DE INDUCCION

CURVAS DE SATURACION EN VACIO Y CON EL ROTOR BLOQUEADO

a) Curva de saturación en vacío.

Esta prueba nos indica el estado de saturación del circuito magnético y además nos ayudará a determinar de una manera más o menos exacta las pérdidas que por fricción y ventilación posee el motor, así como las pérdidas en el núcleo y en el cobre (estas últimas sin carga).

Para obtener los valores necesarios para esta curva, la conexión que deberá hacerse será como sigue:

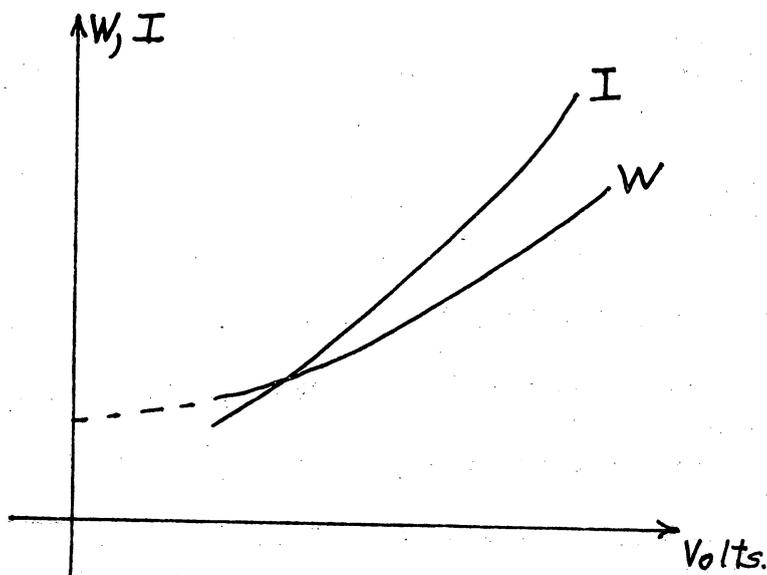


La prueba en cuestión consiste en correr el motor sin carga, aplicando en primer lugar pequeñas tensiones hasta conseguir que arranque, este valor particular de la tensión se denomina "tensión mínima de arranque", a continuación se hace variar acrecentando la tensión aplicando valores escalonados y espaciados lo más uniformemente posible, haciendo las lecturas correspondientes de diferencia de potencial aplicada entre fa-

ses, amperes de línea y potencia consumida, según se indica en la siguiente tabla:

V	I_L	Potencia Consumida		
		W_1	W_2	W_3

Con los datos obtenidos, se referirán a ejes coordenados, colocando en el eje de las abcisas al voltaje entre fases, y como ordenadas quedarán las intensidades de corriente y potencia consumida, pudiendo trazar en estas condiciones las curvas buscadas, que quedarán aproximadamente como sigue:



De la curva de potencia contra voltaje aplicado se podrán obtener las pérdidas que por ventilación y fricción posee el motor, prolongando la parte baja de la curva hasta el punto donde esta línea corta al eje de las ordenadas, correspondiendo este valor a las pérdidas mencionadas.

Como todas las pruebas en las máquinas eléctricas, debe efectuarse ésta cuando la temperatura del motor sea la de trabajo nominal y la lectura de los wáttmetros ya esta estabilizada.

Las pérdidas eléctricas son calculables y conociendo las totales, - pueden determinarse las magnéticas restando de las pérdidas totales mencionadas las mecánicas y las eléctricas.

b) Curva de saturación con rotor bloqueado.

El objeto de esta prueba es el de determinar la intensidad de corriente, el par y el factor de potencia, en el arranque. Para su realización se usará el mismo diagrama anterior, bloqueando el rotor de la máquina con una palanca cuyo extremo libre se descanzará sobre una báscula.

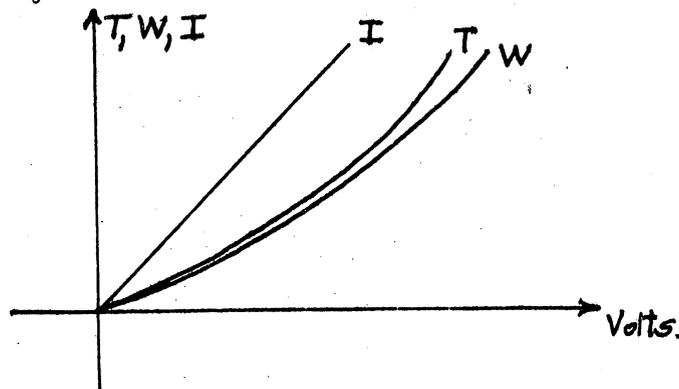
Se comprende que estando el rotor frenado, los devanados se calentarán intensamente en esta prueba, por ello no es recomendable hacerla a tensión normal, a menos que se trate de máquinas pequeñas o de baja velocidad, sin embargo, cuando esta prueba se requiere a tensión normal y los correspondientes valores no pueden ser obtenidos directamente; pueden calcularse por extrapolación, aceptando que la intensidad de corriente varia directamente con el voltaje, el par con el cuadrado de la tensión aplicada y la potencia de entrada es a un factor potencia constante.

Para la realización de esta prueba se tomará la siguiente tabla:

V	I _L	Potencia consumida			F
		W ₁	W ₂	W ₃	

La prueba se iniciará aplicando la tensión máxima, disminuyendo paulatinamente ésta hasta la mínima, evitando así en lo posible que la temperatura de los devanados se eleve peligrosamente durante la prueba, y si esto ocurriese, aún queda el recurso de correr al motor en vacío hasta que su propia ventilación lo deje en condiciones de continuar la prueba.

Se tomarán lecturas aproximadamente a 100, 80, 60, 40 y 20% de la tensión nominal (las altas calculadas), registrándose los valores de voltaje, corriente, Watts y fuerza en la tabla anterior, midiendo también la longitud del brazo de palanca. Las curvas correspondientes quedarán como sigue, si se refiere la corriente, watts y par a las ordenadas y voltaje en las abscisas.



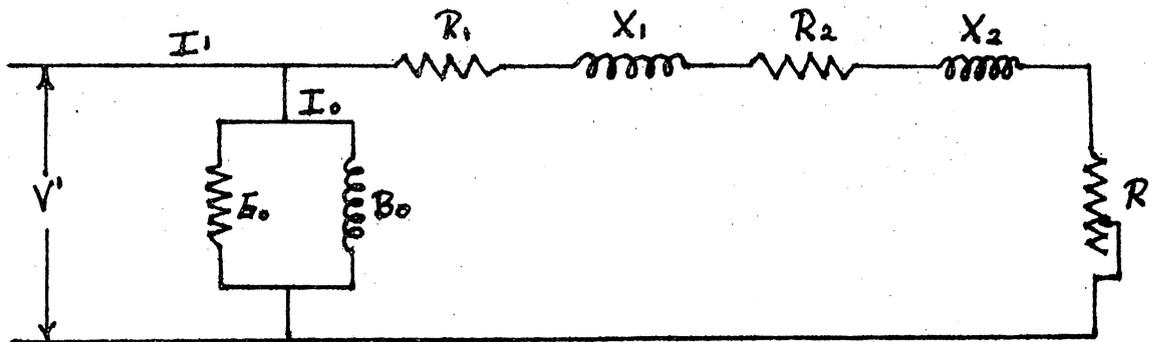
ANALISIS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE.

Las características de operación de un motor de inducción es posible encontrarlas ya sea calculando su circuito equivalente o por medio del diagrama circular de Heyland. El primer método es de una precisión mayor, pero requiere una serie de cálculos que lo hacen mucho más complicado que el segundo, más sencillo, pero no tan preciso.

I. - Método gráfico (Diagrama de Heyland).

El diagrama circular de Heyland se basa en el circuito equivalente, en el cual la corriente de excitación no pasa por el estator y las impedancias primaria y secundaria quedan en serie y pueden ser sustituidas por una sola, formada por una reactancia constante y una resistencia variable.

El circuito equivalente aproximado del motor de inducción es de la siguiente manera. (fase a neutro).



donde.

V'	.-	Voltaje de fase a neutro
R_1 y X_1	.-	Resistencia y reactancia del estator
R_2	.-	Resistencia del rotor
X_2	.-	Reactancia del rotor parado
G_0	.-	Conductancia sin carga.
B_0	.-	Susceptancia sin carga.
I_0	.-	Corriente de excitación.
I_1	.-	Corriente total del motor.
I_2	.-	Corriente secundaria.
R	.-	Representa la carga mecánica ($R_2 \frac{1-S}{S}$)

En cualquier circuito serie, es sabido que si la reactancia permanece constante y la resistencia varía, el lugar geométrico del fasor corriente es un círculo. Observando el circuito, la corriente I_0 de excitación a través del circuito paralelo es constante, en el circuito de la derecha, las reactancias X_1 y X_2 y las resistencias R_1 y R_2 son prácticamente constantes, pero R varía con la carga, por lo tanto el lugar geométrico del vector corriente I_2 es un círculo; ahora como la corriente total del motor I_1 es la suma de la corriente variable I_2 más la corriente constante I_0 entonces también el lugar geométrico del vector I_1 es un círculo.

De lo anterior podemos concluir que el diagrama circular de Heyland se basa en el siguiente postulado: El lugar geométrico de los vectores representativos de la corriente primaria de un motor de inducción, cualquiera que sea el circuito que lo constituya, es un círculo.

Este principio significa que si la carga de un motor es varia da, pero con la tensión y la frecuencia de alimentación constantes, la corriente puede ser cualquier fasor que parta del origen y termine en la circunferencia de acuerdo con las condiciones de opera ción del motor, o sea que cada uno de los puntos de la circunferencia corresponde a una operación particular del motor.

Los datos necesarios para la construcción del diagrama circular son obtenidos de las siguientes mediciones:

1.- Motor girado en vacío

Se echará a andar el motor alimentándolo en su voltaje nominal y sin aplicarle ninguna carga, midiendo en esas condiciones los valores anotados a continuación:

V.- Voltaje nominal por fase.

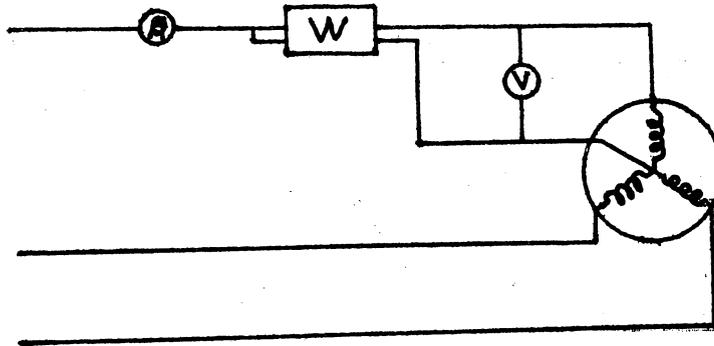
I_0 .- Intensidad de corriente por fase (corriente de excitación).

W_0 .- Potencia en Watts por fase.

con estos datos se podrá calcular el factor de potencia sin carga como sigue:

$$\cos \phi_0 = \frac{W_0}{V I_0}$$

El circuitito utilizado deberá ser de la siguiente manera:



2.- Motor con el rotor bloqueado.

Para obtener este segundo grupo de lecturas, se usará el mismo circuito anterior, bloqueando exclusivamente el rotor de la máquina. Con objeto de que la corriente se conserve dentro de límites razonables, el voltaje de alimentación por fase, se reducirá a un va por tal que la corriente de corto circuito alcance un valor aproximadamente igual que el nominal de la máquina. En estas condiciones se tomarán las siguientes lecturas:

V_r' .- Voltaje por fase en estas condiciones.

I'_r .- Intensidad de corriente por fase.

W'_r .- Potencia en watts por fase.

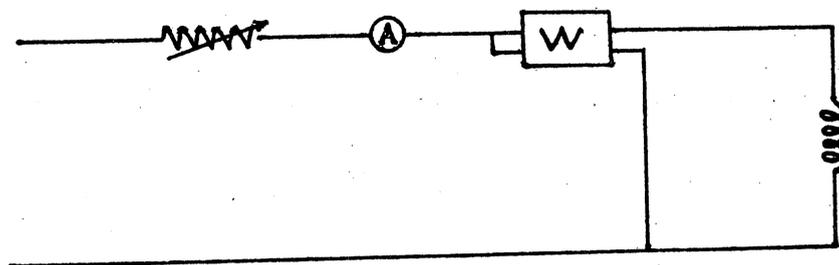
A partir de estos datos obtenidos con voltaje reducido se calcularán sus valores reales a voltaje nominal, en el concepto de que I es proporcional a V y W es proporcional a V^2 , calculandose también el factor de potencia correspondiente, quedarán las siguientes ecuaciones:

$$I_r = I' \times \frac{V}{V'_r}$$

$$N_r = W'_r \times \frac{V^2}{V_r^2}$$

$$\cos \phi_r = \frac{W'_r}{I'_r \times V'_r}$$

3.- Se medirá la resistencia R_1 de una fase del primario, para lo cual se podrá usar la siguiente conexión:



en donde el valor de la resistencia eficaz será igual a:

$$R = \frac{W}{A^2}$$

estando en estas condiciones listos para el trazo del diagrama circular y por consiguiente para encontrar las características del motor de inducción.

Las escalas que se utilizarán serán como sigue:

El voltaje de un valor fijo.

La escala de intensidad de corriente es arbitraria.

La de la potencia en watts es la de la corriente multiplicada por el voltaje.

La de los caballos de potencia es igual a la escala de los watts - dividida entre 746.

El deslizamiento es una relación de la longitud de dos líneas y no una escala.

Para trazar el diagrama se seguirá la siguiente secuela:

a).- De los valores obtenidos en el punto número 1, se trazará el voltaje por fase V verticalmente, y la corriente de excitación I_0 (por fase) representada con un ángulo φ_0 de V y atrasada.

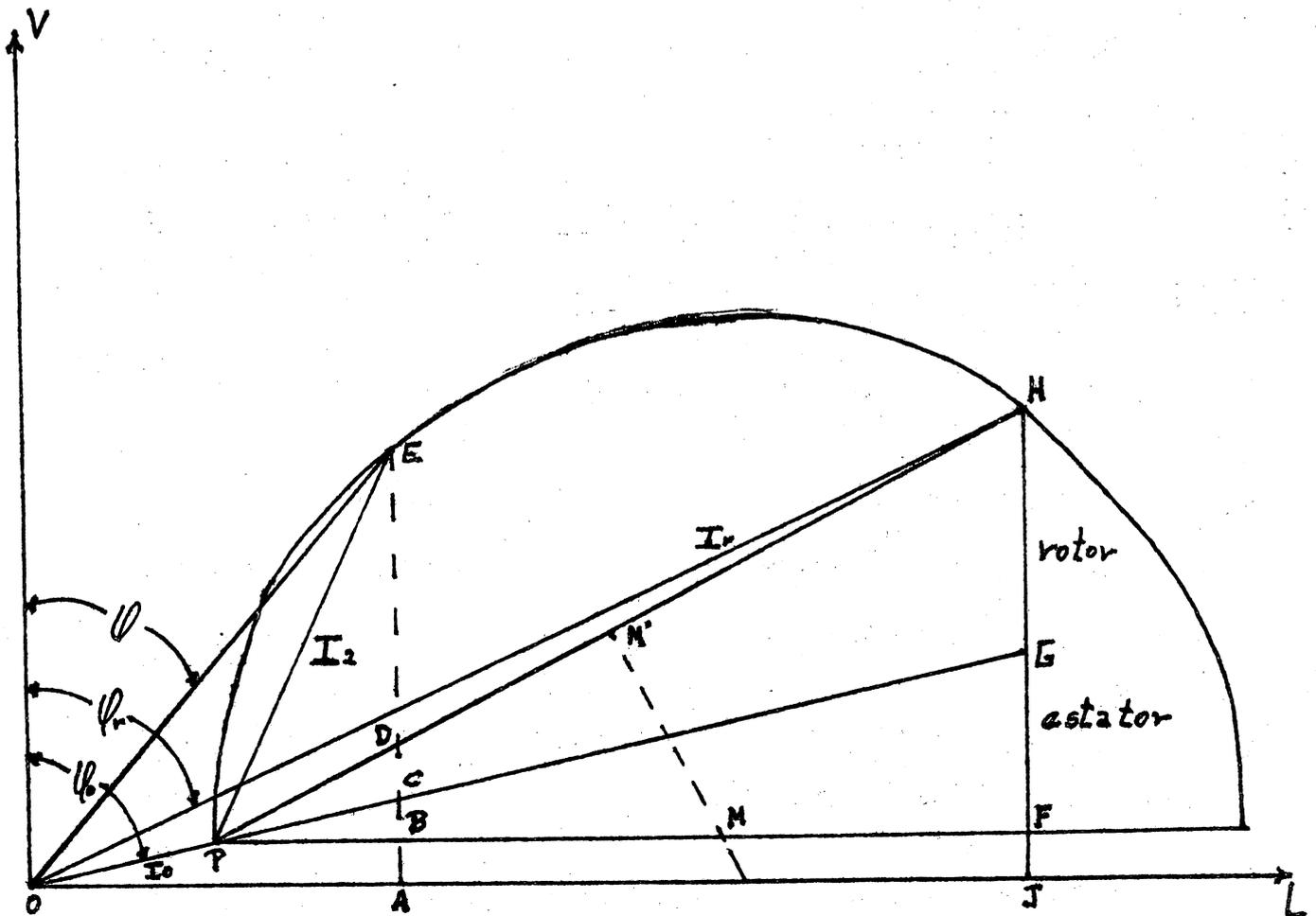
b).- Se dibujará la línea OL formando un ángulo de 90° con OE y en la dirección de las manecillas del reloj.

c).- De los valores obtenidos en el punto No. 2 se trazará I_r -- describiendo un ángulo φ_r con OE , por lo tanto determinarán los pun-

tos P y H del círculo.

d).- En esas condiciones se dibujará la línea PH, trazando también PK que será paralela a OL. (no será necesario conocer el punto K para construir el diagrama).

e).- Con la línea PK como diámetro se dibujará un semicírculo a través de los puntos P y H. El centro M de este semicírculo se encontrará trazando la perpendicular M'M al centro de la línea PH. La intersección de la línea M'M con PK nos dará el centro M del círculo.



f).- A continuación se trazará una perpendicular de H a OL; la línea HF será dividida en dos segmentos por el punto G de tal manera que:

$$\frac{HG}{GF} = \frac{I_2^2 R_2}{I_1^2 R_1}$$

que en proporción a las resistencias primarias y secundarias, asumiendo una relación 1: 1 de las vueltas del rotor al estator.

La distancia HF es determinada en condiciones de rotor bloqueado, por lo cual, para encontrar el valor de GF será a partir de:

$$I_E^2 R_1$$

donde R_1 es la resistencia eficaz del estator encontrada en el punto 3, y I_E es el valor calculado de la corriente a rotor bloqueado. Encontrando en esas condiciones el punto G.

g).- Se utilizará entonces la línea PG.

h).- Ahora, para cualquier corriente de carga I, la corriente secundaria es igual a :

$$I_2 = PE$$

que fasorialmente será igual a:

$$I_2 = I - I_0$$

La interpretación del diagrama circular de Heyland será de la manera siguiente: (para una corriente I cualquiera):

E A es la componente activa de la corriente, por lo cual, la potencia de entrada por fase será igual a :

$$P_1 = EA \times V$$

Las pérdidas en el núcleo y por fricción serán:

$$P_c = BA \times V \text{ (por fase)}$$

Las pérdidas eléctricas en el primario (estator).

$$I_1^2 R_1 = BC \times V \text{ (por fase)}$$

En el secundario (rotor) serán:

$$I_2^2 R_2 = CD \times V \text{ (por fase)}$$

La eficiencia

$$\eta = \frac{DE}{AE}$$

El par T referido a su escala correspondiente (K') es:

$$T = CE \times K'$$

El deslizamiento s es :

$$s = \frac{CD}{CE}$$

El factor potencia:

$$\cos \varphi = \frac{AE}{OE}$$

Los valores de potencia, pérdidas y par obtenidos anteriormente son para una fase del motor, si el motor es de n fases, dichos valores deberán estar multiplicados por n.

La escala del par a que nos referimos con anterioridad es:

$$K' = 7.04 \times \frac{V}{N}$$

$$T = K' CE$$

donde:

V.- Voltaje de alimentación.

N.- Velocidad de sincronismo.

Finalmente la velocidad de la máquina es igual a:

$$N_2 = N (1 - S)$$

donde:

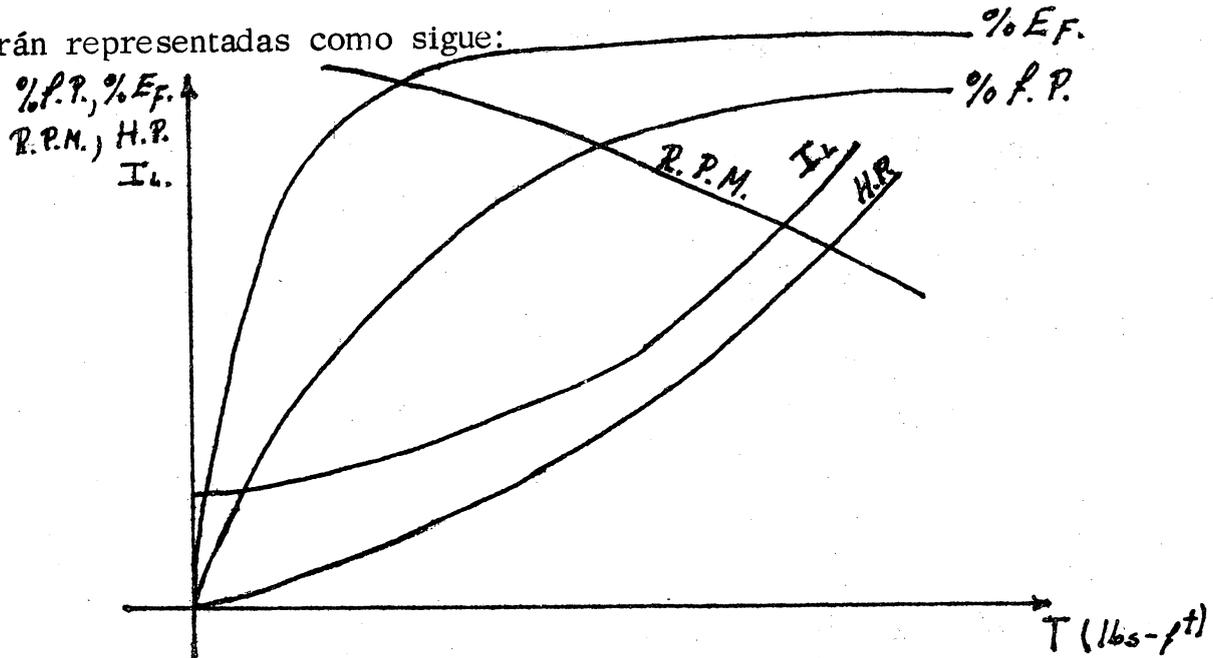
N_2 .- Velocidad del motor.

N .- Velocidad de sincronismo

S .- Deslizamiento.

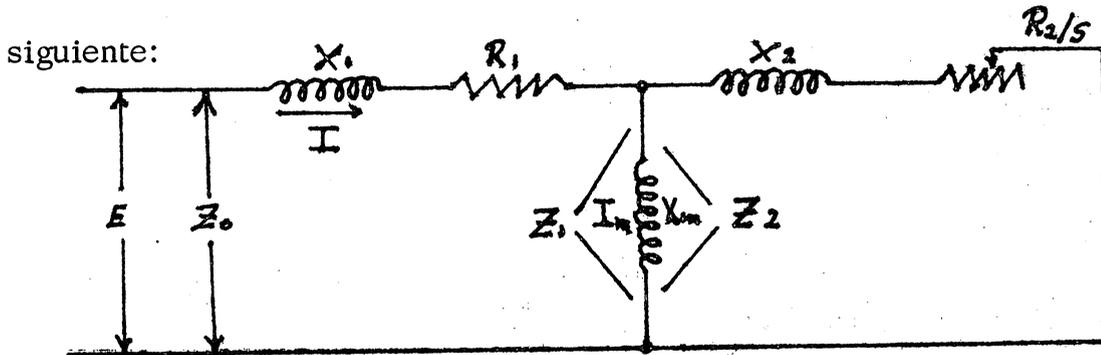
Asi como se describió el procedimiento para un valor específico de corriente, se podrán encontrar diferentes valores para dis--

tintos grados de carga, pudiendo de esta forma trazar las curvas características del motor de inducción. Si referimos al eje de las abscisas al par y al de las ordenadas la potencia de salida, corriente de línea, eficiencia, factor de potencia y velocidad, podremos tener las diferentes curvas características de la máquina, que quedarán representadas como sigue:



II. - Circuito equivalente.

El circuito equivalente del motor de inducción es de la manera



Los valores de X_1 y X_2 dependen de la clase de motor, por lo cual se puede tener la siguiente tabla: (para motores de 2 y 3 fases):

	X_1	X_2
Clase A	$0.5 X_L$	$0.5 X_L$
Clase B	$0.4 X_L$	$0.6 X_L$
Clase C	$0.3 X_L$	$0.7 X_L$
Clase D	$0.5 X_L$	$0.5 X_L$
Rotor devanado	$0.5 X_L$	$0.5 X_L$

donde $X_L = X_1 + X_2$

Clase A.- Motores jaula de ardilla, par normal, corriente de arranque normal.

Clase B.- Motores jaula de ardilla, par normal, baja corriente de arranque.

Clase C.- Motores jaula de ardilla, alto par de arranque, baja corriente de arranque.

Clase D.- Motores jaula de ardilla, alto deslizamiento.

Para el cálculo del circuito equivalente usaremos los siguientes términos :

E.- Voltaje terminal

I.- Amperes, en el primario.

R'_{ts} .- Resistencia del estator a temp. normal de operación

- R'_t .- Resistencia del estator al finalizar la prueba de saturación en vacío.
- R_2 .- Resistencia del rotor referida al estator.
- X_1 .- Reactancia del estator.
- X_2 .- Reactancia del rotor.
- X_L .- Reactancia total.
- X_m .- Reactancia magnetizante.
- $W_h + W_f$.- Pérdidas mecánicas y magnéticas.
- W_s .- Pérdidas de carga.
- S .- Deslizamiento.
- F .- Frecuencia nominal.
- F_t .- Frecuencia usada en la prueba de impedancia.
- V .- Voltaje en prueba de imp. con corriente normal y frecuencia F_t .
- W_{RL} .- Watts a voltaje y frecuencia nominales, con el motor en va cío.
- I_m .- Corriente de magnetización a voltaje normal, frecuencia nominal, con el motor en vacío.
- Z_2 .- Impedancia secundaria.
- G_2 .- Conductancia secundaria.
- B_2 .- Susceptancia secundaria.
- Y .- Admitancia combinada del circuito secundario y del circuito de magnetización.
- R .- Resistencia combinada del circuito secundario y del circuito de magnetización.
- X .- Reactancia combinada del circuito secundario y del circuito de magnetización.
- R_o .- Resistencia del circuito total.

X_0 . - Reactancia del circuito total.

Z_0 . - Impedancia del circuito total.

I_2 . - Corriente en el secundario.

En un motor de inducción por lo general se tienen los siguientes datos de placa.

Pot. de salida en H.P.

Voltaje

Corriente

Fases

Frecuencia

Velocidad

Dividiremos ahora el cálculo en dos partes, primero encontraremos los valores básicos de partida, y posteriormente los correspondientes a diferentes grados de carga.

A. - Valores básicos.

Para obtenerlos, se hará de la forma siguiente:

1. - E . - Voltaje nominal.

2. - $I_m = \sqrt{3} I_m'$

I_m' Se encuentra de la curva de saturación en vacío en el punto de voltaje nominal.

3. - W_{RL} .- Se obtiene también de la curva de saturación en vacío a voltaje nominal.

$$4.- W_h + W_F = W_{RL} - I_m^2 R'_t$$

R'_t Como ya se indicó se tomará al final de la prueba de saturación en vacío.

5.- R'_t (indicada anteriormete).

6.- R'_{ts} . Se determinará en frío y luego se calculará a la temp. nominal por medio de la siguiente ecuación.

$$\frac{R_1}{R'_{ts.}} = \frac{234.5 + T_1}{234.5 + T_2}$$

7.- V_L y W_L Valores obtenidos a la corriente nominal en la curva de saturación a rotor bloqueado.

8.- $I_{asumida}$.- Será igual a la corriente nominal por la raíz de 3.

$$9.- X_L = \frac{I_{asumida}}{I} = \frac{I_{nom} \sqrt{3}}{I} = \sqrt{\frac{V_L^2}{I^2} - \frac{W_L^2}{I^2}} \times \frac{F}{F_L}$$

En este caso particular se obtuvo la prueba de saturación a rotor bloqueado solo a 60 c.p.s. por lo cual el termino F/F_t es la unidad.

Se observará que se toman los valores de X_L a plena carga y el máximo, los cuales se calcularán de la siguiente forma: (considerando

que se hace la prueba a la frecuencia nominal y a la de impedancia que por lo general es la cuarta parte de la nominal):

a) Se calculan $X_L (F.L)_1$ y $X_L (F.L)_2$ con sus correspondientes frecuencias y usando los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio (curvas de sat. a rotor bloqueado a frec. nom. y a la cuarta parte de la nom).

b) A continuación se calcula $X_L (max)_1$ cuyos datos se toman a aproximadamente el 68% del voltaje nominal (curva de frecuencia nominal).

c) Finalmente la $X_L (max)$ será igual a:

$$X_L (max) = \frac{X_L (F.L)_2}{X_L (F.L)_1} \times X_L (max)_1$$

d) El valor de $X_L (F.L.)$ será el correspondiente a la frecuencia reducida.

En este caso particular solo se calcularán a la frecuencia nominal por tener solo esa curva.

10.- Cálculo de X_1 y X_2 tanto para plena carga como a máxima carga (consideramos un motor de inducción de clase A).

11.- $X_{m(F.L)}$ y $X_{m(max)}$, según las ecuaciones indicadas, se tomarán los valores calculados con anterioridad.

$$X_m (F.L) = \frac{E}{I_m} - X_1 (F.L)$$

$$X_m (\max) = \frac{E}{I_m} - X_1 (\max)$$

12.- W_s (pérdidas de carga) Se toma aproximadamente el 1% de los KW nominales a su corriente nominal.

B.- Valores a diferentes grados de carga.

1.- Resistencia del rotor entre el deslizamiento.

$$\frac{R_2}{S} = \frac{E}{I_{\text{asum.}}}$$

para obtener una mayor precisión en el par máximo, para calcular el valor de R_2/S (max) se utiliza la siguiente expresión:

$$\frac{R_2}{S} (\max) = \sqrt{(R'_{ts})^2 + \left(X_1 \max + \frac{X_2 \max \times X_m \max}{X_2 \max + X_m \max} \right)^2}$$

2.- Impedancia secundaria al cuadrado.

$$Z_2^2 = \left(R_2 / S \right)^2 + X_2^2$$

3.- Impedancia secundaria.

$$Z_2 = \sqrt{Z_2^2}$$

4.- Conductancia secundaria.

$$G_2 = \frac{R_2 / S}{Z_2^2}$$

5.- Susceptancia secundaria.

$$B_2 = \frac{X_2}{Z_2^2}$$

6.- Susceptancia magnetizante.

$$B_m = \frac{1}{X_m}$$

7.- Susceptancia combinada del circuito secundario y del circuito magnetizante.

$$B = B_2 + B_m$$

8.- Cuadrado de la admitancia combinada del circuito secundario y del circuito de magnetización.

$$Y^2 = G_2^2 + B^2$$

9.- Resistencia combinada del circuito secundario y del circuito de magnetización.

$$R = \frac{G_2}{Y^2}$$

10.- Reactancia combinada del circuito secundario y del circuito de magnetización.

$$X = \frac{B}{Y^2}$$

11.- Impedancia combinada del circuito secundario y del circuito de magnetización.

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

12.- Resistencia del circuito total.

$$R_o = R + R'_{ts}$$

13.- Reactancia del circuito total.

$$X_o = X + X_1$$

14.- Impedancia del circuito total.

$$Z_o = \sqrt{R_o^2 + X_o^2}$$

15.- Por ciento del factor potencia.

$$\% F.p = \frac{R_o}{Z_o} \times 100$$

16.- Amperes en el primario.

$$I = \frac{E}{Z_o}$$

17.- Corriente en el secundario.

$$I_2 = I \times \frac{Z}{Z_2}$$

18.- Deslizamiento.

S (se calcula por cualquier procedimiento - estroboscopio-)

19.- Deslizamiento restado de la unidad.

$$1-S$$

20.- Revoluciones por minuto.

$$\text{RPM}=(1-S) \times \text{vel. de sincronismo.}$$

21.- Potencia bruta de salida.

$$= I_2^2 \times R_2 / S \times (1-S)$$

22.- Pérdidas Magnéticas y mecánicas más las de carga.

$$(W_H + W_F) + W_S$$

23.- Potencia en la flecha o de salida. (neta).

$$21 - 22$$

24.- Potencia de entrada.

$$I^2 R_o$$

25.- Por ciento de eficiencia.

$$\% \text{ EF.} = \frac{\text{Pot. salida}}{\text{Pot. entrada}} \times 100.$$

26.- Pot. de salida en H.P.

$$HP = 1.34 \times \text{Pot. sal. en W} \times 10^{-3}$$

27.- Par.

$$T = \frac{7.04 \times \text{pot. sal. en W}}{\text{R.P.M.}}$$

28.- Corriente de linea.

$$I_L = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

29.- Resistencia del secundario.

$$R_2 = \frac{E}{I_m} \times S$$

Cuando en el número 26 se obtiene un valor diferente al de la potencia en H.P marcada en placa, se corregirá el valor del número 1 (R_2 / S), que estará en razón inversa de las potencias de salida, o sea:

$$R_2 / S_f = \frac{P_{enc}}{P_n} \times R_2 / S_{in}$$

donde:

R_2 / S_f .- valor por encontrar.

P_{enc} .- Pot. encontrada con la corriente asumida.

P_n .- Pot. nominal de placa.

R_2 / S_{in} .- Es el valor inicial con el que se empezó el cálculo.

Con este nuevo valor se volverán a repetir los cálculos ante-

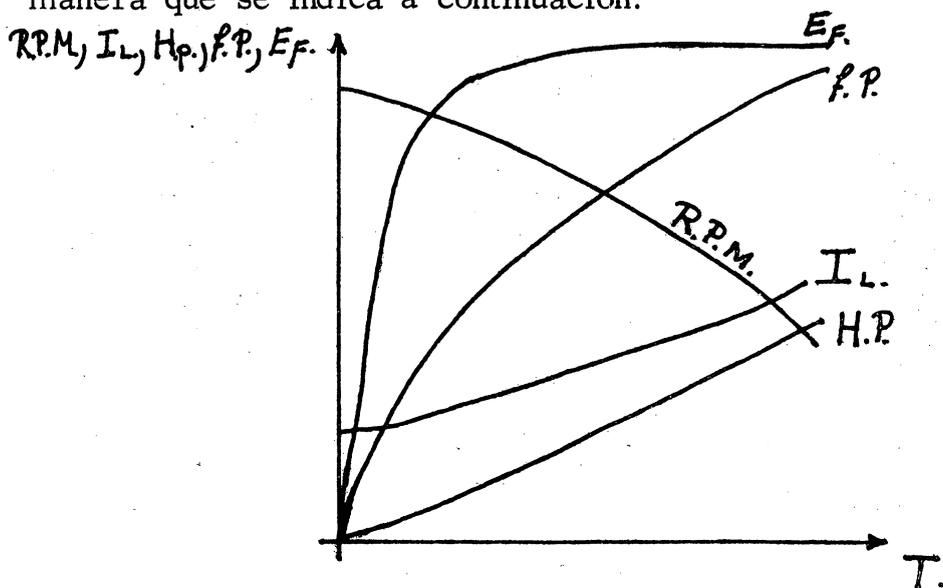
riores de la misma manera (para plena carga).

Para obtener estos valores a diferentes grados de carga, se multiplicará R_2 / S por los valores siguientes, dependiendo de la carga que se desee.

1/4	-	4.0
1/2	-	2.02
3/4	-	1.355
1 1/4	-	.78
1 1/2	-	.61

habiendo nuevamente la serie de cálculos anteriores para cada grado de carga.

Con los valores de par, referido al eje de las abscisas y de eficiencia, factor potencia, Pot. de salida (H.P.), corriente de línea y velocidad en las ordenadas, se podrán trazar las curvas características del motor de inducción las cuales quedarán representadas de la manera que se indica a continuación:

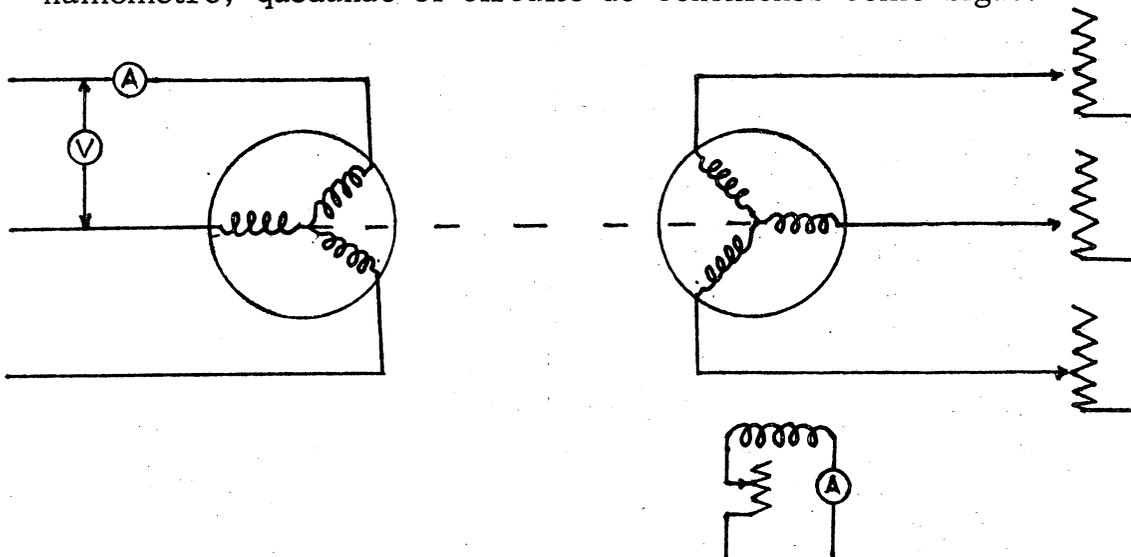


CURVA PAR VELOCIDAD

El objeto primordial de esta prueba es el de determinar el par máximo que el motor puede desarrollar, conservando para tal fin la tensión aplicada constante. Debido a las condiciones anormales a que se sujeta al motor, la temperatura de los devanados tiende a elevarse, por lo cual esta debe realizarse antes de la prueba de temperatura.

En el caso de querer obtener la curva desde el motor en vacío, (casi a la velocidad de sincronismo), hasta la velocidad cero, o sea con el rotor bloqueado, deberá reducirse la tensión conforme se aumente la carga, con objeto de proteger al motor, haciendo posteriormente las correcciones necesarias, recordando que la intensidad de la corriente es proporcional a la tensión aplicada y el par al cuadrado de la tensión.

Para efectuar esta prueba se acoplará el motor a un electrodinamómetro, quedando el circuito de conexiones como sigue:



El procedimiento a seguir será de la siguiente manera:

1. - Se registrará la tabla indicada a continuación.

R. P. M.	V_L	I_L	F

2. - Se empezará la prueba sin carga, y poco a poco la máquina se irá cargando ayudada por las resistencias acopladas al electrodinamómetro y por la excitación de este mismo aparato.

3. - Conforme aumente la carga se tendrá que ir reduciendo el voltaje aplicado con objeto de proteger a la máquina en prueba, pero como ésta debe efectuarse a una tensión constante, se harán las correcciones indicadas con anterioridad.

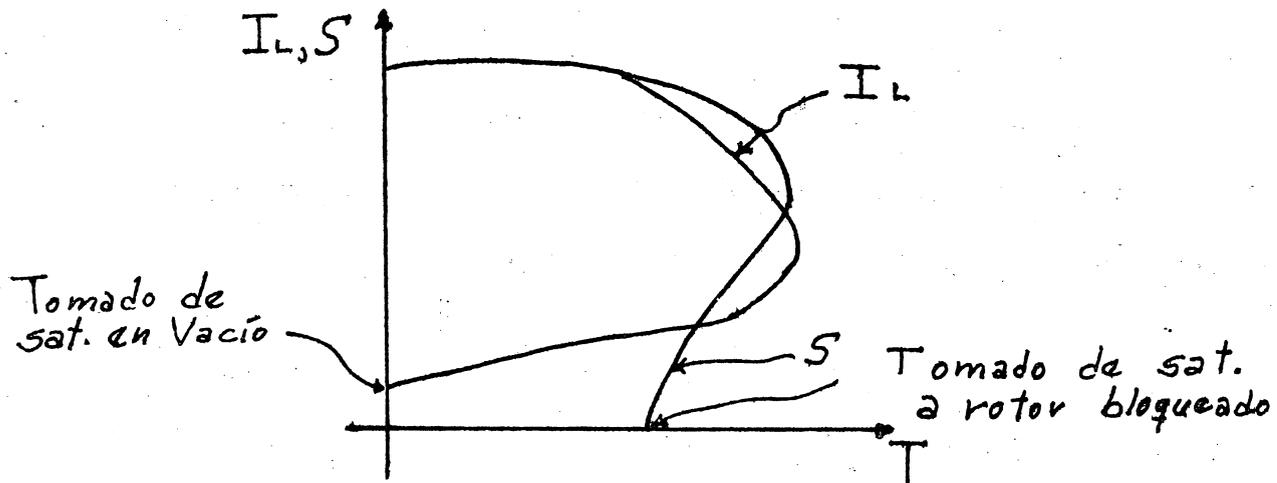
4. - Se observará en el proceso de carga de la máquina, que se llegará a un punto en que la fuerza leída sobre la báscula dejará de aumentar aunque la velocidad siga disminuyendo. La lentitud de la aplicación de la carga, sobre todo en las cercanías de este punto, tiene por objeto evitar lecturas falsas de pares mayores, debidas a la energía cinética de rotación del conjunto motor- electrodinamómetro.

5. - Pasando este punto, y a velocidades menores se tomarán otras lecturas, hasta llegar a la velocidad cero, donde se bloqueará el rotor.

6.- Como se observa en la tabla por registrar, se tomarán simultáneamente las lecturas de la corriente, con objeto de trazar las dos curvas, teniendo el par como variable independiente.

7.- Para trazar las curvas, se referirá al eje de las abscisas el par y en el de las ordenadas la corriente y la velocidad.

8.- Su representación es como sigue:



OTRAS APLICACIONES DE LOS MOTORES DE INDUCCION

Los motores de inducción, además de las características propias que ya se han visto en prácticas pasadas, tiene otras aplicaciones que trataremos ahora .

1.- Generador de inducción:

El generador de inducción o asíncrono no difiere en su construcción del motor de inducción. La única diferencia existente para que funcione como motor o como generador dependerá exclusivamente del porcentaje de deslizamiento; si la velocidad de la máquina es menor que la de sincronismo funciona como motor; en caso contrario si es mayor, - operará como generador.

Así como en el caso del motor cuando trabaja como generador, el factor de potencia dependerá del deslizamiento y no de la carga.

Las ventajas que presenta en comparación con el generador síncrono son las siguientes:

- a) El rotor es resistente y menos delicado.
- b) En el caso de un corto circuito en la línea, esta máquina no coopera a aumentar la intensidad de la corriente, haciéndolo solo durante el efecto transitorio que es muy corto y tan pronto como el voltaje terminal llega a cero la corriente de corto circuito será también cero.

c) No hay penduleo.

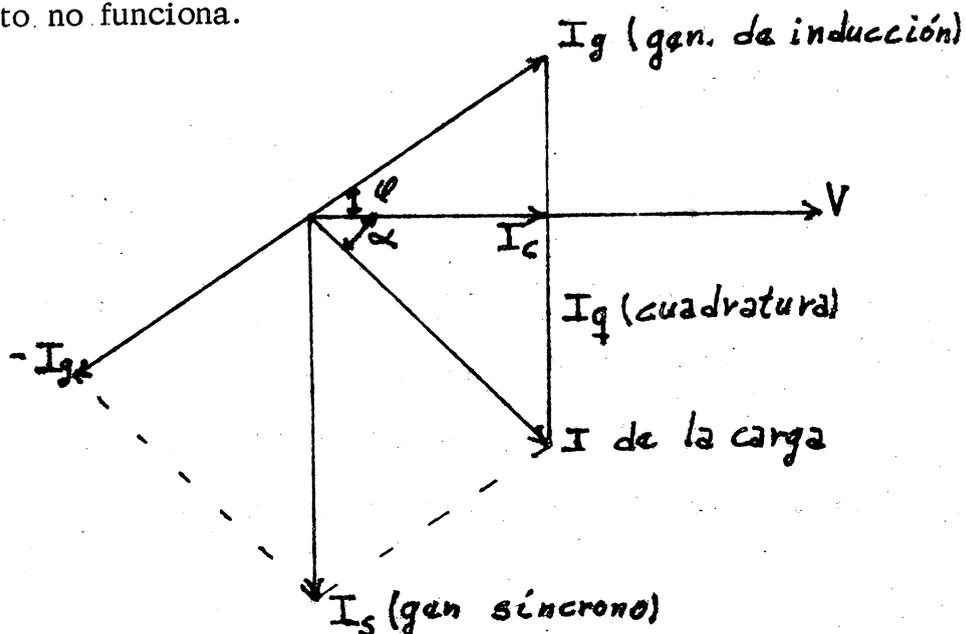
d) Para ponerlo en servicio no es necesario igualar tensiones y sincronizar, pues tanto el voltaje como la frecuencia quedan controlados automáticamente por los del generador síncrono al que se conectó en paralelo.

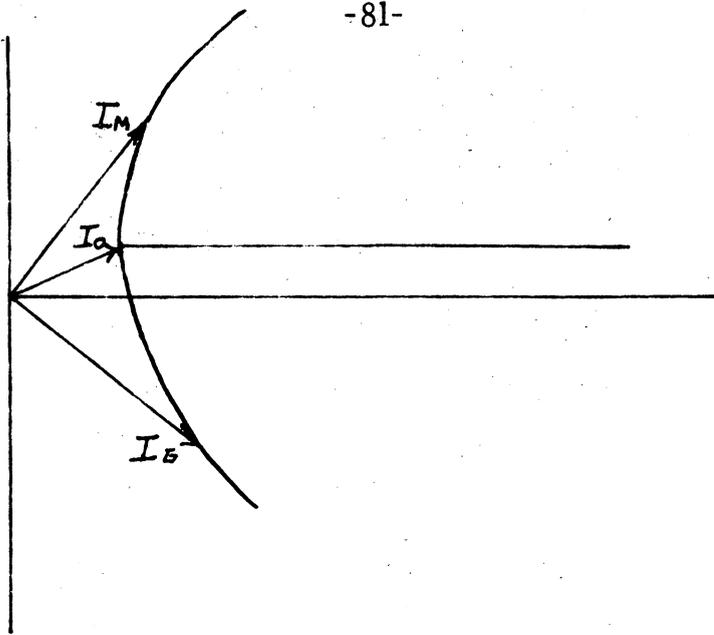
Sus desventajas serán:

a) Únicamente puede generar corriente reactiva adelantada y - la mayoría de las cargas requieren corriente reactiva atrasada.

b) El factor de potencia está fijado por el deslizamiento y no por carga.

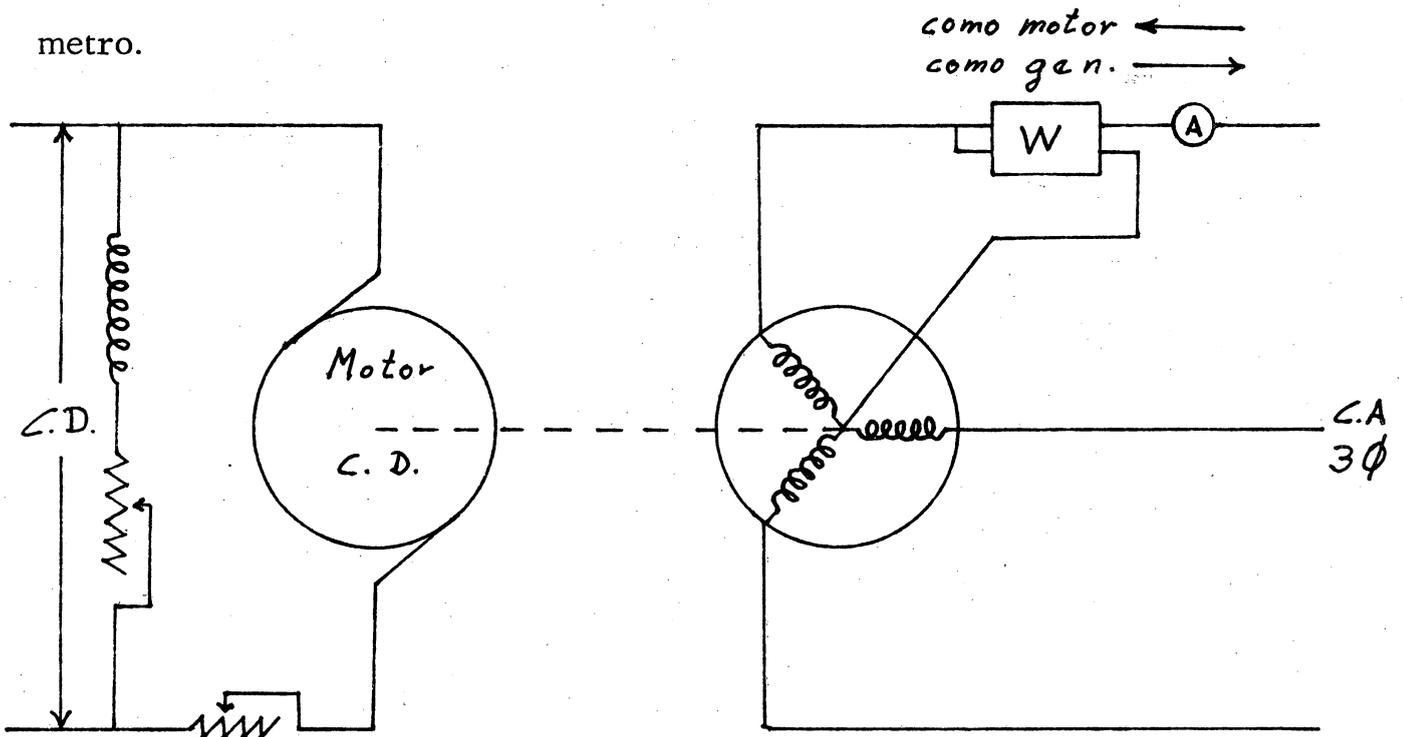
c) Para que funcione este generador es indispensable excitarlo con corriente reactiva atrasada, por lo tanto será necesario acoplarlo en paralelo con un generador síncrono que le proporcionará esta corriente atrasada, además de la demandada por la carga, sin cuyo requisito no funciona.





Para saber cuando una máquina de inducción trabaja como motor o como generador, se hace lo siguiente:

Se acoplará la máquina de inducción a un motor de corriente directa, según se indica en el diagrama, intercalado en una de las fases de la máquina de inducción un amperímetro y un wáttmetro o waththorímetro.



Cuando la máquina de inducción trabaja a una velocidad menor a la de sincronismo, estará trabajando como motor y la corriente estará circulando de la fuente de alimentación a la máquina; en caso contrario, si trabaja arriba de la velocidad de sincronismo, la corriente circulará de la máquina a la línea, operando por lo tanto como generador.

Esto se podrá observar en los instrumentos intercalados en el diagrama, en el ampérmetro se observará un cambio en el sentido de la aguja, y si se usa wathorimetro, se observará que el disco del aparato cambiará de dirección cuando trabaje la máquina ya sea como motor o como generador.

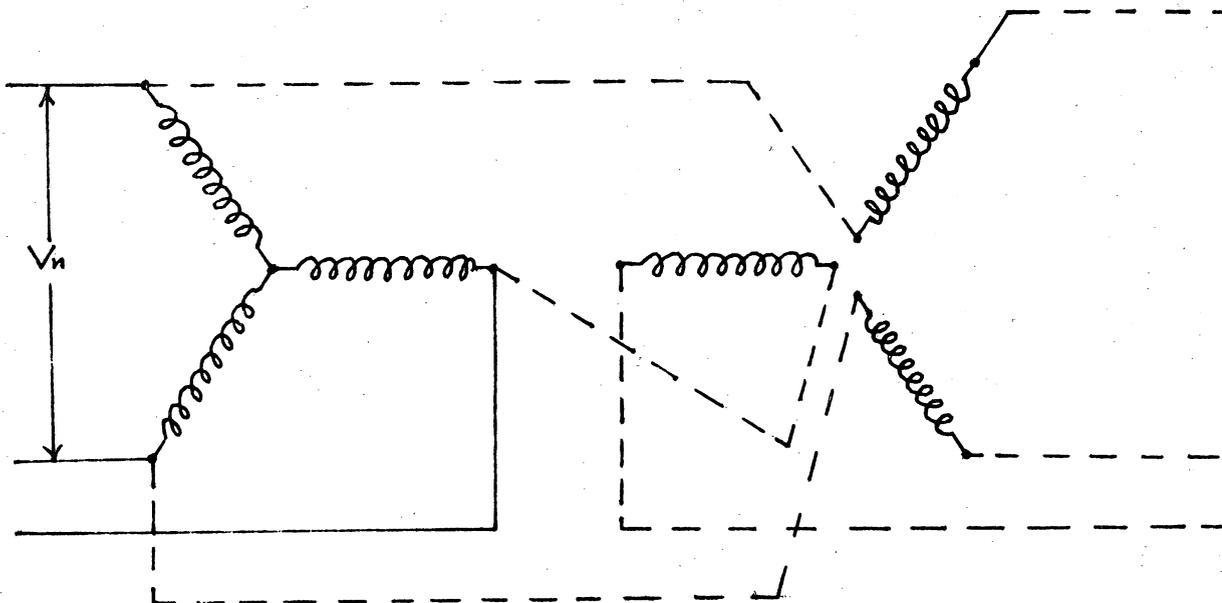
2.- Motor de inducción utilizado como regulador de voltaje.

El motor utilizado deberá ser de rotor devanado. Cuando el rotor está abierto se induce en él una tensión, pero no puede circular corriente alguna. En el caso de que se cierre como se indica con -- las líneas puntuadas en la siguiente figura podrá circular una corriente determinada.

Moviendo ahora la posición relativa entre el rotor y el estator la máquina trabajará como regulador de inducción.

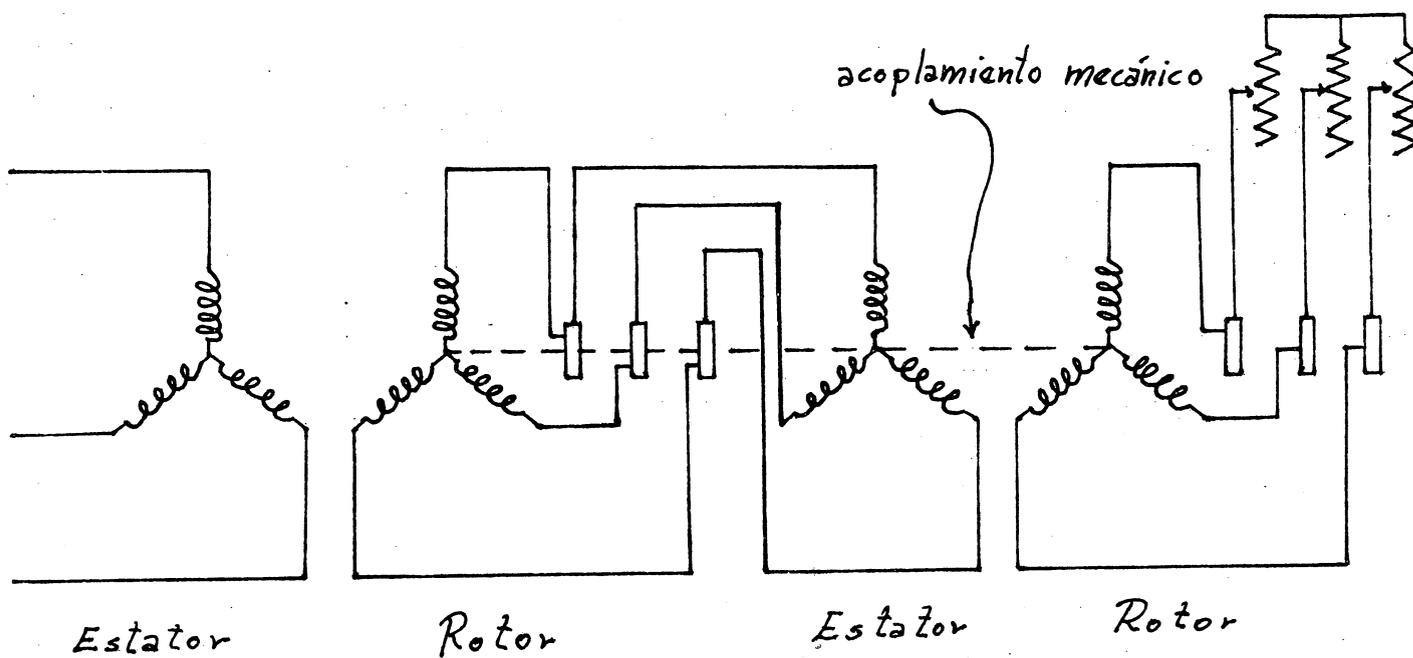
Estator

Rotor



3.- Motor de inducción conectado en cascada para modificar la velocidad, acoplados mecánicamente.

Este sistema se usa cuando se requieran varias velocidades en la flecha de dos motores de inducción. El circuito de conexión es como sigue.



En estas condiciones se podrán tener cuatro velocidades diferentes, dos de ellas serán las correspondientes a cada máquina en particular, y las otras dos serán combinando ambas máquinas o sea si los motores se conectan de manera que ambos tiendan a girar en la misma dirección, su velocidad será la que corresponda a $P_1 + P_2$ polos; si la dirección de giro es en sentido contrario de una máquina con respecto a otra, entonces la velocidad corresponde a $P_1 - P_2$.

Expresando algebraicamente se tendra:

Mismo sentido de giro.

$$\text{R.P.M.} = \frac{120 \times F}{P_1 + P_2}$$

Diferente sentido de giro.

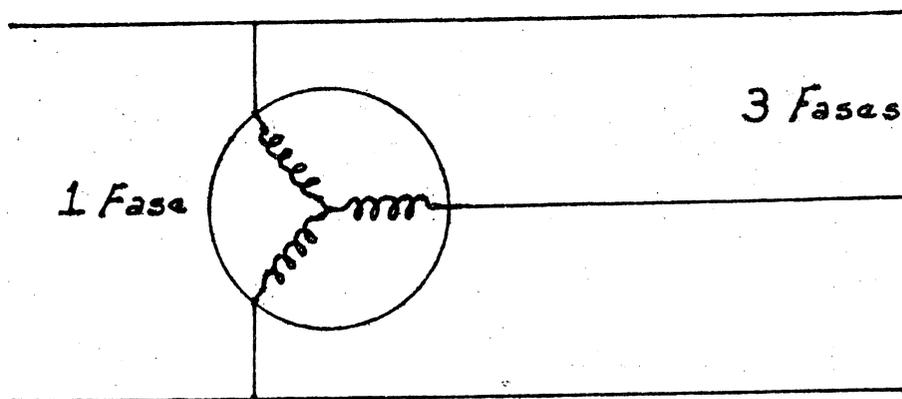
$$\text{R.P.M.} = \frac{120 \times F}{P_1 - P_2}$$

donde: F. - Frecuencia.

P_1 y P_2 - Número de polos de máquinas.

4. - Motor de inducción cómo cambiador de fases.

Se alimentará monofásicamente el motor, de la manera indicada en el diagrama, obteniendo tres fases en el extremo de salida.

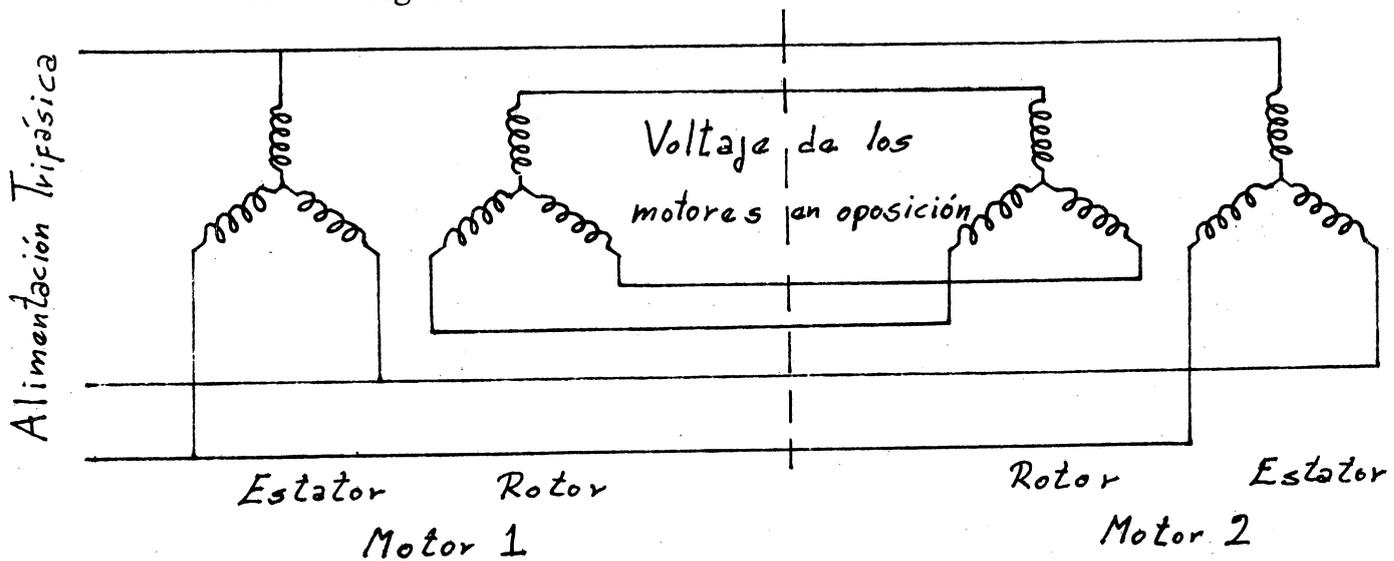


Para girar el motor en esta aplicación habrá que aplicarle un impulso inicial al rotor, ya sea por medio de otra máquina cuando el motor sea grande, o directamente con la mano en caso de motores pequeños.

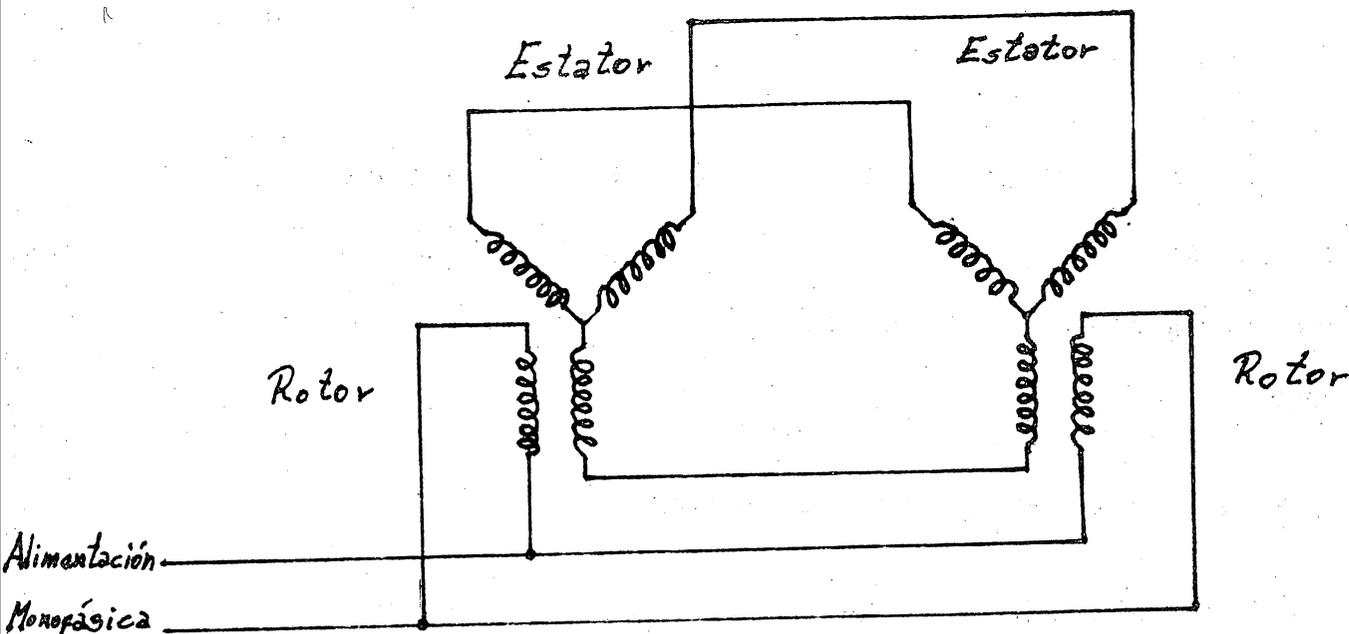
5. - Para controlar operación a distancia.

Se le dá el nombre de conexión Selsyn o Self synchronouns y consistirá de dos motores conectados entre sí electricamente con corriente alterna, y en los que cualquier desplazamiento angular del rotor de uno de ellos, se reproducirá en el otro de la misma forma.

Se usará, como su nombre lo indica, para control a distancia de un determinado movimiento. Su diagrama correspondiente será de la manera siguiente:



También podrá quedar como se indica en la siguiente figura donde se alimentarán monofásicamente los rotores.



6.- Motores de inducción como cambiadores de frecuencia.

La frecuencia en el rotor de un motor de inducción polifásico es igual a la frecuencia en el estator multiplicada por el deslizamiento.

$$F_2 = F_1 \times S$$

donde:

F_2 .- Frecuencia resultante

F_1 .- Frecuencia inicial

S .- Deslizamiento en por ciento.

Haciendo girar el rotor a la velocidad apropiada, puede obtenerse en los anillos colectores del mismo rotor la frecuencia deseada, por lo tanto en un motor de inducción con rotor devanado se podrá emplear como cambiador de frecuencia.

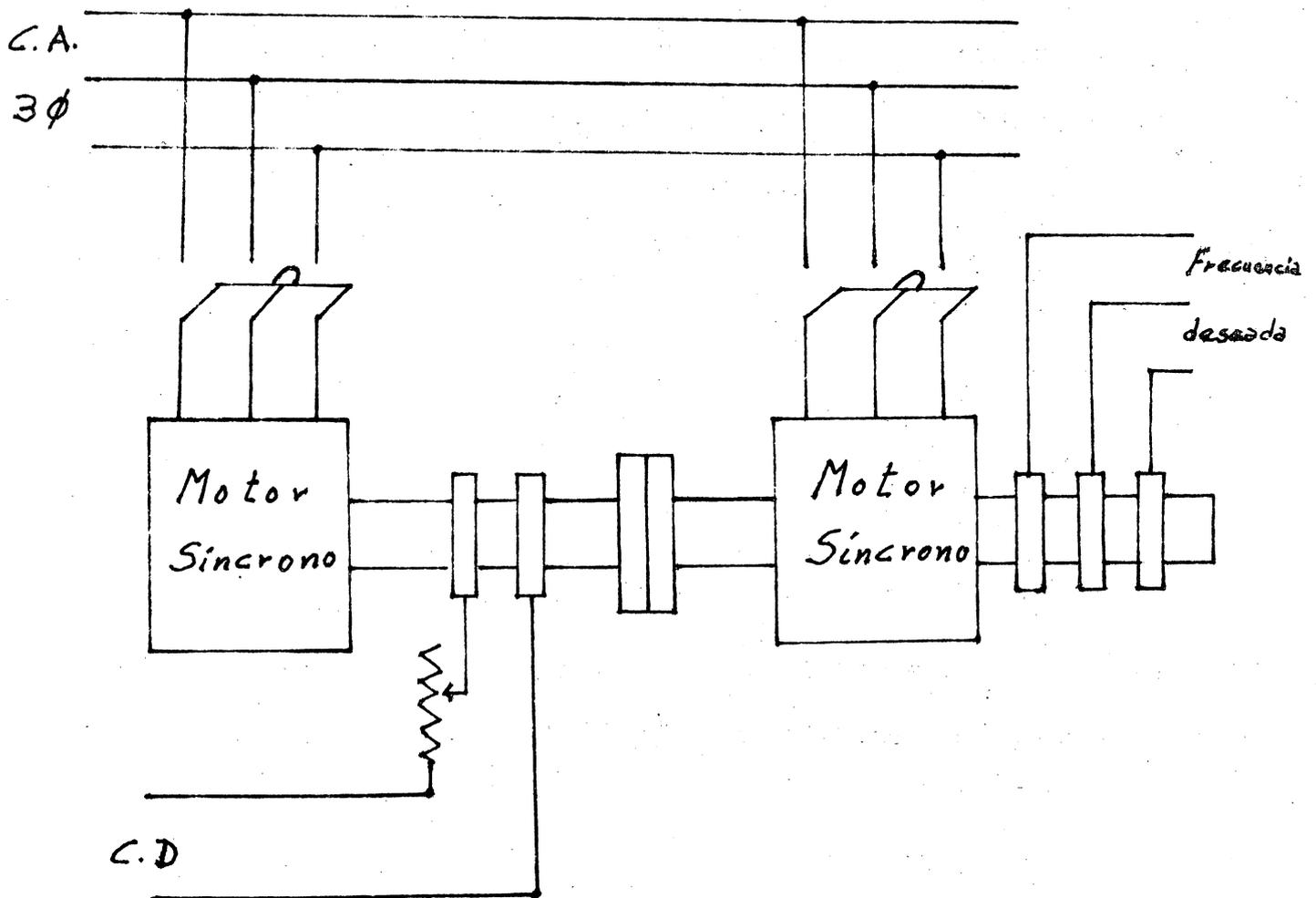
Cuando el motor no gira el campo magnético en el estator induce una fuerza electromotriz en el rotor de la misma frecuencia -

de la corriente del primario.

En el caso que se haga girar a la velocidad nominal, pero en dirección opuesta a su sentido natural de rotación, la frecuencia a la salida de los anillos colectores será el doble de la nominal.

Si se hace girar en el mismo sentido natural, pero a la mitad de su velocidad nominal, la frecuencia obtenida será de un 50% de la aplicada en el estator.

Se podrá tener el siguiente circuito:



MOTORES MONOFASICOS

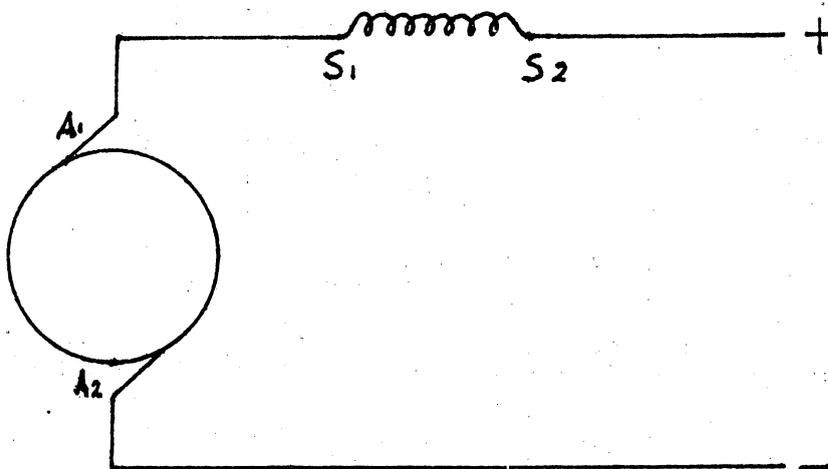
Entre los principales motores monofásicos de C.A. se pueden contar los siguientes:

1. - Motor serie
2. - Motor de repulsión
3. - Motor de inducción

1. - Motor serie.

El motor serie de corriente alterna es muy semejante al de corriente directa.

Del diagrama de un motor serie de corriente directa, tal como el que se representa en la figura, se puede observar que:



a). - Si se invierte la polaridad de la corriente de alimentación no se invertirá el sentido de giro del motor.

b).- En el caso de que se desee invertir el sentido de giro del motor, será necesario invertir el campo con respecto a la armadura de la máquina.

Ahora, en el caso de alimentarlo con corriente alterna, el par neto desarrollado actúa en una sola dirección.

En motores de corriente alterna no conviene tener un campo en derivación pues tendrá un par muy pobre debido a la alta inductancia de este campo.

La diferencia entre un motor serie de C.D. y uno de corriente alterna consiste de los siguientes puntos:

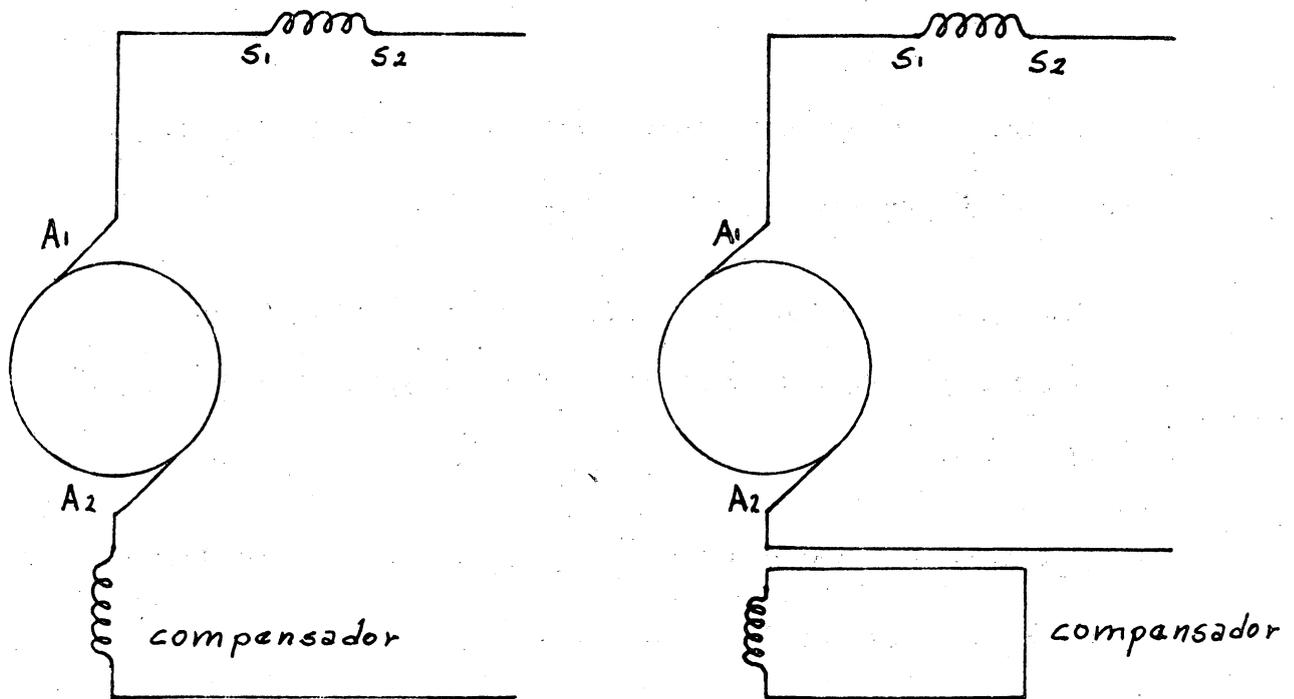
a).- Se requerirá un circuito magnético laminar en los motores de C.A. con objeto de eliminar los efectos debidos a las corrientes parásitas.

b).- El campo serie de este motor tiene una alta reactancia, por lo que será conveniente que trabajen a baja frecuencia (25 a 15 ciclos).

c).- La armadura de un motor serie de corriente alterna para una capacidad dada, tiene un mayor número de conductores que una de corriente directa.

d).- El motor serie de corriente alterna tiene un menor número de vueltas en el campo y mayor número de vueltas en la armadura, que el correspondiente de C.D. de la misma capacidad. Esto supondrá una

mayor reacción de armadura, que se contrarrestará por medio de un embobinado compensador, que se conectará en serie con la armadura o en corto circuito, tal como se muestra en la figura:



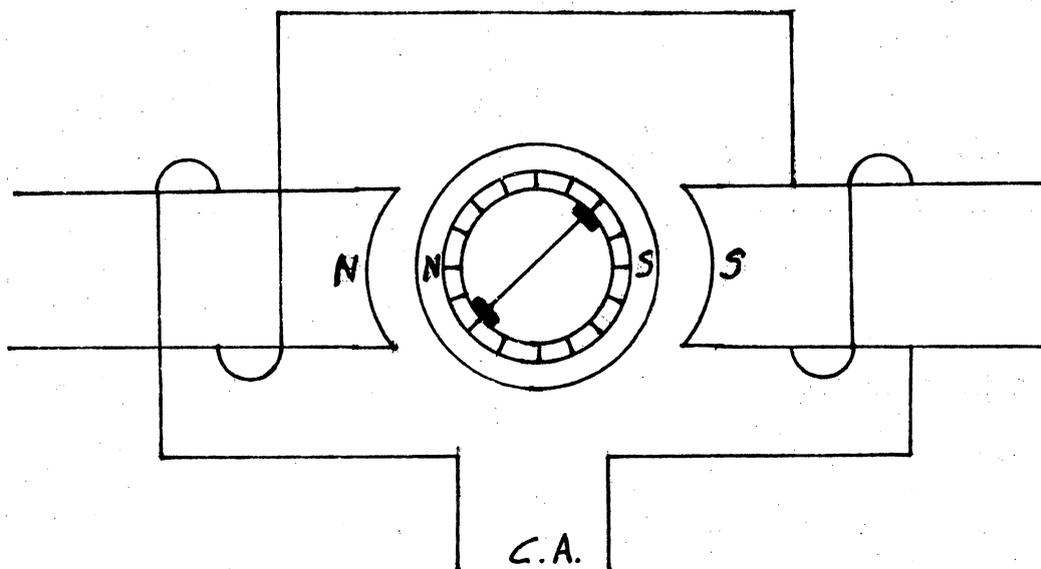
e).- En los motores de corriente alterna una fem transformada incrementa las dificultades de la comutación, problema que se ha resuelto al colocar resistencias entre las bobinas de la armadura y los segmentos del conmutador, también se puede resolver colocando interpolos en la máquina.

El uso principal de este motor es en tracción, como por ejemplo en los ferrocarriles.

2.- Motor de repulsión.

El diagrama esquemático de este motor se representa en la figura siguiente en donde se han colocado polos salientes pero en realidad la mayor parte de estos motores se prefiere usar polos lisos a

los salientes.

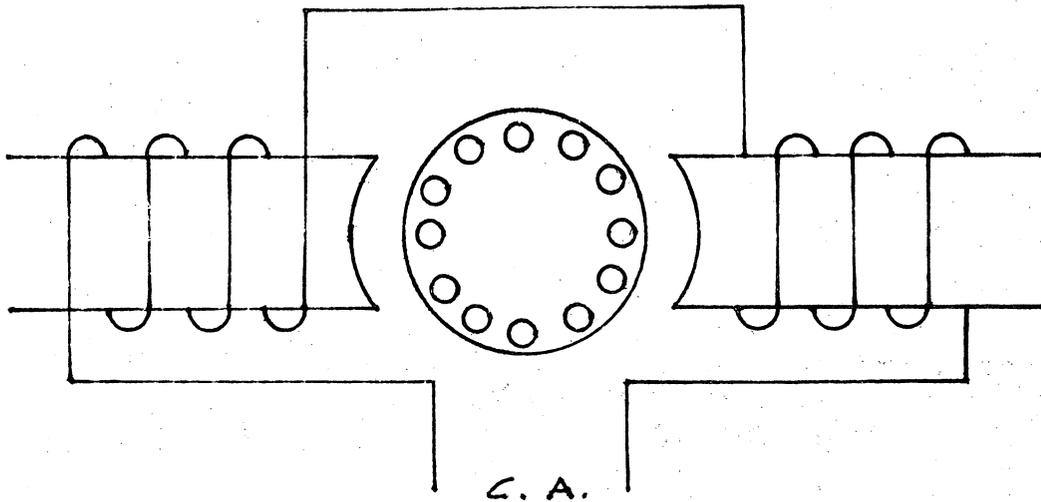


El motor de repulsión opera como sigue: Las escobillas estarán en corto circuito, por lo que esta conexión hará que se induzcan polos en el rotor de igual polaridad que los del campo, tal como se ilustra en la figura, esto hará que al tratar de repelerse los polos del mismo nombre se produzca el movimiento.

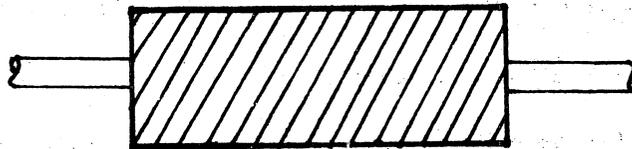
3. - Motor de inducción monofásico.

La desventaja principal de este motor es que requiere un impulso inicial para entrar en operación. Una vez en movimiento, el campo de la máquina induce en el rotor una fuerza electromotriz que produce el par, manteniéndolo de esta manera en movimiento .

El diagrama correspondiente de este motor es como se indica a continuación.



La jaula de ardilla de este motor es algo diferente en construcción al trifásico en virtud de que tiene los conductores inclinados, tal como se indica en la siguiente figura:

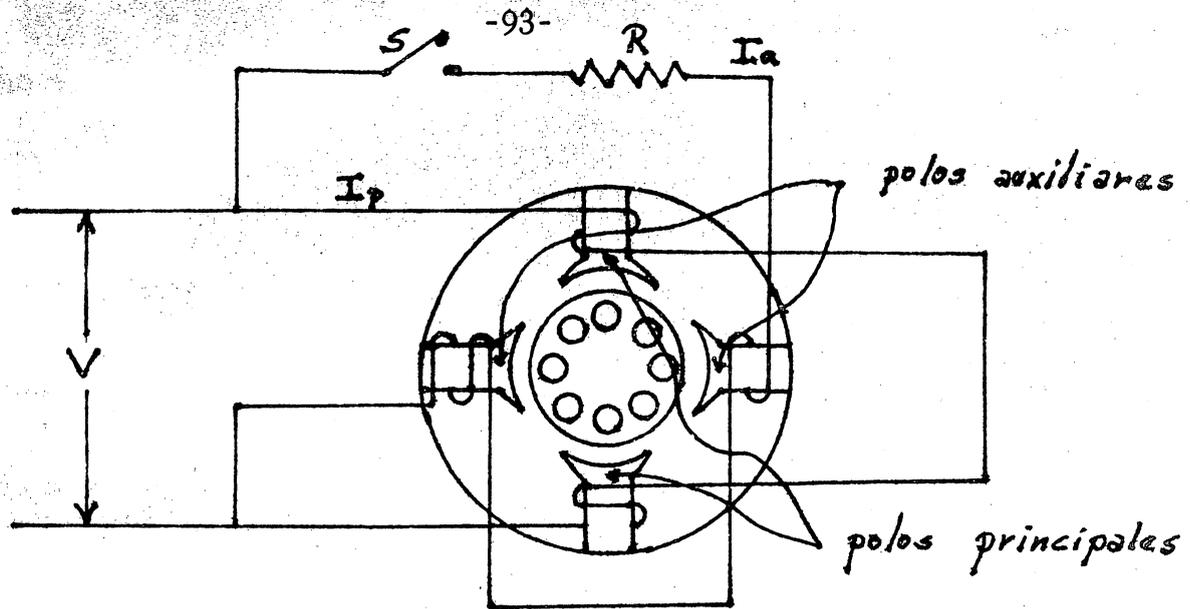


Como se indicó en un principio el principal problema existente en este tipo de máquinas es el arranque, problema que se ha solucionado por diferentes métodos, siendo los principales los indicados a continuación:

a). Fase dividida.

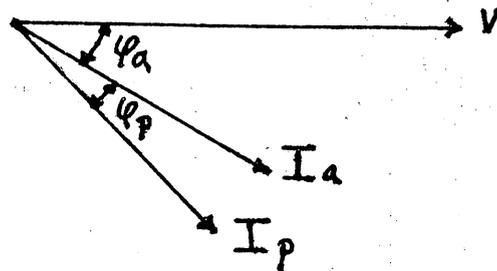
Este método consiste en dividir la fase por combinaciones de inductancias, resistencias y capacitancias.

El diagrama correspondiente para un motor de dos polos es como sigue:



El embobinado de los polos principales se conectará normalmente de la línea de alimentación; este embobinado es altamente inductivo. Entre los polos principales se colocarán los auxiliares los cuales tienen un embobinado de mayor resistencia y menor reactancia que el embobinado principal. En algunas ocasiones se conecta en el circuito una resistencia adicional.

Como la relación de resistencias a reactancias es mayor en el embobinado auxiliar que en el principal, su corriente estará atrasada del voltaje de línea un ángulo más pequeño que la corriente del principal, por lo cual estas corrientes diferirán en fase.

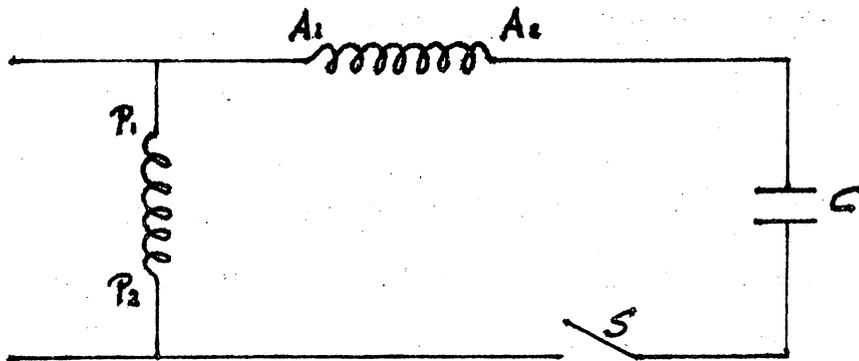


Estos dos tipos de polos producirán un campo rotatorio, que hará que arranque el motor. Cuando la máquina ha adquirido su velocidad nominal el interruptor de fuerza centrífuga S abrirá y desconectará el embobinado auxiliar.

b). - Capacitor.

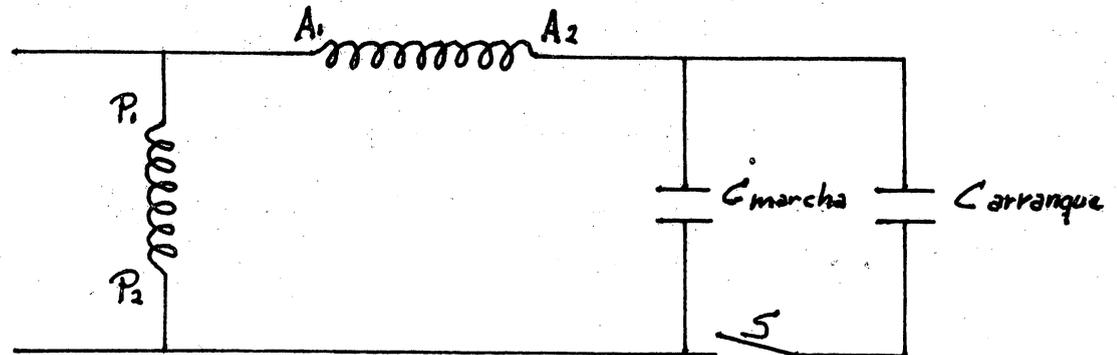
En virtud de que el campo perfecto es con 90° de defasamiento, a la conexión anterior se le sustituye la resistencia por un capacitor, obteniendo en estas condiciones el defasamiento de 90° .

En el diagrama siguiente se ilustra esta conexión:



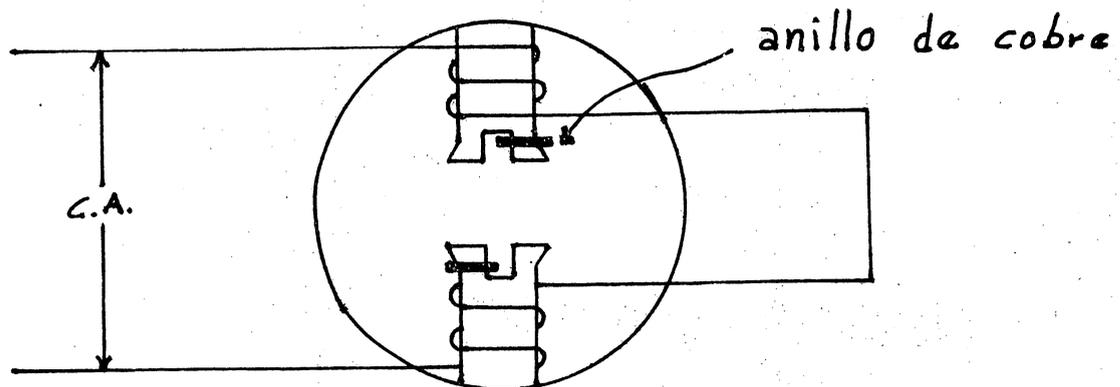
Pero, para una operación continua no es conveniente un defasamiento de 90° , por lo que cuando el motor vaya a trabajar en estas condiciones se utilizará un capacitor pequeño, en serie con la bobina auxiliar. Ahora, como este capacitor no es suficiente para el arranque, se le conectará otro capacitor de capacidad apropiada en paralelo. Este último capacitor se eliminará por medio de un interruptor de fuerza centrífuga una vez que el motor haya sido puesto en marcha.

Por lo tanto, el arreglo anterior consistirá de un capacitor de arranque y otro de marcha, quedando esquemáticamente su diagrama de conexiones como sigue:



c). - Polos sombreados.

Según se representa en la figura siguiente, para arrancar el motor de inducción por medio de este procedimiento se colocará un anillo de cobre en cada uno de los polos.



Estos anillos, en virtud de la variación del flujo en los polos, inducirán una fuerza electromotriz, tal que de acuerdo con la ley de Lenz, se opondrá a la causa que lo produjo, o sea, que debilitarán el campo en ese lugar. Debido a que solamente se debilita una parte de cada polo, esto producirá un par que moverá al motor.

Las desventajas que presenta este método de arranque son las siguientes:

- ° Tiene fuertes pérdidas de f.e.m.
- ° En el caso que se quiera invertir el sentido de giro de la máquina, será necesario abrir el motor con objeto de cambiar los anillos.

d) Tipo repulsión.

Se puede utilizar el mismo principio indicado con anterioridad en el motor de repulsión para el arranque de un motor de inducción monofásico. Se le deberá intercalar en su circuito un interruptor de fuerza centrífuga, de tal manera que, una vez en operación normal, el motor, opere dicho interruptor y abra la conexión de corto circuito, permitiendo así la operación normal de la máquina.