

105  
26



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**  
FACULTAD DE INGENIERIA

**PRACTICAS PARA LABORATORIO  
DE MAQUINAS ELECTRICAS**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:**  
**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**  
**P R E S E N T A N :**  
**LEONARDO RODRIGUEZ VILLA**  
**GONZALO AGUILAR HERNANDEZ**

**DIRECTOR DE TESIS :**  
**ING. AGUSTIN RODRIGUEZ FUENTES**

MEXICO, D. F.

1987



## **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 está 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.

## P R O L O G O

El presente trabajo se llevó a cabo con la idea de ayudar a los alumnos de la Facultad de Ingeniería en el desarrollo de las prácticas de la materia de Laboratorio de Máquinas Eléctricas, ya que debido a los cambios en los planes de estudios de la Facultad, no existía un manual de laboratorio que se apegara íntegramente al contenido de la materia.

El proyecto fue propuesto por el Ingeniero Agustín Rodríguez Fuentes y durante el desarrollo del mismo contamos con su asesoría y plena colaboración, lo que nos permitió llevar este trabajo a feliz término.

Este proyecto está pensado para un curso con duración de un semestre, por lo que no es necesario llevar a cabo todas las prácticas, sino que queda a criterio del profesor escoger las prácticas más necesarias. En la elaboración de cada una de éstas, se tomó en consideración el equipo y maquinaria con que cuenta el laboratorio de la escuela, para un mejor desarrollo de dichas prácticas. Realizamos físicamente las prácticas en las máquinas del laboratorio para constatar la posibilidad de la realización de cada una de éstas.

Este manual de laboratorio contiene pruebas en motores de corriente continua, de motores de inducción, máquinas síncronas, que son las máquinas eléctricas más utilizadas así como transformadores, tanto monofásicos como trifásicos.

Esperamos que este manual de laboratorio cumpla con su fin y sea de utilidad para los alumnos de la Facultad de Ingeniería.

## C O N T E N I D O

### 1. TRANSFORMADORES

- 1.1 Pruebas dieléctricas en un transformador
- 1.2 Rigidez dieléctrica del aceite
- 1.3 Resistencia óhmica de los devanados
- 1.4 Relación de transformación
- 1.5 Polaridad y secuencia de fases
- 1.6 Determinación del circuito equivalente del transformador monofásico
- 1.7 Conexiones y operación de transformadores trifásicos

### 2. MOTORES DE INDUCCION

- 2.1 Identificación de las partes estructurales de los diversos motores de inducción
- 2.2 Pruebas de saturación en vacío y con rotor bloqueado y comprobación de los datos de placa

### 3. MAQUINAS DE CORRIENTE DIRECTA

- 3.1 Identificación de las partes estructurales de la máquina de corriente directa
- 3.2 Arranque, protección y control de velocidad para motores con excitación independiente, en derivación y en serie
- 3.3 Características de las diferentes conexiones de motores de corriente directa

### 4. MAQUINAS SINCRONAS

- 4.1 Identificación de las partes estructurales de la máquina síncrona
- 4.2 Curvas características del alternador trifásico
- 4.3 Acoplamiento de alternadores
- 4.4 Métodos de arranque para motores síncronos y curvas "V"

ANEXO 1 Rectificadores controlados de silicio (S.C.R.)

ANEXO 2 Puente de Kelvin (Thompson)

ANEXO 3 Medición de la potencia en un círculo trifásico

## TRANSFORMADORES

## I. INTRODUCCION

Uno de los dispositivos más notables jamás desarrollados es el transformador. Su construcción es sencilla; no tiene partes móviles, puede colgarse de un poste expuesto a la intemperie todo el año y aún así cumplir su propósito día y noche sin requerir atención y con muy poco mantenimiento. Su eficiencia es sumamente alta y aunque su adquisición es costosa, su prolongada vida útil lo hace muy económico. Puede servir para una diversidad de propósitos: acoplamiento de impedancias, aislamiento de circuitos eléctricos, transformación de voltajes desfasaje y otros; cualquiera que sea su propósito, los principios operacionales no cambian — aunque el énfasis de sus características funcionales puede ser diferente. Nos dedicaremos a los transformadores de potencia y de distribución, los cuales constituyen elementos comunes en todo sistema de transmisión de potencia.

## a. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El acoplamiento inductivo entre dos devanados que abarcan un circuito magnético de acero fue descubierto en 1831 por M. Faraday, quien demostró el surgimiento de una f.e.m. en uno de en los devanados al variar la corriente en el otro.

La elaboración de los transformadores con circuito magnético cerrado dio comienzo al uso industrial de los transformadores para elevar la tensión al transmitir la energía por corriente alterna. El primer transformador de este tipo fue construido en 1884 por los hermanos John y Edward Hopkinson. Su circuito magnético en forma de "O" estaba compuesto de placa de acero aislada y de alambres. En ambas columnas del mismo se disponían alternativa y separadamente las bobinas de los devanados de alta y baja tensiones. Este transformador tenía buenas características de funcionamiento (corriente pequeña en vacío, pequeñas pérdidas por corrientes parásitas en el circuito magnético y alto rendimiento).

Varias modificaciones de transformadores monofásicos con circuito magnético cerrado (acorazado, anular y de columnas, fueron contruidos en 1885 por los electrónicos húngaros O. Blati,-

M. Deri y K. Tsipernovski, también fueron ellos los que inventaron el término "transformador", además, a Deri le pertenece la idea de conectar en paralelo los transformadores, la cual se utiliza mucho en la energética contemporánea.

En el desarrollo ulterior de los transformadores de potencia, influyó el enfriamiento por circulación de aceites propuesto por D. Svinbern en 1888.

Finalmente, en 1889 M.O. Dolivo - Dobrovoiski inventó el transformador trifásico, pero hasta 1891 fue patentado el transformador trifásico con columnas paralelas dispuestas en un plano, concepción estructural que no ha cambiado hasta en hoy día.

#### b. ELEMENTOS PRINCIPALES DE UN TRANSFORMADOR

Las partes del transformador destinadas para el proceso de transformación de la energía -el - circuito magnético y los devanados- se denominan partes activas. La transformación eficaz - de la energía eléctrica sólo se puede obtener en tales construcciones en las cuales los devanados estén abarcados por circuitos magnéticos cerrados hechos de un material ferromagnético de alta permeabilidad magnética que supera centenares de veces la constante magnética. Para obtener alta permeabilidad magnética, el circuito magnético no debe estar demasiado saturado y la densidad en él, con flujo magnético máximo, no debe superar  $1.4 \dots 1.6T$ .

El circuito magnético a núcleo de transformador debe estar construido de tal modo que en él - estén suficientemente debilitadas las pérdidas por corrientes parásitas y de histéresis que - surgen durante la remagnetización, esto se logra resolver tomando las siguientes medidas conjuntas:

1. Utilizando aceros magnéticamente suaves con pequeñas pérdidas por histéresis.
2. Empleando aceros con aleaciones especiales que proporcionan resistencia eléctrica específica aumentada.
3. Montando el circuito magnético con chapas de acero aisladas eléctricamente una de otra, cuyo espesor sea de  $0.35 \dots 0.5$  mm.

Los circuitos magnéticos de los transformadores suelen ser de dos tipos principales: de co -

lumnas y acorazados.

Los devanados constituyen los circuitos de alimentación y carga, pueden ser de una, dos o tres fases, y por la corriente y número de espiras, pueden ser de alambres, grueso o de barra. La función del devanado primario es crear un campo magnético con una pérdida de energía muy pequeña y la del devanado secundario utiliza el flujo para inducir una fuerza electromotriz. Ambos devanados son de cobre.

#### c. CLASIFICACION DE LOS TRANSFORMADORES

1. La forma de su núcleo.

Tipo de columnas, acorazado, envolvente y radial.

2. Por el número de fases.

Monofásico y trifásico.

3. Por el número de devanados.

Dos devanados y tres devanados.

4. Por el medio refrigerante.

Aire, aceite y líquido inerte.

5. Por el tipo de enfriamiento.

OA, OW, OW/A, OA/AF, OA/FA/FA, FOA, OA/FA/FOA, POW, A/A, AA/F

6. Por la regulación.

Regulación fija, variable con carga variable y sin carga.

7. Por la operación.

De potencia, distribución, de instrumento, de horno eléctrico, de ferrocarril.

Clasificación de ensayos de máquinas eléctricas. Ensayar una máquina eléctrica significa someterla a una serie de pruebas, con el fin de verificar si dicha máquina responde a los requisitos de una buena construcción y buen funcionamiento, según especificación de las normas establecidas. Los ensayos pueden clasificarse en:

1. Ensayos de carácter general.
2. Ensayos de carácter particular.

Se clasifican los ensayos de carácter general los que se refieren a todos tipos de máquinas como por ejemplo: los ensayos de calentamiento, prueba de aislamiento, etc.

Asimismo, se clasifican como ensayos de carácter particular los que difieren de una máquina a otra, por ejemplo: el ensayo para determinar la característica de funcionamiento (en vacío bajo carga, etc.) y el rendimiento. Este último ensayo (rendimiento) de gran importancia, ofrece la particularidad de ser, generalmente, de ejecución muy diferente de una a otra máquina.

## PRACTICA NO. 1.1 TITULO PRUEBAS DIELECTRICAS EN UN TRANSFORMADOR

## OBJETIVO GENERAL

Comprobar el estado en que están los aislamientos de los devanados de un transformador antes de ponerlo en servicio.

En esta práctica se harán las pruebas a los aislamientos de los devanados y al aceite.

## 1.1 Resistencia de aislamiento

1.1.1. Objetivo. La medición de la resistencia de aislamiento sirve para establecer el grado de deterioro de los aislamientos.

## 1.2 Consideraciones teóricas.

El obtener valores bajos de resistencia de aislamiento no indica necesariamente que el aislamiento sea deficiente, sino que puede existir suciedad o humedad en los aislamientos, por lo que será necesario indicar el tratamiento adecuado.

En caso de que la resistencia de aislamiento nos de un valor bajo se procede a filtrar el aceite para quitarle la suciedad y a centrifugarlo para separar el agua del aceite y de esa forma eliminar la humedad. Una vez hecho este proceso, se vuelve a realizar la prueba de aislamiento y si nuevamente nos da un valor bajo, se procede a cambiar dicho aceite.

Resistencia típicas:

15 M $\Omega$

25 M $\Omega$

40 M $\Omega$

Para tensiones de servicio:

hasta 1000V

de 1000V a 5000V

más de 5000V

La medición generalmente se efectúa con un "Megger"

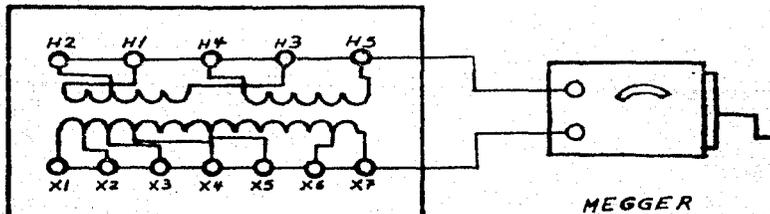
## 1.1.3 Datos de placa y equipo utilizado.

#### 1.1.4. Desarrollo de la práctica.

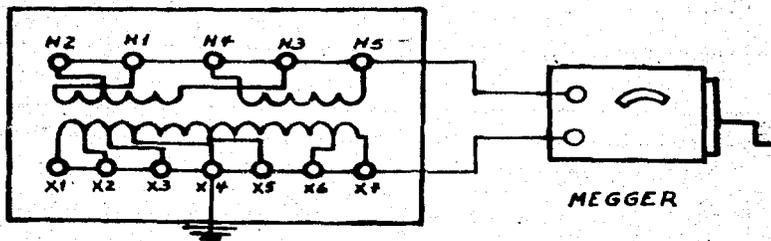
Las resistencias a determinar en un transformador son: la resistencia que presenta un devanado con respecto a otro y la que presenta un devanado con respecto al núcleo.

El "Megger" consta, básicamente, de una fuente de c.d. y un indicador de resistencia en megohms, la capacidad de la fuente de c.d. generalmente es baja, ya que la finalidad es ver el estado en que se encuentra el aislamiento, es decir, esta es una prueba indicativa no destructiva, de tal forma que si el aislamiento este débil, no lo agrave.

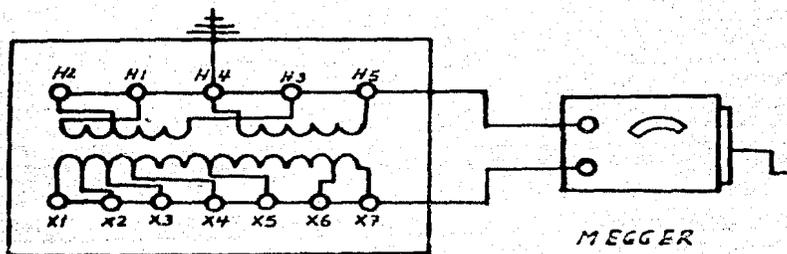
DIAGRAMAS ILUSTRATIVOS PARA EL ENSAYO DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO CON MEGGER



Devanado de alto voltaje contra devanado de bajo voltaje



Devanado de alto voltaje contra devanado de bajo voltaje más tanque a tierra



Devanado de bajo voltaje más tanque a tierra contra devanado de alto voltaje.

#### 1.1.5 Resultados y observaciones.

MEDICION	RESISTENCIA DE AISLAMIENTO	RESULTADOS
1		
2		
3		

### 1.1.6. Preguntas

1. ¿Por qué no se mide la resistencia de aislamiento con un ohmetro o un medidor tipo-  
puente?
2. ¿Qué líquido utilizan los transformadores cuando se desea evitar al máximo el riesgo  
de un incendio, por ejemplo un transformador para un teatro o cine?
3. ¿Qué haría si en un transformador seco (enfriado por aire), la resistencia de aisla-  
miento tuviera un valor bajo?
4. ¿Qué función cumple el aceite en un transformador?

## PRACTICA NO. 1.2 TITULO RIGIDEZ DIELECTRICA DEL ACEITE

## 1.2.1 Objetivo

Conocer las condiciones en que se encuentra el aceite del transformador (contenido de humedad y otro tipo de impurezas).

## 1.2.2. Consideraciones teóricas.

Como es sabido, en los transformadores sumergidos en aceite, este tiene la función de refrigerante y de aislante. El valor promedio obtenido no debe ser menor de 25 kv para considerar que el aceite está en buen estado.

## 1.2.3. Datos de placa y equipo utilizado.

## 1.2.4. Desarrollo de la prueba.

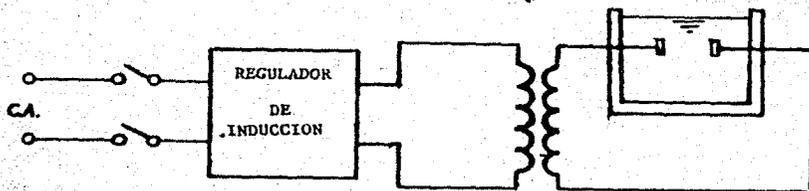
La rigidez dieléctrica del aceite se determina con un dispositivo construido de material aislante llamado "Copa". Este contiene dos electrodos en el interior. Los pasos a seguir son los siguientes:

- a. Lévese la copa con el mismo aceite que se va a probar; el aceite toma de la parte inferior del transformador (es la parte donde posiblemente exista la mayor cantidad de impurezas).
- b. Calibre los electrodos a la separación de 0.25 cm.
- c. Tome una muestra de aceite en la copa y deje reposar tres minutos, hasta que esté en reposo y sin burbujas, el aceite debe cubrir los electrodos.
- d. Conecte las terminales de una fuente de potencia a los electrodos, aplique tensión a razón de 3kv por segundo, aproximadamente, hasta lograr la ruptura y to

ma la lectura correspondiente a la cual ocurrió.

- e. Agite el aceite y deje reposar durante un minuto, aplique nuevamente potencial y repita la operación tres veces.
- f. Repita todo el proceso con dos muestras más de aceite.

DIAGRAMA ILUSTRATIVO PARA EL ENSAYO Y RIGIDEZ DIELECTRICA DEL ACEITE



	LECTURA	RIGIDEZ DIELECTRICA	OBSERVACIONES
MUESTRA 1	1		
	2		
	3		
	4		
MUESTRA 2	1		
	2		
	3		
	4		
MUESTRA 3	1		
	2		
	3		
	4		

### 1.2.5. Resultados y observaciones.

### 1.2.6. Preguntas.

- a. ¿Qué se puede hacer si el aceite no tiene la rigidez dieléctrica mínima requerida?
- b. ¿A qué se puede deber que no cumpla con dicho valor?
- c. ¿Qué funciones realiza el aceite en un transformador?
- d. ¿Qué tipo de aceite se utiliza?

## PRACTICA NO. 1.3 TITULO RESISTENCIA OHMICA DE LOS DEVANADOS

## 1.3.1. Objetivo.

Foder calcular las pérdidas por efecto Joule. Se realiza por temperatura, obtener por comparación de resistencias el calentamiento de los devanados.

## 1.3.2. Consideraciones teóricas.

Las mediciones de las resistencias deben hacerse con la mayor exactitud posible, al igual que la de la temperatura a la cual se hace la medición, ya que la resistencia del cobre varía con la temperatura. Se mide la temperatura del aceite teniendo cuidado que por esas bobinas no haya pasado corriente en un periodo de seis horas, - - cuando menos.

a. Se debe obtener la resistencia del devanado primario como del secundario, en el caso de un transformador trifásico, se debe obtener la resistencia de cada una de las fases en ambos devanados.

b. Los métodos más usados para medir las resistencias de un transformador son:

1. Con puentes de Kelvin y Wheatstone.
2. Por el método de la caída de tensión (Ley de Ohm).

de preferencia haga las mediciones con puente de resistencia, si las hace por el método de caída de tensión, tome como mínimo cuatro lecturas de corriente - con sus correspondientes caídas de tensión, calcule la resistencia en cada caso y obtenga un valor promedio.

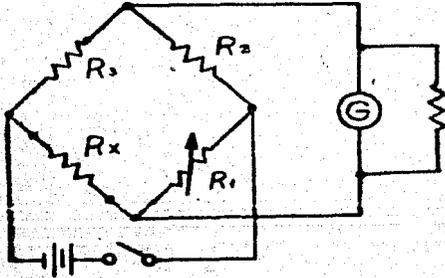
c. La medición de la resistencia de los devanados se hace a la temperatura ambiente, sin embargo, hay que corregir dicho valor a la temperatura de trabajo (por norma 75°C). La siguiente fórmula nos permite hacer la corrección por temperatura.

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{234 + T_1}{234 + T_2}$$

### 1.3.3. Datos de placa y equipo utilizado.

### 1.3.4. Desarrollo de la prueba

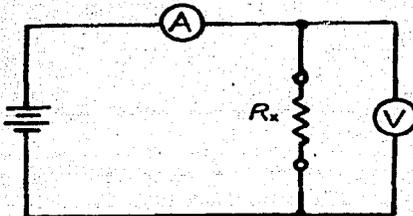
Si la medición se hace con puente, en la siguiente figura se ilustra la forma de hacerlo.



$$\frac{R_1}{R_x} = \frac{R_2}{R_3}$$

$$R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2}$$

Si la medición se hace por el método de la caída de tensión, el circuito utilizado es el siguiente:



$$R_x = \frac{V}{I}$$

**1.3.5. Resultados y observaciones.**

Mida la resistencia de los devanados que se indican en la tabla.

	RESISTENCIA MEDIDA ( $\Omega$ )	TEMPERATURA ( $^{\circ}\text{C}$ )	RESISTENCIA MEDIDA ( $\Omega$ )	OBSERVACIONES
$X_1 - X_2$				
$X_1 - X_3$				
$X_1 - X_4$				
$X_1 - X_5$				
$X_1 - X_6$				
$X_1 - X_7$				

Calcule las pérdidas por efecto Joule del transformador.

**1.3.6. Preguntas.**

- ¿Qué devanado debe tener más resistencia, el de alto voltaje o el de bajo voltaje?
- ¿Cómo debe ser, en general, la resistencia de los devanados de un transformador?

## PRACTICA NO. 1.4

## TITULO RELACION DE TRANSFORMACION

## 1.4.1. OBJETIVO

Determinar la relación de vueltas y de voltajes de un transformador monofásico.

## 1.4.2. CONSIDERACIONES TEORICAS

Cuando por una bobina circula una corriente eléctrica, se produce un campo magnético que es más intenso en el interior de dicha bobina que en su exterior; si la corriente es alterna senoidal, el campo magnético también varía en la misma forma.

Si dicho campo magnético atraviesa a otra bobina en ésta se induce una tensión - alterna senoidal de la misma frecuencia; para hacer que este efecto sea más intenso, ambas bobinas se montan sobre un núcleo formado por láminas de hierro entre sí, como se muestra en la figura 1.

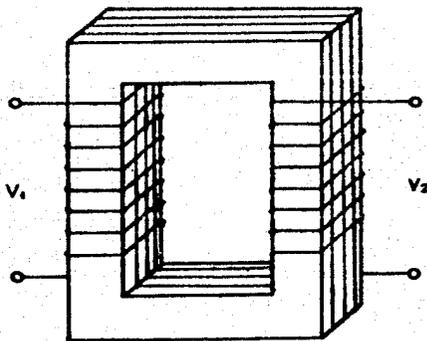


Figura 1

Ambos voltajes se relacionan, de acuerdo con la ley de Faraday.

$$V_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad y \quad V_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Considerando que el flujo de ambas bobinas es el mismo (se desprecia el flujo de dispersión), tenemos:

$$\frac{V_1}{N_1} = -\frac{d\phi}{dt} \quad \text{y} \quad \frac{V_2}{N_2} = -\frac{d\phi}{dt}$$

Iguando ambas expresiones:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

A esta relación se la conoce como relación de transformación y se le designa con la letra "a"

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

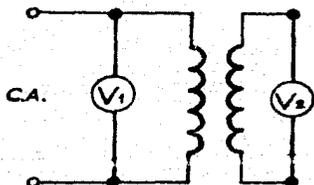
#### 1.4.3. Equipo utilizado

#### 1.4.4. DESARROLLO DE LA PRUEBA

Existen varios métodos para determinar la relación de la transformación, en esta práctica vamos a emplear dos métodos y compararemos los resultados de ambos ensayos.

a. El método de los dos voltímetros.

Se conecta el transformador como se muestra en la figura 2.



Para determinar la relación de transformación, se miden los voltajes en las devanadas de alto y bajo voltaje, se recomienda conectar la fuente de C.A. en el lado de bajo voltaje y que, de preferencia, sea el voltaje que viene en el dato de placa.

Haga el experimento para los bornes indicados en la siguiente tabla:

DEVANADO	$V_1$ (V)	DEVANADO	$V_2$ (V)	$a = \frac{V_1}{V_2}$
$H_1 - H_5$		$X_1 - X_3$		
$H_1 - H_5$		$X_1 - X_5$		
$H_1 - H_5$		$X_1 - X_7$		

b. Por medio del T.T.R. (Test Turn Ratio)

Con ayuda de este aparato es posible obtener directamente la relación de transformación. Dicho aparato consta de un generador, un transformador de patrón y medidoras, como muestra la figura 3. Por medio de la comparación del transformador en prueba con el transformador patrón se determina la transformación.

Anote los valores obtenidos con el T.T.R. conectado en los mismos bornes - que en la prueba anterior.

PRIMARIO	SECUNDARIO	RELACION DE TRANSFORMACION ( $\sigma$ )
$H_1 - H_2$	$X_1 - X_2$	
$H_1 - H_5$	$X_1 - X_5$	
$H_1 - H_5$	$X_1 - X_5$	

## 1.4.5.

## RESULTADOS Y PREGUNTAS

- Defina la relación de transformación y diga las aplicaciones que tiene conocerla.
- Investigue el método de la resistencia variable (sistema potenciométrico) para determinar la relación de transformación.
- ¿Qué es la relación de transformación de corrientes?, ¿Cómo se determina?, ¿Qué relación tiene con la relación de vueltas y voltajes?
- Determine la relación de transformación que existe en las siguientes conexiones de transformadores trifásicos:
  - Delta - estrella
  - Estrella - estrella
  - Estrella - zig zag
- ¿Por qué en el método de los dos voltímetros se recomienda conectar la fuente de C.A. en el lado de bajo voltaje?

## PRACTICA NO. 1.5

## TITULO POLARIDAD Y SECUENCIA DE FASES

## 1.5.1. OBJETIVO

Determinar la correspondencia entre terminales de un transformador, tanto monofásicos como trifásicos.

## 1.5.2. CONSIDERACIONES TEORICAS.

Para poder acoplar un transformador a otros en paralelo, es necesario conocer su diagrama vectorial para la cual es necesario conocer las marcas de polaridad (en caso de transformadores monofásicos) y la secuencia de fases (en caso de transformadores trifásicos).

En los transformadores monofásicos se acostumbra colocar dos pequeños puntos llamados marcas de polaridad, cuyo significado es el siguiente: una corriente alterna entrando por la terminal puntada de un embobinado, establece un flujo en el núcleo en tal dirección, que los voltajes inducidos en los dos embobinados tienen la misma polaridad relativa, como el mostrado en la figura 1.

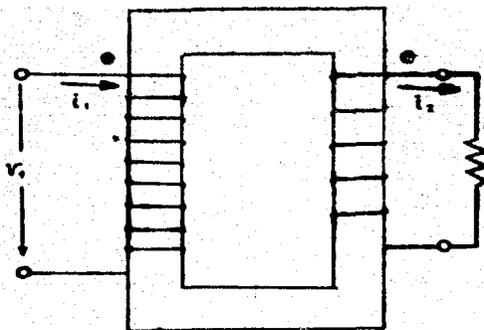


Figura 1

Los transformadores trifásicos se alimentan con una tensión trifásica senoidal, que está formada por tres tensiones desfasadas entre sí  $120^\circ$ , la tensión obtenida también es trifásica y con el mismo defasamiento entre dichas tensiones (la tensión secundaria puede ser mayor o menor a la tensión primaria). Como ya sabemos, para conectar dos transformadores en paralelo, es necesario que entre ambos haya concordancia de fases. Un paso anterior es determinar la secuencia de fases del transformador. La secuencia de fases es la que aplicada a un motor trifásico, lo haría girar a favor de las manecillas del reloj (a la derecha). -  
Figura 2.

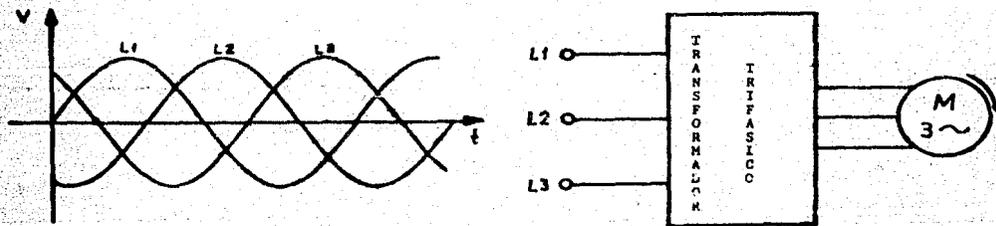


Figura 2

### 1.5.3. EQUIPO UTILIZADO

## 1.5.4. DESARROLLO DE PRUEBAS

1.5.4.1. Marca de polaridad, se determina la polaridad por dos métodos y se verifica que el resultado es el mismo en las dos pruebas.

## a. Método del golpe inductivo.

Conecte el transformador como se muestra en la figura 3.

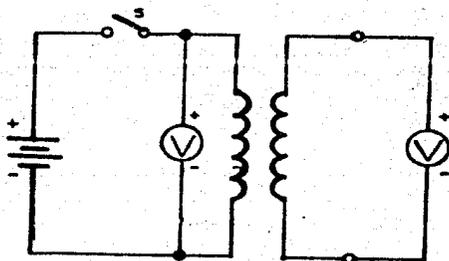


Figura 3

Se debe ajustar la fuente de C.D. a un voltaje de aproximadamente 15V y el voltímetro que se conecta en el secundario, debe estar en un rango bajo.

Si al cerrar el interruptor, el voltímetro marca hacia dentro de la escala, significa que le fue aplicada a su borne (+) una tensión cuya polaridad es positiva con relación a su otro borne esto quiere decir que la terminal del transformador conectado al borne (+) del voltímetro es la correspondiente a la terminal del devanado excitado, conectado al borne (+) de la batería.

Una deflexión en sentido contrario a la escala nos indicará que al borne (-) del voltímetro le fue aplicado un voltaje positivo luego, la terminal conectada a este borne será la correspondiente a la terminal (+) del devanado excitado.

Conecte el transformador como se indica en la figura 3, conectando en los bornes que se indican en la siguiente tabla y anote los datos obtenidos.

PRIMARIO -      +	SECUNDARIO -      +	DEFLEXION HACIA	RESULTADO
$H_5 - H_1$	$X_7 - X_1$		
$H_5 - H_1$	$X_5 - X_1$		
$H_5 - H_2$	$X_3 - X_1$		
$H_2 - H_5$	$X_3 - X_1$		

- b. Por comparación de un transformador cuyas marcas de polaridad se conocen T.T.R. (Test Turn Ratio).

El equipo T.T.R. consta de un transformador cuyas marcas de polaridad son conocidas de antemano, un generador y medidores como se muestra en la figura 4. Si la aguja del medidor se mueve hacia la izquierda, los bornes del primario y del secundario considerados como los puntos donde entra y sale la corriente, respectivamente, tiene la misma marca de polaridad y si la aguja se mueve a la derecha, las marcas de polaridad son contrarias.

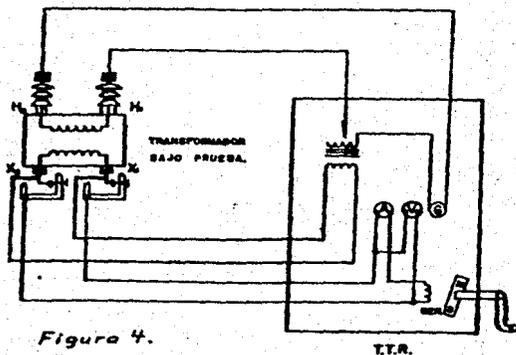


Figura 4.

T.T.R.

Determine las marcas de polaridad en los mismos bornes que en el ensayo anterior y anote los datos obtenidos en la siguiente tabla.

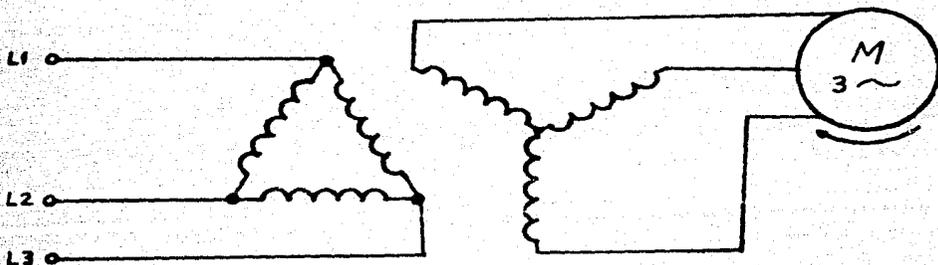
PRIMARIO	SECUNDARIO	LECTURA	RESULTADOS
$H_1 - H_7$	$X_1 - X_7$		
$H_1 - H_5$	$X_1 - X_5$		
$H_2 - H_5$	$X_1 - X_3$		
$H_2 - H_3$	$X_1 - X_3$		

#### 1.5.4.2 SECUENCIA DE FASES.

Se va a determinar la secuencia de fases por medio de un secuencímetro y por medio de un motor de inducción y se van a comparar los resultados obtenidos en ambas pruebas.

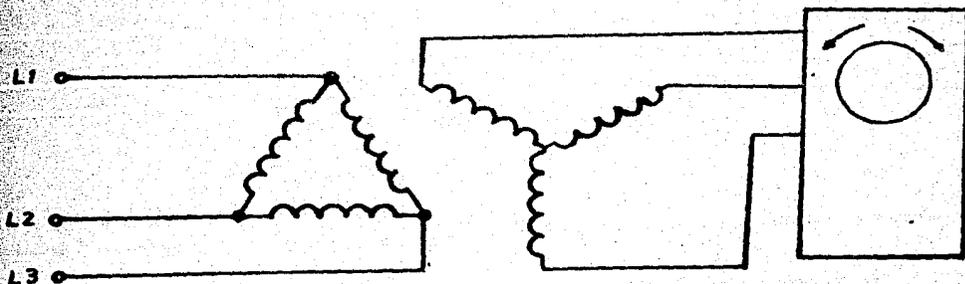
##### a. Por medio de un motor de inducción.

Conecte el motor de inducción a la salida del transformador y observe el sentido de giro del motor, si el motor gira en contra de las manecillas del reloj (a la izquierda), cambie la conexión (basta intercambiar dos conductores) para que el motor gire a favor de las manecillas del reloj (a la derecha). Y en estas condiciones, el transformador tiene la secuencia adecuada. Conecte el transformador en la conexión delta - estrella, como se muestra en la figura 5.

*Figura 5*

b. Por medio del secuencímetro.

Conecte el transformador en la misma conexión que en la prueba anterior - y alimente al secuencímetro y compruebe que efectivamente tiene la secuencia correcta.

*Figura 6*

**1.5.5. PREGUNTAS Y CONCLUSIONES**

- a. ¿Qué sucede si conectamos en paralelo dos transformadores con diferente polaridad?
- b. ¿Qué sucede si conectamos en paralelo dos transformadores trifásicos con diferente secuencia de fases?
- c. ¿Cómo se puede cambiar la secuencia de fases a un transformador trifásico?
- d. ¿Cómo se puede cambiar la polaridad a un transformador monofásico?

## PRACTICA NO. 6

TITULO DETERMINACION DEL CIRCUITO EQUIVALENTE  
DEL TRANSFORMADOR MONOFASICO

## 1.6.1 OBJETIVO

Determinar los parámetros que producen pérdidas en el transformador, mediante las pruebas de circuito abierto y de corto circuito, así como obtener el circuito equivalente aproximado referido al primario.

## 1.6.2. CONSIDERACIONES TEORICAS

## a. Pruebas de circuito y de corto circuito

Prueba de circuito abierto, cuando a un transformador no se le conecta carga y se alimenta con su voltaje nominal, existen pérdidas de energía, que se deben a la continua magnetización y desmagnetización que se produce en el núcleo del transformador llamadas pérdidas por histéresis y a las corrientes inducidas que circulan en dicho núcleo, llamadas corrientes parásitas. Estas pérdidas se conocen con el nombre de pérdidas en el hierro, se pueden reducir utilizando materiales magnéticamente adecuados, laminando el núcleo y agregándole silicio más no eliminarse completamente.

Prueba de corto circuito, si por un transformador circulan las corrientes nominales producen calentamiento en los devanados, conocidas como pérdidas en el cobre. Estas pérdidas pueden medirse conectando el transformador en un corto circuito y aplicándole una tensión pequeña que haga que circulen las corrientes nominales, la potencia medida corresponde a dichas pérdidas.

Con esta misma prueba se puede obtener el voltaje de corto circuito, que no es más que el voltaje obtenido en esta prueba ( $V_{cc}$ ), expresado como un porcentaje nominal, esto es:

$$V_{cc}(\%) = \frac{V_{cc}(V)}{V_n(V)} \times 100$$

También es posible obtener la corriente que circularía cuando el transformador quedara en corto circuito y se le aplicara el voltaje nominal.

$$I_{cc}(A) = \frac{I_n}{V_{cc}(\%)} \times 100$$

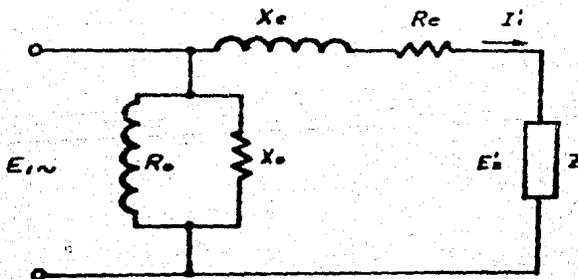
Y la caída de voltaje cuando el transformador pasa de su operación en vacío a su operación a plena carga:

Investigar:

- Qué es un material magnéticamente blando
- Qué es un material magnéticamente duro
- En qué consisten las curvas de magnetización y de histéresis

b. Circuito equivalente

Los problemas relacionados con las corrientes y los voltajes en los transformadores se pueden resolver con gran precisión por medio del circuito equivalente del transformador. Existen varios circuitos equivalentes de transformadores, unos más exactos que otros. Nosotros obtendremos un circuito equivalente aproximado de un transformador, como el mostrado en la figura.



Donde:

$$E_2 = \frac{N_1}{N_2} E_2' ; R_c = R_1 + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_2$$

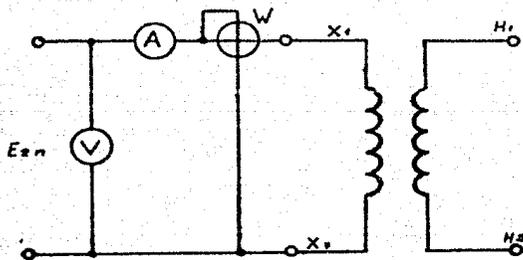
$$I_1 = \frac{N_1}{N_2} I_2' ; X_c = X_{11} + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 X_{22}$$

$$Z = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_L$$

## 1.6.3. EQUIPO UTILIZADO

## 1.6.4. DESARROLLO DE LA PRUEBA

- a. Por medio de la prueba de circuito abierto podemos conocer el valor de los parámetros  $R_o$  y  $X_o$ , de acuerdo con el siguiente circuito. Es recomendable que la prueba se haga del lado de baja tensión.

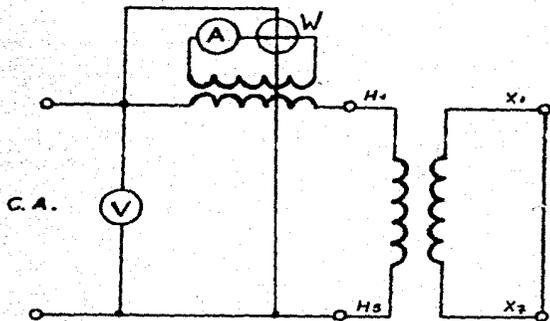


Donde :

$$R_o = \frac{E}{I_o \cos \varphi} \quad ; \quad \cos \varphi = \frac{P}{VI} \quad ; \quad X_o = \frac{E}{I_o \sin \varphi}$$

- b. Por medio de la prueba de corto circuito obtenemos los parámetros  $R_e$  y  $X_e$ . En esta prueba se pone en corto circuito el transformador y se va aumentando de la tensión desde cero volts hasta que circulan las corrientes nominales. Se recomienda aplicar el voltaje del lado del alto voltaje y hacer el corto

en el lado de bajo voltaje. Se debe utilizar un transformador de corriente debido a que en la prueba circulan las corrientes nominales (anote la relación de transformación del transformador de corriente).



Donde :

$$R_e = \frac{P}{I^2}$$

$$Z_e = \frac{V}{I}$$

$$X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2}$$

#### 1.6.5. RESULTADOS Y OBSERVACIONES

¿Qué factor de potencia tiene el transformador cuando se encuentra en vacío? -  
 ¿A qué se debe que tenga este valor?

¿Qué factor de potencia tiene el transformador cuando se encuentra en corto circuito?, ¿A qué se debe que tenga este valor?

¿De qué valor resultaron las pérdidas en el hierro y las pérdidas en cobre del transformador?

En base a estos valores, obtenga el rendimiento del transformador cuando trabaja a plena carga si:

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + P_{fe} + P_{cu}} \times 100$$

¿Corresponde a la potencia de entrada o a la potencia de salida, el dato de potencia viene en la placa del transformador? Justifique su respuesta.

Dibuje el circuito equivalente del transformador, anotando los valores obtenidos en las pruebas.

Haga el diagrama vectorial del transformador considerando una carga resistiva.

Obtenga:

El voltaje de corto circuito  $V_{cc}(V)$ , la corriente de corto circuito  $I_{cc}(A)$ , y la caída de voltaje  $V(v)$  del transformador. Con ayuda de este último valor, determine el voltaje en vacío y el porcentaje de regulación de voltaje del transformador.

$$\text{Donde : } \%Reg = \frac{V_{20} - V_{2n}}{V_{2n}} \times 100 \quad ; \quad V_{20} = V_{2n} + \Delta V (V)$$

¿A qué cree que se deba que en la prueba de corto circuito el voltaje se aplica en el lado de alto voltaje y hacer el corto circuito en el lado de bajo voltaje, y en la prueba de circuito abierto el voltaje se aplica en el lado bajo de bajo-voltaje?. ¿Qué pasaría si se hicieran las pruebas en forma contraria?

## PRACTICA NO. 1.7

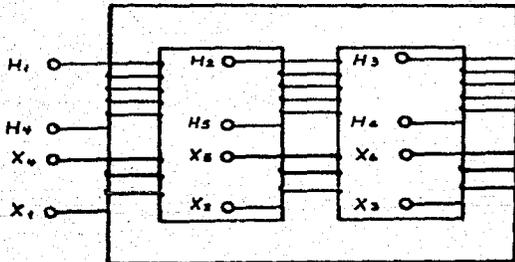
## TÍTULO CONEXIONES Y OPERACIONES DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

## 1.7.1. OBJETIVO

Comprender las principales conexiones de transformadores trifásicos, así como sus aplicaciones más generales.

## 1.7.2. CONSIDERACIONES TEÓRICAS

Los transformadores trifásicos constan de 6 bobinas montadas sobre un mismo núcleo. Tres de ellos forman el primario y las otras tres el secundario, como se muestra en la figura siguiente:



Tanto las bobinas que forman el primario como las que forman el secundario, pueden conectarse en delta o en estrella, pudiéndose tener las siguientes conexiones:

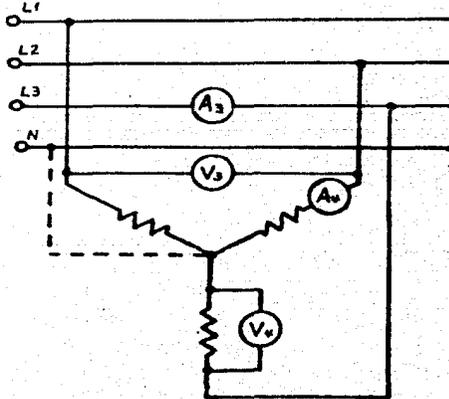
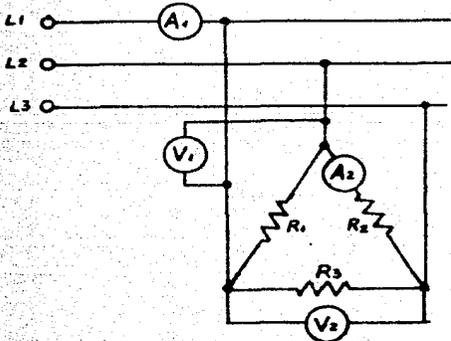
- Conexión delta - delta
- Conexión estrella - estrella
- Conexión delta - estrella
- Conexión estrella - delta

Investigar las características y aplicaciones de las conexiones mencionadas.

En los circuitos trifásicos convencionales existen dos voltajes diferentes (voltajes de línea y de fase) y dos corrientes también diferentes (corrientes de línea y de fase) aún en circuitos balanceados y es necesario poder identificar cual es cada uno de ellos, ya que por ejemplo, la potencia aparente en un circuito trifásico balanceado se calcula con la siguiente fórmula:

$$P_{ap} = S = \sqrt{3} V_L I_L$$

Y sería incorrecto utilizar corrientes o voltajes de fase en esta fórmula. La siguiente figura muestra cada una de dichas magnitudes en la conexión delta y en la conexión estrella.



El voltaje medido entre dos líneas que alimentan a la carga (en este caso las resistencias) se llama voltaje de línea  $V_L$  (voltímetros  $V_1$  y  $V_3$ ).

El voltaje medido directamente a cualquiera de las resistencias se llama voltaje de fase  $V_f$  (voltímetros  $V_2$  y  $V_4$ ).

La corriente que se mide en la línea de alimentación se llama corriente de línea  $I_l$  (amperímetro  $A_1$  y  $A_3$ ).

La corriente que se mide directamente en la resistencia se llama corriente de fase  $I_f$  (amperímetros  $A_2$  y  $A_4$ ).

Las definiciones anteriores son válidas para generadores como para consumidores.

La conexión delta no tiene neutro. En el caso de la conexión estrella el neutro sirve de protección para obtener dos voltajes, en caso de que la carga esté balanceada por el neutro no circula corriente.

Tarea: investigar las relaciones que existen entre los valores de voltaje y corriente y corriente de línea, con los valores de voltaje y corriente de fase para la conexión delta como para la conexión estrella.

### 1.7.3. EQUIPO UTILIZADO

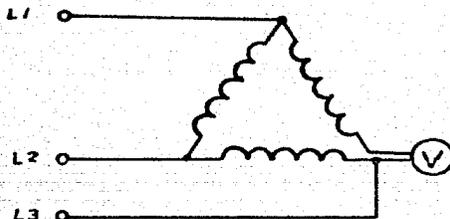
### 1.7.4 DESARROLLO DE LA PRUEBA

- a. Identificación de la conexión delta y de la conexión estrella.
  - Identificar primario y secundario por medio de un puente de Kelvin.

El devanado de alta tensión está formado por muchas espiras de calibre delgado, y el de baja tensión está formado por pocas espiras de calibre grueso.

Una vez identificados los devanados de alta y baja tensión, compárelos con los datos de placa del transformador y diga cual devanado es el primario, -- y cual es el secundario.

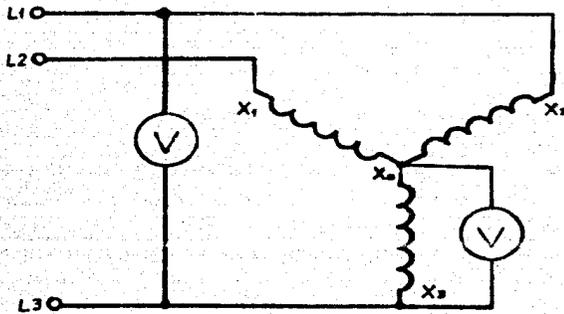
En el devanado primario forme una delta, comprobando que la conexión es correcta, con el siguiente circuito.



Si la conexión es correcta el voltímetro no debe indicar ningún voltaje. - Realice tres mediciones, intercambiando de lugar las bobinas y anote los valores obtenidos.

En el devanado secundario forme una estrella, comprobando que la conexión es correcta, midiendo los voltajes de línea y de fase, compruebe que la relación entre estos dos voltajes sea correcta.

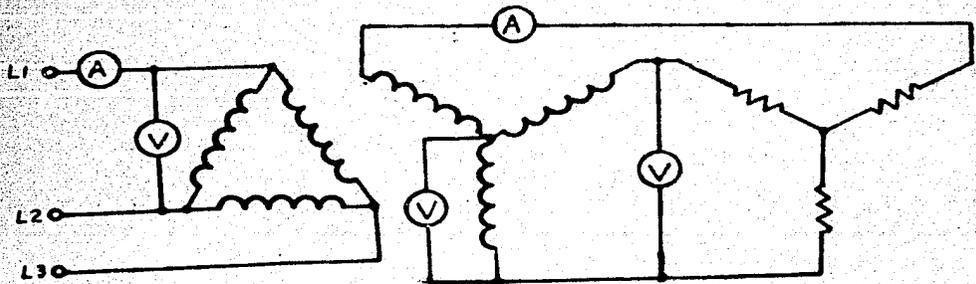
Haga tres mediciones, invirtiendo la posición de cada una de las bobinas.



Anote los valores obtenidos y la relación que existe entre estos.

b. Comprobación de la conexión correcta en delta y estrella

Conecte el transformador en la conexión delta-estrella y mida los voltajes y corrientes, tanto de línea como de fase, conecte las resistencias en  $\Delta$  como en  $Y$ .



Calcule el valor que deben tener las resistencias para no sobrepasar la potencia nominal del transformador.

### 1.7.5. RESULTADOS Y OBSERVACIONES

Las resistencias de los devanados fueron:

$R_{11} =$  \_\_\_\_\_  $R_{12} =$  \_\_\_\_\_  $R_{13} =$  \_\_\_\_\_

$R_{23} =$  \_\_\_\_\_  $R_{21} =$  \_\_\_\_\_  $R_{23} =$  \_\_\_\_\_

¿Cuál es el devanado de alta tensión y cuál el de baja?

¿Cuál es el primario y cuál el secundario?

¿Es un transformador elevador o reductor?

¿A qué se debe que al cerrar la delta, en el inciso 1.7.4 a., el voltaje medido no es cero? Obtenga analíticamente y gráficamente el valor de dicho voltaje.

## PRACTICA NO. 2.1

TITULO IDENTIFICACION DE LAS PARTES ESTRUCTURALES  
DE LOS DIVERSOS MOTORES DE INDUCCION

## 2.1.1. OBJETIVO

Conocer las partes principales de los motores jaula de ardilla y rotor devanado (también llamado motor de anillos rozantes), para diferenciarlos entre sí y de otros motores eléctricos.

## 2.2.2. CONSIDERACIONES TEORICAS

Los motores de jaula de ardilla son los motores eléctricos de uso más generalizado, debido al poco mantenimiento que necesitan, a su fácil construcción así como a su buen par en servicio, la única desventaja que tiene es su par de arranque - pequeño, cuando se requiere un par de arranque grande, se utiliza el motor con rotor devanado.

Principio de funcionamiento: cuando se aplica un voltaje trifásico a tres bobinas (o grupos de bobinas) desplazadas  $120^\circ$  entre sí, se produce un campo magnético giratorio. Figura 1.

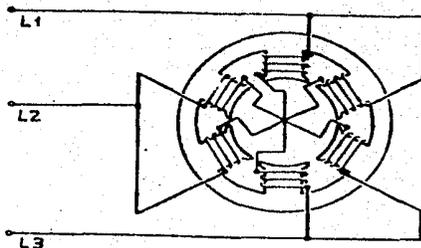
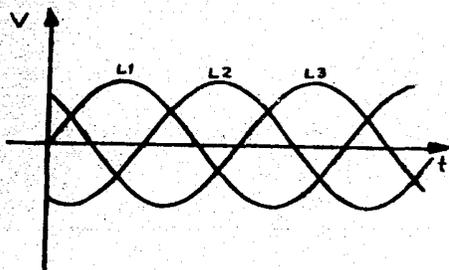


Figura 1

Cuando el voltaje  $V_{L_1}$  tiene su valor máximo en la bobina 1, se produce un polo norte y en las otras dos bobinas un sur; un instante después el voltaje  $V_{L_2}$  tiene su valor máximo y en la bobina dos se produce un polo norte y en las otras dos bobinas un sur y así sucesivamente, produciéndose de esa forma un campo magnético giratorio. La velocidad del campo magnético giratorio depende de la frecuencia de la red y de la conexión que tengan las bobinas entre sí (o sea del número de polos).

El estator del motor de jaula de ardilla o de rotor devanado. Está formado por estas bobinas que van montadas en las ranuras de un paquete de láminas de aceroasiladas entre sí, el estator está fijado a su vez, en la carcasa que es de hierro fundido.

El rotor del motor de jaula de ardilla está formado por barras de aluminio que se funden a presión sobre un paquete de láminas de hierro, quedando la jaula en corto circuito, mientras que el rotor de un motor de anillos rozantes consta de bobinas de cobre alojadas en las ranuras del paquete de chapas del rotor y van conectadas a tres anillos rozantes.

El campo magnético giratorio induce un voltaje, en el rotor como el rotor de un motor de jaula de ardilla se encuentra en corto circuito (el motor de rotor devanado se cierra por medio de tres resistencias conectadas a los anillos rozantes) este voltaje produce corrientes, por lo que en el devanado del rotor también existe un campo magnético. De acuerdo a la Ley de Lenz, el campo magnético tiene una dirección tal que se opone a la causa que lo produce, haciendo que el rotor gire en la misma dirección que el campo magnético giratorio.

Las resistencias que se utilizan en el motor de anillos rozantes, tienen la función de aumentar su momento de arranque así como reducir las altas corrientes que se producen en el arranque. Una vez que el motor alcanza su velocidad nominal, se eliminan las resistencias, quedando el rotor en corto circuito. Figura-2.

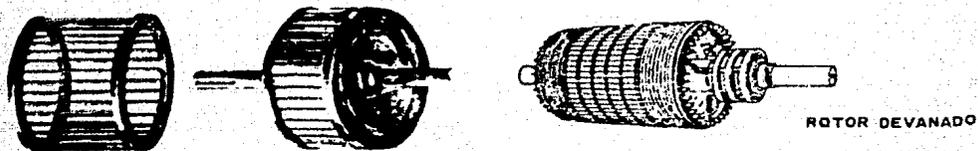


Figura 2

Investigar la forma en que se produce el campo magnético giratorio en los motores de inducción monofásicos.

#### 2.1.3. EQUIPO UTILIZADO

#### 2.1.4. DESARROLLO DE LA PRUEBA

Al aumentar la carga, la velocidad del motor disminuye, de tal forma que al dejarlo sin carga el motor alcanza su máxima velocidad, esta velocidad es prácticamente la velocidad del campo magnético giratorio. A la diferencia entre la velocidad de campo magnético y la velocidad a plena carga se le conoce como deslizamiento, este deslizamiento se acostumbra expresar como porcentaje, o sea:

$$S = \frac{N_s - N_n}{N_s} \times 100$$

Haga trabajar el motor en vacío ( $N_s$ ), mida la velocidad y con ayuda de este va-

lor y la velocidad a plena carga ( $N_n$ ) calcule el deslizamiento.

$N_s$  =

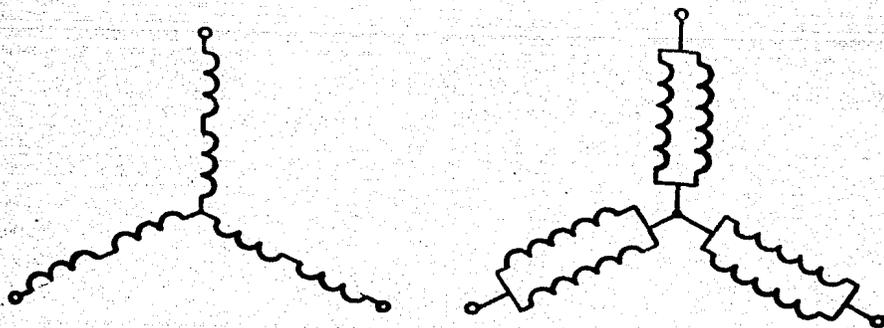
$S$  =

La velocidad del campo magnético giratorio se calcula con la fórmula:

$$N = \frac{120f}{\text{Número de Polos}}$$

De acuerdo a esto, ¿Cuántos polos se forman en el estator del motor de jaula de ardilla?

Este motor tiene la posibilidad de funcionar con dos diferentes voltajes: 220V y 440V, esto es posible debido a que el motor tiene doble devanado y se puede conectar en la forma que se muestra en la figura 3. En ambas conexiones se tiene la misma potencia y velocidad. En la placa del motor se muestran las conexiones que se deben hacer para que el motor funcione a dichas tensiones.



### 2.1.5. RESULTADOS Y OBSERVACIONES

Dibuje la tablilla de bornes indicada en la placa del motor. Mida la resistencia del devanado del estator, entre dos fases.

R12 =

R23 =

R31 =

Obtenga el promedio de estos tres valores.

¿Qué conexión tiene el motor, la de alto o bajo voltaje?

¿Qué resistencia tiene el motor entre una fase y el neutro?

Calcule la resistencia que tendría el devanado a la temperatura de trabajo.

¿Por qué es muy utilizado el motor de jaula de ardilla?

¿De qué depende la velocidad de un motor de jaula de ardilla?

DÉ 5 aplicaciones de los motores de jaula de ardilla.

PRACTICA NO. 2.2 TITULO PRUEBAS DE SATURACION EN VACIO Y CON ROTOR BLOQUEADO Y COMPROBACION DE LOS DATOS DE PLACA

2.2.1 OBJETIVO

Determinar las pérdidas mecánicas, del hierro y el cobre de un motor "x" de inducción, así como su rendimiento, por medio de las pruebas en vacío y a rotor bloqueado, así como obtener la curva de saturación en vacío.

2.2.2. CONSIDERACIONES TEORICAS

Durante el funcionamiento normal de un motor de inducción se producen pérdidas de energía. Las llamadas pérdidas en el cobre son debidas al calentamiento que producen las corrientes al circular por los devanados del rotor y estator; las pérdidas en el hierro son debidas a la continua magnetización y desmagnetización que se lleva a cabo, tanto en el rotor como en el estator y al calor producido por las corrientes parásitas que se inducen en la laminación del rotor y del estator; las pérdidas mecánicas son producidas por la fricción en los rodamientos y la fricción con el aire.

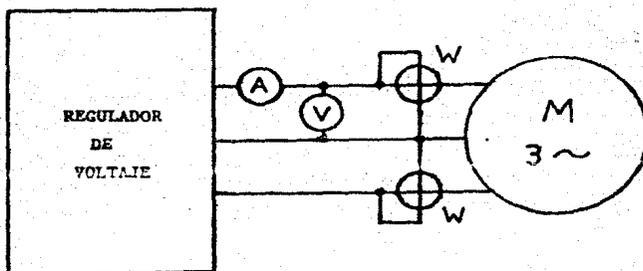
Por medio de pruebas en el motor de inducción es posible determinar cada una de sus pérdidas. En la prueba de saturación en vacío es posible determinar las pérdidas mecánicas y las pérdidas magnéticas, en esta prueba al motor se hace trabajar sin carga y se va variando la tensión desde cero volts hasta un poco más allá de su voltaje nominal. en esta misma prueba, se puede determinar el grado de saturación del núcleo. En la prueba a rotor bloqueado se obtienen las pérdidas en el cobre y también el momento del motor, esta prueba se realiza impidiendo el giro del motor y haciendo que absorba la corriente nominal. Con ayuda de estos datos, es posible determinar el rendimiento del motor a plena carga.

2.2.3. DESARROLLO DE LA PRUEBA

a. Prueba de saturación en vacío

Haga funcionar el motor en vacío tal como se muestra en la figura 1, con ayuda de wattmetros es posible la medición de la potencia en un circuito -

trifásico de tres hilos (conexión Aaron) se necesita también un voltímetro y un amperímetro.



Aumente el voltaje poco a poco hasta que el motor empiece a girar lentamente espere que el motor aumente su velocidad (la corriente debe disminuir) si esto no sucede, aumente un poco el voltaje y espere a que aumente la velocidad y tome las lecturas de voltaje, corriente y potencia. Si la aguja de los wattmetros se deflexiona hacia adentro de la escala de potencia total es la suma de las dos lecturas  $P_t = P_1 + P_2$ .

En este momento se pueden calcular las pérdidas mecánicas (el motor gira a la velocidad nominal), debido a que el voltaje es muy pequeño las pérdidas en el hierro son despreciables, y como no se entrega energía a la carga.

$$P_c = \text{Pérdidas mecánicas} + \text{Pérdidas eléctricas en el estator}$$

Las pérdidas eléctricas en el estator pueden calcularse, ya que se conoce la corriente que circula y la resistencia del devanado del estator en la prueba anterior. Como el rotor gira prácticamente a la velocidad del campo magnético giratorio, hay una corriente muy pequeña en el rotor y las pérdidas eléctricas en él son despreciables. Por lo tanto:

$$\text{Pérdidas eléctricas} = 3 I_f^2 R \quad \text{estator}$$

De donde:

$$\text{Pérdidas mecánicas} = P_c - 3 I_f^2 R \quad \text{estator}$$

A partir de este valor aumente el voltaje tomando mediciones de voltaje y corriente cada 10V, hasta llegar al 120% del voltaje nominal, anotando cada par de resultados en una tabla y haciendo la gráfica de  $V = f(I)$  (uno de los valores debe ser el voltaje nominal). Cuando el voltaje llegue a su valor nominal, tome los valores de los wattmetros y calcule la potencia total. En este momento en el motor se producen las pérdidas mecánicas y magnéticas nominales y unas pequeñas pérdidas eléctricas en el estator (las pérdidas eléctricas en el rotor son despreciables), por lo que:

$$P_c = P. \text{ mecánicas} + P. \text{ magnéticas} + P. \text{ eléctricas}$$

y despejando:

$$P. \text{ magnéticas} = P_c - P. \text{ mecánicas} - P. \text{ eléctricas}$$

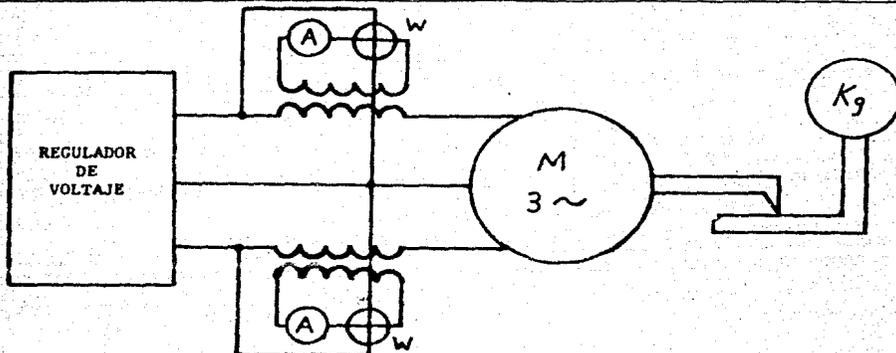
Las pérdidas mecánicas nominales ya se determinaron anteriormente y las pérdidas eléctricas se calculan con la fórmula:

$$P. \text{ eléctricas} = 3 I_f^2 R$$

Esta corriente no es la misma que en el caso anterior.

b. Prueba a rotor bloqueado

Bloquee el motor no permitiendo que gire en esta caso por medio de un hilo unido a un dinamómetro, como se muestra en la figura 2, aplique un voltaje pequeño, empezando desde cero volts hasta que circule la corriente nominal y mida la potencia consumida y la fuerza ejercida por el motor.



El valor de la potencia medida en esta prueba nos da las pérdidas eléctricas que se producen en el motor, con ayuda de este valor es posible calcular el rendimiento del motor:

$$\eta (\%) = \frac{\text{Potencia salida}}{\text{Potencia salida} + P. \text{ mecánicas} + P. \text{ magnéticas} + P. \text{ eléctricas}} \times 100$$

Mida el radio de la polea y calcule con este valor y la fuerza medida en el dinamómetro, el momento del motor; este valor corresponde al momento nominal.

$$T_p = F \cdot r$$

Haga otras dos mediciones para el 50 y 75% de la corriente nominal y mida la potencia consumida y la fuerza ejercida por el motor.

Es necesario utilizar un transformador de corriente debido a que circulan corrientes altas.

Como la prueba se realizó a voltaje reducido, es necesario extrapolar los valores al voltaje nominal, para esto se parte de que la resistencia, reactancia e impedancia, permanecen constantes, o sea:

$$I_e = \frac{V_e}{Z} \quad I_p = \frac{V_p}{Z}$$

por lo tanto: 
$$\frac{I_e}{I_p} = \frac{V_e}{V_p} \Rightarrow I_e = \frac{V_e}{V_p} I_p \quad (1)$$

En donde:

- $I_e$  = Corriente extrapolada
- $V_e$  = Voltaje para el cual queremos extrapolar
- $I_p$  = Corriente obtenida en la prueba
- $V_p$  = Voltaje aplicado en la prueba
- $Z$  = Impedancia del motor a rotor bloqueado

Para las potencias:

$$W_e = V_e I_e \cos \varphi$$

$$W_p = V_p I_p \cos \varphi$$

De donde:

$$W_e = \left( \frac{V_e}{V_p} \right)^2 W_p \quad (2)$$

Donde

$W_e$  = Potencia extrapolada

$W_p$  = Potencia

El momento del motor es proporcional al cuadrado del voltaje aplicado, esto es:

$$T_e = K V_e^2$$

$$T_p = K V_p^2$$

En donde: 
$$T_e = \left( \frac{V_e}{V_p} \right)^2 T_p \quad (3)$$

$T_e$  = momento extrapolado

$T_p$  = momento obtenido en la prueba

Con ayuda de las fórmulas (1, 2 y 3), calcule la corriente, potencia y el momento que se producen a voltaje nominal.

### 2.2.5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Las máquinas y aparatos en donde existe inducción magnética se diseñan de tal forma que su núcleo se encuentre trabajando en la parte lineal de la curva de magnetización, es decir, antes de llegar a la zona de saturación. La curva obtenida en la prueba de saturación en vacío nos sirve para saber en qué condiciones se encuentra el circuito magnético del motor de inducción. Localice el voltaje nominal en la curva de saturación en vacío e indique si el circuito magnético se encuentra trabajando en la zona lineal o en la zona de saturación.

En la prueba a rotor bloqueado, al extrapolar ¿Se obtiene el momento de arranque o el momento nominal?, ¿Qué se entiende por deslizamiento?, ¿Qué sucede con el deslizamiento al aumentar la carga al motor?

PRACTICA NO. 3.1 TITULO IDENTIFICACION DE PARTES ESTRUCTURALES DE LA MAQUINA DE CORRIENTE DIRECTA

3.1.1. OBJETIVO

Identificar las partes principales, tanto de un motor como de un generador de C.D. para poder diferenciarlos de las demás máquinas eléctricas.

3.1.2. CONSIDERACIONES TEORICAS

Los motores de C.D. son los motores eléctricos en donde es más fácil tener una buena regulación de velocidad, por lo que su uso en la industria moderna está muy generalizado, a pesar de que la mayor parte de la energía eléctrica se produzca en forma de corriente alterna. Los generadores de C.D. son muy parecidos a los motores de C.D.

El funcionamiento de los motores de C.D. se basa en el hecho de que cuando un conductor de corriente se encuentra dentro de un campo magnético, se produce sobre dicho conductor una fuerza. Figura 1.

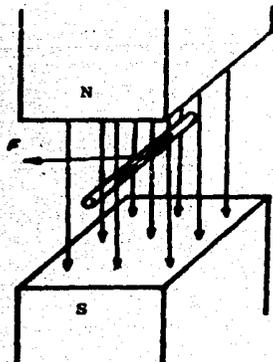


Figura 1

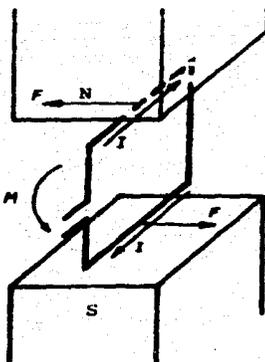


Figura 2

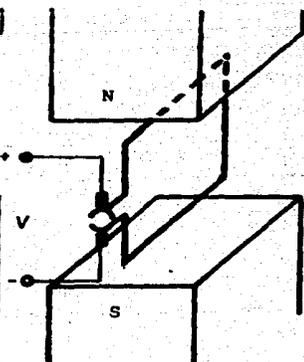


Figura 3

Si en lugar de un conductor tenemos una espira, sobre ésta actúan dos fuerzas que producen un momento que hace girar a la espira. Figura 2.

La espira (rotor) se conecta a un colector o conmutador que invierte el sentido de la corriente en dicha espira, permitiendo con ello que el motor tenga un giro continuo. Figura 3.

El colector está formado por una serie de segmentos de cobre (en este caso dos) aislados entre sí.

El rotor está formado por una gran cantidad de bobinas montadas sobre un paquete de chapas aisladas entre sí, dichas bobinas se conectan entre sí por medio del colector.

En las máquinas medianas y grandes el campo magnético es creado por medio de bobinas arrolladas sobre un núcleo magnético, que queda unido a la carcasa. Dichas bobinas (estator) se pueden conectar, ya sea en serie o en paralelo con el rotor, o bien una conexión mixta, lográndose con ello diferentes características, tanto en motores como en generadores de corriente directa.

Aparte de estos elementos (rotor, estator, carcasa, colector) las máquinas de corriente directa constan de polos de conmutación (interpolos) o devanados de compensación conectados en serie con el rotor.

La función de cualquiera de ellos es el de contrarrestar la reacción de armadura, permitiendo con ello un mejor funcionamiento de la máquina (reduce el chisporroteo que destruiría rápidamente al colector y los carbones). Los polos de conmutación se colocan en la carcasa entre dos polos principales y el devanado de compensación se coloca sobre los polos principales en la zapata polar.

### 3.1.3 EQUIPO UTILIZADO

¿En una máquina serie?      ¿En una máquina compuesta?

¿Es posible utilizar un motor serie como motor paralelo?, ¿Y un paralelo como serie?

¿Cómo se llama el motor compuesto en el cual el flujo serie se opone al flujo paralelo?

¿Por qué al calcular la potencia del motor  $P = EI$  y hacer la conversión a H.P., este valor no concuerda con el dato de potencia que viene en la placa?

¿La carcasa del motor es lisa o tiene aletas de refrigeración?, ¿A qué cree que se deba?

¿Cómo están fijados los polos principales de la carcasa?

¿Cómo pueden ser conectados entre sí los devanados del rotor y del estator?

¿Puede un motor compuesto utilizarse como motor serie?, ¿Como motor paralelo?

### 3.1.4 DESARROLLO DE LA PRUEBA

3.1.4.1 Tome los principales datos de la placa de las máquinas: paralelo, serie y compuesto, tanto en motor como en generador.

a. Máquina paralelo

Motor:

Generador:

b. Máquina serie

Motor:

Generador:

c. Máquina compuesta

Motor:

Generador:

3.1.4.2 Mida las resistencias del rotor y del estator en cada una de las máquinas. Si la resistencia es pequeña, se debe medir con un puente de Wheatstone o Kelvin.

3.1.4.3 Cuente el número de polos principales y juegos de escobillas que tiene cada una de las máquinas.

3.1.4.4 Haga un diagrama de cada una de las conexiones, indicando en cada caso la designación de bornes.

### 3.1.5 PREGUNTAS Y CONCLUSIONES

¿Cómo son entre sí las resistencias del rotor y del estator en una máquina paralelo?

PRACTICA NO. 3.2 TITULO ARRANQUE, PROTECCION Y CONTROL DE VELOCIDAD PARA MOTORES CON EXCITACION INDEPENDIENTE, EN DERIVACION Y EN SERIE

3.2.1. OBJETIVO

Conocer la forma en que se arrancan y protegen los motores de C.D. en sus diferentes conexiones, así como la forma de regular su velocidad.

3.2.2. CONSIDERACIONES TEORICAS

Debido a que la resistencia del devanado del rotor de un motor de C.D. es muy pequeña y a que en el arranque no existe fuerza contraelectromotriz, no es permitido arrancar un motor de C.D. directamente al voltaje nominal, ya que circularía una corriente demasiado elevada.

Calcule dicha corriente en base a la resistencia del rotor y al voltaje nominal de la práctica anterior.

Para hacer que la corriente en el arranque no sea muy grande, se conecta una resistencia en serie con el rotor, como muestra la figura 1.

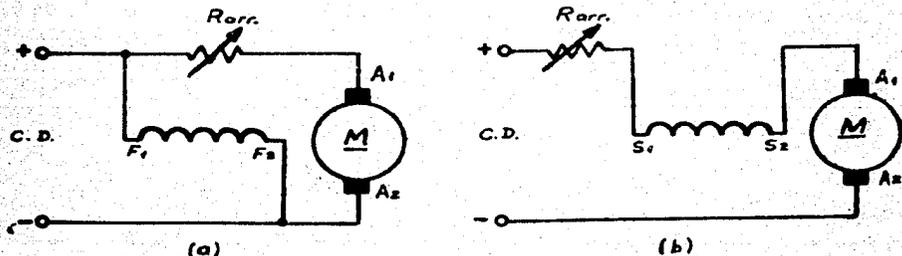


Figura 1

El valor de la resistencia de arranque se calcula de tal forma que la corriente de arranque quede limitada a un cierto valor, generalmente  $I_{arr} = 1.7 I_n$ . Calcule el valor de dicha resistencia con el voltaje y corrientes nominales del motor.

$$R_{arr} = \frac{V}{I_{arr}}$$

La resistencia se conecta en el arranque y va disminuyendo su valor hasta que el motor queda conectado directamente a su voltaje nominal, pero ahora la corriente es muy grande, ya que al girar el rotor se produce una f.c.e.m. que se opone al voltaje de alimentación.

Esta misma resistencia se utiliza para tener diferentes velocidades en el motor, - si se deja el motor a la tensión nominal se tiene la velocidad máxima y esta velocidad va disminuyendo al aumentar el valor de la resistencia.

En la industria moderna el arranque y control de velocidad de los motores de C.D. - se efectúa por medio de tiristores (rectificadores controlados de silicio).

### 3.2.3. EQUIPO UTILIZADO

### 3.2.4. DESARROLLO DE LA PRUEBA

3.2.4.1. En el laboratorio se dispone de bancos de resistencias que tienen la -

siguiente forma. Figura 1.

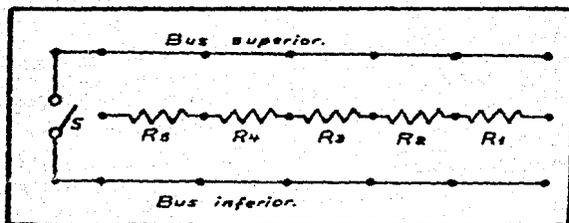


Figura 1

Intercaladas en las resistencias y al final de las resistencias  $R_1$  y  $R_5$ , se disponen de cuchillas que se pueden conectar a la línea superior o bien a la línea inferior, obteniéndose con ello diferentes valores de resistencia. La resistencia mayor se obtiene conectando la cuchilla de la resistencia mayor se obtiene conectando la cuchilla de la resistencia  $R_1$  a la línea superior y la cuchilla de la resistencia  $R_5$  a la línea inferior (quedan las resistencias en serie) y la resistencia mínima conectando las resistencias en paralelo. Por medio del interruptor S se pueden dejar fuera las resistencias.

Mida las resistencias que se tienen en el banco de resistencias en diferentes posiciones.

- 3.2.4.2. Arranque el motor paralelo con la resistencia máxima y mida la corriente con el arranque, disminuya poco a poco el valor de la resistencia y cuando alcance una velocidad alta elimine las resistencias por medio del interruptor S. Mida la velocidad y la corriente en vacío del motor

Anore la corriente de excitación del generador trifásico. Aplique carga al motor hasta que circule la corriente nominal del motor y mida sus revoluciones. La carga del motor es el generador, como se muestra en la figura 2 y para cargar al motor es necesario conectarle resistencias al generador.

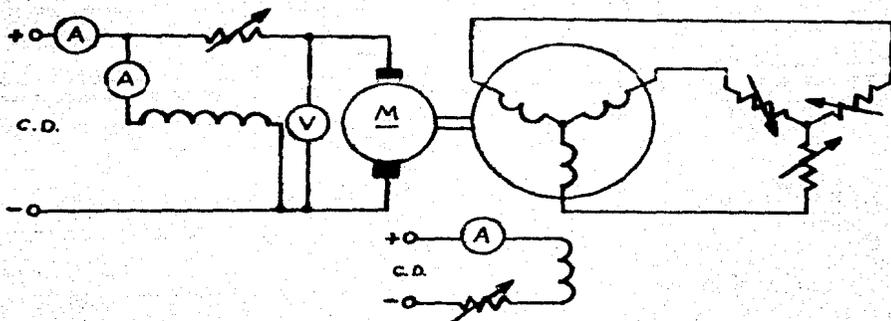


Figura 2

- 3.2.4.3. Varíe el valor de la carga hasta que el motor tome el 20% de la corriente nominal, ajuste el valor de la resistencia de arranque en 5 valores diferentes y para cada uno de ellos mida las revoluciones que tiene el motor y el voltaje que llega al rotor. Haga una gráfica.

R ( $\Omega$ )	V (v)	n (r.p.m.)

- 3.2.4.4. Repita el experimento anterior con el motor en vacío.
- 3.2.4.5. Arranque un motor serie con la resistencia de arranque en su valor máximo, mida la corriente de arranque, disminuya poco a poco el valor de dicha resistencia y finalmente elimine las resistencias por medio del interruptor S. Mida la velocidad y corriente en vacío del motor.

NOTA: El motor serie se debe arrancar con carga, por lo que primero se debe conectar la excitación al generador. Figura 3.

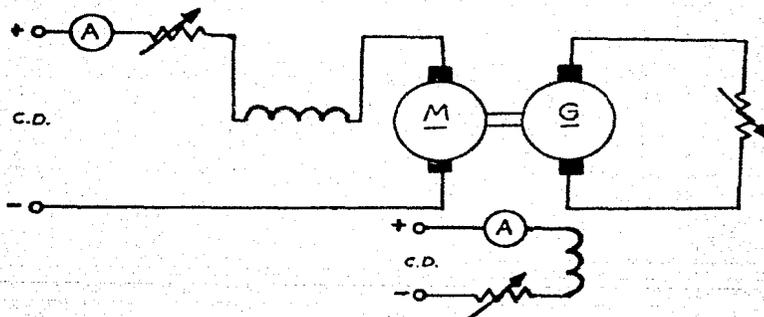


Figura 3

- 3.2.4.6 Varía la carga hasta que el motor tome el 20% de la corriente nominal, ajuste el valor de la resistencia de arranque en 5 valores diferentes y para cada uno de ellos mida las revoluciones que tiene el motor y el voltaje que llega al rotor. Haga una gráfica  $n = f(V_{rot})$ .

R ( $\Omega$ )	V (v)	n (r.p.m.)

### 3.2.5. RESULTADOS Y PREGUNTAS

¿Por qué es elevada la corriente de arranque en motores de C.D.?

¿Qué otro método existe para reducir la corriente de arranque en motores de C.D.?  
Explique.

¿Cuántos métodos existen para regular la velocidad de motores de C.D.? Dé las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

¿En cuál conexión de motores de C.D. se tiene una mejor regulación de velocidad?

PRACTICA NO. 3.3 TITULO CARACTERISTICAS DE LAS DIFERENTES  
CONEXIONES DE MOTORES DE C.D.

3.3.1. OBJETIVO

Conocer el comportamiento que tienen los motores de C.D. en sus diferentes conexiones: paralelo, serie y compuesto.

3.3.2. CONSIDERACIONES TEORICAS

Los motores de C.D. son muy utilizados en la industria moderna, sobre todo en aquellos procesos donde se requiere una buena regulación de velocidad (industria del papel, del vidrio, textil, del hierro, etc.) en donde se necesite un gran par de arranque y en servicio (transportes eléctricos, marchas de automóviles, etc.).

Estas dos características pueden obtenerse en las diversas conexiones que se tienen en los motores de C.D. que son:

- a. Motor de C.D. con excitación en paralelo (también llamada derivación de shunt).

En esta conexión el campo magnético de excitación y el rotor son alimentados por la misma fuente de voltaje, como se muestra en la figura 1.

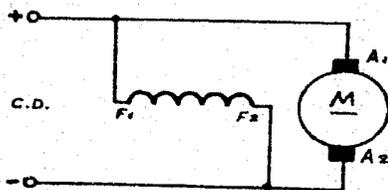


Figura 1

Los bornes del rotor se designan como  $A_1$  y  $A_2$  y los bornes del devanado de excitación en paralelo con las letras  $F_1$  y  $F_2$ . El devanado de excitación en-

esta conexión se hace de muchas espirales de alambre delgado para tener una resistencia alta.

las siguientes ecuaciones nos permiten analizar las características del motor paralelo.

$$V_{ent} = I_r R_r + f.c.e.m. \quad (1)$$

$$f.c.e.m. = k_1 \Phi_{exc} n \quad (2)$$

Sustituyendo (2) en (1) y despejando  $n$ , tenemos:

$$n = \frac{V_{ent} - I_r R_r}{k_1 \Phi_{exc}} \quad (3)$$

En donde se observa que la velocidad depende del voltaje de entrada, el flujo de excitación ( $\Phi_{exc}$ ) y de la  $I_r$  (de la carga).  $k_1$  es una constante que depende de la construcción del motor.

Para hacer que la velocidad no dependa mucho de la carga, se hace que la resistencia del rotor sea la más pequeña posible.

El momento del motor de C.D. puede expresarse con la siguiente ecuación.

$$M = k_2 \Phi_{exc} I_r \quad (4)$$

b. Motor de C.D. con excitación en serie

El rotor y el campo de excitación se conectan en serie, como se muestra en la figura 2, y se alimentan con la misma fuente de voltaje.

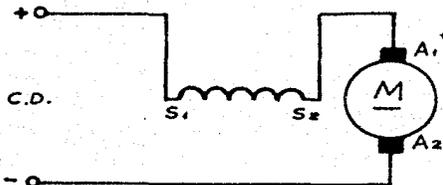


Figura 2

Los bornes del devanado de excitación serie se designan con S y S y los bornes del devanado rotor igual que en el motor paralelo. El devanado de excitación serie se hace de pocas vueltas de alambre grueso para tener poca resistencia.

Como por el devanado serie circula la corriente del rotor, la ecuación que describe el comportamiento del motor queda:

$$n = \frac{V_{ent.} - I_r(R_r + R_{exc})}{k_s I_r} \quad (5)$$

El momento del motor serie es descrito por la ecuación:

$$M = k_t I_r^2 \quad (6)$$

Como se ve, el momento varía con el cuadrado de la corriente del rotor, por lo que el momento en el arranque y con carga es muy grande. De hecho, los motores de C.D. conexión serie, tienen mayor momento entre los motores eléctricos.

c. Motor de C.D. con excitación compuesta (llamado también mixto o compound)

En esta conexión el devanado de excitación tiene una parte en serie con el rotor y otra parte en paralelo; con esto se logra una combinación de las características de las dos conexiones anteriores. la designación de bornes es la mis-

ma que en las dos conexiones de las cuales es resultado. Figura 3.

Si el flujo de la conexión serie se suma con el flujo de la conexión paralelo se tiene una conexión compuesto acumulativo, y si ambos flujos se oponen se tiene la conexión compuesto diferencial. En ambas conexiones el flujo en la conexión paralelo es la más importante.

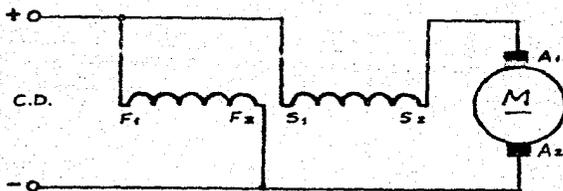


Figura 3

La ecuación (7) nos indica la forma en que varía la velocidad del motor compuesto y la (8) el momento.

$$n = \frac{V_{ent} - I_r(R_r + R_{exc. serie})}{K_s (\Phi_{exc. paralelo} \pm \Phi_{exc. serie})} \quad (7)$$

$$M = k_s n (\Phi_{exc. paralelo} \pm \Phi_{exc. serie}) \quad (8)$$

La conexión compuesto diferencial prácticamente no se utiliza por presentar características inestables.

También existe el motor con excitación independiente, en esta conexión se utiliza una fuente de voltaje para el motor y otra fuente para la excitación, generalmente de menor voltaje. Los motores de C.D. con imanes permanentes se pueden considerar como motores de conexión independiente.

Las características mecánicas  $n = f(I)$  y  $M = f(I)$  son semejantes a las de un motor conexión paralelo, sin embargo, en algunas aplicaciones se prefiere, ya que es posible variar la velocidad entre amplios límites, por ejemplo en el accionamiento de rectificaciones, fresadoras y otras máquinas - herramientas, por medio de la conexión Ward-Leonard.

### 3.3.3. EQUIPO UTILIZADO

### 3.3.4. DESARROLLO DE LA PRACTICA

3.3.4.1 Varíe la carga al motor de C.D. paralelo, mediante el generador de C.A., - como se muestra en la figura 4.

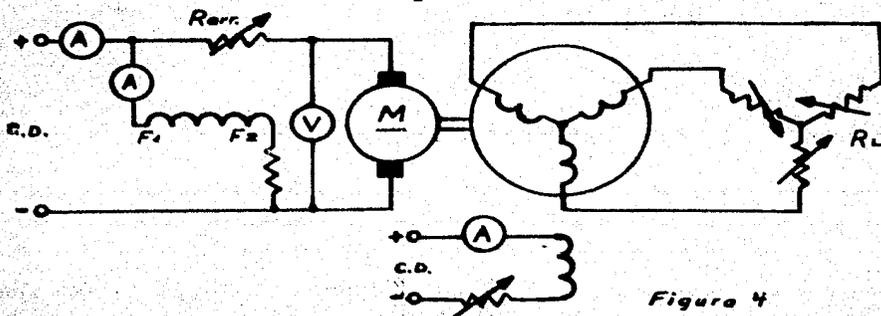
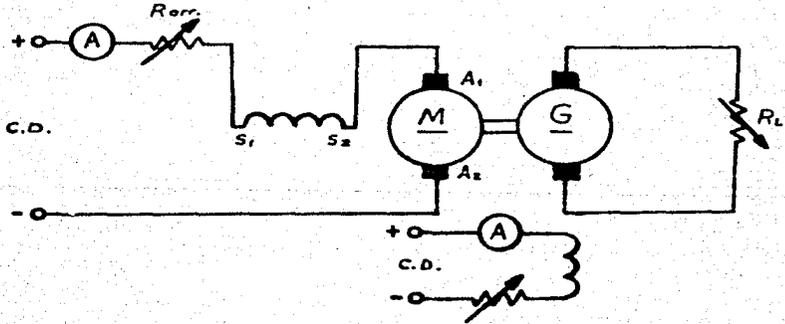


Figura 4

Mida la corriente del motor y las revoluciones, desde la corriente mínima hasta la corriente nominal, tome 8 valores como mínimo y haga una gráfica.

Tenga cuidado al arrancar el motor, utilice la resistencia de arranque y puentes, el amperímetro durante el proceso de arranque. Una vez que arranque el motor, elimine la resistencia de arranque. Ajuste la levc del motor de C.D. a su valor nominal.

3.3.4.2 Varíe la carga del motor de C.D. excitación serie utilizando el circuito mostrado:



Toma 8 diferentes valores de  $n$  y de  $I$  y haga una gráfica de  $n = f(I)$ , no sobrepase la velocidad nominal del motor.

Tenga cuidado al manejar el motor, no lo deje trabajar en vacio, ya que la velocidad subiria demasiado.

### 3.3.5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

¿En qué motor varían más revoluciones con la carga?

¿En qué motor varían menos las revoluciones al variar la carga?

¿Cómo es la velocidad de un motor serie en vacio?

¿Cómo es la velocidad de un motor paralelo en vacio?

Sabiendo que la potencia en un motor se calcula con:

$$P = \frac{M \omega}{975}$$

¿Cuál conexión de motores de C.D. nos da más momento al aumentar la carga, si en todas las conexiones la potencia fuer la misma carga?

Investigue y explique la conexión Ward-Leonard.

¿Cómo se puede variar la velocidad en un motor paralelo?

¿Qué función tiene la resistencia de arranque?

PRACTICA NO. 4.1 TITULO IDENTIFICACION DE LAS PARTES  
ESTRUCTURALES DE LA MAQUINA SINCRONA

4.1.1. OBJETIVO

El alumno se familiarizará con las partes más importantes que integran la máquina síncrona.

4.1.2. CONSIDERACIONES TEORICAS

La máquina síncrona es reversible, es decir, si le proporcionamos energía mecánica nos entrega energía eléctrica y si se le proporciona energía eléctrica nos entrega energía mecánica. Concluyendo, una máquina síncrona es un convertidor de energía-rotatorio.

En el primer caso descrito anteriormente, la máquina opera como alternador y en el segundo como motor.

También podemos concluir, por lo anteriormente descrito, que la máquina síncrona - por ser un convertidor de energía rotatorio, está constituido por dos partes principalmente: el estator o parte fija de la máquina y el rotor o parte móvil de la - máquina.

Este tipo de máquinas se clasifican en: de inducido fijo y de inducido móvil, siendo las más usadas las de inducido fijo, y por lo tanto, nos concretaremos a estas últimas.

El estator de estas máquinas está compuesto de los siguiente elementos:

1. Devanados
2. Núcleo magnético
3. Carcasa
4. Escudos o porta cojinetes (tapas laterales)

Los devanados son trifásicos, esto quiere decir que, son tres bobinas independien-

tes entre sí, con posibilidad de interconexión; esta interconexión puede ser en estrella o en delta. Generalmente son de un conductor muy grueso.

Cuando la máquina actúa como alternador, por las terminales de los devanados, se obtiene energía eléctrica, y, cuando actúa como motor, por estas terminales se aplica energía eléctrica.

Los devanados se montan sobre el núcleo magnético que consta de un paquete apilado de chapas de material ferromagnético, generalmente de acero al silicio, de espesor muy delgado para reducir tanto las pérdidas por corrientes parásitas como para reducir las pérdidas por histéresis.

La envoltura del paquete de chapas que compone al núcleo magnético estático se llama carcasa y es, generalmente, de fundición gris.

La parte móvil de estas máquinas se llama rotor y está compuesto de las siguientes partes:

1. Devanados
2. Núcleo magnético
3. Flecha o eje

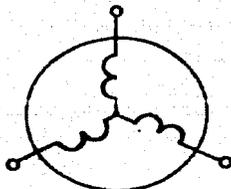
Los devanados rotóricos de esta máquina se van alojados en ranuras practicadas en el núcleo rotórico. Estas bobinas se conectan a una fuente de corriente directa, obteniéndose así un campo magnético que sirve como excitación en el caso de un alternador y como electroimán en el caso de un motor, generalmente son de un conductor delgado y con gran número de espiras.

El núcleo magnético también se compone de muchas chapas de material ferromagnético que forman un paquete cilíndrico, el núcleo magnético rotórico se monta sobre el eje o flecha de la máquina síncrona. Este eje es la parte móvil externa de la máquina y sirve para aplicarle energía mecánica cuando actúa como generador y para obtener energía mecánica cuando actúa como motor.

A su vez, el eje o flecha se monta sobre los cojinetes que se encuentran alojados en las tapas laterales o escudos.

#### 4.1.3. EQUIPO UTILIZADO

Diversas máquinas síncronas del laboratorio.



#### 4.1.4. DESARROLLO DE LA PRACTICA

Medir la resistencia eléctrica de los distintos devanados de la máquina síncrona e identificar los bornes.

Medición de la resistencia.

Deben medirse tanto la resistencia de armadura como la de campo. La prueba debe realizarse con la máquina a temperatura ambiental, y, por supuesto, estática por medio de un puente. Para la armadura las mediciones se realizan entre cada par de terminales. (Observar el tipo de conexión interna).

#### 4.1.5. PREGUNTAS Y CONCLUSIONES

¿Cómo es el devanado rotórico con respecto al devanado estatórico?

¿Por qué se prefiere la máquina síncrona con inducido fijo?

¿Por qué el inducido debe tener resistencia pequeña?

PRACTICA No. 4.2 TITULO CURVAS CARACTERISTICAS DEL ALTERNADOR TRIFASICO

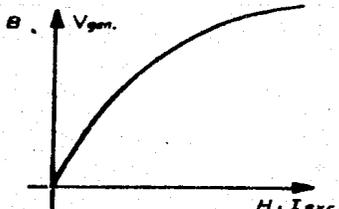
4.2.1. OBJETIVO

Obtener la curva de saturación en vacío y la curva característica de corto circuito del alternador, adicionalmente a esto, calcular la impedancia síncrona.

4.2.2. CONSIDERACIONES TEORICAS

Se sabe que los alternadores generan un voltaje de C.A., cuya frecuencia depende de la velocidad de rotación del campo magnético rotórico. El valor de este voltaje depende, tanto de la velocidad de rotación como del valor del campo magnético rotórico y del factor de potencia que maneja la carga.

Si se tiene un alternador sin carga eléctrica y operando a velocidad constante, cabe esperar que a incrementos progresivos de la corriente de excitación rotórica de C.D., existan incrementos proporcionales en el voltaje generado, pero esto sólo es cierto en un rango de valores determinado, es decir, que la respuesta  $V_{gen}$  en función de  $I_{exc}$  no es necesariamente lineal. Cabe mencionar, por lo anterior, que el voltaje generado es una función también del circuito magnético y este se puede saturar.

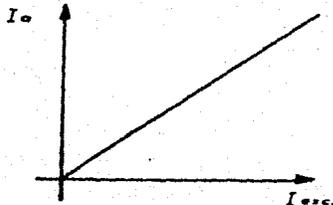


De la figura se ve que  $B = f(H)$ , pero  $H = f(I_{exc})$ .

$I_{exc}$  = corriente de campo rotórico. Pero  $V_{gen} = f(B) =$  voltaje generado.

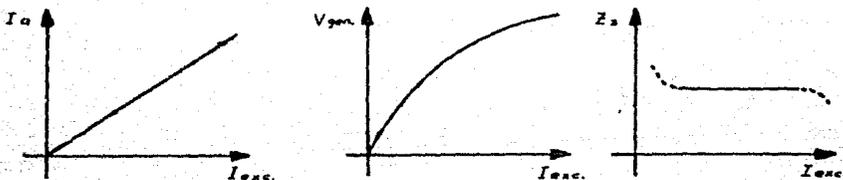
Conclusión

La curva de voltaje generado en función de la corriente de excitación es idéntica a la curva de magnetización del generador. Esta curva se obtiene de la prueba en vacío.



Cabe esperar que la gráfica de la corriente de inducido ( $I_a$ ) en función de  $I_{exc}$  en un alternador sea igual a la curva anterior, pero el efecto desmagnetizante del inducido, por ser predominantemente inductivo, hace que el núcleo magnético no se sature y sea una línea recta.

Una vez elaboradas las curvas de  $V_{gen} = f(I_{exc})$  y de  $I_a = f(I_{exc})$ , se procede a elaborar una curva de la impedancia síncrona ( $Z_s$ ), en función de la corriente de excitación.



Para esto es necesario hacer lo siguiente:

1. Se escogen algunos valores de  $I_a$
2. Con alguno de estos, se entra a la gráfica  $I_a = f(I_{exc})$
3. Se determina  $I_{exc}$  correspondiente
4. Con el valor de  $I_{exc}$  entramos en la gráfica  $V_{gen} = f(I_{exc})$
5. Se determina el valor de  $V_{gen}$
6. Utilizando  $Z_s = \frac{V_{gen}}{I_a}$  se pueden obtener puntos suficientes para graficar  $Z_s = f(I_{exc})$ .

NOTA:  $I_a$ ,  $V_{gen}$  y  $Z_s$  son valores por fase.

Observar el ejemplo en las figuras anteriores.

## 4.2.3. DESARROLLO DE LA PRACTICA

Para la prueba o ensayo de circuito abierto con el cual se obtiene la curva  $V_{gen} = f(I_{exc})$ . En este ensayo es necesario impulsar al alternador trifásico a velocidad constante, de preferencia la nominal.

Además, el alternador debe estar sin carga. Aumentar progresivamente la  $I_{exc}$ , desde un mínimo hasta la corriente nominal. (Ver dato de placa). Medir para distintos valores de  $I_{exc}$  los correspondientes valores de  $V_{gen}$  (hacer tabla de valores).

NOTA: Precaución, se manejan voltajes peligrosos.

## 4.2.4. EQUIPO UTILIZADO

De acuerdo al punto anterior, el equipo requerido es:

Un alternador trifásico

Un motor impulsor (motor síncrono)

Un tacómetro, para verificar la velocidad (debe ser constante)

Un amperímetro, para medir la corriente de excitación de corriente directa C.D.

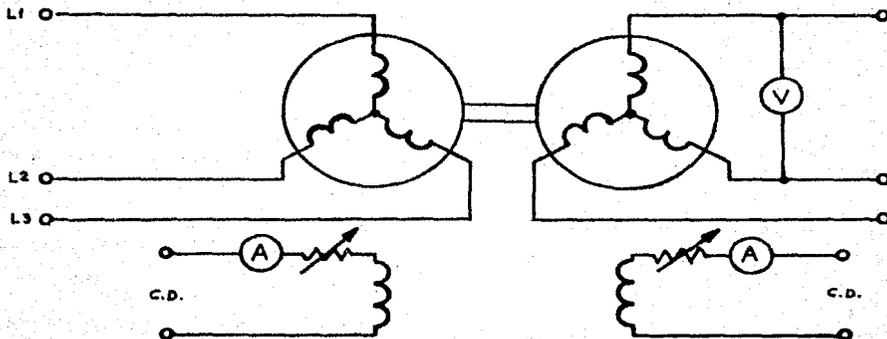
Un voltímetro, para medir el voltaje generado ( $V_{gen}$ )

Cables de conexión, para interconexiones

Un reostato de campo, para controlar o variar  $I_{exc}$ .

Diagrama de conexiones. Motor síncrono.

Alternador.



**Procedimiento**

1. Arrancar el motor síncrono conectando L1, L2 y L3 al motor
2. Conectar la C.D. del devanado de campo rotórico del motor, controlando adecuadamente  $I_{exc}$  (ver valor de placa)
3. Aumentar progresivamente en forma ascendente los valores de  $I_{exc}$  del generador o alternador, para eliminar el efecto de histéresis y llenar la tabla.

$I_{exc}$						
$V_{gen}$						

4. Hacer gráfica de  $V_{gen} = f(I_{exc})$

Para el ensayo de corto circuito del alternador es necesario conectar las tres terminales del inducido al punto neutro, intercalando en un puente un amperímetro de C.A., como se muestra en el diagrama de conexiones.

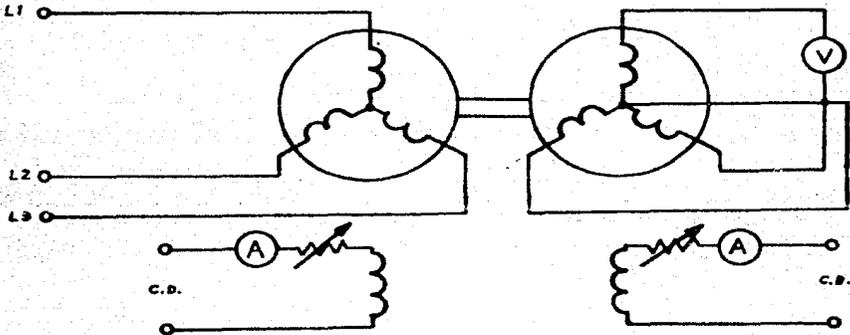
Se debe mantener la velocidad constante durante toda la prueba.

Aumentar la  $I_{exc}$  desde un mínimo hasta que se obtenga la corriente nominal del inducido  $I_a$  (ver dato de placa).

Debido a lo anterior, se requiere el siguiente equipo:

- Un alternador trifásico
- Un motor síncrono
- Un amperímetro de C.D.
- Un amperímetro de C.A.
- Un tacómetro
- Un amperímetro de C.A.
- Dos reostatos de campo y cables de conexión.

Diagrama de Conexiones



## Procedimiento

1. Conectar de acuerdo al diagrama anterior
2. Conectar la tensión trifásica al motor síncrono
3. Conectar la tensión de C.D. para la excitación del campo, regulando con el reostato la corriente, no exceder el valor nominal
4. Desde un mínimo, excitar el campo del alternador
5. Tomar lecturas, tanto de  $I_{exc}$  y su correspondiente corriente de inducido
6. Llenar la siguiente tabla

$I_{exc}$							
$I_a$							

7. Hacer gráfica de  $I_a = f(I_{exc})$

De acuerdo al ejemplo anterior para el cálculo de la impedancia, llenar la siguiente tabla.

$I_{exc}$							
$I_a$							

**4.2.5. PREGUNTAS**

¿Cómo es la resistencia del inducido en relación a su reactancia?

Explique a qué se debe el efecto de reacción de inducido desmagnetizante durante el ensayo de corto circuito

Explique por qué la curva característica de  $V_{gen} = F(I_{exc})$  en el ensayo en vacío no es lineal

## PRACTICA NO. 4.3 TITULO ACOPLAMIENTO DE ALTERNADORES

## 4.3.1. OBJETIVO

Comprender las ventajas de disponer de alternadores acoplados en paralelo, así como el método de conexión para tal puesta en paralelo.

## 4.3.2. CONSIDERACIONES TEORICAS

Las redes eléctricas de distribución son alimentadas por muchos alternadores funcionando en paralelo, a medida que fluctúan las demandas de carga eléctrica y con el fin de permitir reparaciones y mantenimiento, se adicionan o retiran alternadores de la red.

Esto es, que cuando la demanda de carga eléctrica aumenta el número de alternadores aumenta y cuando la demanda de carga eléctrica disminuye el número de alternadores también disminuye. Esto permite operar a los alternadores conectados a la red en condiciones de plena carga, optimizando su rendimiento debido a que se sabe que las máquinas eléctricas tienen mejor rendimiento en condiciones nominales o de plena carga. También cuando se requiere reparar o darle mantenimiento a un alternador, se puede sacar a este de la red y acondicionar otro en su posición.

Para sacar a un alternador en operación de la red, basta, una vez sin carga, simplemente desconectarlo de esta, pero para desconectarlo a la misma red, es necesario llevar a cabo todo un proceso.

El proceso mencionado anteriormente se debe a que no se pueden acoplar sistemas eléctricos de diferentes valores de tensión o voltaje, frecuencia y secuencia de fases, por lo tanto, es necesario observar los siguientes puntos:

1. Mismo valor de tensiones o voltajes entre alternador y red
2. Mismas frecuencias entre alternador y red
3. Mismas secuencias de fases entre alternador y red
4. Oposición de fases entre alternador y red

Una vez satisfechos estos tres puntos, aún así, no se puede todavía acoplar o interconectar ambos (alternador y red), sino hasta lograr oposición de fases, esto es, que entre ambos no exista diferencia de potencial. Cuando se logra este último punto, se puede cerrar el interruptor que acople o interconecta al alternador a la red. A todo lo anteriormente descrito, esto es, los cuatro puntos, se le llama sincronización.

5. Una vez sincronizado el alternador puede actuar sobre la máquina impulsora para que el alternador tome carga hasta su corriente nominal.
6. Actuando sobre la corriente de excitación del generador se puede ajustar su factor de potencia.

Los métodos que emplearemos para llevar a cabo la sincronización son tres, siendo estos:

1. Por medio de lámparas
2. Por medio de sincronoscopio
3. Por medio del sincronizador automático

#### 4.3.3. EQUIPO UTILIZADO

Por lo anterior, el equipo a utilizar necesario para la sincronización debe ser:

Un alternador trifásico

Un motor impulsor de velocidad regulable

Un sincronoscopio

Un sincronizador automático

Tres lámparas

Un amperímetro de C.A. para medir  $I_a$  en el alternador (ver dato de placa)

Un amperímetro de C.D. para medir  $I_{exc}$  en el rotor (ver dato de placa)

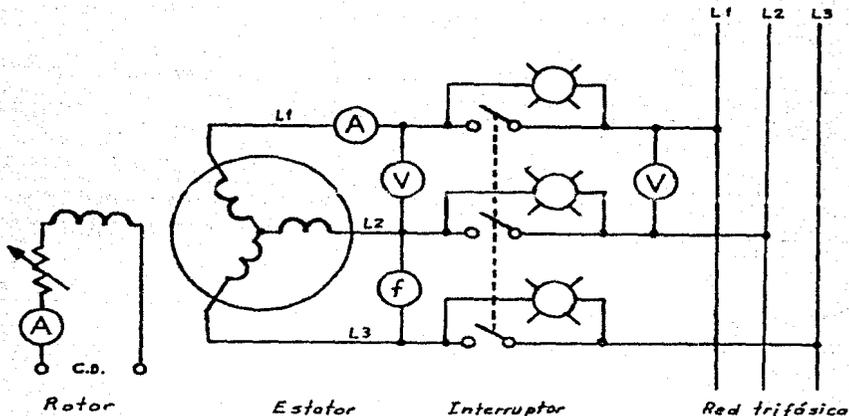
Un amperímetro de C.D. para medir  $I_{exc}$  en el motor impulsor

Dos roostatos de campo

Un frecuencímetro

Dos voltímetros

## 4.3.4. DESARROLLO DE LA PRACTICA

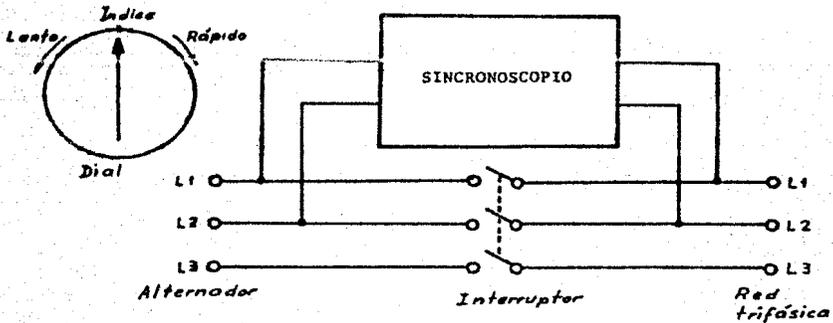


1. Se arranca el motor impulsor.
2. Se excita el campo rotórico del alternador, ajustándose su corriente hasta tener voltaje en el alternador igual al voltaje de la red.
3. Con la velocidad del motor se ajusta la frecuencia del alternador hasta que esta sea igual a la de la red.
4. Cuando se cumplan los dos últimos puntos, las lámparas deben encender y apagar simultáneamente, esto indicará que la secuencia de fases del alternador no es igual a la secuencia de fases de la red, lo cual se corrige invirtiendo dos fases del alternador.
5. Cumplido lo anterior, las lámparas seguramente se apagan y encienden simultáneamente, por lo que, aumentado o disminuyendo ligeramente la velocidad del alternador tendremos tiempo suficiente con las lámparas apagadas, y en este instante tenemos que accionar sobre el interruptor trifásico cerrándolo y logrando, finalmente, la sincronización.

Si la sincronización la llevamos a cabo por medio del sincronoscopio, de

bamos cumplir los primeros cuatro puntos anteriores, y, el último punto-realizarlo por medio del sincronoscopio.

El sincronoscopio es un instrumento con una aguja giratoria (que indica si el alternador que va a conectarse va lento o rápido) y un índice fijo que señala el instante preciso de sincronización en que debe cerrarse el interruptor de puesta en paralelo.

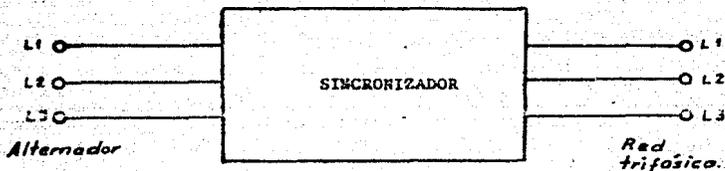


También podemos llevar a cabo la sincronización por medio de un sincronizador automático, este se utiliza cuando se desea una sincronización con alto grado de precisión.

El principio de operación de este dispositivo se base en un circuito que detecta la diferencia de potencial entre las fases a sincronizar y que hace disparar el relevador de puesta en paralelo cuando tal potencia es-cero.

Este sistema no detecta que la secuencia de fases de ambos sistemas sea-la misma, por lo tanto, tendremos que seguir los cuatro primeros pasos -ya descritos antes de operar en automático este sincronizador.

Diagrama de conexiones del sincronizador.



#### 4.3.5. PREGUNTAS

¿Por qué se requiere conectar generadores en paralelo?

¿Qué pasa si conectamos dos sistemas trifásicos si la diferencia de potencial entre ambos es distinto de cero?

## PRACTICA NO. 4.4

TITULO METODOS DE ARRANQUE PARA  
MOTORES SINCRONOS Y CURVAS "V"

## 4.4.1. OBJETIVO

Conocer los distintos métodos existentes para el arranque de este motor y obtener la curva característica de la corriente de inducción en función de la corriente de campo.

## 4.4.2. CONSIDERACIONES TEORICAS

Se sabe que cuando aplicamos tensiones trifásicas a devanados trifásicos, se genera un campo magnético giratorio circular, según el teorema de Ferraris, en el estator.

Si, por otro lado, en el rotor producimos por medio de un devanado alimentado con corriente directa un campo magnético de polos fijos, este campo puede enclavarse magnéticamente con el campo magnético giratorio producido en el estator, siempre y cuando la diferencia de velocidad tienda a cero.

Esto es el principio de operación del motor síncrono trifásico. Por lo anteriormente dicho, se nota que el motor síncrono no tiene par de arranque propio es decir, que mediante algún sistema exterior al motor, será necesario impulsarlo para lograr que la diferencia de velocidades tiendan a cero.

Cabe recordar que la velocidad del campo magnético giratorio estatorio gira según:  $n = \frac{120f}{P}$

Donde: f = frecuencia de la red trifásica de alimentación  
P = Número de polos de la máquina

Además, la velocidad del rotor y, por lo tanto, de su campo magnético de polos fijos en el instante de arranque es cero.

## Métodos de arranque

La idea en todos los métodos de arranque de un motor síncrono es hacer que la-

diferencia de velocidades entre campo magnético giratorio creado en el estator de polos fijos creado en el estator, tienda a cero.

Los métodos más utilizados son:

1. Arranque con jaula amortiguadores
2. Arranque con motor auxiliar

El primer método es el más usual, se puede llevar a cabo siempre que el rotor tenga integrado una jaula amortiguadora o jaula de ardilla. Funciona de la siguiente manera: el campo magnético giratorio creado en el estator induce en la jaula de ardilla corrientes que, según la Ley de Lenz, se oponen a la causa que produce la inducción girando, por lo tanto, el rotor en la misma dirección del campo giratorio, reduciendo con esto la diferencia de velocidades entre rotor y campo magnético.

El segundo método se emplea si el rotor del motor síncrono no tiene una jaula de ardilla integrada. Se requiere por lo tanto, un motor pequeño de potencia suficiente para mover al rotor del motor síncrono y acelerarlo hasta una velocidad cercana a la del campo magnético giratorio creado en el estator del motor síncrono, reduciendo con esto la diferencia de velocidades entre el campo giratorio y el rotor del motor síncrono.

#### 4.4.3. EQUIPO UTILIZADO

De acuerdo con lo anterior, para ensayar el arranque con jaula de amortiguadores necesitamos:

Un motor síncrono con jaula amortiguadora en el rotor

Un amperímetro de C.A. para el estator (ver dato de placa del motor)

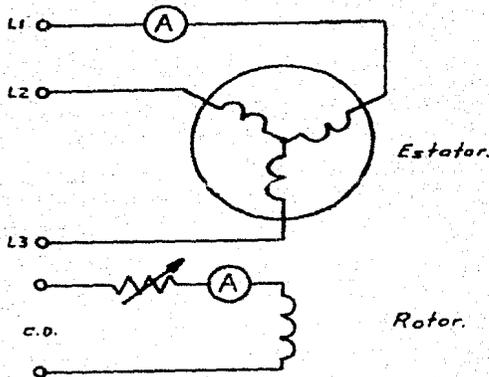
Un amperímetro de C.D. para el rotor (ver dato de placa del rotor)

Cables de conexión

Un reostato de excitación del campo rotórico

## 4.4.4. DESARROLLO DE LA PRACTICA

## Diagrama de conexiones



## Procedimiento:

1. Corto circuitar las terminales rotóricas
2. Conectar la alimentación trifásica al estator (cuidado con el amperímetro)
3. Una vez que el rotor se acelera a una velocidad cercana a la de sincronismo, se abre el corto circuito rotórico
4. Se conecta la tensión de C.D. al rotor (sincronización), regulando la corriente de campo  $I_{exc}$ , hasta lograr la mínima corriente de inducción  $I_a$ .

Para ensayar el segundo método de arranque necesitamos:

Un motor síncrono sin jaula amortiguadora

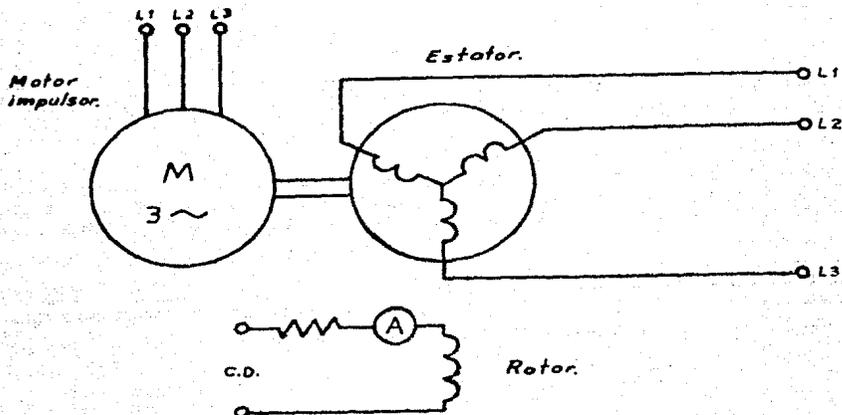
Un motor auxiliar impulsor

Un amperímetro de C.A. para medir  $I_a$  (ver dato de placa)

Un amperímetro de C.D. para medir  $I_{exc}$  (ver dato de placa)

Un reostato de excitación de campo

Cables de conexión



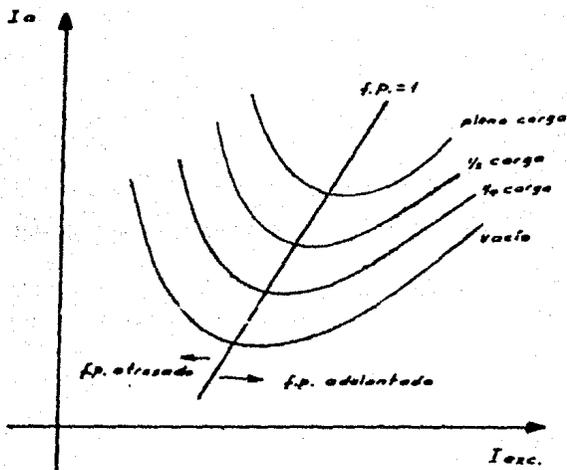
#### Procedimiento:

1. Se conecta el motor impulsor a la red trifásica (cuidando que el rotor del motor síncrono gire en la misma dirección que su campo magnético giratorio creado en el estator)
2. Una vez acelerado el rotor se conecta al estator del motor síncrono a la red trifásica
3. Se conecta la red de C.D. al rotor (sincronización), regulando la corriente de campo  $I_{exc}$  hasta logra la mínima  $I_a$

Las curvas "V" son la gráfica de la corriente de inducido en función de la corriente de excitación de campo  $I_{exc}$  para una carga mecánica constante.

Se sabe que un motor síncrono trifásico al variar su corriente de excitación varía el factor de potencia.

Para una carga mecánica constante del motor, si se aumenta progresivamente la corriente de excitación, la corriente de inducido  $I_a$ , va disminuyendo hasta cierto valor de  $I_{exc}$ , al seguir aumentando  $I_{exc}$ , la  $I_a$  empieza de nuevo a aumentar.

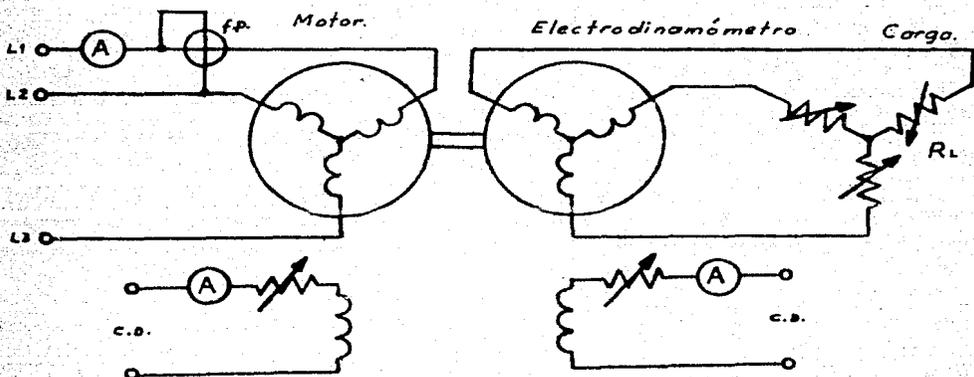


Como se puede observar en la figura, los puntos mínimos de cada curva ocurren a factor de potencia unidad. Todos los puntos a la izquierda de esta línea - ocurren a factor de potencia atrasados. Todos los puntos a la derecha de esta línea ocurren a factor de potencia adelantado.

También puede observarse que cada curva corresponde a una determinada carga - del motor síncrono. Por lo anteriormente dicho, para el ensayo de las curvas "V" necesitamos el equipo siguiente:

- Un motor síncrono trifásico
- Un electrodinamómetro como carga mecánica
- Un factorímetro para medir el factor de potencia
- Un amperímetro de C.A. para medir  $I_a$  (ver dato de placa)
- Un amperímetro de C.D. para medir  $I_{exc}$  (ver dato de placa)
- Un reostato de campo
- Cables de conexión
- Un amperímetro de C.D. para medir  $I_{exc}$  del electrodinamómetro
- Un reostato de carga para el electrodinamómetro

Diagrama de conexiones



Procedimiento:

1. Se conecta la red trifásica al estator
2. Se conecta la tensión de C.D. al devanado rotórico del motor
3. A partir del valor nominal de la  $I_{exc}$  del devanado rotórico del motor - síncrono (ver dato de placa), disminuya progresivamente  $I_{exc}$  y mida el correspondiente valor de la hasta llega a un valor mínimo de  $I_{exc}$ . Llene la siguiente tabla (mida también el factor de potencia).

$I_{exc}$							
$I_a$							
f.p.							

4. Con estos datos e puede obtener la gráfica de carga en vacío de las curvas "v"

5. Conecte la tensión de C.D. al devanado rotórico del electrodinamómetro - y ajuste el valor de la corriente nominal.
6. En este punto empiece a aplicar carga al electrodinamómetro por medio de las resistencias. Ajuste el valor de la carga hasta obtener  $I_a = (I_a - \text{nominal} - I_a \text{ vacio}) / 2$ , aproximadamente, al factor de potencia nominal.
7. Ahora, siga los pasos indicados en el punto 3 y llene la siguiente tabla de valores

$I_{exc}$							
$I_a$							
f.p.							

8. Con estos datos se puede obtener la gráfica de media carga de las curvas "v"
9. Finalmente, ajustando las resistencias de la carga del electrodinamómetro hasta obtener  $I_a$  en el motor a factor de potencia nominal
10. Siga los pasos descritos en el punto 3 y llene la siguiente tabla de valores


11. Con estos datos se puede obtener la gráfica de plena carga de las curvas "v"
12. También grafique f.p. en función de  $I_{exc}$  para cada uno de los tres casos anteriores

#### 4.4.5. PREGUNTAS Y CONCLUSIONES

¿Por qué varía el factor de potencia al variar la corriente de excitación? -  
Utilice un diagrama vectorial

¿Por qué es necesario que la velocidad del rotor y del campo magnético giratorio sean casi iguales para que se enganche magnéticamente en el arranque?

¿Qué es ángulo de carga en una máquina síncrona?

## ANEXO I RECTIFICADORES CONTROLADOS DE SILICIO S.C.R.

Una forma de controlar la velocidad de un motor de C.D. es por medio de la variación del voltaje. En la industria moderna este es el método más utilizado debido a la buena regulación de velocidad que se consigue y a las pocas pérdidas que se tienen.

El rectificador controlado de silicio, también conocido como tiristor, es el elemento que nos permite, a partir de una tensión alterna senoidal, obtener una tensión continua variable.

El tiristor está formado por dos elementos semiconductores tipo P y dos elementos tipo N, como se muestra en la figura 1a.

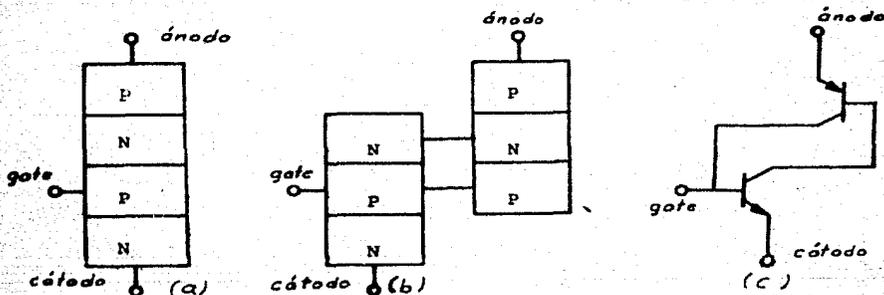


Figura 1

Este arreglo de los elementos semiconductores equivale a dos transistores conectados como se muestra en la figura 1c.

El símbolo del tiristor se muestra en la figura 2a.

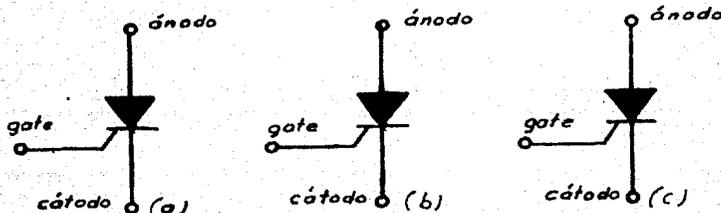
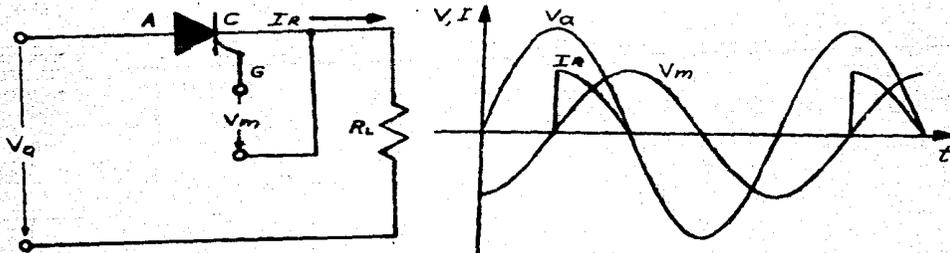


Figura 2

Al aplicar un voltaje con la polaridad indicada en la figura 2b, no circula corriente entre el cátodo y ánodo mientras no se aplique una corriente en el gate. Esto equivale a aplicar un voltaje en la base del transistor Q1, la corriente de base hace que circule una gran corriente del colector en Q1, esta corriente es, a su vez, la corriente de base del transistor Q2 por lo que la corriente del colector del transistor Q2 toma un valor muy alto, esta corriente es, a su vez, la corriente de base de Q1, provocándose una avalancha de corriente cuyo valor depende del valor de la resistencia de carga. Para iniciar esta avalancha de corriente es necesario un pequeño impulso de corriente instantáneo en el gate, esta avalancha sólo termina cuando la tensión entre ánodo y cátodo pasa por cero.

Si aplicamos un voltaje con la polaridad indicada en la figura 2c, nunca circula corriente entre ánodo y cátodo debido a las dos capas barrera conectadas en bloqueo, un impulso en el gate no tiene ningún efecto en estas condiciones.

Cuando utilizamos los tiristores en una red de corriente alterna, obtenemos una tensión continua variable, dependiendo del instante en que disparemos el gate. El circuito mostrado en la figura 3 nos permite comprender este proceso.



El voltaje aplicado entre el gate y el cátodo está atrasado un cierto ángulo  $\alpha$  llamado ángulo de mando, entre más pequeño sea este ángulo más rápido conduce el tiristor y es mayor la corriente  $I_d$  que llega a la carga.

En la práctica se utiliza un circuito rectificador de onda completa tipo puente con dos diodos y dos tiristores y un circuito de disparo que sólo da un impulso instantáneo al gate para hacer conducir los tiristores.

## ANEXO 2 PUENTE DE KELVIN (THOMPSON)

Los circuitos tipo puente son empleados en una gran variedad de aplicaciones: para la aplicación de resistencia, inductancia y capacitancia. Son usados, también, para la medición de temperatura, velocidad y nivel de fluidos, en combinación con resistencias cuyo valor varía con la temperatura (resistencias NTC y PTC).

La forma básica de los circuitos se muestra en la figura 1.

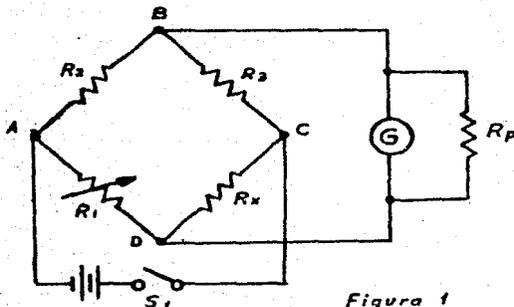


Figura 1

En este circuito los valores de las resistencias  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$ , son conocidos y el valor de uno de ellos se puede variar (en este caso  $R_1$ ). La determinación de la resistencia desconocida  $R_x$ , se hace cuando el circuito puente se encuentra en equilibrio, esto es, cuando entre los puntos B y D no existe diferencia de potencial.

El potencial en el punto B es:

$$V_B = \frac{V R_2}{R_2 + R_3} \quad (1)$$

Y en el punto D es:

$$V_D = \frac{V \cdot R_1}{R_1 + R_x} \quad (2)$$

Por lo tanto, la diferencia de potencial entre B y D es:

$$V_{BD} = \frac{V R_2}{R_2 + R_3} - \frac{V R_1}{R_1 + R_x}$$

Cuando  $V_{BD} = 0$ , tenemos:

$$R_x = \frac{R_1 R_2}{R_3} \quad (3)$$

Como se observa en la fórmula (3) podemos conocer la resistencia  $R_x$  a partir de dos resistencias conocidas ( $R_2$  y  $R_3$ ) y otra resistencia variable de valor, también conocido  $R_1$ .

En el medidor no es necesario hacer ningún cálculo, ya que al variar el valor de la resistencia  $R_1$  en un disco móvil, está indicado el valor de esta resistencia. Este valor puede variar con un selector (o clavijas) que hace un ajuste de rango.

La lectura debe hacerse cuando el galvanómetro indique que entre los puntos B y D no existe diferencia de potencial, la sensibilidad del galvanómetro se puede modificar con la resistencia  $R_p$ .

Un medidor tipo puente que nos permite medir resistencias muy pequeñas es el Puente de Thompson, cuyo diagrama se muestra en la figura 2.

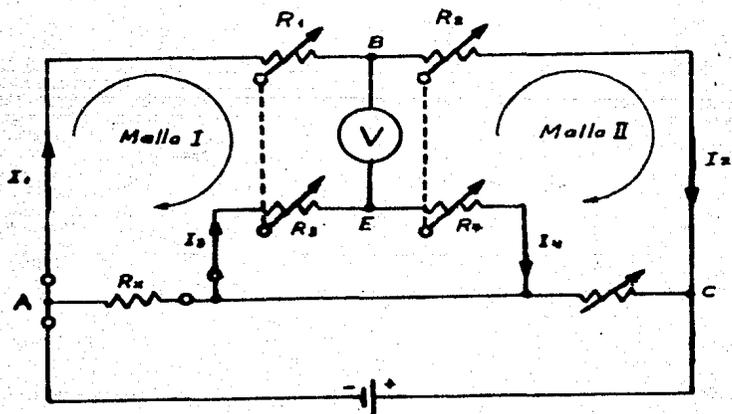


Figura 2

La lectura se debe hacer cuando el voltaje  $V_{BE} = 0$ , entonces:

$$I_1 = I_2 \quad I_3 = I_4 \quad (1)$$

En la malla I tenemos:

$$V_1 - V_3 - V_x = 0$$

$$I_1 R_1 - I_3 R_3 - I_x R_x = 0 \Rightarrow I_x = \frac{I_1 R_1 - I_3 R_3}{R_x} \quad (2)$$

En la malla II tenemos

$$V_2 - V_n - V_4 = 0$$

$$I_2 R_2 - I_n R_n - I_4 R_4 = 0 \Rightarrow I_n = \frac{I_2 R_2 - I_4 R_4}{R_n} \quad (3)$$

Igualando (2) y (3):

$$\frac{I_1 R_1 - I_3 R_3}{R_x} = \frac{I_2 R_2 - I_4 R_4}{R_n}$$

Haciendo  $R_1 = R_3$  y  $R_2 = R_4$  y como  $I_1 = I_2$  y  $I_3 = I_4$

$$\frac{R_1 (I_1 - I_3)}{R_x} = \frac{R_n (I_1 - I_3)}{R_n} \quad R_x = \frac{R_1}{R_2} R_n \quad (4)$$

Variando  $R_1$  (junto con  $R_3$ ) o  $R_2$  (junto con  $R_4$ ) se logra el ajuste de rango (en la práctica se varía  $R_1$ ) y variando  $R_n$  se logra un ajuste fino.

Conectando los puntos de  $R_x$  directamente en A y D quedan todas las resistencias de contacto y de los alambres de conexión incluidos en los circuitos de valor alto ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  y  $R_4$ ) por lo que, se recomienda utilizar cuatro cables de igual longitud para efectuar medición.

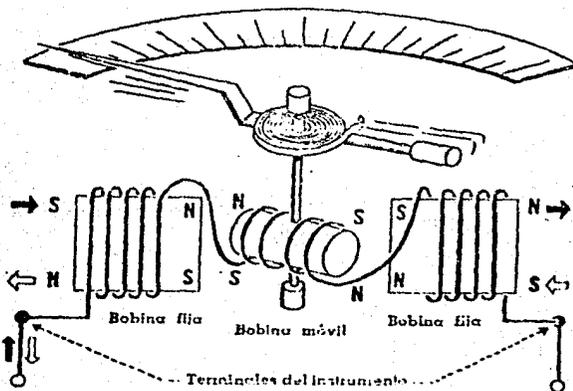
Nos interesa analizar cuando  $V_{BD} = 0$ , por lo que:

De donde:

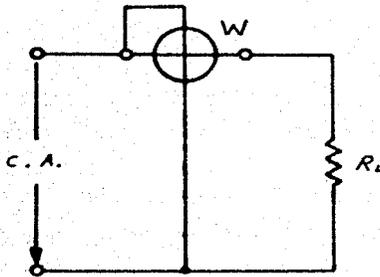
## ANEXO 3 MEDICION DE LA POTENCIA EN UN CIRCUITO TRIFASICO

La medición de la potencia se realiza con ayuda de un medidor electrodinámico, este medidor consta de dos bobinas, una de ellas es móvil y va dentro de la bobina que es fija. Generalmente, la bobina móvil se emplea en paralelo, o sea, sirve para medir el voltaje, la bobina fija mide la corriente.

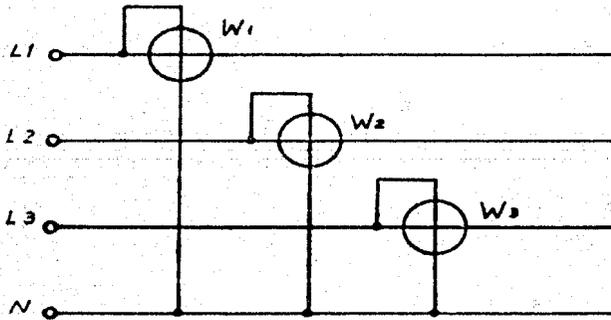
Al circular corriente por ambas bobinas, sobre la bobina móvil actúa un par de giro. Si el sentido de la corriente se invierte simultáneamente en ambas bobinas, el sentido de giro no varía. Por lo tanto, este mecanismo se puede utilizar, tanto para corriente alterna como para corriente continua. En corriente alterna la potencia indicada es la potencia activa. Figura 1.



Para medir la potencia en un circuito monofásico, se debe conectar la bobina de tensión en paralelo y bobina de corriente en serie, como se muestra en la figura 2.

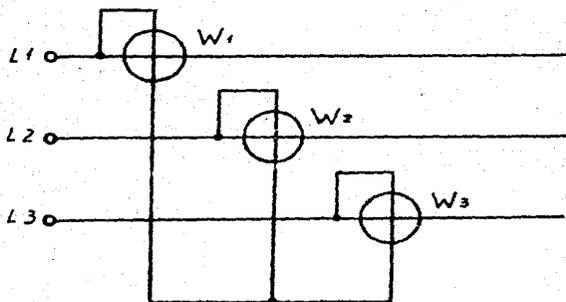


Cuando se quiere medir la potencia en un circuito trifásico de cuatro hilos (con neutro), se requieren tres wattmetros, cada uno de los cuales mide la potencia de una fase, se conectan en la forma siguiente. La potencia total es igual a la suma de la lectura de los tres medidores.

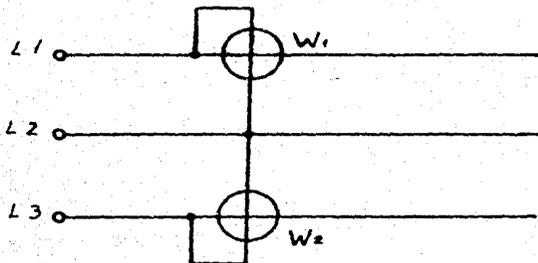


Si el circuito trifásico sólo consta de tres conductores, se utilizan tres medidores, creándose entre ellos un neutro artificial. En esta conexión, al igual que en la conexión

anterior, cada wattmetro mide la potencia de una fase.



Sin embargo, en los sistemas trifásicos de tres hilos es muy frecuente el uso de dos - -  
wattmetros, con el consiguiente ahorro, la forma de conectarlos se muestra en la figura -  
5. A esta conexión se la conoce con el nombre de Aron.



La potencia total es la suma de las potencias medidas en los dos wattmetros.  $P_t = P + P$

El que esto sea posible se basa en la siguientes relaciones:

En donde  $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_3$  son voltajes de fase al neutro y  $(V_1 - V_2)$  y  $(V_3 - V_2)$  son voltajes entre líneas, por lo tanto:

Esta fórmula es válida para cargas con factor de potencia mayores de 0.5, para cargas con factor de potencia 0.5 uno de los dos wattmetros mide 0 y para cargas menores de 0.5 uno de ellos mide al revés, por lo cual la potencia total es la resta de las dos mediciones.

Existen medidores de potencia trifásica que consta de dos medidores monofásicos dispuestos uno encima del otro, de modo que sus bobinas móviles puedan montarse sobre el mismo eje.

Sólo tiene una aguja y su desviación está determinada por la suma de los pares de desviación, constituyendo, por tanto, una medida de la potencia total.