

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA



" Construcción de una fuente trifásica regulable para  
desarrollar ensayos de rotor bloqueado en motores de  
inducción "

PRESENTADO POR

MARLON LIBARDO AMAYA ALEMÁN  
LUIS NORBERTO MENJIVAR RAMÍREZ  
JORGE VICENTE TOBAR MARTÍNEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, DICIEMBRE 2003

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTORA :

Dra. Maria Isabel Rodríguez

SECRETARIA GENERAL :

Licda. Lidia Margarita Muñoz Vela

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO :

Ing. Mario Roberto Nieto Lovo

SECRETARIO :

Ing. Oscar Eduardo Marroquín Hernández

DIRECTOR :

Ing. Luis Roberto Chévez Paz

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Titulo :

" Construcción de una fuente trifásica regulable para  
desarrollar ensayos de rotor bloqueado en motores de  
inducción "

Presentado por :

Marlon Libardo Amaya Alemán  
Luis Norberto Menjívar Ramírez  
Jorge Vicente Tobar Martínez

Trabajo de Graduación aprobado por:

Docente Director :

Ing. Armando Martínez Calderón

San Salvador, Diciembre 2003

Trabajo de Graduación aprobado por:

Docente Director :

Ing. Armando Martínez Calderón

## PREFACIO

El presente trabajo de graduación se ha desarrollado con el objetivo de construir una fuente regulable trifásica que pueda suministrar en forma segura la potencia eléctrica necesaria para desarrollar ensayos a rotor bloqueado en motores de inducción hasta una capacidad de 250HP. El equipo se construyó siguiendo las recomendaciones del estándar IEEE Std 112 el cual brinda los requerimientos indispensables para este tipo de fuente. El punto de partida para la construcción, fue el diseño preliminar efectuado en el proyecto de ingeniería, el cual se modificó para que la construcción de este equipo pudiera desarrollarse con los materiales disponibles en el mercado nacional y por supuesto que fuera factible.

Ya que el uso de la energía eléctrica tiene un componente económico, el cual día a día se incrementa, el estudio del rendimiento, eficiencia, etc del motor de inducción es prácticamente necesario, principalmente si este ha sido sometido a algún tipo de reparación en la cual sus parámetros han sido modificados. Partiendo de esto, se debe evaluar a través de los resultados del estudio, el impacto de las reparaciones sobre los parámetros propios del motor. De lo anterior, se observa la necesidad de construir un sistema con capacidad para hacer este tipo de estudio principalmente orientado a realizar pruebas o ensayos a rotor bloqueado. Las pruebas por supuesto para ser validas deben estar normalizadas, para el presente caso, por el estándar de la IEEE Std -112 que reúne los requisitos para desarrollar pruebas en maquinas polifásicas rotatorias.

El equipo construido esta diseñado para de manejar la corriente equivalente de un motor de 250HP, en tres de sus terminales y en los dos restantes 325 amperios, además de proveer los voltajes necesarios para la prueba en forma balanceada. Inicialmente el equipo se había planteado en manejar la corriente de un motor de 250HP sin ninguna restricción, es decir, en todos sus terminales. Esto se logro en parte ya que el material necesario para tal objetivo no se obtuvo. Adicionalmente, la potencia de las maquinas construidas esta limitada por la naturaleza de su funcionamiento, principalmente por la relación de transformación.

## RESUMEN

El presente trabajo consistió básicamente en construir tres unidades monofásicas de autotransformador, para lograr obtener a través de la conexión de las tres unidades, potencia trifásica. Esto principalmente motivado por la necesidad de construir un equipo capaz de manejar la potencia necesaria, para realizar ensayos a rotor bloqueado en motores de inducción hasta de una capacidad de 250HP. El trabajo describe la teoría en la que se basa el funcionamiento de las maquinas eléctricas involucradas en la investigación, así como también, fundamentos de diseño del equipo que se construyo, su fabricación y pruebas.

El diseño, fue prácticamente adaptado al tipo de maquina que se construyo, es decir, al diseño de autotransformadores, ya que el método empleado, esta orientado al diseño de transformadores convencionales y no a autotransformadores. Para lograr esto ultimo, fue necesario, el comprobar el método con un modelo, que tuviera las mismas características de voltajes que las maquinas a construir. Adicionalmente, datos importantes del diseño, fueron determinados por un estudio estadístico de los materiales de todos los transformadores desarmados, ya que la mayoría de los materiales utilizados en la construcción de los autotransformadores, fueron extraídos de estos.

La construcción del equipo una vez diseñado, fue de carácter artesanal, teniendo que implementar pequeñas herramientas de este tipo con el objetivo de llevar a cabo la construcción de las maquinas. Por supuesto una vez finalizada la construcción, pruebas fueron hechas a las maquinas construidas. Esta pruebas bajo recomendaciones por normas de la IEEE.

Finalmente, se incluyo los requisitos que se deben cumplir para que las pruebas a realizar con el equipo, estén bajo el estándar IEEE Std-112, realizando además un resumen de cómo poder elegir el método de prueba correcto de acuerdo al estándar antes mencionado y como presentar los datos de prueba una vez realizadas estas.

## TABLA DE CONTENIDOS

	Pagina
Lista de tablas	
Lista de figuras	
Capitulo I - Teoría básica de maquinas eléctricas	
Introducción	1
1.0. El transformador	
1.0.1. Definición de transformador	1
1.0.2. Principio de operación del transformador	1
1.0.3. Definiciones fundamentales	2
1.0.4. Polaridad del voltaje inducido	3
1.0.5. El coeficiente de acople	3
1.0.6. El transformador ideal	5
1.0.7. Impedancia reflejada	9
1.0.8. El transformador práctico	10
1.0.9. Circuitos equivalente para un transformador de potencia práctico	11
1.1. El autotransformador	14
1.1.1. Definición	14
1.1.2. Principio de operación	15
1.1.3. Funcionamiento del autotransformador	15
1.1.4. Circuito equivalente	20
1.1.5. Ventajas y desventajas de los autotransformadores	21
1.1.6. Conexiones trifásicas de los autotransformadores	22
1.1.7. Aplicaciones de los autotransformadores	25
1.2. El motor de inducción	26
1.2.1. Definición	26
1.2.2. Principio de funcionamiento	26
1.2.3. El modelo del motor de inducción	26
1.2.4. Pruebas en motores de inducción	27
1.2.4.1. Tipos de prueba	29

1.2.5. Banco de pruebas de motores de inducción	29
1.2.5.1. Definición	29
1.2.5.1. Elementos que forman el banco de pruebas	30
Conclusiones del capítulo I	32
Referencias bibliográficas	33
Capítulo II - Etapa de diseño	
Introducción	34
2.0. Teoría de diseño del transformador	34
2.1. Potencia del transformador	36
2.1.1. Densidad de flujo	37
2.1.2. Densidad de corriente	38
2.2. Clasificación y tipos de transformadores	40
2.2.1. Transformadores de potencia	40
2.2.2. Transformadores de distribución	40
2.2.3. Ecuación de rendimiento voltio-vuelta del devanado	41
2.2.4. Límites usuales de densidad de flujo y la densidad de corriente	43
2.2.4.1. Densidad de flujo	43
2.2.4.2. Densidad de corriente en los bobinados	43
2.3. Determinación de los parámetros de los transformadores de distribución usados para la construcción de la fuente trifásica	44
2.3.1. Características de los transformadores de 75 kVA	44
2.3.2. Cálculo de las pérdidas en el núcleo	45
2.4. Definición de los voltajes de la fuente	47
2.5. Procedimiento de diseño matemático del transformador	49
2.5.1. Pérdidas en el conductor	53
Conclusiones del capítulo II	59

Referencias bibliográficas	60
Capítulo III - Proceso de construcción	
Introducción	61
3.0. Preparación de los núcleos	61
3.1. Preparación del conductor magnético	61
3.2. Herramientas para la construcción de los devanados	63
3.2.1. Construcción del molde	63
3.2.2. Construcción de la maquina para embobinar	63
3.2.3. Construcción de la remachadora hidráulica	64
3.3. Construcción de los devanados	64
3.4. Ensamble del autotransformador monofásico	65
3.5. Ensamble del banco trifásico de autotransformador	66
3.5.1. Construcción de la estructura metálica	67
3.5.2. Instalación de los conductores	67
3.5.3. Conexión del banco trifásico	69
Conclusiones del capítulo III	70
Referencias bibliográficas	71
Capítulo IV - Prueba de autotransformadores	
Introducción	72
4.0. Pruebas para autotransformadores	72
4.0.1. Pruebas de aislamiento	72
4.0.2. Pruebas a cero voltaje	73
4.0.2.1. Pruebas de vacío	74
4.0.2.2. Pruebas de voltaje	75
4.0.3. Pruebas de corto-circuito	75

4.1. Resultados de las pruebas	77
4.1.1. Resultados de las pruebas de aislamiento	77
4.1.2. Resultados de las pruebas a cero carga	78
4.1.2.1. Resultados de la prueba de vacío	78
4.1.2.2. Resultados de la prueba voltajes	78
4.1.3. Resultados de la prueba de corto-circuito	79
4.2. Comparación de resultados	80
4.2.1. Pruebas de aislamiento	80
4.2.2. Pruebas a cero carga	80
4.2.2.1. Pruebas de vacío	80
4.2.2.2. Pruebas de voltaje	81
4.2.3. Prueba de corto-circuito	81
Conclusiones del capítulo IV	82
Referencias bibliográficas	83
Capítulo V - Requerimientos para los procedimientos de ensayo	
Introducción	84
5.1. Requerimientos de potencia	84
5.1.1. Cantidades eléctricas	85
5.1.2. Suministro de potencia	85
5.1.2.1. Estabilidad en la frecuencia	85
5.1.3. Selección de instrumentos	86
5.1.4. Transformadores de instrumentación	87
5.1.5. Voltaje	87
5.1.6. Corriente	88
5.1.7. Potencia	88
5.1.8. Resistencia	88
5.1.8.1. Resistencia de referencia	88
5.1.8.2. Resistencia del ambiente	88
5.1.8.3. Corrección a una temperatura especificada	88

5.1.9. Cantidades mecánicas	89
5.1.9.1. Potencia	89
5.1.9.2. Estabilización de perdidas por rodamientos	90
5.2. Procedimiento de prueba	90
5.2.1. Determinación de la eficiencia	91
5.2.2. Métodos de prueba para eficiencia	92
5.2.3. Guía para seleccionar el método de prueba para determinar la eficiencia	92
5.2.4. Resumen del procedimiento de prueba	93
5.3. Presentación de los resultados	94
Conclusiones del capítulo V	98
Referencias bibliográficas	99
Conclusiones generales y recomendaciones	100
Anexos	101
Anexo A	101
Anexo B	103
Anexo C	111
Anexo D	113
Anexo E	114

## LISTA DE TABLAS

Tabla	Pagina
2.1. Valores típicos de la constante "c"	43
2.2. Valores típicos de las densidades de flujo	43
2.3. Resumen de las características de diferentes tipos de transformadores	47
2.4. Recomendaciones de voltaje para alcanzar la corriente nominal en motores de inducción a rotor bloqueado	48
2.5. Porcentajes de voltaje nominal para motores de hasta 250 hp a 240 V	48
2.6. Porcentajes de voltaje nominal para motores de hasta 250 hp a 480 V	48
2.7. Corrientes requeridas en los terminales del autotransformador	54
2.8. Corrientes y potencia para maquinas de hasta 250 hp a 240 V	54
2.9. Corrientes y potencia para maquinas de hasta 250 hp a 480 V	55
2.10. Corrientes y potencia para maquinas de hasta 250 hp a 480 y 240 V	56
2.11. Perdidas en el conductor para la máxima demanda de potencia	58
2.12. Perdidas en el conductor dependiendo de la derivación que se use para la prueba	58
4.1. Resultados de la prueba de aislamiento en los autotransformadores	77
4.2. Resultados de la prueba de vacío	78
4.3. Resultados de las pruebas de los autotransformadores monofásicos	79
4.4. Resultados de las pruebas de voltaje banco trifásico	79

4.5. Resultados pruebas de corto-circuito	80
5.1. Resumen de las características de las maquinas	84
5.2. Formato recomendado para presentar los resultados De las pruebas rutinarias en maquinas de inducción Según IEEE Std-112	96
5.3. Formato recomendado para presentar los resultados De las pruebas especializadas en maquinas de Inducción Según IEEE Std-112	97

## LISTAS DE FIGURAS

Figura	Pagina
1.1. Transformador con núcleo de aire acoplado inductivamente	2
1.2. Caso ideal de un transformador con núcleo de hierro	6
1.3. Diagramas fasoriales del transformador	7
1.4. Impedancias reflejadas del transformador	11
1.5. Diagrama de un transformador practico	13
1.6. Circuitos equivalentes para un transformador de potencia	14
1.7. Transformador monofásico	16
1.8. Autotransformador reductor	16
1.9. Autotransformador con carga	17
1.10. Autotransformador reductor	18
1.11. Transformador equivalente de un autotransformador	19
1.12. Valores de $1 - (1/a)$ y $V_1 / V_2 = a$	20
1.13. Circuito equivalente del transformador	21
1.14. Circuito equivalente aproximado	21
1.15. Conexión de autotransformadores en estrella	23
1.16. Conexión de autotransformadores en estrella zig-zag	24
1.17. Conexión de autotransformadores en configuración delta	24
1.18. Conexión de autotransformadores en Vv	25
1.19. Circuito equivalente del motor de inducción	27

1.20. Elementos de un banco de pruebas de motores	31
2.1. Núcleo de hierro de un transformador tipo acorazado	44
2.2. Esquema del transformador	50
2.3. Esquema del autotransformador	53
2.4. Esquema del autotransformador con todas sus derivaciones	55
2.5. Esquema del autotransformador con derivaciones	56
3.1. Preparación del conductor	62
3.2. Conductor en proceso de limpieza	63
3.3. Molde del devanado	64
3.4. Embobinadora artesanal	65
3.5. Remachadora artesanal	66
3.6. Embobinado construido	66
3.7. Autotransformador monofásico	67
3.8. Estructura metaliza construida	68
3.9. Instalación de los conductores	69
3.10. Equipo trifásico construido	69
4.1. Conexión para medir aislamiento en el autotransformador	73
4.2. Conexión para pruebas en vacío	74
4.3. Conexión para pruebas de voltaje	75
4.4. Circuito de prueba de corto-circuito	76

## CAPITULO I

### TEORIA BASICA DE MAQUINAS ELECTRICAS

#### Introducción

El presente capítulo describe en forma breve los conceptos básicos en los que se basa el funcionamiento de las maquinas eléctricas utilizadas en el diseño de la fuente regulable, como son el transformador y el autotransformador. Básicamente el objetivo que persigue el capítulo es desarrollar los conceptos de funcionamiento de la maquinas bajo estudio.

#### 1.0. El transformador

##### 1.0.1. Definición de transformador

El transformador es un dispositivo eléctrico de dos (o más) bobinas acopladas íntimamente y enrolladas juntas en un núcleo de hierro. Es usado para transferir energía eléctrica, sin cambio en la frecuencia. Generalmente esta transferencia esta acompañada por un cambio de voltaje. Un transformador puede recibir energía a un voltaje y liberarla a un voltaje más alto, en cuyo caso es llamado "transformador elevador"; puede recibir energía a un voltaje y liberarla a un voltaje más bajo, en cuyo caso es llamado "transformador reductor"; o puede recibir energía a un voltaje y liberarla al mismo voltaje, en cuyo caso es llamado "transformador uno a uno"

El transformador más sencillo esta constituido por un circuito magnético o núcleo, formado por chapas apiladas de material ferromagnético, aisladas por ambas caras; y por dos circuitos eléctricos enrollados sobre el núcleo, sin que exista conexión conductiva entre ellos.

##### 1.0.2. Principio de operación del transformador

El transformador esté basado en el principio de la "inductancia mutua" entre dos (o más) bobinas acopladas

inductivamente. Cuando se sitúan dos arrollamientos de forma que los cambios de corriente en uno hagan que su flujo magnético variable corte a las vueltas del otro, se origina un voltaje inducido en el segundo arrollamiento. Siendo el voltaje proporcional a la razón de variación del flujo magnético. Se dice que los dos circuitos poseen "inductancia mutua". La proporcionalidad entre el voltaje y la razón de variación de la corriente es la inductancia mutua.

### 1.0.3. Definiciones fundamentales

La Figura 1.1 muestra un transformador teórico con núcleo de aire en el que los dos circuitos estén acoplados por inducción magnética. El circuito conectado a la fuente de voltaje alterno,  $V_1$ , se llama "primario" (circuito 1). El primario recibe su energía de la fuente alterna. Dependiendo del grado de "acople magnético" entre los dos circuitos, se transfiere energía del circuito 1 al circuito 2.

En este caso del núcleo de aire, el acople es pobre y por lo tanto sólo se transfiere al circuito 2 una cantidad pequeña de energía. Por otro lado un transformador con sus dos bobinas enrolladas en un núcleo común de hierro, transferirá casi toda la energía recibida de la fuente, alterna por el primario, hacia el secundario,

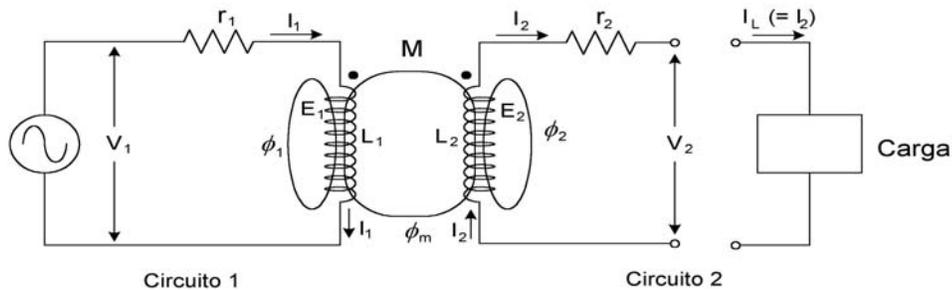


Figura 1.1 Transformador con núcleo de aire acoplado inductivamente

De la Figura 1.1 se obtienen las siguientes definiciones usadas para todos los transformadores. Así, se tienen:

- $V_1$ : voltaje de la fuente aplicado al primario, en voltios.
- $r_1$ : resistencia del primario, en ohmios.
- $L_1$ : inductancia del primario, en henrios.
- $X_{L1}$ : reactancia inductiva del primario, en ohmios.
- $Z_1$ : impedancia del primario, en ohmios.

$I_1$ : corriente rms absorbida de la fuente por el primario, en amperios.  
 $E_1$ : voltaje inducido en la bobina primaria por todo el flujo que enlaza la bobina 1, en voltios.  
 $E_2$ : voltaje inducido en la bobina secundaria por todo el flujo que enlaza la bobina 2, en voltios.  
 $I_2$ : corriente rms liberada por el secundario hacia una carga colocada a través de sus terminales, en amperios.  
 $r_2$ : resistencia del secundario (excluyendo la carga), en ohmios.  
 $v_2$  voltaje en los terminales del devanado secundario, en : voltios.  
 $L_2$ : inductancia del secundario, en henrios.  
 $X_{L2}$ : reactancia inductiva del secundario, en ohmios.  
 $Z_2$  impedancia del secundario (excluyendo la carga), en : ohmios.  
 $\phi_1$ : componente de dispersión del flujo que enlaza sólo la bobina 1.  
 $\phi_2$ : componente de dispersión del flujo que enlaza sólo la bobina 2.  
 $\phi_M$ : flujo mutuo, compartido por ambos circuitos, enlazando las bobinas 1 y 2.  
 $M$ : inductancia mutua entre las dos bobinas producida por el flujo mutuo ( $\phi_M$ ), en henrios

#### 1.0.4. Polaridad del voltaje inducido

En la Figura 1.1, los puntos cercanos a las bobinas están para mostrar la polaridad instantánea de los devanados primario y secundario, como resultado de la acción transformadora. Así de acuerdo a la ley de Lenz, cuando  $V_1$  es instantáneamente positivo, un voltaje  $E_1$  es inducido en el devanado primario de polaridad opuesta a  $V_1$ . También de acuerdo a la ley de Lenz,  $I_2$  se opone a  $I_1$ , ya que  $I_1$  produce a  $\phi_m$ ; a su vez,  $I_2$  determina la polaridad instantánea de  $E_2$ . La polaridad instantánea de  $I_2$  y  $E_2$  establece la polaridad instantánea de  $V_2$  y la dirección de la corriente en la carga.

#### 1.0.5. El coeficiente de acople (k)

Conocida la polaridad del efecto magnético del circuito 1 sobre el circuito 2, debido al flujo magnético mutuo ( $\phi_m$ ), debe especificarse la cantidad de acción mutua entre ambos circuitos. En la Figura 1.1, la inductancia mutua, como cualquier otra inductancia, es proporcional al voltaje inducido, esto es:

$$e_M = M \frac{di}{dt} \quad (1.1)$$

donde:  $e_M$  es el voltaje desarrollado en la bobina 2 por el flujo común  $\phi_m$ .

De acuerdo a la Ley de Inducción Electromagnética de Faraday, se tiene que:

$$E_m \propto k N_1 N_2$$

Y para una bobina cualquiera se sabe que:

$$L \propto N^2$$

Escrita la proporcionalidad de otra forma:

$$N \propto \sqrt{L}$$

Nos conduce a escribir que:

$$N_1 \propto \sqrt{L_1} \quad \text{y} \quad N_2 \propto \sqrt{L_2}$$

y por lo tanto:

$$E_m \propto M \propto k N_1 N_2 = k' \sqrt{L_1 L_2} \quad ,$$

donde:  $k'$  (o  $k$ ) es, por definición, el coeficiente de acople, y  $\sqrt{L_1 L_2}$  es el medio geométrico de las auto-inductancias de las dos bobinas.

El coeficiente de acople ( $k$ ) entre las dos bobinas de la Figura 1.1, es una razón del flujo mutuo al flujo total, definido como:

$$k = \frac{\phi_1}{\phi_m + \phi_1} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (1.2)$$

En el transformador de la Figura 1.1, el acople es débil debido a que el núcleo es de aire por lo tanto  $\phi_m$  y  $\phi_2$  son pequeños con respecto a  $\phi_1$ . consecuentemente  $L_2$  y  $M$  son pequeñas con respecto a  $L_1$ . La sustitución de estos valores en la ecuación (1.2) produce un valor pequeño de  $k$ . Esto, a su vez, produce valores bajos de  $E_2$  y  $V_2$  (en comparación a  $E_1$  y  $V_1$ ). Para cualquier carga dada, un valor pequeño de  $V_2$  produce una pequeña corriente de carga ( $I_2$ ), y la potencia

transferida al circuito secundario,  $E_2 I_2$  es relativamente pequeña. De lo anterior se deduce que si las bobinas de un transformador están acopladas estrechamente, y los flujos  $\phi_1$  y  $\phi_2$  son pequeños en comparación con  $\phi_m$ ,  $M$  es tan grande como lo son  $E_2$ ,  $I_2$  y  $V_2$ . El intento de los diseñadores de transformadores de potencia con núcleo de hierro, es alcanzar en éstos un coeficiente de acople unitario, ( $k=1$ ) tal que en la ecuación 2,  $M = \sqrt{L_1 L_2}$  como en el caso del transformador ideal.

#### 1.0.6. EL Transformador ideal

Un transformador ideal es la aproximación de un transformador con acoplamiento muy fuerte, en el cual  $k$  vale casi 1, y las reactancias inductivas ( $X_{L1}$ ,  $X_{L2}$ ) son extremadamente grandes en comparación con las impedancias terminales.

Por medio del análisis del transformador ideal resulta sencillo analizar aproximadamente un circuito que contenga un transformador con núcleo de hierro, sustituyendo a este por uno que se comporte de una forma ideal. Por definición, un transformador ideal es aquel cuyos flujos  $\phi_1$  y  $\phi_2 = 0$  y  $k = 1$ .

La Figura 1.2 muestra un transformador con núcleo de hierro, considerado ideal, en estas condiciones se posee solamente el flujo mutuo  $\phi_m$  común a las bobinas primarias y secundarias. Cuando  $V_1$  posee un valor instantáneo positivo, la dirección de la corriente  $I_1$  produce la dirección de  $\phi_m$ . El voltaje inducido  $E_1$  produce una polaridad positiva en la parte superior de la bobina primaria, de acuerdo a la convención de puntos y a la Ley de Lenz, que se opone instantáneamente a  $V_1$ . De igual forma, vista la dirección de  $\phi_m$ , la polaridad de  $E_2$  deberá ser positiva. Una carga conectada entre los terminales del secundario, produce  $I_2$  que fluye de acuerdo a la polaridad de  $E_2$ , y produce un flujo desmagnetizante.

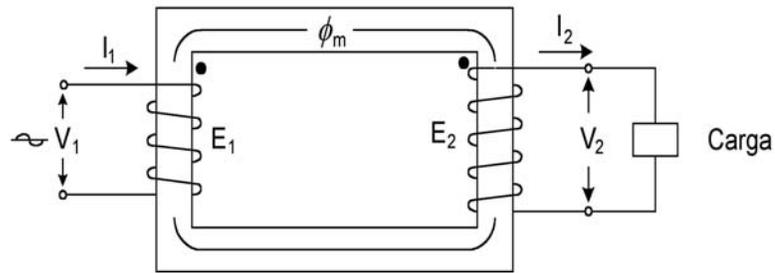


Figura 1.2 Caso ideal de un transformador con núcleo de hierro

Para comprender cualitativamente como un transformador desarrolla potencia en el secundario y transfiere potencia del primario al secundario, consideremos lo siguiente:

- Se asume que la impedancia de carga en el secundario es infinita; por tanto, el circuito se considera abierto,  $I_2 = 0$
- El voltaje aplicado crea el flujo mutuo alterno  $\phi_m$  que a su vez produce las f.e.m.  $E_1$  y  $E_2$ , que tienen las polaridades, mostradas en la Figura 1.2, con respecto a  $\phi_m$ .
- Aunque el transformador esté sin carga, deberá fluir una pequeña corriente primaria,  $I_m$ , conocida como corriente de magnetización. La razón de que esta corriente sea pequeña es que el voltaje inducido primario,  $E_1$ , se opone al voltaje aplicado,  $V_1$ , en cada instante. La magnitud de  $I_m$  es una función primariamente de la reluctancia del circuito magnético,  $R_m$ , y del valor pico del flujo mutuo magnetizante,  $\phi_{pm}$  para un número dado de vueltas primarias.
- $I_m$  atrasa al voltaje primario, que la produce  $\phi_m$ , por  $90^\circ$ . Esto se observa en la figura 1.3a.
- A su vez  $\phi_m$  requiere de  $90^\circ$  para producir los voltajes inducidos  $E_1$  y  $E_2$ . Estos voltajes inducidos están en fase entre sí debido a que ambos son producidos por  $\phi_m$ . De la figura 1.3a se nota que  $E_1$  se opone a  $V_1$ . Esta misma figura representa todas las relaciones de corriente y voltaje en el transformador ideal cuando está funciona en vacío.
- Se asume una carga inductiva conectada a través del secundario del transformador ideal de la figura 1.2.
- Esta carga produce a  $I_2$  atrasado a  $E_2$  por un ángulo  $\theta_2$ , ver figura 1.3b
- Los amperios-vuelta secundarios,  $I_2 N_2$ , de la figura 1.2, tienden a producir un flujo desmagnetizante que reduce a  $\phi_m$  y a los voltajes inducidos,  $E_2$  y  $E_1$ , instantáneamente.
- La reducción de  $E_1$  causa una componente primaria de corriente de carga,  $I_1'$ , que fluye en el circuito primario

restableciendo a  $\phi_m$ , a su valor original, tal que  $I_1' N_1 = I_2 N_2$ . Note en la Figura 1.3b que  $I_1'$  atrasa a  $V_1$  por  $\theta_1'$  mientras  $I_2$  atrasa  $E_2$  por  $\theta_2$ , tal que  $\theta_1' = \theta_2$

- En la figura 1.3c se muestra el efecto de la componente primaria de corriente de carga  $I_1'$  en el primario, donde la corriente primaria  $I_1$  es la suma fasorial de  $I_m$  e  $I_1'$ .

Nótese que:

- El ángulo de f.p. del primario ha decrecido desde su valor original sin carga de 90 a su ángulo  $\theta_1$  con carga.
- El ángulo de f.p. del circuito primario no es exactamente igual al del circuito secundario. Para cargas inductivas,  $\theta_1 > \theta_2$

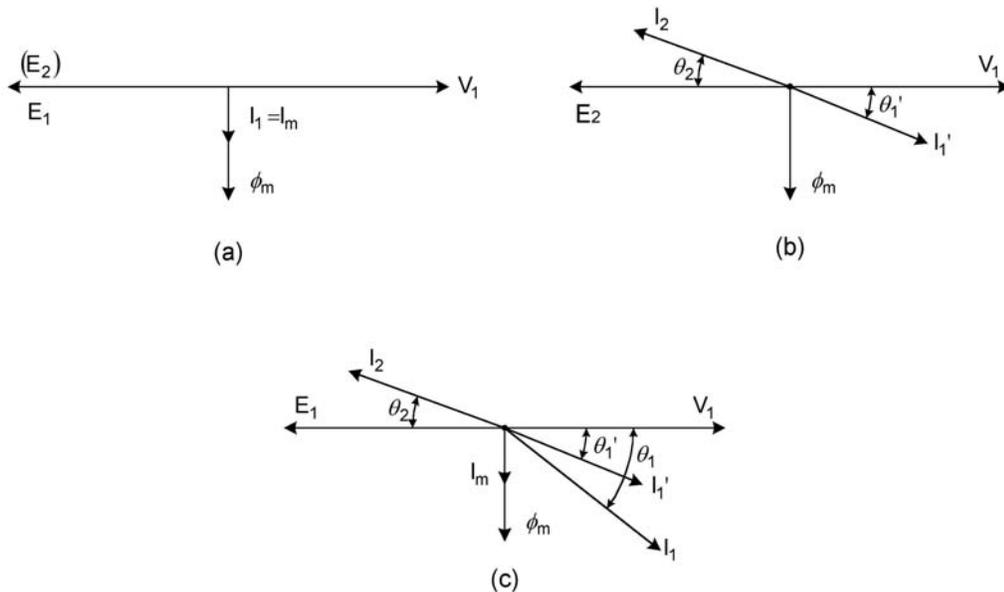


Figura 1.3 Diagramas fasoriales del transformador

- Relaciones primarias sin carga.
- Relaciones secundarias, con carga
- Relaciones primarias, con carga

Las consideraciones anteriores revelan la forma en que responde el primario a la carga del secundario. La igualdad entre la f.m.m. de desmagnetización  $I_2 N_2$  y la f.e.m. primaria de carga que contrarreste la acción desmagnetizadora, puede resumirse y arreglarse así:

$$I_1' N_1 = I_2 N_2 \quad (1.3)$$

ó

$$\frac{I_2}{I_1'} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (1.4)$$

donde:  $a$  = razón de transformación  
 $I_1'$  = componente de carga de la corriente primaria  
 $I_2$  = corriente de carga  
 $N_1$  y  $N_2$  vueltas primarias y secundarias  
= respectivamente

La ecuación 1.4, dice que la razón de transformación,  $a$ , "es fijada" dependiendo de la aplicación del transformador, y no es una constante. Por lo tanto, la componente de carga de la corriente primaria se puede calcular para cualquier valor de corriente de carga secundaria.

La razón de transformación puede establecerse en términos de voltajes también, cuantificando la Ley de Inducción Electromagnética de Faraday:

$$E_{promedio} = \frac{\phi}{t} \times 10^{-8} \text{ (voltios)}$$

donde:  $E_{promedio}$  = voltaje inducido en una vuelta (voltios-vuelta)  
 $\phi$  = flujo magnético enlazado por vuelta (maxwell)  
 $T$  = tiempo en segundos en que  $\phi$  se encuentra enlazado  
 $10^{-8}$  = es el número de líneas de flujo que debe enlazar una vuelta en cada segundo, a fin de inducir un voltaje de 1 voltio

De la ecuación anterior se deduce que para incrementar el voltaje inducido se puede incrementar la fuerza del campo magnético (es decir, el número de líneas de flujo en movimiento relativo al conductor) o reduciendo el tiempo durante el que ocurre el cambio en los enlaces de flujo. Así, se tiene también:

$$E_1 = N_1 \frac{d\phi_m}{dt} \quad (1.5)$$

$$E_2 = N_2 \frac{d\phi_m}{dt} \quad (1.6)$$

Puesto que la razón de cambio del flujo mutuo ( $d\phi_m/dt$ ) que

enlazan las vueltas primarias y secundarias, es la misma, se puede dividir la (1-5) por la (1-6) para establecer la razón de transformación,  $a$ , en términos de voltajes:

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (1.7)$$

Las ecuaciones (1.4) y (1.7) producen:

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1'} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (1.8)$$

De (1.8) se obtiene la relación de "potencias fundamentales" entre el primario y secundario:

$$E_1 I_1' = E_2 I_2 \quad (1.9)$$

Ahora, si se considera que la componente de carga de la corriente primaria,  $I_1'$ , es mucho más grande que la corriente de magnetización  $I_m$ , se puede escribir:

$$E_1 I_1 = E_2 I_2 \quad (\text{si } I_m \text{ es despreciable}) \quad (1.10)$$

Podemos decir que para un transformador ideal, "que no tiene pérdidas" debidas a flujos de dispersión en el primario y secundario (reactancias de dispersión cero):

$$V_1 I_1 = V_2 I_2 \quad (\text{para un transformador ideal}) \quad (1.11)$$

La ecuación (1.11) verifica que un transformador es un dispositivo que transfiere energía de un circuito a otro. También establece un medio de clasificar un transformador en voltio-amperios (VA) o kilo-voltio-amperios (KVA) donde  $V_1$  e  $I_1$  son el voltaje y corriente nominal del primario, respectivamente, y  $V_2$  e  $I_2$  son el voltaje y corriente nominal del secundario, respectivamente.

#### 1.0.7. Impedancia reflejada

La Figura 1.4 presenta un transformador ideal con núcleo de hierro, el cual tiene conectados en sus terminales secundarios una impedancia  $Z_L$ , se define ahora que para cualquier valor de  $Z_L$ , la impedancia en los terminales secundarios vista desde la carga es:

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2} \quad (1.12)$$

Analizada de igual forma, la impedancia equivalente de entrada en los terminales primarios, vista desde la fuente es:

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} \quad (1.13)$$

Ya que cambios en  $Z_L$  e  $I_2$  se reflejan en el primario como un cambio en la corriente primaria, conviene simplificar el transformador a un circuito equivalente. Esto lleva a reflejar la impedancia secundaria al lado primario.

De (1.7)  $V_1 = aV_2$  y de (1.4)  $I_1' = I_2/a$

Se obtiene que:

$$Z_1 = \frac{aV_2}{I_2/a} = a^2 \frac{V_2}{I_2}$$

pero  $V_2/I_2 = Z_2$  y por lo tanto:

$$Z_1 = a^2 Z_2 \quad \text{o} \quad \frac{Z_1}{Z_2} = a^2 = \frac{N_1^2}{N_2^2} \quad (1.14)$$

La Figura 1.4c muestra la impedancia en los terminales de entrada, vista desde la fuente, cuando la impedancia secundaria ( $Z_L$ ) esta reflejada en el primario.

#### 1.0.8. El transformador práctico

Por fuerte que sea el acople en un núcleo de hierro, siempre se producen flujos de dispersión  $\phi_1$  y  $\phi_2$  en los devanados primario y secundario, respectivamente, aparte del flujo mutuo  $\phi_m$ . Esto se muestra en la figura 1.5 de un transformador práctico, donde  $\phi_1$  produce  $X_{L1}$ ,  $\phi_2$  produce  $X_{L2}$  y las resistencias internas de los alambres de cobre de las bobinas primaria y secundaria son  $r_1$  y  $r_2$ , respectivamente. Todas estas reactancias y resistencias producen caídas de tensión dentro del transformador como resultado de las corrientes primaria y secundaria. La Figura 1.5b presenta estas resistencias y reactancias internas, en serie con el transformador ideal, que ahora sufre pérdidas por caída de voltaje primario  $I_1 Z_1$  y por la caída de voltaje secundario  $I_2 Z_2$  donde:

Figura 1.4 Impedancias reflejadas del transformador

- a) Transformador ideal con carga.
- b) Impedancias equivalentes de entrada y salida
- c) Impedancia equivalente reflejada

$$Z_1 = r_1 + jX_{L_1} \quad (1.15)$$

$$Z_2 = r_2 + jX_{L_2} \quad (1.16)$$

Para ver la relación entre los voltajes terminal e inducido del primario y secundario, respectivamente, se deducen de la Figura 1.5b las siguientes ecuaciones:

$$E_1 = V_1 - (I_1 Z_1) = V - I_1 (r_1 + jX_{L_1}) \quad (1.17)$$

$$E_2 = V_2 - (I_2 Z_2) = V - I_2 (r_2 + jX_{L_2}) \quad (1.18)$$

De (1.17) y (1.18), y de la Figura 1.5b se observa que:

$$V_1 > E_1 \quad \text{y} \quad V_2 < E_2 \quad (1.19)$$

para un transformador practico operando en condiciones nominales.

#### 1.0.9. Circuitos equivalentes para un transformador de potencia práctico

Las relaciones que expresan (1.17) Y (1.18) dan la idea de que se puede desarrollar un circuito equivalente para el transformador practico si se hace la transformación de impedancias.

Un circuito semejante es útil para resolver problemas relacionados con la eficiencia y la regulación de voltaje de un transformador. El circuito equivalente del transformador de la Figura 1.5b se muestra en la Figura 1.6a con la impedancia de carga, la resistencia interna secundaria y la reactancia secundaria, reflejadas en el primario.

En la Figura 1.6.a se observa que  $I_1 = I_m + I_1'$ ; y  $R_m$  representa la pérdida de potencia equivalente del transformador debida a la pérdida en el hierro del núcleo del transformador, como a la pérdida que resulta de la corriente de magnetización,  $I_m$ ;  $X_{Lm}$  representa la componente de reactancia del transformador.

Si en la Figura 1.6a. se abre el secundario,  $I_1' = 0$ , sólo fluye  $I_m$ , tal que  $I_1 = I_m$ , que produce una pequeña caída interna de tensión debida a  $Z_1$  (igual a  $r_1 + j X_{L1}$ ). Puesto que  $Z_1$  e  $I_1$  son relativamente pequeños, se puede obtener un circuito equivalente aproximado trasladando la rama en paralelo L- R directamente a través de la fuente  $V_1$ .

Ahora se pueden compactar las resistencias y reactancias internas de los circuitos primario y secundario, respectivamente (como lo muestra la Figura 1.6b.) para producir:

resistencia equivalente referida al primario:

$$R_{e1} = r_1 + a^2 r_2 \quad (1.20)$$

reactancia equivalente referida al primario:

$$X_{e1} = X_{L1} + a^2 X_{L2} \quad (1.21)$$

impedancia equivalente referida al primario:

$$Z_{e1} = R_{e1} + jX_{e1} \quad (1.22)$$

Figura 1.5 Diagrama de un transformador práctico cargado

- a) Flujos de dispersión en un transformador práctico cargado.
- b) Resistencias y reactancias primarias y secundarias que causan caídas de voltaje en un transformador práctico

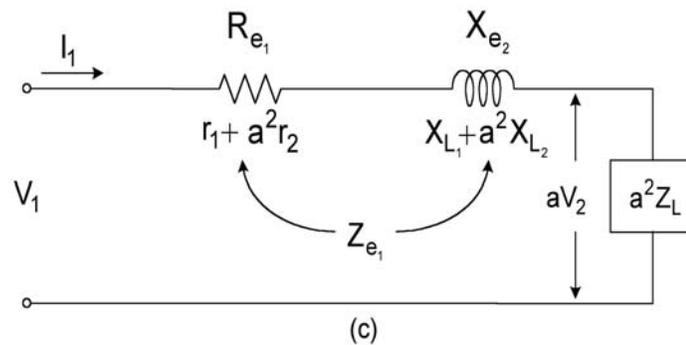


Figura 1.6 Circuitos equivalentes para un transformador de potencia

- a) Circuito equivalente del transformador de potencia
- b) Equivalente aproximado conteniendo resistencias y reactancias compactadas.
- c) Circuito equivalente simplificado, donde  $I_m=0$ .

## 1.1. El autotransformador

### 1.1.1. Definición

El autotransformador es un tipo especial de transformador, el cual está constituido básicamente por una sola bobina. También el autotransformador es usado para

transferir energía eléctrica sin cambio en la frecuencia, al igual que los transformadores se pueden clasificar como " elevador o reductor".

### 1.1.2. Principio de operación.

Básicamente el principio de operación del autotransformador es el mismo del transformador de dos bobinas, es decir la inductancia mutua, lo cual se describió en el apartado 1.0.2. La principal diferencia es que en el caso de esta maquina no existe el aislamiento magnético que ofrece el transformador lo cual es considerado una desventaja para ciertas aplicaciones donde se requiera de esta propiedad, esto debido a que los embobinados esta unidos físicamente, lo cual provoca que parte de la energía de la maquina sea transmitida por inducción y parte por medio de la conducción eléctrica.

### 1.1.3. Funcionamiento del autotransformador

La Figura 1.7 muestra un transformador monofásico, las flechas indican el sentido positivo de las fuerzas electromotrices primaria  $E_1$  y secundaria  $E_2$ , en fase, inducidas en el primario y en el secundario por el flujo magnético común. Si se unen dos puntos homólogos, por ejemplo B y D, los puntos unidos estarán constantemente al mismo potencial; teniéndose sobre el arrollamiento de mayor tensión, otro punto C' cuya tensión coincidirá, con la tensión del terminal libre C del arrollamiento de baja tensión: por consiguiente, pueden unirse también los punto C y C' sin ningún inconveniente y sin modificar esencialmente las condiciones electromagnéticas del conjunto. Por lo tanto, es posible suprimir el arrollamiento CD de la Figura 1.7 obteniendo la configuración expresada en la Figura 1.8, que es denominada autotransformador reductor.

Si se conecta una impedancia Z entre los puntos B y C, tal como lo muestra la Figura 1.9, sin entrar en consideraciones sobre el carácter de Z, por ahora, se producirá una variación en las condiciones de funcionamiento. Z puede tener carácter óhmico, inductivo o capacitivo. Al conectarla entre dos puntos que tienen una diferencia de potencial, circulará una corriente, que llamamos  $I_2$ , con el subíndice correspondiente al secundario.

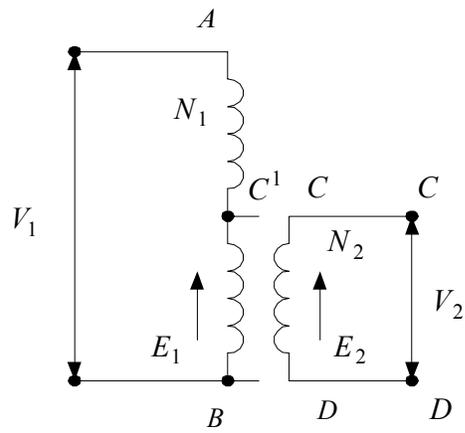


Figura 1.7 Transformador monofásico

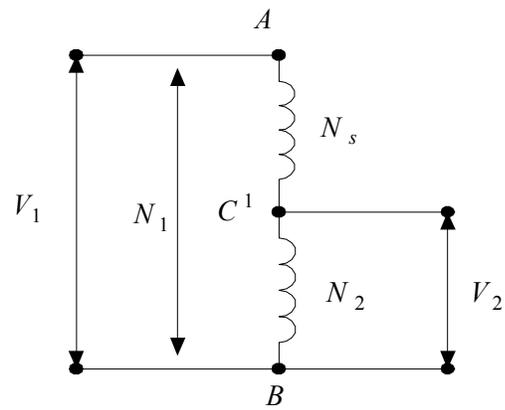


Figura 1.8 Autotransformador reductor

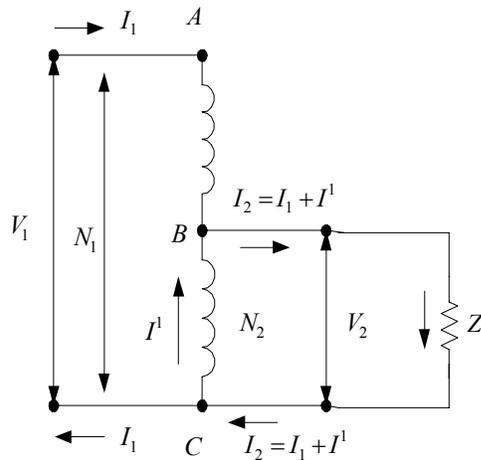


Figura 1.9 Autotransformador con carga

Para determinar el sentido instantáneo de esta corriente secundaria hagamos la siguiente observación: en un dado instante, la f.e.m. inducida es tal que el punto A tiene mayor potencial que el punto B. La tensión primaria debe vencer a la f.e.m. primaria, luego en ese instante la corriente primaria circula con sentido contrario al que correspondería a la f.e.m. primaria, es decir, de A hacia C. En el secundario, en cambio, la tensión en los bornes y la f.e.m. tienen el mismo sentido, luego la corriente circula hacia arriba, es decir, de C hacia B. Entonces por el tramo BC sólo circulará la diferencia entre ambas, es decir, que en el tramo secundario del bobinado circula una corriente:  $I^1 = I_2 - I_1$ . Debiendo aclararse que esta diferencia debe tener carácter vectorial. Quiere decir que en el tramo A B tenemos la corriente  $I_1$ ; en el BC tenemos la diferencia  $(I_2 - I_1)$  y en el circuito de carga tenemos la corriente  $I_2$ .

De las relaciones anteriores se observa como la transferencia de energía desde la red al circuito de carga en el secundario se transfiere de dos diferentes maneras: parte de la energía se transfiere por vía electromagnética, como en los transformadores, y parte por vía eléctrica directa, como en un circuito cerrado simple de corriente alternada. La parte que transfiere energía por vía electromagnética es la AB que obra como primario ficticio, y la parte que la recibe transferida es la BC, que obra como secundario ficticio.

Supongamos el autotransformador reductor representado en la Figura 1.10.

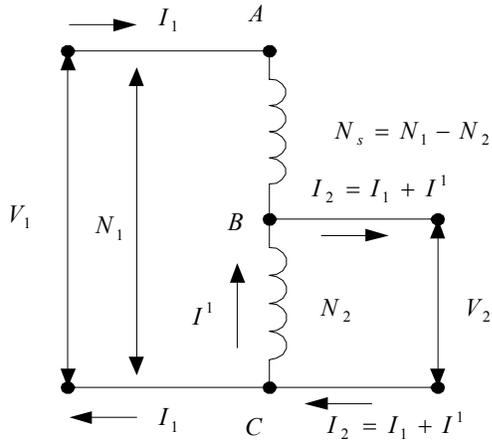


Figura 1.10 Autotransformador reductor

Aplicando las relaciones de los transformadores se obtiene:

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

$$V_1 I_1 = V_2 I_2$$

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{N_2 + N_s}{N_2}$$

De las expresiones anteriores se deducen:

$$V_2 = V_1 \frac{N_2}{N_1} = V_1 \frac{1}{a} \quad (1.23)$$

$$I_2 = I_1 \frac{V_1}{V_2} = I_1 a \quad (1.24)$$

Si se separa la bobina por el punto intermedio B, se obtiene el transformador de dos embobinados como se muestra en la Figura 1.11, de la cual se tiene:

$$N_1 - N_2 = N_s \text{ espiras primarias}$$

$$N_2 = \text{espiras secundarias}$$

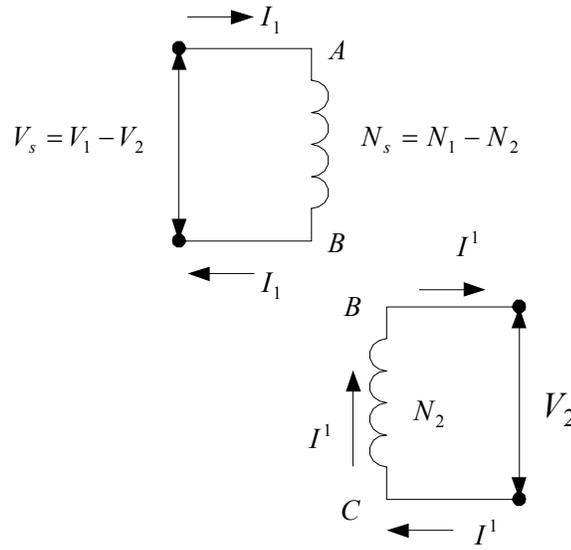


Figura 1.11 Transformador equivalente de un autotransformador

Entonces la potencia  $P_T$  que puede suministrar el transformador constituido por los mismo elementos constructivos que el autotransformador es:

$$P_T = V_s I_1 = (V_1 - V_2) I_1 = V_2 I^1 = V_2 (I_2 - I_1) \quad (1.25)$$

Mientras que la potencia  $P_A$  del autotransformador es:

$$P_A = V_1 I_1 = V_2 I_2 = V_2 (I_2 + I^1) \quad (1.26)$$

Dividiendo las ecuaciones (1.25) y (1.26) miembro a miembro obtenemos:

$$P_A = P_T \frac{V_1}{V_1 - V_2} \quad (1.27)$$

la cual expresa en forma matemática, la economía obtenida al usar un autotransformador en sustitución de un transformador convencional. De estas ultimas ecuaciones se desprenden algunos conceptos asociados a los auto transformadores: la relación expresada por la ecuación (1.25) es conocida también como potencia propia o interna, mientras que la relación expresada en la ecuación (1.26) es conocida como potencia de paso. Es decir que se denomina potencia de paso de un autotransformador, a la potencia total transformada, mientras se denomina potencia propia o interna a la potencia del transformador equivalente.

Las relaciones vienen expresadas como se muestran continuación:

$$P_{propia} = P_T = V_S I_1 = (V_1 - V_2) I_1 \quad (1.28)$$

$$P_{paso} = P_A = V_1 I_1 = V_2 I_2 \quad (1.29)$$

Al relacionar las dos ecuaciones anteriores tenemos:

$$\frac{P_{propia}}{P_{paso}} = \frac{V_1 - V_2}{V_1} = 1 - \frac{V_2}{V_1} = 1 - \frac{1}{a} \quad (1.30)$$

de donde se obtiene:

$$P_{propia} = P_{paso} \left( 1 - \frac{1}{a} \right) \quad (1.31)$$

El factor encerrado entre paréntesis puede ser graficado, el cual se muestra en la Figura 1.12

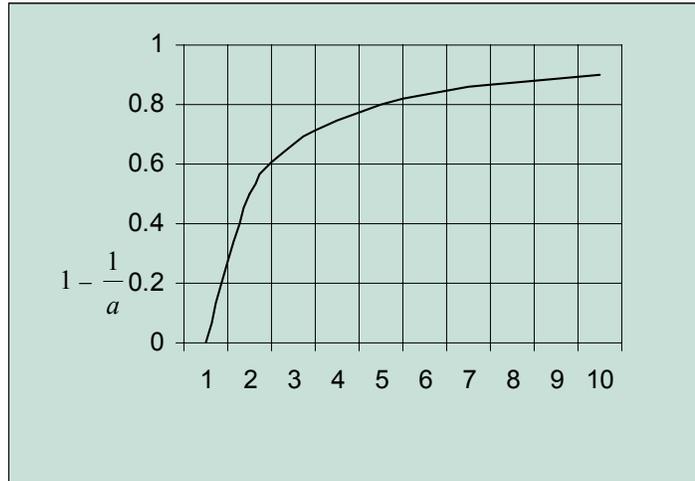


Figura 1.12 Valores de  $1 - \frac{1}{a}$  y  $\frac{V_1}{V_2} = a$

#### 1.1.4. Circuito equivalente

El autotransformador al igual que el transformador puede ser representado por un circuito equivalente. El circuito que modela a esta maquina se muestra en la Figura 1.13. Cuando se desprecia la corriente de excitación, el

circuito equivalente exacto de la Figura 1.13 se reduce al modelo equivalente aproximado de la Figura 1.14.

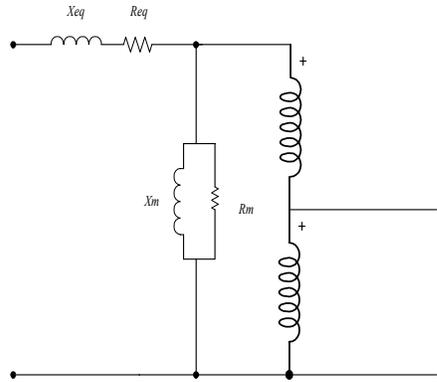


Figura 1.13 Circuito equivalente del autotransformador

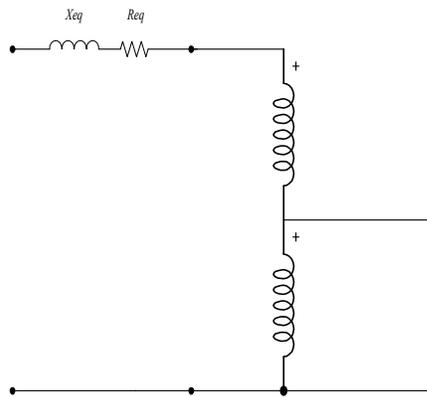


Figura 1.14 Circuitos equivalente aproximado

### 1.1.5. Ventajas y desventajas de los autotransformadores

Cubierto en los numerales anteriores la teoría básica del autotransformador, se pueden enumerar algunas ventajas de este con respecto al transformador convencional.

- Menor tamaño y menor costo
- Mejor rendimiento
- Menor corriente de magnetización
- Mejor regulación de tensión

El menor tamaño y costo se debe principalmente a que existe un ahorro de material para elaborar un autotransformador de la misma potencia que un transformador equivalente dependiendo este ahorro principalmente de la relación de transformación.

La mejora en el rendimiento se debe principalmente a que disminuyen las pérdidas en el hierro, en el cobre y la corriente de magnetización producto esto de la reducción en los materiales necesarios para su construcción de la máquina, es decir del tamaño del núcleo, de la cantidad y área de los conductores, etc.

La mejora en la regulación de tensión se debe a la disminución de la reactancia de dispersión la cual disminuye por efecto de la disminución en el flujo de dispersión.

Las principales desventajas que presenta el autotransformador son las siguientes:

- No existe aislamiento magnético entre los circuitos de alta y de baja
- Las corrientes de corto circuito se incrementan.

La no-existencia de aislamiento magnético es debido a la conexión eléctrica que existe entre los dos bobinados. Las corrientes de corto circuito aumentan ya que las reactancias propias de las máquinas disminuyen y que al provocarse una falla, estas por su valor incrementarían la magnitud de las corrientes de cortocircuito.

#### 1.1.6. Conexiones trifásicas de los autotransformadores

En forma similar a los transformadores, los autotransformadores monofásicos se pueden conectar para obtener potencia trifásica, existe el inconveniente, sin embargo, de que, por la propia constitución del autotransformador es necesario adoptar el mismo tipo de conexión en el primario y en secundario, excepto si una de las conexiones es estrella en cuyo caso, la otra puede ser estrella o zigzag. A causa de esta limitación no existe tanta variedad de conexiones trifásicas como en el caso de los transformadores. Se debe mencionar que las características de funcionamiento de estas conexiones son muy similares a los de los transformadores debido a eso solamente se describen brevemente. Se presenta algunas de este tipo de conexiones a continuación.

## Conexión estrella - estrella

Es la más utilizada a causa de su sencillez en el montaje y porque puede disponerse de conductor neutro para la puesta a tierra o para alimentar redes de cuatro conductores. Las características de funcionamiento son similares a las de los transformadores trifásicos en conexión estrella - estrella.. La Figura 1.15 muestra el detalle de la conexión.

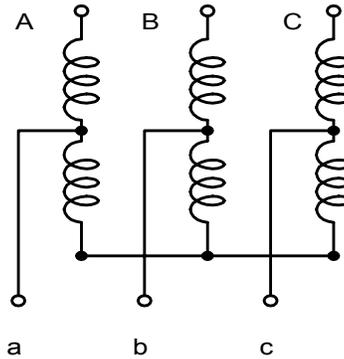


Figura 1.15 Conexión de autotransformadores en estrella

## Conexión estrella - zigzag

Dispone de conductor neutro para la conexión a tierra o para alimentación de redes de cuatro conductores. Estas conexiones se emplean muchas veces porque el autotransformador puede acoplarse en paralelo con un transformador trifásico en conexión estrella - triángulo o con uno en conexión triángulo - estrella. Las propiedades características son similares a las de un transformador trifásico en conexión estrella - zigzag. La conexión de los autotransformadores en esta configuración se observa en la Figura 1.16.

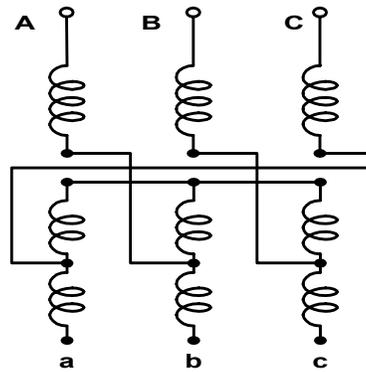


Figura1.16 Conexión de autotransformadores en estrella-zigzag

### Conexión delta

La conexión delta es menos empleado que la conexión estrella, a causa, sobre todo, de que no hay conductor neutro disponible para poner a tierra o para alimentar redes de cuatro conductores. Las características de funcionamiento son semejantes a las de un transformador trifásico en conexión delta-delta.

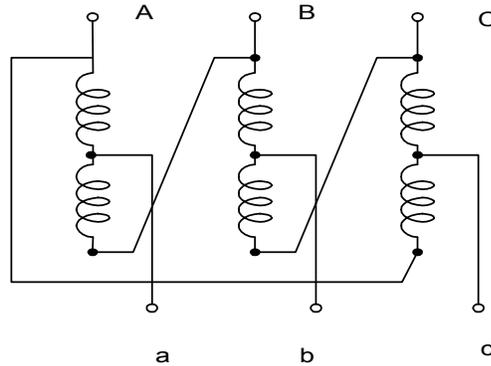


Figura 1.17 Conexión de autotransformadores en configuración delta

### Conexión Vv

No se utiliza con mucha frecuencia ya que, aunque su costo inicial es bajo, tiene los mismo defectos de los

transformadores trifásicos en conexión Vv, es decir, resulta desequilibrada y no dispone de conductor neutro

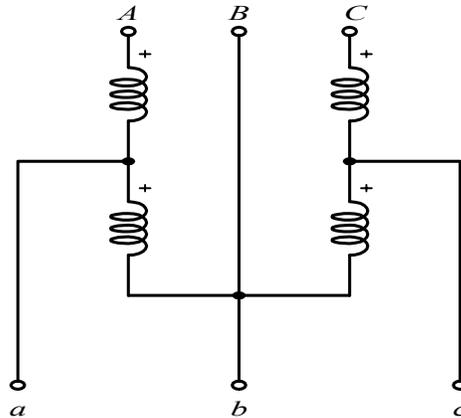


Figura 1.18 Conexión de autotransformadores en Vv

#### 1.1.7. Aplicaciones de los autotransformadores

A pesar de las ventajas del autotransformador sobre el transformador, su campo de aplicación es limitado debido principalmente a la circunstancia de que una parte de los embobinados de alta y baja tensión son comunes, bajo estas condiciones la puesta a tierra de un conductor en la red de alta tensión puede provocar una tensión peligrosa respecto a tierra. Por esta razón se recomienda tomar siguientes restricciones para su empleo:

- Se admitirán autotransformadores, cuando la diferencia de potencial a tierra no sea superior a 250V, se podrá entonces emplear autotransformadores con cualquier relación transformación.
- Los puntos neutros de los circuitos de entrada y salida de los autotransformadores deberán conectarse solidamente a tierra.
- En los autotransformadores polifásicos conectados en estrella o en zigzag, el punto neutro será accesible desde el exterior y el terminal correspondiente estará señalado para evitar confusiones.

Entre las principales aplicaciones donde el autotransformador puede ser utilizado se mencionan las siguientes:

- Cuando no sea preciso aislar el circuito de baja tensión del circuito de alta tensión, es decir, cuando las diferencias entre una y otra sea inferior a 25%. Usualmente lo que se presenta en las interconexiones de redes de alta tensión.
- Como distribuidores de carga entre varios transformadores, cuyas impedancias sean inadecuadas para este servicio, o que trabajen con tensiones de servicio ligeramente diferentes.
- Como arrancadores para motores trifásico asíncronos. Generalmente, se utilizan autotransformadores trifásicos en conexión estrella.
- Para obtener un sistema trifilar a partir de un sistema bifilar.

## 1.2. El motor de Inducción.

### 1.2.1. Definición

El motor de inducción es una maquina eléctrica cuya función principal es la de transformar energía eléctrica tomada de una fuente trifásica y convertirla en energía mecánica.

### 1.2.2. Principio de funcionamiento

El motor de inducción basa su funcionamiento en el concepto de "Campo magnético giratorio" el cual es desarrollado por la maquina como resultado de la aplicación de un sistema de voltajes trifásicos en los terminales del estator. Este campo magnético giratorio, induce corrientes en el circuito del rotor, el cual desarrolla el mismo numero de polos del estator. Estos polos desarrollados reaccionan sobre el campo del estator provocando un torque en la misma dirección del campo magnético producido por el estator, resultando así el movimiento del eje de la maquina.

### 1.2.3. Modelo del motor de inducción

El motor de inducción puede ser modelado por un circuito eléctrico. De la teoría de maquinas eléctricas se conoce que este modelo es necesario para poder estudiar el comportamiento de esta maquina y obtener parámetros como las perdidas de tipo eléctrico, mecánicas, eficiencia, etc.

El modelo o circuito equivalente del motor de inducción monofásico se representa en la Figura 1.19.

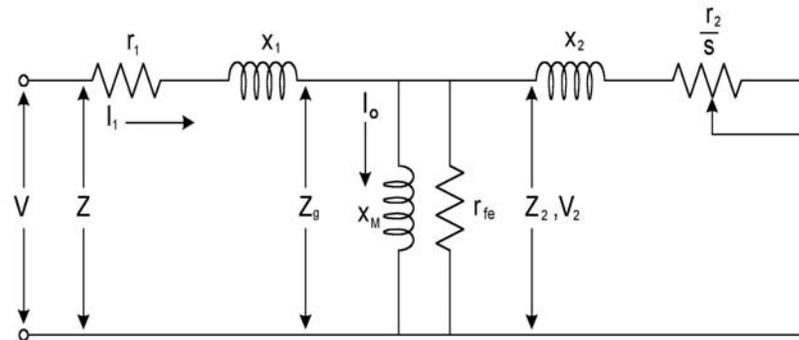


Figura 1.19 Circuito equivalente del motor de inducción

donde:

$r_1$	resistencia del estator
$x_1$	reactancia inductiva del estator
$x_M$	reactancia de magnetización
$r_M$	resistencia de magnetización
$x_2$	reactancia del rotor
$\frac{r_2}{s}$	resistencia del rotor

#### 1.2.4. Pruebas en motores de inducción

Los ensayos o pruebas en motores tienen como objetivo obtener en forma precisa y exacta el comportamiento del motor de inducción bajo condiciones de prueba. Para llevar a cabo este propósito es necesario el realizar estos ensayos bajo condiciones controladas con el fin de que estas den como resultado los datos que lleven a modelar lo más exacto a las máquinas bajo prueba. El estándar IEEE Std 112-1996 denominado "IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators" presenta procedimientos y pruebas destinados a obtener el circuito equivalente de una máquina polifásica bajo estas condiciones. Básicamente este estándar, describe los principales procedimientos y pruebas que se le deben realizar a una máquina eléctrica giratoria ya sea motor o generador y las condiciones que estas deban cumplir para que sean válidas.

La importancia de realizar estas pruebas va en aumento cada día, ya que, el desempeño y eficiencia de este tipo de maquina además del factor específicamente técnico, lleva consigo un factor económico asociado. Técnicamente, uno de los factores más importantes a evaluar en los motores es la eficiencia. Este concepto que se define como la razón de la potencia de salida entre la potencia de entrada (potencia de salida + pérdidas) la cual representa un factor de la calidad de la maquina construida. Esta regularmente se encuentra en la placa de datos del motor y sus valores de 0.8 a 0.95. Esta relación se expresa en la siguiente ecuación:

$$Eficiencia = \frac{potencia\ de\ salida}{potencia\ de\ salida + perdidas} \quad (1.32)$$

Se puede entonces definir algunos conceptos asociados a la eficiencia:

Eficiencia nominal ( $EFF_{nom}$ ): es el numero asignado para un rango de eficiencias dentro de las cuales un motor en particular falla. Esta representa la eficiencia promedio de un gran amplio numero de motores del mismo tipo de diseño.

Eficiencia mínima ( $EFF_{min}$ ): es una eficiencia estadística basada en la curva de distribución de los resultados de las pruebas de eficiencia. Esta puede ser expresada matemáticamente como sigue:

$$EFF_{min} = \frac{1}{\frac{1.2}{EFF_{nom}} - 0.2} = \frac{1}{1.2 - 0.2 * EFF_{nom}} \quad (1.33)$$

Eficiencia garantizada: es el valor que es determinado por el fabricante del motor, para un determinado motor.

Eficiencia calculada: es el valor del diseño de ingeniería.

Eficiencia aparente: es el producto del factor de potencia y la eficiencia del motor.

La ecuación (1.33) define el valor mínimo que se debe alcanzar por una maquina sea esta nueva o reparada, es decir, este es el valor que debe resultar de las pruebas como mínimo para considerar que un motor de inducción luego de un proceso de reparación o de adquirirse nuevo pueda ser considerado para instalarlo en operación. Valores recomendados para diferentes capacidades de potencia de motores de inducción se muestran en las tablas del anexo A

#### 1.2.4.1. Tipos de pruebas

Entre estas pruebas y procedimientos para motores se encuentran:

- Pruebas para determinar la eficiencia
- Pruebas de rendimiento
- Pruebas de temperatura
- Pruebas Misceláneas

Dentro de las pruebas de rendimiento, se encuentra la prueba de rotor bloqueado la cual es de interés para el presente trabajo de graduación. Las pruebas de rotor bloqueado tiene como objetivo encontrar parte del circuito eléctrico equivalente con el cual como se ha mencionado la maquina se puede estudiar. El estándar menciona los requisitos para hacerla, el más importante es que durante esta prueba solamente se podrá hacer circular el equivalente de la corriente nominal de la maquina, lo que significa que en los terminales del motor se aplicara solo el voltaje necesario para hacer que esta circule. Algunos textos de maquinas eléctricas mencionan que con un 15% a un 35% del voltaje nominal del motor de inducción se obtienen los valores requeridos de corriente, pero no se sabe con certeza el valor exacto.

#### 1.2.5. Banco de pruebas de motores de inducción

##### 1.2.5.1. Definición.

Un banco de pruebas de motores de inducción es un equipo de tipo eléctrico, electrónico y mecánico el cual tiene como objetivo principal obtener a través de cierto tipo de pruebas y procedimientos el comportamiento de los motores de inducción.

Se debe hacer notar que un banco de pruebas para maquinas de inducción es un equipo de prueba muy complejo ya que se involucran en su construcción ramas de la ingeniería eléctrica e ingeniería mecánica como: el diseño de maquinas eléctricas, instrumentación electrónica, sistemas de control, hidráulica, dinámica por mencionar algunas de las más importantes.

#### 1.2.5.2. Elementos que forman el banco de pruebas

En general un banco de pruebas de este tipo estaría integrado por los siguientes elementos:

- Fuente de Suministro de Energía Trifásica
- Equipo con capacidad para realizar operaciones de cierre-apertura
- Equipo Regulador de Voltaje
- Equipo de Instrumentación
- Equipo de Control y protección

##### Fuente de suministro de energía trifásica

La fuente de suministro de energía trifásica es la que provee la potencia eléctrica necesaria para realizar las pruebas. Generalmente los motores de inducción trabajan con sistemas de voltajes alternos separados  $120^\circ$  eléctricamente, es decir el sistema de voltajes comerciales en secuencia ABC o ACB. Esta fuente de energía bien puede ser suministrada por un generador de corriente alterna independiente como también puede ser obtenida de la red de una distribuidora de energía eléctrica.

##### Equipo con capacidad para realizar operaciones de cierre-apertura

Esta parte del equipo debe poseer la capacidad de poder realizar operaciones de cierre-apertura bajo condiciones de carga, es decir; cuando este circulando potencia eléctrica entre el equipo bajo prueba y la fuente de suministro de energía eléctrica

##### Equipo regulador de voltaje

Esta parte del banco de prueba es el que realiza la regulación de voltajes, los cuales son obtenidos de la fuente de suministro de energía trifásica. En otras palabras esta equipo se encarga de proporcionar a la maquina bajo condiciones de prueba los voltajes necesarios de acuerdo al tipo de prueba que se este realizando. Esta parte del banco de pruebas puede ser implementado por una unidad trifásica formada ya sea por transformadores o por auto-transformadores de potencia.

##### Equipo de Instrumentación

El equipo de instrumentación tiene como objetivo obtener los valores de las cantidades eléctricas con precisión y exactitud. Entre estos están principalmente transformadores de corriente, transformadores de potencial, medidores de corriente, potencia, voltaje, factor de potencia, fuerza, vibraciones, temperatura y todos los instrumentos necesarios para determinar cualquier cantidad eléctrica o mecánica que sea necesario muestrear.

### Equipo de control y protección

Esta parte del banco tiene como función realizar las pruebas bajo condiciones seguras tanto para el equipo como para los operarios del equipo. También es responsable de detectar condiciones inseguras antes, durante y después de las pruebas. En este sentido se debe tener en mente que esta parte del equipo se debe hacer un análisis de coordinación de protecciones ya que debe tener la capacidad de interrumpir (accionar) los elementos de cierre-apertura de forma automática y manual en caso de presentarse una condición de falla, además de proveer en forma automatizada las lecturas estables de las pruebas.

Para este elemento del equipo se debe hacer un profundo análisis para determinar exactamente el controlador necesario. Pero en forma preliminar se puede mencionar que un ordenador con una aplicación de usuario o un controlador lógico programable serían las opciones a ser consideradas para implementarlo.

Un esquema de lo descrito anteriormente se muestra en la Figura 1.20.

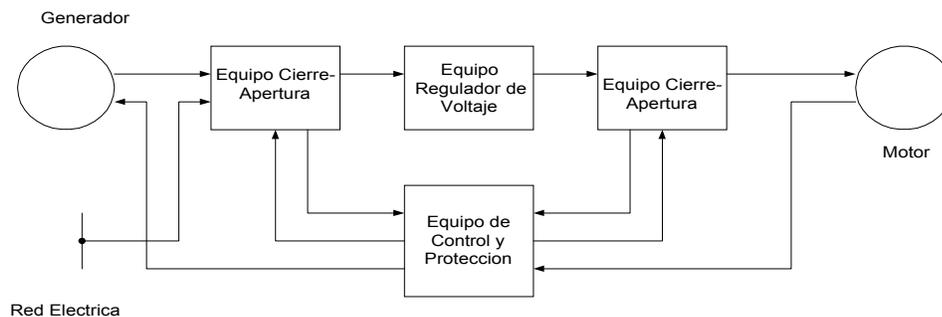


Figura 1.20 Elementos de un banco de pruebas de motores

## CONCLUSIONES DEL CAPITULO I

Tanto el transformador como el autotransformador presentan en esencia el mismo principio de operación que es la inductancia mutua. Esto les permite realizar una transferencia de energía eléctrica a través del campo magnético. Adicionalmente el autotransformador tiene la capacidad de realizar transferencia de energía a través de la conducción eléctrica debido a que sus embobinados están directamente conectados en serie no así el transformador en donde sus dos embobinados están acoplados magnéticamente.

El autotransformador puede incrementar su potencia aparente con respecto a un transformador debido a la transferencia de energía por medio de la conducción eléctrica, pero esta se limita de acuerdo a la relación de transformación. Generalmente con relaciones de transformación cercanas a la unidad el incremento de potencia es considerablemente grande, además, existe una disminución de los materiales para su construcción, lo cual conlleva a una disminución en los costos para fabricarlos.

Aspectos como la eficiencia, rendimiento, etc. son mejorados en los autotransformadores presentando la desventaja principal de perder el aislamiento que presenta el transformador.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Matsch, Leander W. Maquinas Electromecánicas y Electromagnéticas. Ing. Juan Vargas Sierra. México D.F. Representaciones y Servicios de Ingeniería S.A. 1974

Gelabert, Pedro Dagá. Prados, Enrique Oños. Vásquez, José. Ruiz Vasallo, Francisco. Transformadores, convertidores. Ediciones CEAC, S.A. España. 1979.

Ras Enrique, Transformadores de potencia de medida y de protección. Ediciones Alfaomega, México. 1991

## CAPITULO II

### ETAPA DE DISEÑO

#### Introducción

El presente capítulo tiene por objetivo mostrar en una forma breve la teoría básica del diseño de los transformadores, las ecuaciones que describen el comportamiento de estas maquinas, el procedimiento matemático seguido para el diseño de un transformador monofásico, criterios de diseño y mostrar las características de los transformadores desmontados, de los cuales se obtuvo el material para la construcción de la fuente trifásica.

#### 2.0. Teoría de diseño del transformador

El transformador más sencillo está constituido por un circuito magnético o núcleo, formado por chapas apiladas de material ferromagnético, aisladas por ambas caras; y por dos circuitos eléctricos enrollados sobre el núcleo, sin que exista conexión conductiva entre ellos.

Supóngase, en primer lugar, que los extremos del devanado primario están conectados a líneas de suministro de voltaje constante, y que no se toma corriente de las terminales del secundario, el flujo total de  $\Phi$  maxwels aumenta dos veces desde cero hasta su valor máximo y disminuye dos veces desde su valor máximo hasta valor cero en el tiempo de un periodo completo. El flujo cortado por segundo es, por consiguiente,  $4\Phi f$ , y el valor *promedio* de la fem inducida en el primario es

$$V_{prom} = 4\Phi f N_p \text{ [V]} \quad (2.1)$$

donde:  $f$  = Frecuencia del voltaje aplicado  
 $N_p$  = Numero de vueltas en el devanado primario.  
 $\Phi$  = Flujo

Si se supone que las variaciones de flujo son sinusoidales, el factor de forma es  $\pi/2\sqrt{2}=1.11$ , y el valor efectivo de su voltaje primario inducido será

$$V_1 = 4.44 f \Phi N_p \text{ [V]} \quad (2.2)$$

además, como la única diferencia entre la fem contraria en el primario y la diferencia de potencial aplicada a través de las terminales del primario es debida a la caída  $IR$  relativamente despreciable, en las bobinas primarias debido a la corriente de excitación, podemos escribir:

$$V_p = 4.44 f \Phi N_p \quad (\text{aprox}) \quad (2.3)$$

y similarmente para el bobinado secundario

$$V_s = 4.44 f \Phi N_s \quad (\text{aprox}) \quad (2.4)$$

en donde  $V_p$  = Voltaje impreso al primario  
 $V_s$  = Voltaje terminal secundario  
 $N_p$  = Numero de vueltas en serie del primario  
 $N_s$  = Numero de vueltas en serie del secundario

De donde

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (2.5)$$

Lo cual es aproximadamente cierto en transformadores bien diseñados, aun bajo carga, a menos que se tome una corriente de gran magnitud del secundario, cuando las cantidades relativas de los componentes  $IR$  e  $IX$  del voltaje pueden llegar a ser apreciables.

Como la caída  $IR$  en el primario es comparativamente pequeña y de hecho, frecuentemente despreciable, se supone que el flujo ligado al primario debe ser aproximadamente el mismo a plena carga que sin ella, y los ampere-vueltas magnetizantes necesarios para establecer este flujo deben, consecuentemente, permanecer aproximadamente iguales ya sea que se tome o no corriente del secundario. Así, cuando se toma corriente del secundario, deberá existir siempre una corriente en el primario cuya magnitud y fase serán tales que casi produzcan el balance y contrarresten el efecto magnetizante de los ampere-vueltas del secundario. Si  $I_p$  e  $I_s$  representan, respectivamente, a las corrientes del primario y secundario, podemos, por consiguiente, escribir:

$$I_p N_p = I_s N_s \quad (\text{aprox}) \quad (2.6)$$

de donde

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p} \quad (\text{aprox}) \quad (2.7)$$

## 2.1. Potencia del transformador

La potencia total de salida del transformador está dada por:

$$S = V_s I_s \quad [\text{VA}] \quad (2.8)$$

donde:  $S$  = potencia total de salida del transformador.

$V_s$  voltaje terminal del devanado = secundario por fase

$I_s$  corriente del devanado = secundario por fase

Además, de la teoría del transformador se conoce que el voltaje  $V_s$  se puede expresar, despreciando la caída de voltaje en el devanado secundario, mediante la ecuación (2.4) y como el flujo está dado por:

$$\Phi = BA \quad (2.9)$$

donde:  $B$  = Densidad de flujo

$A$  = Área de la sección transversal del núcleo

Por lo tanto, el voltaje terminal se puede definir en función de la densidad de flujo, el área y el número de vueltas:

$$V_s = 4.44 f B A N_s \quad (2.10)$$

La corriente puede expresarse como:

$$I_s = J A_s C_{es} \quad (2.11)$$

donde:  $J$  = Densidad de corriente

$A_s$  = Área del conductor del devanado secundario

$C_{es}$  = Conductores elementales del devanado secundario

De las ecuaciones (2.8), (2.9), (2.10) y (2.11) se obtiene:

$$S = 4.44 f B A N_2 A_2 C_{e2} J \quad (2.12)$$

La corriente circulante por el devanado primario puede expresarse como:

$$I_p = J A_p C_{ep} \quad (2.13)$$

donde:

$A_p$  = área del conductor del devanado primario  
 $C_{ep}$  = conductores elementales del devanado primario

Los conductores elementales constituyen las ramas paralelas que se forman en los devanados, lo cual se emplea cuando el área requerida del conductor es superior a la comercial disponible o también por comodidad en la colocación del enrollado. Sustituyendo las ecuaciones (2.11) y (2.13) en la (2.7) se obtiene:

$$N_s A_s C_{es} = N_p A_p C_{ep} \quad (2.14)$$

El área total del devanado está dada por:

$$A_c = N_2 A_2 C_{e2} + N_1 A_1 C_{e1} \quad (2.15)$$

donde:  $A_c$  = Área total ocupada por los devanados.

De las ecuaciones (2.13) y (2.14) se obtiene:

$$N_1 A_1 C_{e1} = N_2 A_2 C_{e2} = \frac{A_c}{2} \quad (2.16)$$

De las ecuaciones (2.12) y (2.16) se obtiene:

$$S = 2.22 f B J A N_2 A_c \text{ [VA]} \quad (2.17)$$

La ecuación (2.17) expresa que la potencia total del transformador depende de los parámetros de diseño  $B$  y  $J$  y del producto de las áreas del núcleo y de los devanados. Para una potencia dada, considerando fijo los valores de frecuencia, densidades de flujo y de corriente, se requiere un valor determinado de los productos de las áreas del núcleo y de los devanados. Sin embargo, este producto puede presentar infinitas combinaciones de cada una de las áreas individuales.

### 2.1.1. Densidad de flujo

El valor de densidad de flujo a emplear debe ser tal que no sature el material magnético de modo que la corriente de magnetización no sea excesiva. Para garantizar este aspecto debe ser seleccionado una densidad de flujo que no esté por encima de la rodilla de saturación. Recordemos que un valor excesivo de la densidad de flujo implica un alto valor de las pérdidas de núcleo; ello conduce, además de una baja eficiencia, a daños térmicos en el aislamiento.

De acuerdo con lo explicado anteriormente, la densidad de flujo tiene un límite superior fijado por las pérdidas de núcleo y la corriente de excitación. También existe un límite inferior de la densidad de flujo fijado por el aprovechamiento del material activo. Para comprender este aspecto es necesario partir de la ecuación (2.3), la cual expresa la relación entre el flujo y el voltaje aplicado:

$$V_p = 4.44 f \Phi N_p$$

De las ecuaciones (2.4) y (2.9) se obtiene:

$$V_p = 4.44 f N_p B A \text{ [V]} \quad (2.18)$$

De acuerdo con la ecuación (2.18), si se tienen fijadas las vueltas del devanado primario, a medida que se emplee menor densidad de flujo, para unos valores dados de voltaje y frecuencia, mayor debe ser el área del núcleo y el costo de éste. Sin embargo, suponiendo que se tiene fijado el área del núcleo, a medida que se utilice menor valor de densidad de flujo, mayor será el número de vueltas del devanado primario, de acuerdo con lo expresado en la ecuación (2.18).

Esto implica además menor valor del flujo magnético, según la ecuación (2.3) y, por lo tanto, mayor número de vueltas del devanado secundario, para un valor dado del voltaje en éste, de acuerdo con la ecuación (2.4). Todo lo anterior significa un aumento del costo del devanado. El valor máximo de densidad de flujo debe ser seleccionado de acuerdo con el tipo de material magnético a emplear.

### 2.1.2. Densidad de corriente

La densidad de corriente es un parámetro de diseño que está relacionado con el calentamiento del devanado. Para comprender este fenómeno partiremos de la ecuación de pérdidas eléctricas de un devanado determinado, que se expresa mediante:

$$P_c = I^2 R \text{ [W]} \quad (2.19)$$

donde:  $P_c$  = pérdidas eléctricas en el devanado  
 $I$  = corriente por el devanado  
 $R$  = resistencia del devanado

El valor de resistencia del devanado está dado por:

$$R = \frac{\rho l N}{A} \Omega \quad (2.20)$$

donde:  $\rho$  = resistividad del material (Para Aluminio  $\rho = 2.63 \times 10^{-8}$ ).  
 $L$  = longitud media de cada vuelta.  
 $N$  = número de vueltas del devanado.  
 $A$  = área del conductor

La corriente por el conductor se expresa mediante:

$$I = J A \quad (2.21)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.20) y (2.21) en la (2.19) se obtiene:

$$P_c = \rho J^2 (N l A) \quad (2.22)$$

En la ecuación (2.22) los términos encerrados por los paréntesis representan el volumen del devanado.

De ésta se obtiene:

$$\frac{P_c}{V_c} = \rho J^2 \quad (2.23)$$

donde:  $V_c$  = Volumen del devanado.

La ecuación (2.23) nos indica que las pérdidas por unidad de volumen dependen de la densidad de corriente.

Esto implica que con un diseño, siempre que se mantenga constante la densidad de corriente, las pérdidas por unidad de volumen no varían. El incremento de temperatura es aproximadamente constante, para máquinas que se mantengan dentro de un intervalo de potencia dado y con el mismo método de enfriamiento.

Es importante señalar que de acuerdo con la ecuación (2.22), las pérdidas eléctricas dependen directamente del volumen para una densidad de corriente fija, mientras que la superficie de enfriamiento depende del área. Esto significa realmente que a medida que la potencia aumente, menor debe ser el valor de la densidad de corriente a emplear, de modo que se mantenga constante la temperatura del aislamiento.

El cálculo exacto de la densidad de corriente a utilizar, para obtener un valor dado de temperatura, resulta laborioso. Para transformadores enfriados por aceite se permiten mayores valores de densidad de corriente, ello obedece a que, en este caso, existe una mejor vía para la evacuación del calor.

## 2.2. Clasificación y tipos de transformadores

Pueden clasificarse de acuerdo al número de fases, método de enfriamiento, voltaje terminal o rendimiento; pero desde el punto de vista del diseñador, será mejor considerar el uso que se le dará al transformador, ya sea monofásico o polifásico. Esto conduce a las dos clasificaciones.

- Transformadores de potencia
- Transformadores de distribución

### 2.2.1. Transformadores de potencia

Este término se emplea aquí para incluir a todos los transformadores de gran tamaño, como los empleados en las estaciones generadoras centrales y subestaciones para transformar el voltaje en cada extremo de una línea de transmisión de potencia. Éstos pueden diseñarse para máxima eficiencia a plena carga, porque usualmente se arreglan en bancos y pueden colocarse en paralelo con otras unidades o desconectarse según se desee.

### 2.2.2. Transformadores de distribución

Estos son del tipo autoenfriados y casi invariablemente sumergidos en aceite. Se encuentran continuamente en línea, ya sea que se tome o no corriente de los devanados secundarios, y las pérdidas en el hierro deberán ser menores con relación a las pérdidas en el cobre a plena carga de las que serían necesarias en transformadores de potencia. En otras palabras, deben diseñarse para una buena eficiencia que cubra "todo el día" y no para la eficiencia más alta a plena carga.

Cada transformador consiste de un circuito magnético de hierro laminado con el que están ligados los circuitos eléctricos (primario y secundario). Usualmente se hace una distinción entre los transformadores *tipo* de *núcleo* y los del *tipo* de *casco* o *acorazado*. El tipo de casco parece

adaptarse bien a transformadores de bajo voltaje y alto rendimiento, mientras que el tipo de núcleo es, preferible para transformadores de alto voltaje y bajo rendimiento.

### 2.2.3. Ecuación de rendimiento - voltios por vuelta de devanado

La alimentación en VA de un transformador monofásico es  $V_p I_p$  y si se sustituye  $V_p$  por su valor dado por la ecuación (3):

$$\begin{aligned} V_p &= 4.44f \times \Phi \times N_p \\ V_p I_p &= 4.44f \times \Phi \times N_p I_p = VA \end{aligned} \quad (2.24)$$

Asumiendo que  $I_p N_p = I_s N_s$ , aproximadamente, y si escribimos  $NI$  para representar amperes-vueltas, ya sea de los devanados primario o secundario tenemos

$$VA = 4.44f \times \Phi \times (NI) \quad (2.25)$$

No hay límite para el número de diseños que pudieran satisfacer esta ecuación; el flujo total  $\Phi$  es burdamente una medida de la sección transversal del núcleo de hierro, mientras que la cantidad  $(NI)$  determina la sección transversal de los devanados. El problema del diseñador consiste en proporcionar las partes y disponer el material en tal forma que se obtenga el rendimiento deseado y la eficiencia específica al costo inferior, aunque en esta ocasión no se trata de la construcción de los núcleos de hierro, pues ya se cuenta con ellos.

Si pudiese determinarse o suponerse un valor adecuado para  $N$  en la ecuación anterior, la cantidad de flujo  $\Phi$  podría calcularse y tendríamos un punto de partida para determinar las dimensiones principales de un diseño preliminar. Sea  $V_t =$  voltios por vuelta (ya sea en el embobinado primario o secundario); entonces

$$V_t = \frac{V}{N} \quad (2.26)$$

donde:

V voltaje, ya sea en el primario o en el secundario  
 =  
 N número de vueltas en el primario o secundario, según  
 = corresponda

Al multiplicar el numerador y denominador por  $I$  :

$$V_t = \frac{VI}{(NI)}$$

$$V_t = \frac{\text{rendimiento en VA}}{(NI)} \quad (2.27)$$

Al sustituir el numerador de la ecuación (2.27) por la definición de rendimiento en VA (ecuación (2.25)):

$$V_t = \frac{4.44f \times \Phi \times (NI)}{(NI)} \quad (2.28)$$

Lo que lleva a

$$V_t = 4.44f \times \Phi \quad (2.29)$$

multiplicando ambas definiciones de  $V_t$  podemos escribir, por consiguiente:

$$V_t^2 = 4.44f \times \Phi \times \frac{VI}{(NI)} = 4.44 \times \frac{f \Phi}{(NI)} \times EI$$

$$V_t^2 = 4.44 \times \frac{f \Phi}{(NI)} \times VA$$

$$V_t = \frac{1}{\sqrt{\frac{NI}{4.44f \Phi}}} \times \sqrt{VA} \quad (2.30)$$

El análisis de la ecuación anterior muestra que, para una frecuencia dada  $f$ , los A-vueltas son directamente proporcionales a los VA, mientras que el flujo es inversamente proporcional a ellos. Esto significa que el denominador tiene un valor aproximadamente constante para un diseño eficiente. Esto permite poner la ecuación en la forma:

$$V_t = \frac{1}{c} \times \sqrt{\text{rendimiento en VA}} \quad (2.31)$$

Donde  $c$  está dada por la ecuación

$$c = \sqrt{\frac{NI}{4.44f \Phi}} \quad (2.32)$$

Los siguientes valores numéricos son los límites usuales para el coeficiente  $c$ . Puede suponerse un valor promedio para los diseños preliminares.

Tabla 2.1. Valores típicos de la constante " $c$ "

Tipo de núcleo (distribución).....	$c = 40$ a 70
Tipo de núcleo (potencia).....	$c = 30$ a 35
Tipo de casco (distribución).....	$c = 25$ a 40
Tipo de casco (potencia).....	$c = 20$ a 30

Los valores bajos del coeficiente  $c$  corresponden a voltajes bajos y frecuencias altas.

#### 2.2.4. Límites usuales de la densidad de flujo y la densidad de corriente

##### 2.2.4.1. Densidad de flujo

Como una guía para el uso de diseños preliminares, se dan a continuación valores usuales de  $B$  (líneas/plg<sup>2</sup>)

Tabla 2.2. Valores típicos de las densidades de flujo

		$f = 25$	$f = 50$ o 60
Transformadores	de	75 000 a	70 000 a
distribución		90 000	85 000
Transformadores	de	85 000 a	80 000 a
Potencia		95 000	95 000

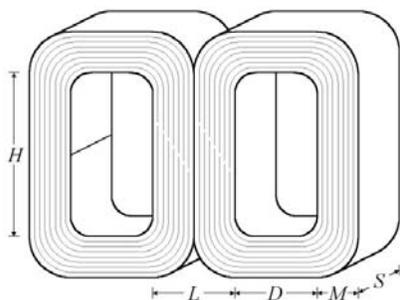
##### 2.2.4.2. Densidad de corriente en los bobinados.

Aún con bobinas bien ventiladas (aire forzado), o con métodos mejorados para producir una buena circulación de aceite en el caso de los transformadores sumergidos en aceite, la densidad de corriente permisible en los devanados está limitada por el calentamiento.

2.3. Determinación de los parámetros de los transformadores de distribución usados para la construcción de la fuente trifásica

Primero, se procede a conocer las características originales del transformador. Para la construcción de las tres unidades se echó mano de tres transformadores de distribución de 75 KVA con características idénticas, las cuales se detallan a continuación:

Transformador de distribución tipo acorazado, sumergido en aceite, las dimensiones del núcleo ferromagnético son:



L =	11 cm
D =	10.5 cm
H =	27 cm
M =	5.5 cm
S =	21.7 cm

Figura 2.1. Núcleo de hierro de un transformador tipo acorazado

2.3.1. Características de los transformadores de 75 kVA

Potencia nominal:  $S = 75 \text{ KVA}$

Del lado secundario:

Numero de vueltas  $N = 12 / 24$

$$V_s = 120 / 240 \text{ V}$$

Corriente nominal del lado secundario:

$$I_{snom} = \frac{75 \times 10^3}{240} = 312.5 \text{ A}$$

Área de sección transversal del conductor del secundario (placa de aluminio):

$$A_{Al} = 240 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} = 240 \text{ mm}^2 = 0.372 \text{ pulg}^2$$

Densidad de corriente del conductor secundario:

$$J = \frac{I_{noms}}{A_{Al}} = \frac{312.5}{0.372} = 840.052 \frac{A}{pulg^2}$$

Con la ecuación (2.4) es posible calcular el flujo en la sección central del núcleo:

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{V_s}{4.44 f N}, \quad f = 60 \\ &= \frac{240}{4.44 \cdot 60 \cdot 24} \\ &= 0.038 \text{ weber} = 3.754 \times 10^6 \text{ líneas} \end{aligned}$$

El área de sección transversal del brazo central del núcleo es:

$$\begin{aligned} A_n &= L \times S = 11 \text{ cm} \times 21.7 \text{ cm} = 238.7 \text{ cm}^2 \\ &= 36.999 \text{ pulg}^2 \end{aligned}$$

Por lo tanto, la densidad de flujo es:

$$\begin{aligned} B &= \frac{\Phi}{A_n} = \frac{3.754 \times 10^6}{36.99} \\ &\approx 101456.714 \frac{\text{líneas}}{\text{pulg}^2} \end{aligned}$$

El valor de la constante  $c$  para el transformador de 75 kVA se puede determinar por medio de la ecuación (2.32):

$$\begin{aligned} c &= \sqrt{\frac{NI}{4.44 f \Phi}} = \sqrt{\frac{24 \cdot 312.5}{4.44 \cdot 60 \cdot 0.03754}} \\ &= 27.386 \end{aligned}$$

### 2.3.2. Calculo de las perdidas en el núcleo

Para determinar las pérdidas en el núcleo, primero se calcula el volumen del mismo:

El volumen aproximado del núcleo es:  $V_n = 2 \cdot M \cdot S \cdot L_m \cdot 0.9$ , donde  $L_m$  es la longitud media del núcleo, tomada como un promedio de la longitud perimetral externa e interna del mismo núcleo y el factor 0.9 es lo que se conoce como el factor de apilamiento.

Primero es necesario conocer la longitud media de los núcleos:

$$L_m = \frac{L_{ext} + L_{int}}{2}$$

Longitud perimetral externa de una de las secciones del núcleo:

$$L_{ext} = 112.5 \text{ cm}$$

Longitud perimetral interna de una de las secciones del núcleo:

$$L_{int} = 77.4 \text{ cm}$$

La longitud media es:

$$L_m = \frac{112.5 + 77.4}{2}$$

$$L_m = 94.95 \text{ cm}$$

Con el valor de la longitud media se puede calcular el volumen total del núcleo

$$\begin{aligned} \text{Volumen} &= L \times S \times L_m \times 0.9 \times 2 \\ &= 21.7 \times 5.5 \times 94.95 \times 0.9 \times 2 \\ &= 20398.108 \text{ cm}^3 \\ &= 1244.769 \text{ pulg}^3 \end{aligned}$$

Peso del núcleo:

$W_{nucleo} = \gamma_{fe} \text{ Volumen}$ , donde  $\gamma_{fe}$  es la densidad del acero al silicio, igual a 0.28 lb/pulg<sup>3</sup>

$$W_{nucleo} = 0.28 \times 1244.769$$

$$W_{nucleo} = 348.535 \text{ lbs}$$

Para una densidad de 100 klineas/pulg<sup>2</sup> la grafica B.1 (perdidas por unidad de masa), proporciona un factor  $k$  de 1.45 W/lb

Las pérdidas en el núcleo por unidad de masa son entonces:

$$P_{lossnucleo} = k \times W_{nucleo}$$

$$P_{lossnucleo} = 1.45 \times 348.5$$

$$P_{lossnucleo} = 505.376 \text{ W}$$

Para el resto de transformadores que fueron utilizados para la construcción de la fuente trifásica, los datos para los cálculos de sus parámetros pueden verse en el anexo B, a continuación se presenta una tabla resumen de sus características.

Después de desmontar un total de 6 tipos diferentes de transformadores de distribución, se determinaron las siguientes características:

Tabla 2.3. Resumen de las características de diferentes tipos de transformadores

S [KVA]	Tipo	Vueltas N	Conductor	$J \left[ \frac{A}{\text{pulg}^2} \right]$	$B_{\max} \left[ \frac{\text{líneas}}{\text{pulg}^2} \right]$	c
10	Acorazado	24	Al - Cu	2256.06	109065.24	20.00
15	Acorazado	32	Cu - Cu	1464.78	99776.36	32.66
75	Acorazado	24	Al - Al	840.05	101456.71	27.39
100	Acorazado	16	Al - Cu	755.10	101115.01	21.08
100	Núcleo	20	Al - Al	806.17	125806.33	26.35
167	Acorazado	18	Al - AL	1109.00	107591.26	30.65

Como el objetivo primordial de este proyecto es realizar pruebas en motores de inducción a rotor bloqueado de hasta 250 HP a 240 V y 480 V para determinar sus parámetros, es necesario alcanzar del 100 al 125 % de la corriente nominal del motor a voltaje reducido.

De acuerdo a la tabla C.1 (Anexo C) se puede ver que la corriente nominal de un motor a 220 V es de 618 A y para motores de 250 HP a 440 V la corriente nominal es de 309 A. De acuerdo a la tabla 430 - 150 del NEC, la corriente nominal de un motor de 250 HP a 460 V (permisible para motores de 440 a 480 V) es de 312 A, por consiguiente para motores de 250 HP a 230 V (permisible para motores de 220 a 240 V) la corriente nominal es de 624 A. Por lo tanto, para realizar pruebas en motores de inducción trifásicos a rotor bloqueado, se requiere una fuente de voltaje variable capaz de suministrar hasta 624 A a voltaje reducido en todas sus derivaciones, para este caso, se ha fijado la corriente máxima en 650 A.

#### 2.4. Definición de los voltajes de la fuente

En lo referente al voltaje de excitación la norma Std IEEE 112 no hace referencia a los valores de éste para la prueba de rotor bloqueado, solo se especifica que la

corriente que debe circular por los devanados del motor debe de ser la corriente nominal, como ya se ha mencionado.

Sin embargo en algunos textos de Maquinas Eléctricas se definen valores en porcentaje de los valores nominales de voltaje para hacer circular la corriente nominal por el motor. A continuación se resumen los valores recomendados por algunos textos.

Tabla 2.4. Recomendaciones de voltajes para alcanzar la corriente nominal en motores de inducción a rotor bloqueado

Texto	Autor	Recomendación.
Maquinas eléctricas	Vicent del Toro	10% al 25% del $V_{nominal}$
Maquinas Eléctricas	Irvin Kosow	10% al 33% del $V_{nominal}$

Considerando los datos anteriores se definen los voltajes del auto transformador que servirá para el equipo de prueba del auto transformador. Para motores de 250 HP a 240 V:

Tabla 2.5. Porcentajes de voltaje nominal para motes de hasta 250 HP a 240 V

% del Voltaje Nominal	Maquinas a 240	Corriente de suministro
10	24	650
20	48	650
30	72	650

Para motores de 250 HP a 480 V:

Tabla 2.6. Porcentajes de voltaje nominal para motes de hasta 250 HP a 480 V

% del Voltaje Nominal	Maquinas a 480	Corriente de suministro
10	48	325
15	72	325
20	96	325
25	120	325

Como se puede ver en las tablas 2.5. y 2.6., algunos de los voltajes de las derivaciones coinciden tanto para maquinas a 240 V como para maquinas a 480 V, por tal motivo, se eligieron así los porcentajes de voltaje para las derivaciones.

Teniendo ya definidos los voltajes de las derivaciones, comienza el proceso de diseño uno de los transformadores, para luego unir físicamente el final de la bobina primaria al principio de la secundaria para formar el bobinado serie y común de un autotransformador. Como el voltaje de alimentación del autotransformador será de 240 V y el máximo valor de voltaje requerido de salida en el autotransformador es de 120 V, que es el 50% del voltaje de alimentación, se tratará de diseñar un transformador con una relación de transformación igual a 1 y se asumirá que se conectará a 120 V. Al unir el primario con el secundario se tendrá un autotransformador para conectar sus terminales primarios a 240 V.

## 2.5. Procedimiento de diseño matemático del transformador

Voltaje primario  $V_p = 120$  V  
Corriente primaria  $I_p = 325$  A  
Relación de transformación  $a = 1$

La potencia nominal del transformador es:

$$\begin{aligned} S &= V_p \times I_p \\ S &= 120 \times 325 \\ S &= 39 \text{ KVA} \end{aligned}$$

Usando la ecuación (2.30) calculamos el voltaje terminal en el transformador:

$$V_t = \frac{1}{c} \times \sqrt{\text{rendimiento en VA}}$$

El valor de la constante  $c$  lo escogemos de los valores dados en la tabla 2.1. para transformadores tipo casco o acorazado de distribución. Como se disponía de muy poco material para la construcción de los bobinados, se escoge el valor de esta constante de tal manera que haya un aprovechamiento máximo de los recursos y que a su vez arroje un número de vueltas que sea apropiado, de tal manea que en las derivaciones no hayan fracciones de vueltas; para este caso se escoge  $c = 25$ . En la Tabla 2.3 están los valores de la constante  $c$  para los transformadores que se desarmaron y como puede verse la mayoría de los valores de la constante  $c$  están dentro de los limites que recomienda el libro de Still. Teniendo ya definida la constante  $c$  se calcula el voltaje terminal.

$$c = 25$$

rendimiento en VA = 39000

$$V_t = \frac{1}{25} \times \sqrt{39000}$$

$$V_t = 7.899 \frac{\text{V}}{\text{vuelta}}$$

El número de vueltas en el primario se calcula por medio de la ecuación (2.26):

$$N = \frac{V_p}{V_t}$$

$$N = \frac{120}{7.899}$$

$$N = 15.191 \text{ vueltas}$$

Asumiendo  $N = 15$  vueltas el esquema básico del transformador sería como se muestra en la Figura 2.2:

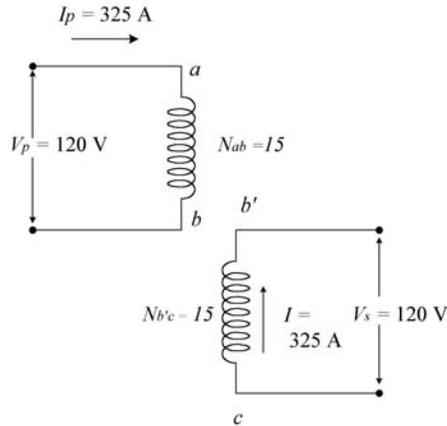


Figura 2.2. Esquema del transformador

El flujo debido a las 15 vueltas que circulara por la sección central del núcleo es:

$$\begin{aligned}\Phi &= \frac{V_s}{4.44 f N}: f = 60, V_s = 120 \text{ V y } N = 15 \\ &= \frac{120}{4.44 \cdot 60 \cdot 15} \\ &= 0.03003 \text{ wb} = 3.003 \times 10^6 \text{ líneas}\end{aligned}$$

Por lo tanto, la densidad de flujo manteniendo el área constante es:

$$\begin{aligned}B &= \frac{\Phi}{A_n} = \frac{3.003 \times 10^6}{36.99} \\ &\approx 81165.37 \frac{\text{líneas}}{\text{pulg}^2}\end{aligned}$$

Tomando en cuenta tanto las recomendaciones del libro de Still así como los parámetros de los transformadores desmontados, se asumen los valores de las variables:

$$\begin{aligned}\text{Densidad de flujo: } B &= 95\,000 \frac{\text{líneas}}{\text{pulg}^2} \\ &= 1.473 \frac{\text{wb}}{\text{m}^2}\end{aligned}$$

$$\text{Densidad de Corriente: } J = 1000 \frac{\text{A}}{\text{pulg}^2}$$

Es de notar que la densidad de flujo y de corriente variarán dependiendo de la derivación que se use para la prueba.

Teniendo ya fijos los valores de estas variables, procedemos redefinir las dimensiones de los núcleos de los transformadores de 75 kVA.

Primero hay que determinar el área requerida para la densidad de flujo fijada, por medio de la ecuación (2.10)

$V_s = 4.44 f B A N$ , despejando para  $A$ :

$$\begin{aligned}A &= \frac{V_s}{4.44 f B N} \\ A &= \frac{120}{4.44 (60)(1.473)(15)} \\ A &= 20.394 \times 10^{-3} \text{ m}^2\end{aligned}$$

Esta es el área necesaria para un para lograr que circule un flujo de  $30.03 \times 10^{-3}$  wb, como  $L$  es la única dimensión del núcleo que puede ser modificada, despejamos para  $L$ :

$$L = \frac{A}{S}$$

$$L = \frac{0.02039}{0.217}$$

$$L = 0.09398 \text{ m}$$

Por lo tanto cada brazo del núcleo el espesor puede ser reducido de 5.5 cm a 4.7 cm; las implicaciones en las perdidas en el núcleo son:

La longitud externa e interna se reducen a:

$$L_{ext} = 106.5 \text{ cm}$$

$$L_{int} = 77.4 \text{ cm}$$

La longitud media es:

$$L_m = \frac{L_{ext} + L_{int}}{2}$$

$$L_m = \frac{106.5 + 77.4}{2}$$

$$L_m = 91.95 \text{ cm}$$

Con lo que el volumen del núcleo cambia a:

$$\begin{aligned} \text{Volumen} &= L \times S \times L_m \times 0.9 \times 2 \\ &= 21.7 \times 4.7 \times 91.95 \times 0.9 \times 2 \\ &= 16876.945 \text{ cm}^3 \\ &= 1029.894 \text{ pulg}^3 \end{aligned}$$

Peso del núcleo:

$$\begin{aligned} W_{nucleo} &= \gamma V \\ &= 0.28 * 1029.9 \\ W_{nucleo} &= 288.37 \text{ lbs} \end{aligned}$$

Para una densidad de 95 klineas/pulg<sup>2</sup> la grafica B.1 (anexo B), proporciona un factor  $k$  de 1.32 W/lb.

Las pérdidas en el núcleo por unidad de masa son entonces:

$$P_{lossnucleo} = 1.32 \times W_{nucleo}$$

$$P_{lossnucleo} = 1.32 \times 288.37$$

$$P_{lossnucleo} = 380.65 \text{ W}$$

Como se puede ver las pérdidas en el núcleo disminuyen considerablemente con este ajuste, y además se obtiene una reducción significativa de peso.

### 2.5.1. Pérdidas en el conductor

Teniendo definidas todas las variables necesarias, se procede a la configuración de autotransformador. Al unir el primario y secundario del transformador las densidades de corrientes cambian para cada devanado, por lo tanto es necesario conocer el valor de la corriente en cada punto y así calcular las pérdidas en sección de conductor del autotransformador

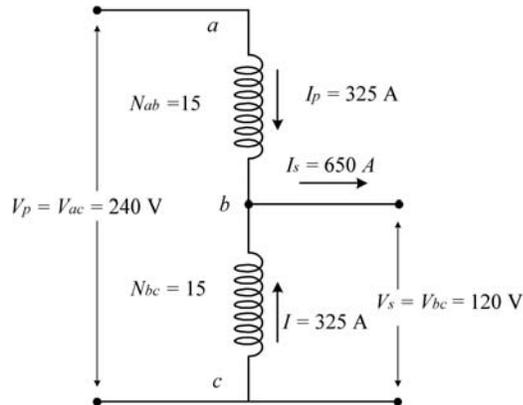


Figura 2.3. Esquema del autotransformador

Es de notar, que este es el esquema preliminar del autotransformador, las corrientes en cada derivación se seleccionara de acuerdo a las necesidades que se presenten en cada caso. A continuación se muestran los porcentajes de voltaje de alimentación con su correspondiente derivación, para un voltaje base de 240 V:

Tabla 2.7. Corrientes requeridas en los terminales del autotransformador

% de voltaje de alimentación del autotransformador	No de vueltas en el secundario (Bobinado común)	Corriente [A]	Se usará para Máquinas de hasta
10	3	650	240 V, 250 HP
20	6	650	240 y 480 V, 250 HP
30	9	650	240 y 480 V, 250 HP
40	12	325	480 V, 250 HP
50	15	325	480 V, 250 HP

Para lograr manejar 650 A se han unido diferentes tipos de placa de aluminio en el secundario, por ejemplo en la derivación del 10 y 20% (6 vueltas), que es donde se tiene mayor circulación de corriente en el devanado común, se ha colocado placa de aluminio de un transformador de 167 KVA, para la derivación de 30% placa de transformador de 100 KVA (3 vueltas) y el resto se hará con placa de transformador de 75 KVA, incluyendo el bobinado serie (21 vueltas).

Se ha supuesto que en cada derivación se demandará la máxima corriente, es decir, 325 y 650 A según sea el caso; aplicando las relaciones de transformación del autotransformador tanto para voltaje como para corriente, así como las definiciones de potencia, hay que notar que la máxima corriente que podría circular por el bobinado serie en realidad es de 195 A.

Tabla 2.8. Corrientes y potencia para maquinas de hasta 250 HP a 240 V

% de Vnom	Maq 240 V ( $V_{bc}$ )	$V_{ab}$	$a_A$	$I_s$	$I_p$	$I$	Ptransf	PAutoT
30	72	168	3.33	650	195.00	455.00	32.76	42.90
20	48	192	5.00	650	130.00	520.00	24.96	28.60
10	24	216	10.00	650	65.00	585.00	14.04	14.30

Tabla 2.9. Corrientes y potencia para maquinas de hasta 250 HP a 480 V

% de Vnom	Maq 240 V ( $V_{bc}$ )	$V_{ab}$	$a_A$	$I_s$	$I_p$	$I$	Ptransf	PAutoT
25	120	120	2.00	325	162.50	162.50	19.50	35.75
20	96	144	2.50	325	130.00	195.00	18.72	28.60
15	72	168	3.33	325	97.50	227.50	16.38	21.45
10	48	192	5.00	325	65.00	260.00	12.48	14.30

El esquema del autotransformador con todas sus derivaciones es el siguiente:

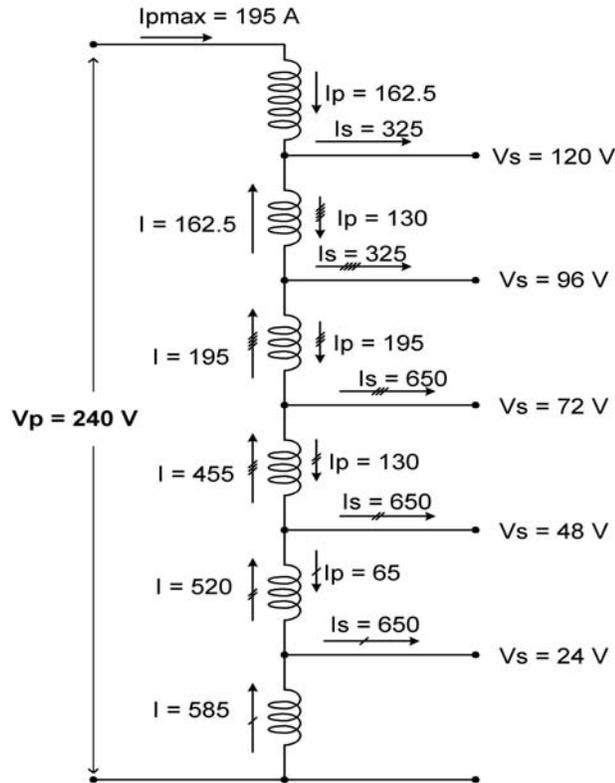


Figura 2.4. Esquema del autotransformador con todas sus derivaciones

Y el total derivaciones que tendrá el autotransformador se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2.10. Corrientes y potencia para maquinas de hasta 250 HP a 480 y 240 V

Sección	% de $V_{nom}$	$V_{bc}$ (240 V)	$V_{ab}$	$a_A$	$I_s$	$I_p$	$I$	$P_{transf}$ [kVA]	$P_{autoT}$ [kVA]
5	50	120	120	2.00	325	162.50	162.50	19.50	35.75
4	40	96	144	2.50	325	130.00	195.00	18.72	28.60
3	30	72	168	3.33	650	195.00	455.00	32.76	42.90
2	20	48	192	5.00	650	130.00	520.00	24.96	28.60
1	10	24	216	10.00	650	65.00	585.00	14.04	14.30

Las celdas que aparecen sombreadas corresponden a las derivaciones que pueden ser usadas por ambos tipos de motores, en la figura 8 se presenta un esquema de cómo se comparten las derivaciones del autotransformador.

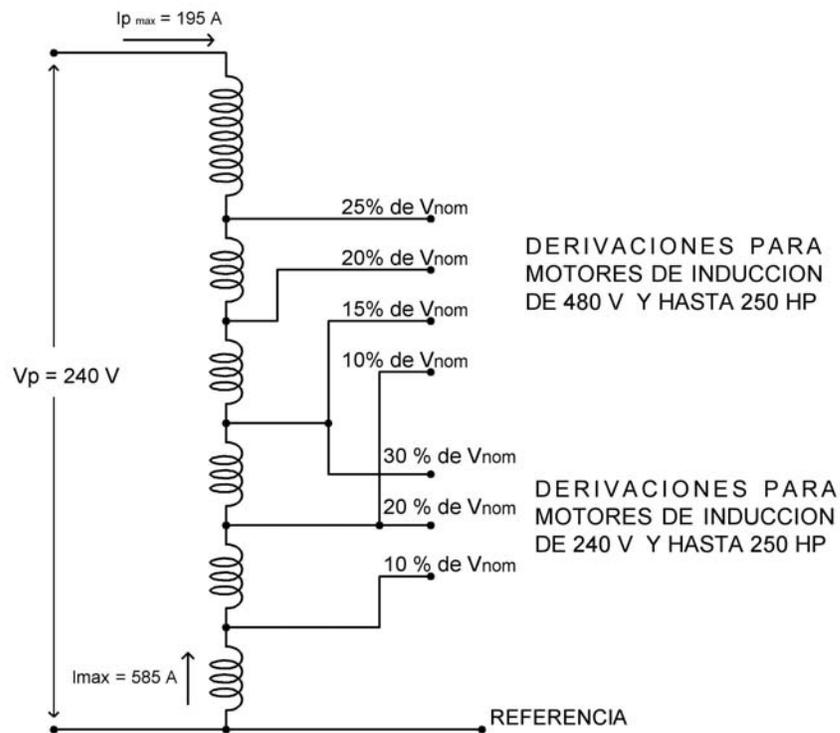


Figura 2.5. Esquema del autotransformador con derivaciones

Teniendo definidas las corrientes que podrían circular en cada segmento de las bobinas del transformador es posible recalcular la densidad de corriente, suponiendo una máxima

demanda en cada derivación, para esto se calculan las perdidas para el punto donde la demanda de potencia es máxima, es decir para el 30%:

Los valores de densidad de corriente se calcula en cada una de las secciones de dichos bobinados:

En el bobinado común, sección 1:

$$J_{sección1} = \frac{I_{sección1}}{A_{sección1}}$$
$$J_{sección1} = \frac{455}{0.627}$$
$$J_{sección1} = 725.167 \frac{A}{pulg^2}$$

Esta misma densidad de corriente es aplicable a la sección 2, debido a que ambas secciones están construidas con el mismo tipo de conductor.

Para la sección 3:

$$J_{sección3} = \frac{I_{sección3}}{A_{sección3}}$$
$$J_{sección3} = \frac{455}{0.517}$$
$$J_{sección3} = 880.335 \frac{A}{pulg^2}$$

Las densidades de corriente de las secciones que componen el bobinado serie son:

Para la sección 4:

$$J_{sección4} = \frac{I_{sección4}}{A_{sección4}}$$
$$J_{sección4} = \frac{195}{0.372}$$
$$J_{sección4} = 524.192 \frac{A}{pulg^2}$$

Este resultado es valido también para la sección 5, debido a que ambas secciones tiene el mismo tipo de conductor, al igual que el resto del bobinado serie.

Una vez se han calculado las densidades de corrientes a través de las diferentes secciones del bobinado es posible

calcular las pérdidas en el conductor, por medio de la ecuación (2.22). las dimensiones del conductor usado en cada una de las secciones se detallan a continuación:

Tabla 2.11. Pérdidas en el conductor para la máxima demanda de potencia

Bobinado Común					
Sección	$l$ [m]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$V_c$ [m <sup>3</sup> ]	$J$ $\left[ \frac{A}{m^2} \right]$	$P_c$ [W]
1	3.1	$404.8 \times 10^{-6}$	$1.254 \times 10^{-3}$	$1.124 \times 10^6$	41.67
2	3.0	$404.8 \times 10^{-6}$	$1.214 \times 10^{-3}$	$1.124 \times 10^6$	40.33
3	2.91	$333.45 \times 10^{-6}$	$970 \times 10^{-6}$	$1.365 \times 10^6$	47.53
4	2.81	$240 \times 10^{-6}$	$674 \times 10^{-6}$	$812.5 \times 10^3$	11.7
5	2.71	$240 \times 10^{-6}$	$650 \times 10^{-6}$	$812.5 \times 10^3$	11.29
Serie	12.5	$240 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-3}$	$812.5 \times 10^3$	52.08
TOTAL					204.6

Resumen de las pérdidas en el conductor de acuerdo a la derivación en uso, asumiendo máxima demanda para cada caso

Tabla 2.12. Pérdidas en el conductor dependiendo de la derivación que se use para la prueba.

Derivación	Demanda de Corriente	Pérdidas en el conductor [W]
1	650	79.06
2	650	144.42
3	650	204.65
4	325	63.67
5	325	68.67

## CONCLUSIONES DEL CAPITULO II

Para el caso de la derivación del 10 % se observa en la Tabla 2.10. que la diferencia de potencias entre la configuración como autotransformador y transformador es casi despreciable, esto debido a que la relación de transformación se aleja de la unidad, es decir, a medida que esto pasa la conveniencia de uso del autotransformador en el manejo de potencia se va diluyendo, aunque en cuanto al ahorro de material sigue siendo vigente; en lo referente a la diferencia de potencial para relaciones de transformación grandes en autotransformadores, para este caso en particular no tendría mayor incidencia, debido a que los voltajes que se manejan no son tan altos como para propiciar arcos y no existe el riesgo de que se dañe el equipo.

Debido a que se disponía de poca información en cuanto a diseño de transformadores, tanto teórica como practica, se aprovecho la información de los transformadores desmontados tomando todos los datos que fueron posibles para calcular sus parámetros, los cuales se confrontaron con los proporcionados por el texto que se tomo como base para el diseño. Dado que dicho texto data de hace ya varias décadas, parámetros de los transformadores como la densidad de flujo y de corriente divergen en cierta medida con los que recomienda el libro, esto debido a que con el desarrollo de nuevas aleaciones en materiales ferromagnéticos y conductores es posible aumentar la eficiencia en la utilización de estos materiales; teniendo esto en cuenta se seleccionaron los valores de densidad de flujo y de corriente usadas en el diseño.

Aunque el diseño estuvo orientado a transformadores de distribución, en realidad la finalidad era la construcción de un autotransformador, para esto se iba a diseñar el transformador y luego se unirían el final del bobinado primario con el principio del secundario, pero a medida que se profundizaba en el diseño se llego a la conclusión de que lo mejor era hacer una sola bobina, esto para evitar hacer otra unión de conductor.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Still Alfred, Siskind Charles S. Elementos de diseño de maquinas eléctricas. Compañía editorial continental. S.A. México, 1968.

Izquierdo Mariano Zerquera. Diseño y recalculo de transformadores. Editorial virtual e-libro.net. 2001

Del Toro, Vincent. Electromechanical devices for energy and control system. Prentice Hall inc. New York. 1975

Kosow, Irvin. Maquinas eléctricas, Prentice Hall inc. México. 1970

## CAPITULO III

### PROCESO DE CONSTRUCCIÓN

#### Introducción

El presente capítulo describe el proceso que se siguió para la construcción de los autotransformadores monofásicos diseñados y las conexiones necesarias para obtener a partir de las tres unidades monofásicas la potencia trifásica para las pruebas en los motores de inducción. Ya que no hay existencia de empresas y talleres especializados en la construcción de este tipo de maquina, el proceso que se describe es de tipo artesanal y no industrial.

#### 3.0. Preparación de los núcleos

Los núcleos de las máquinas a construcción fueron obtenidos de maquinas fuera de servicio, prácticamente los tres núcleos eran de transformadores de distribución de 75KVA los cuales estaban sumergidos en aceite dieléctrico refrigerante. Este tipo de núcleo esta fabricado de material magnético, es decir de aleaciones de acero al silicio de grano orientado en grupos de laminas que mejoran el rendimiento magnético de material. Debido a que los núcleos estaban sumergidos en aceite, estos se mantenían libres de impurezas principalmente de oxido polvo o suciedad lo que contribuyo a mantener en buen estado la superficie de las laminas que regularmente en este tipo de núcleo viene con una capa de barniz aislante aplicada a través de un proceso térmico que le brinda el fabricante del material. Ya que los núcleos estaban conservados por el aceite, fue necesario entonces desplazarles los residuos de aceite que todavía tenían, por lo que se hizo necesario aplicar solvente mineral para realizar esta actividad.

#### 3.1. Preparación del conductor magnético

El conductor magnético utilizado para hacer los devanados de las maquinas, también fue obtenido de máquinas

fuera de servicio; por lo que como en el caso de los núcleos fue necesario adecuarlos para ser utilizados. El conductor magnético en este caso está fabricado con aluminio y no con cobre, la disposición de este es en láminas, es decir el conductor tiene sección rectangular y no circular como se encuentra regularmente. Luego de desarmar los transformadores de donde se obtuvo el conductor, se observó que este tenía adherido material aislante, además en algunos casos se observó que el material había sufrido recalentamiento debido principalmente a que los transformadores habían sido sometidos a sobrecargas. Por lo mencionado anteriormente fue necesario desplazarle los residuos de aceite y material aislante para poder ser utilizados nuevamente en las máquinas a construir. Para esto fue necesario hacer las actividades se mencionan a continuación:

- Remover los residuos de Aceite del conductor
- Remover el material aislante adherido al conductor
- Remover residuos de polvo y suciedad antes de ser utilizados en los bobinados

Para remover los residuos de aceite, polvo y suciedad se realizaron mediante una limpieza con solvente mineral, mientras que para la remover el material aislante fue necesario humedecer la lámina para quitar la mayor parte de material y luego someter a la lámina a un proceso de lijado (lija No. 400) para homogenizar la superficie del conductor. Detalle del conductor se muestra en la Figura 3.1 y 3.2 respectivamente.



Figura 3.1 Preparación del conductor

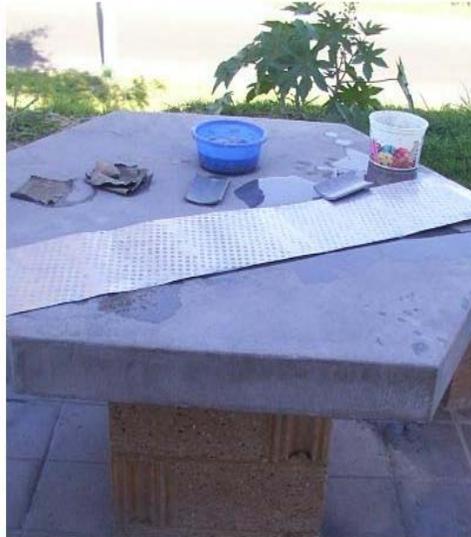


Figura 3.2 Conductor en proceso de limpieza.

### 3.2. Herramientas para la construcción de los devanados

Los devanados de los autotransformadores fueron hechos de material magnético de aluminio de sección rectangular, tanto el embobinado serie como el embobinado común. Para lograr construir estos devanados fue necesario implementar pequeñas herramientas de tipo artesanal con las cuales no hubiera sido posible la construcción de las maquinas eléctricas.

#### 3.2.1. Construcción del molde de los devanados

La construcción del molde de los embobinados fue hecha en madera con la sección rectangular levemente mayor a la ventana efectiva del núcleo magnético. A este se le perforo un agujero con el propósito de instalarlo en la embobinadora. Esto se ilustra en la Figura 3.3.

#### 3.2.2. Construcción de la maquina para embobinar

La embobinadora, se construyo con el propósito de embobinar los devanados de los autotransformadores. Esta maquina se construyo con hierro dulce en forma de angular,

dos rodamiento y un eje roscado para el montaje del molde de madera construido para los devanados. La Figura 3.4 muestra el detalle de la maquina.

### 3.2.3. Construcción de la remachador hidráulica

Esta herramienta fue necesaria implementarla principalmente por que la unión entre los devanados y los terminales de los auto-transformadores fueron de tipo unión en frío, es decir que no se utilizaría ningún tipo de soldadura para hacer las uniones. Ya que las uniones se realizaron con remaches de aluminio la construcción de esta maquina era necesaria. La maquina fue implementada principalmente por una "jack hidráulico" de los usados en automotores como elemento para remachar. El detalle de esta maquina se muestra en la Figura 3.5.



Figura 3.3 Molde del devanado

### 3.3. Construcción de los devanados

Los devanados se embobinaron uno después de la otra, es decir; primero el devanado serie y luego el devanado común sin corte de conductor entre los dos, aplicándole por supuesto el material aislante necesario entre cada vuelta previamente dimensionado y cortado. El material aislante usado fue el papel para máquinas eléctricas tipo NOMEX 10 y papel aislante COPACO 20 para refuerzo en el inicio del

embobinado y en los puntos de unión donde se colocaron los terminales externos de los auto transformadores. Las uniones se realizaron mediante conductor rectangular de aluminio, los cuales se unieron al conductor principal de los devanados a través de un proceso de unión en frío, es decir utilizando para la unión remaches de aluminio de dos tamaños diferentes. En total fueron 6 uniones por cada auto-transformador construido. Finalmente se aseguro el embobinado construido mediante la aplicación de una capa de barniz aislante para darle firmeza y aislamiento a este ultimo. La Figura 3.6 muestra uno de los embobinados construidos.



Figura 3.4 Embobinadora artesanal.

### 3.4. Ensamble del autotransformador monofásico

Luego de construidos los embobinados y que los núcleos magnéticos ya habían sido adecuados para su uso, el siguiente paso era el de ensamblar la bobina preformada al núcleo. Esto se realizo de la siguiente manera:

El proceso es simple, ya que el núcleo es acorazado y este esta formado por grupos de laminas, el ensamblado del embobinado y el núcleo se hace añadiendo grupos de laminas hasta que el tamaño del núcleo se completa. Primero se completa el primer brazo del núcleo y luego el otro. Para asegurar el núcleo ya ensamblado con el embobinado se utiliza cinta metálica conocida comercialmente como cinta "band-it". Finalmente se le aplica al núcleo magnético una capa de barniz para protegerlo. El auto transformador monofásico se muestra en la Figura 3.7.



Figura 3.5 Remachadora artesanal

### 3.5. Ensamble del banco trifásico de autotransformador

Estando ya ensamblados las unidades monofásicas, el siguiente paso era implementar el banco trifásico mediante la conexión de las maquinas construidas en configuración de estrella. Para este propósito se hizo necesario la construcción de una estructura metálica en la cual se instalarían los tres auto-transformadores, y que además tuviera terminales externos para poder obtener en una forma segura los voltajes terminales de las maquinas.



Figura 3.6 Embobinado construido



Figura 3.7 Autotransformador monofásico

### 3.5.1. Construcción de la estructura metálica

La estructura metálica se construyó básicamente con hierro angular para la base de la estructura, lamina metálica de para las cubiertas frontal, posterior y superior y lamina perforada para las cubiertas laterales y posteriores. Las cubiertas laterales se construyeron de tipo desmontable para hacer la estructura fácil de acceso además de darle ventilación a las tres unidades instaladas. A la cubierta frontal se le perforaron 24 agujeros para la instalación de terminales de potencia, los cuales se utilizan para obtener los voltajes de los auto transformadores. La estructura se muestra en la figura 3.8.

### 3.5.2. Instalación de los conductores

La instalación de los conductores se realizó para darle conexión a los auto-transformadores con los terminales de potencia instalados en la estructura metálica. Las dimensiones de los conductores se determinaron de acuerdo al NEC.



a)



b)

Figura 3.8 Estructura metálica construida.

- a) Estructura metálica
- b) Detalle de los terminales de potencia.

La conexión se realizó utilizando pernos galvanizados, esto se hizo necesario que se instalaran en los conductores terminales para los diferentes calibres de conductor que se utilizaron (1/0, 2/0). La instalación de los conductores se muestra en la Figura 3.9.



Figura 3.9 Instalación de los conductores.

### 3.5.3. Conexión del banco trifásico

La conexión del banco trifásico, se implemento conectando las unidades monofásicas a través de cables externos utilizando los terminales de potencia instalados en la estructura metálica. La conexión se realizo en configuración estrella. La Figura 3.10 muestra detalle del equipo construido. El diagrama esquemático de la conexión elegida se muestra en la Figura 1.15.



Figura 3.10 Equipo trifásico construido

### CONCLUSIONES DEL CAPITULO III

El proceso empleado en la construcción de las maquinas diseñadas, fue de tipo artesanal y no industrial ya que en el país no se encuentra ninguna fabrica que construya este tipo de maquina.

De acuerdo a las necesidades herramientas fueron construidas como es el caso de la embobinadora y la remachadora hidráulica, las cuales fueron usadas para la elaboración de los embobinados y en las uniones de los terminales con los devanados común y serie de los autotransformador respectivamente.

Las uniones entre los devanados que forman el embobinado de los autotransformadores monofásicos fueron hechas mediante uniones en frío, utilizando remaches de aluminio, siendo esta la opción más factible para el presente caso.

La conexión trifásica se obtuvo de conectar las maquinas diseñadas en estrella con neutro aterrizado para obtener voltajes balanceados, requisito indispensable mencionado por estándar IEEE Std 112-1996.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

National Fire Protection Association. National electric code 1987 handbook. Estados Unidos 1987.

Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Standars test procedure for polyfase induction motors and generators IEEE Std 112-1996 . New York. 1997.

## CAPITULO IV

### PRUEBAS DE AUTOTRANSFORMADORES

#### Introducción

El presente capítulo contiene los procedimientos y los resultados de las pruebas o ensayos necesarios para caracterizar los autotransformadores construidos. Se plantea una descripción breve de los principales procedimientos de prueba y los resultados obtenidos al realizar estas. Se pretende con estas pruebas determinar los parámetros eléctricos con los cuales este tipo de maquina eléctrica se modela y el comportamiento de estas sin carga realizando pruebas individualmente como conectadas formando una configuración estrella.

#### 4.0. Pruebas para autotransformadores

Las pruebas para autotransformadores son un conjunto de procedimientos los cuales tiene como objetivo verificar si la construcción y los valores de diseño se han logrado alcanzar.

Estas pruebas se dividen de la siguiente manera:

- Pruebas de aislamiento
- Pruebas de voltaje a cero carga
- Pruebas de corto-circuito

##### 4.0.1. Pruebas de aislamiento

Este tipo de pruebas tienen como objetivo principal el determinar si el valor del aislamiento expresado en ohmios, es el suficiente para los niveles de voltaje de la maquina, además de comprobar si en el proceso de construcción se ha cometido algún error principalmente en la elección de los materiales aislantes o en el proceso de ensamblaje de los embobinados con la estructura magnética. El equipo necesario para esta prueba son los medidores de aislamiento, los cuales generan un voltaje de tipo

directo (corriente continua) el cual se le aplica a la maquina bajo prueba.

El procedimiento de la prueba se describe a continuación:

- La maquina debe estar totalmente sin la aplicación de energía eléctrica
- Se coloca el medidor en una escala adecuada de acuerdo al voltaje de la maquina bajo prueba
- Se conecta el terminal (-) del medidor al chasis de la maquina y el terminal (+) del medidor a cada uno de los terminales de la maquina bajo prueba, estos como se indica en la figura 4.1
- Se toman las lecturas del medidor en ohmios cuando estas se estabilicen.
- Se repiten los pasos anteriores para cada uno de los terminales de la maquina si es necesario incluyen el terminal común del autotransformador.

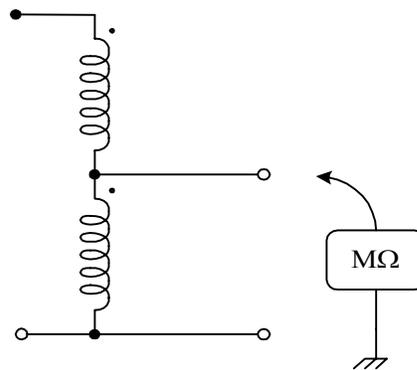


Figura 4.1 Conexión para medir aislamiento en el autotransformador

#### 4.0.2. Pruebas de voltaje a cero carga

Esta prueba tiene como objetivo determinar parte del circuito equivalente del auto-transformador, es decir, la rama de magnetización y de comprobar los voltajes en vacío de la maquina con los cuales se puede determinar la relación de transformación real de la maquina.

#### 4.0.2.1. Prueba de vacío

La prueba consiste en aplicar el voltaje nominal para el que está diseñado el auto-transformador teniendo el cuidado que la frecuencia sea la nominal. Para llevar a cabo esta prueba se necesita medidores de voltaje, de corriente, de potencia y una fuente de voltaje a la frecuencia nominal de la máquina.

El procedimiento es el siguiente:

- Armar el circuito que se muestra en la figura 4.2
- Con la fuente de voltaje se aplica el voltaje nominal de la máquina a frecuencia nominal.
- Se toman lecturas de voltaje, corriente y potencia cuando las lecturas se estabilicen.
- Se calculan los parámetros del modelo de acuerdo a las operaciones matemáticas expresadas en las ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3.

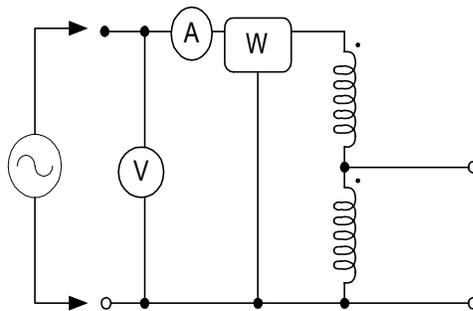


Figura 4.2 Conexión para pruebas en vacío

Sea la corriente, voltaje y potencia medidas definidas de la siguiente manera:

- $I_{oc}$  : corriente registrada por el amperímetro
- $V_{oc}$  : voltaje registrado por el voltímetro
- $P_{oc}$  : potencia real registrada por el vatímetro

Se definen las ecuaciones siguientes para encontrar la rama de magnetización:

La admitancia de excitación:

$$y \approx \frac{I_{oc}}{V_{oc}} \quad (4.1)$$

la conductancia de excitación:

$$g \approx \frac{P_{oc}}{V_{oc}^2} = \frac{I}{R_m} \quad (4.2)$$

de las anteriores se encuentra la susceptancia de excitación:

$$b \approx \sqrt{y^2 - g^2} = \frac{I}{X_m} \quad (4.3)$$

#### 4.0.2.2. Pruebas de voltaje

Las pruebas de voltaje se realizan para comprobar si los valores de voltajes obtenidos corresponden a los voltajes planteados en el diseño. Además se utilizan para comprobar la relación de transformación de la maquinas. Para realizarla es necesario una fuente de voltaje alterno y un medidor de voltaje AC.

El procedimiento es el siguiente:

- Armar el circuito que se muestra en la Figura 4.3.
- Se aplica un voltaje a frecuencia nominal.
- Se toman lecturas de voltaje cuando las lecturas se estabilicen.
- Se repiten los pasos anteriores en todos los terminales de los autotransformador.

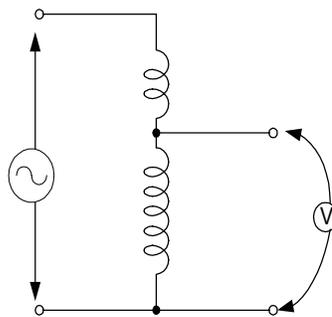


Figura 4.3 Conexión para pruebas de voltaje

#### 4.0.3. Pruebas de corto-circuito

Esta prueba tiene como objetivo determinar también parte del circuito equivalente del autotransformador. Esta

prueba determina la reactancia de dispersión y la resistencia del embobinado del modelo.

La prueba se realiza aplicándole al autotransformador un voltaje a frecuencia nominal capaz de hacer circular la corriente nominal en el embobinado común. El equipo necesario para esta prueba, son medidores de voltaje, corriente y potencia, además de una fuente regulable de voltaje A.C.

El procedimiento es el siguiente:

- Armar el circuito de la figura 4.4.
- Con la fuente regulable se aplica voltaje a los terminales del autotransformador capaz de hacer circular la corriente nominal del autotransformador.
- Se toman lecturas de voltaje, corriente y potencia cuando estas se estabilicen.
- Se calculan los parámetros eléctricos de modelo por las operaciones matemáticas expresadas en las ecuaciones 4.4, 4.5 y 4.6.

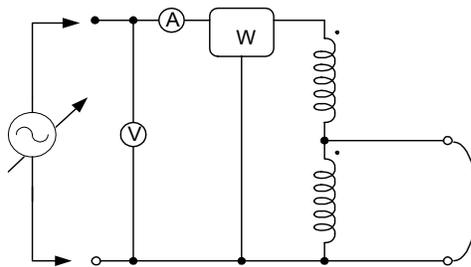


Figura 4.4 Circuito de prueba de corto-circuito

Sea la corriente, voltaje y potencia medidas definidas de la siguiente manera:

$V_{sc}$  : voltaje registrado por el voltímetro

$I_{sc}$  : corriente de entrada de corto-circuito registrada por el amperímetro

$P_{sc}$  : potencia de entrada registrada por el vatímetro.

Se definen las ecuaciones siguientes para encontrar la impedancia serie equivalente:

La impedancia de corto-circuito (impedancia serie equivalente):

$$Z_{eq} \approx Z_{sc} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \quad (4.4)$$

La resistencia de corto-circuito (resistencia serie equivalente):

$$R_{eq} \approx R_{sc} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} \quad (4.5)$$

La reactancia de dispersión equivalente:

$$X_{eq} \approx X_{sc} = \sqrt{Z_{sc}^2 - R_{sc}^2} \quad (4.6)$$

#### 4.1. Resultados de las pruebas

##### 4.1.1. Resultados de la prueba de aislamiento

Los resultados de la prueba de aislamiento se muestran en la Tabla 4.1, los valores de aislamiento están expresados en megohmios ( $10^6 \Omega$ ). El voltaje de prueba fue de 1000 vdc.

Tabla 4.1 Resultados de la prueba de aislamiento en los autotransformadores

Punto de conexión	Autotransformador 1	Autotransformador 2	Autotransformador 3
Tierra-inicio	1000M	1100M	1200M
Tierra- 50%	1000M	1100M	1200M
Tierra-40%	1000M	1100M	1200M
Tierra-30%	1000M	1100M	1200M
Tierra-20%	1000M	1100M	1200M
Tierra-10%	1000M	1100M	1200M
Tierra-común	1000M	1100M	1200M

#### 4.1.2. Resultados de las pruebas a cero carga

##### 4.1.2.1. Resultados de la prueba de vacío

Los resultados de la prueba de vacío, se muestran en las tabla 4.2. La prueba se realizo a los tres autotransformadores. Con los datos obtenidos en la prueba se calcularon los parámetros de la rama de magnetización.

Tabla 4.2 Resultados de la prueba de vacío

<i>Variables</i>	Autotransformador 1	Autotransformador 2	Autotransformador 3
$V_{oc}$	240V	240V	240 V
$I_{oc}$	1.6A	1.5 A	1.6 A
$P_{oc}$	384W	383 W	383 W
$R_m$	149.99ohm	149.99ohm	149.99ohm
$X_m$	1472.8 ohm	2080.63ohm	2098.87ohm

Los valores obtenidos son los de la rama de magnetización del circuito equivalente.  $R_m$  y  $X_M$  corresponde a los valores inversos de la conductancia y la suceptancia.

##### 4.1.2.2. Resultados de la prueba de voltajes

Los resultados de las pruebas de voltaje se muestran en la Tabla 4.3 y Tabla 4.4. Como se observa las pruebas fueron realizadas para cada uno de los autotransformadores monofásicos, así como también, para el banco trifásico conectado en estrella. La relación de transformación que se comprueba ( $a$ ) es la de la bobina serie ( $V_s$ ) y común ( $V_c$ ), es decir del transformador equivalente. Todos los valores en voltios A.C.

Los voltajes de prueba aplicados a las maquinas entre sus terminales fueron 206.6 V, 206.2V y 205.7V a los autotransformadores 1, 2 y 3 respectivamente.

La relación de transformación se encontró dividiendo el valor del voltaje  $V_s$  entre el valor del voltaje  $V_c$  tomados con el voltímetro. El valor resultante fue de uno ( $a= 1$  ).

Tabla 4.3 Resultados de las pruebas de los autotransformadores monofásicos

Puntos de prueba	Autotransformador 1		Autotransformador 2		Autotransformador 3	
	real	teórico	real	teórico	real	teórico
$V_s$	103.1	103.3	103.1	103.1	102.8	102.85
$V_c$	103.1	103.3	103.2	103.1	102.9	102.85
$V_{10\%}$	20.6	20.66	20.6	20.62	20.6	20.57
$V_{20\%}$	41.3	41.3	41.3	41.24	41.2	41.14
$V_{30\%}$	61.9	61.98	61.9	61.86	61.8	61.71
$V_{40\%}$	82.6	82.64	82.5	82.48	82.4	82.28
$V_{50\%}$	103. 2	103.15	103.1	103.1	102. 9	102.85

Tabla 4.4 Resultados de las pruebas de voltaje banco trifásico

Puntos de prueba	$V_{AB}$		$V_{BC}$		$V_{AC}$	
	real	teórico	real	teórico	real	teórico
$V_{10\%}$	20.7	20.72	20.8	20.74	20.9	20.86
$V_{20\%}$	41.5	41.44	41.7	41.48	41.6	41.72
$V_{30\%}$	62.3	62.16	62.6	62.22	62.3	62.58
$V_{40\%}$	83.1	82.88	83.2	82.96	83.2	83.44
$V_{50\%}$	103. 1	103.6	104.3	104.1	104. 0	104.3

Los voltajes de prueba fueron.  $V_{AB} = 207.2$  V,  $V_{BC} = 207.4$  y  $V_{AC} = 208.6$ . Todos los valores mostrados en voltios A.C.

#### 4.1.3. Resultados de la prueba de corto-circuito

Las prueba de corto-circuito se realizo solamente para una de las maquinas construidas, el resultado de los

valores obtenidos y los parámetros calculados se muestran en l a Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Resultados pruebas de corto-circuito

Variabes	Autotransformador 1	Autotransformador 2	Autotransformador 3
$V_{sc}$	-	3.85 V	-
$I_{sc}$	-	338 A	-
$P_{sc}$	-	596.24 W	-
$R_{eq}$	-	$5.22 \cdot 10^{-3}$ ohm	-
$X_{eq}$	-	$9.73 \times 10^{-3}$ ohm	-

Esta prueba solamente se realizo para el autotransformador numero 2. Los valores determinados corresponden a la impedancia equivalente del circuito equivalente.

#### 4.2. Comparación de resultados

##### 4.2.1. Pruebas de aislamiento

Al observar los valores de aislamiento, se ve que los datos obtenidos son altos(en el orden de los millones de ohmios), algunas estándares de la IEEE, mencionan que el valor de estas pruebas debe de resultar como mínimo: el voltaje de la maquina diseñada mas uno, esto por mil.  $(V_{maquina} + 1) \times 10^3$  ohmios. Se ve que este valor fue superado con creces al realizar la esta prueba al equipo.

##### 4.2.2. Pruebas de cero carga

###### 4.2.2.1. Pruebas de vacío

Al comparar los valores obtenidos de esta prueba, observamos que el valor de la resistencia de la rama de magnetización es prácticamente igual, no así, la reactancia. Estas diferencia son debido principalmente provocado por el equipo con que se realizaron las pruebas. El cual no tenia la precisión adecuada para realizar este tipo de pruebas.

#### 4.2.2.2. Pruebas de voltaje

Al comparar los valores de voltaje teórico (calculado en base al voltaje de prueba) con los reales (medidos con voltímetro), observamos que la diferencia es muy pequeña en las tres máquinas, tanto en las pruebas monofásicas como las pruebas conectadas en estrella. Difícilmente los voltajes serán exactamente iguales, incluso en los construidos industrialmente.

#### 4.2.3. Pruebas de corto-circuito

Ya que de este tipo de pruebas solamente se le realizó a una de las máquinas, no fue posible comparar entre ellas, ni contra datos teóricos. El método para realizar el diseño, no proponía el cálculo directo de la impedancia equivalente calculado con esta prueba.

#### CONCLUSIONES DEL CAPITULO IV

Las pruebas o ensayos realizados a los autotransformadores son necesarias ya que solamente a través de estas se puede caracterizar y por lo tanto conocer cual es el comportamiento de este tipo de maquina .

De las pruebas de vacío y cortocircuito se pueden determinar los parámetros del circuito equivalente los cuales son necesarios para el análisis del autotransformador como elemento de circuito. La rama de magnetización se obtiene de las pruebas de vacío, mientras que la impedancia serie equivalente se obtiene de las pruebas de corto circuito.

Se comprobó con las pruebas de voltaje (sin carga) los valores de voltaje par los cuales se había diseñado las maquinas, es decir individualmente, además de verificar los voltajes en configuración estrella determinando en los dos casos variaciones solamente de los dígitos decimales de las lecturas.

Con las pruebas de aislamiento se verifico, que el material utilizado en la construcción de las maquinas y los procedimientos seguidos en el proceso de construcción fueron los mas adecuados para el presente caso.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Institute of Electric and Electronics Engineers. IEEE Standard test code for dry-type distribution and power transformers ANSI/IEEE C57.12.91-1979. New York. 1991

Matsch Leander W. Maquinas Electromecánicas y Electromagnéticas. México D.F. Representaciones y Servicios de Ingeniería S.A. 1974

## CAPITULO V

### REQUERIMIENTOS PARA LOS PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO

#### Introducción

En el presente capítulo se definen las condiciones de entrada que se deben cumplir para que el equipo construido pueda funcionar correctamente y además cumpla con los requerimientos exigidos por las normas internacionales; también se detalla el procedimiento para realizar las pruebas de rotor bloqueado en motores de inducción trifásicos recomendado por la norma IEEE Std-112. para finalizar se muestran los formularios que reglamenta el mencionado estándar para presentar los resultados de dichas pruebas.

#### 5.1. Requerimiento de potencia del equipo construido

Requerimiento de la fuente de potencia que es necesaria para este equipo es determinada en el diseño del mismo que fue presentado en el Capítulo 2, pero a su vez este fue determinado por las recomendaciones definidas en el estándar IEEE Std-112. denominado "Procedimiento de prueba para motores y generadores de inducción polifásicos". En la Tabla 5.1 se resumen los parámetros de cada uno de los autotransformadores.

Tabla 5.1 Resumen de las características de las maquinas

Parámetro	Valor
Tipo	Autotransformador
Método de enfriamiento	Auto enfriado
Voltaje de entrada	240/208 V
Voltaje de salida	10%, 15%, 20%, 25%, 30%
Corriente de entrada	195 A
Corriente de salida	650/325
Tipo de conexión	estrella

Además de los parámetros anteriores se debe tener en cuenta las condiciones que recomienda la norma IEEE-112 los cuales se detallan a continuación.

#### 5.1.1. Cantidades eléctricas.

Todos los valores de voltajes y corrientes medidos son valores r.m.s, al menos que se indique lo contrario.

#### 5.1.2. Suministro de potencia

El suministro de potencia proporcionará voltajes de fase equilibrados (balanceados) que se acercan a la forma de onda sinusoidal. El factor de desviación de la forma de onda del voltaje (ver nota) no excederá el 10%. La frecuencia deberá ser mantenida dentro de  $\pm 0.5\%$  del valor requerido para el desarrollo de la prueba, a menos que se especifique lo contrario. Cualquier desviación de frecuencia afecta directamente la eficiencia obtenida con el método A y B. Cuando estos métodos son usados, la frecuencia promedio deberá estar dentro de  $\pm 0.10\%$  del valor especificado de la prueba.

Nota:

El factor de desviación de una onda es la proporción de la diferencia máxima entre las ordenadas correspondientes de la onda y del equivalente de la onda sinusoidal a la ordenada máxima de la onda sinusoidal equivalente cuando las ondas se sobreponen de tal manera que se haga esta diferencia máxima tan pequeña como sea posible. La onda sinusoidal equivalente es definida como la que tiene la misma frecuencia y los mismos valores r.m.s que la onda de prueba

##### 5.1.2.1. Estabilidad de frecuencia

No pueden tolerarse cambios rápidos en la frecuencia durante las pruebas porque tales variaciones no sólo afectan las pruebas de las máquinas, sino, también las mediciones de los dispositivos. Las variaciones en la frecuencia durante una prueba no excederán el 0.33% de la frecuencia promedio.

### 5.1.3. Selección de instrumentos

Se deberán usar instrumentos y accesorios de equipos calibrados además ambos deben poseer gran exactitud. Pueden usarse instrumentos del tipo analógicos o digitales. Los factores que afectan la exactitud, particularmente con los instrumentos no-electrónicos o analógicos, son:

- Carga de la señal de la fuente.
- Grado de la calibración
- Rango, condición, y calibración del instrumento

Donde la exactitud del instrumento es generalmente expresado como un porcentaje de la escala completa, el rango del instrumento se escoge tan bajo como sea práctico.

El instrumento deberá llevar indicación de registro de calibración, dentro de 12 meses de la prueba, indicando límites del error no mayores de  $\pm 0.5\%$  de escala completa para las pruebas generales o no mayores de  $\pm 0.2\%$  de escala completa, como se requiere por el Método B de prueba de Eficiencia (ver sección 5.2 del presente capítulo) para mantener la exactitud de los resultados de la prueba. Cuando se conectan varios instrumentos simultáneamente al circuito, pueden requerirse correcciones adicionales de la indicación del instrumento.

Los instrumentos electrónicos son generalmente más versátiles y tienen mucha más impedancia que los instrumentos pasivos. (no-electrónicos) La alta impedancia de la entrada reduce la necesidad de hacer correcciones para la corriente mostrada por el instrumento. Sin embargo, los instrumentos de alta impedancia de entrada son más susceptibles al ruido.

Las fuentes comunes de ruido son

- Acoplamientos inductivos o electrostáticos de terminales conductores para sistemas de potencia
- Impedancia Común de acoplamiento o lazos de tierra
- Inadecuado rechazo para señales de modo común.
- Interferencia producida por las líneas de potencia.

La buena práctica requiere el uso de terminales conectores blindados, aterrizados al chasis y solamente en un punto, manteniendo los terminales señalados tan lejos como posible de los cables de potencia.

Deben conectarse con tierra todas las partes de metal expuestas de estos instrumentos para mayor seguridad.

Los requisitos de calibración de los instrumentos son similares a aquellos que son instrumentos no-electrónicos. Cuando sistemas de adquisición de datos automáticos convenientes o registradores de gran velocidad están disponibles, estos podrán usarse. Más información con respecto al uso de instrumentos de este tipo se detalla en el estándar IEEE Std 120-1989.

#### 5.1.4. Transformadores de instrumentación

Cuando transformadores de instrumentación de corriente y potencial son usados, se harán las correcciones para los errores de proporción en las mediciones de voltaje y corriente y para la proporción y errores de ángulo de fase en las mediciones de potencia.

Los errores de los transformadores usados no serán mayores que 0.5% para la prueba general o no mayor que  $\pm 0.3\%$  que se requieren por el Método B de Prueba de Eficiencia (ver sección 5.4.3) para mantener la exactitud de resultados de la prueba. Cuando los transformadores de instrumentación e instrumentos para medir voltaje, corriente o potencia son calibrados como un sistema, los errores del sistema no serán mayores que  $\pm 0.2\%$  a escala completa, el cual se requiere por el Método B de Prueba de Eficiencia (ver sección 5.4.3) para mantener la exactitud de los resultados de la prueba.

#### 5.1.5. Voltaje

Los voltajes de la línea se medirán con terminales conductores conectados a los terminales de la máquina. Si las condiciones locales no permiten tales conexiones, el error introducido se evaluará y las lecturas se corregirán. Pueden realizarse las pruebas donde el desbalance de voltaje no excede 0.5%. El porcentaje de desbalance de voltaje es igual a 100 veces la desviación máxima de voltaje del voltaje promedio dividido entre el voltaje promedio.

Ejemplo: Con los voltajes de 220V, 215V, y 210V, el voltaje promedio es 215 V la desviación máxima del promedio es 5, y el desbalance igual a  $(100 \times 5) / 215 = 2.3\%$ .

#### 5.1.6. Corriente

Se medirán las corrientes de línea en cada fase del motor, y el valor promedio aritmético se usará en calcular el rendimiento (eficiencia) de la maquina en la prueba.

#### 5.1.7. Potencia

La Potencia de entrada a la máquina de trifásica puede ser medida por dos vatímetros monofásicos conectados con el método de los dos vatímetros, un vatímetro polifásico, o tres vatímetros monofásicos. Se corregirán las lecturas de potencia por pérdidas en los medidores si estas son significantes.

#### 5.1.8. Resistencia

##### 5.1.8.1. Resistencia de referencia

Para obtener la resistencia dc (resistencia de corriente directa) del estator (y rotor, en el caso de máquinas de rotor-bobinado), los procedimientos que deben ser utilizados se detallan en el estándar IEEE ETD 118-1978.

##### 5.1.8.2. Referencia del ambiente

Todos los resultados determinados deben corregirse a una temperatura ambiente de 25° C.

##### 5.1.8.3. Corrección a una temperatura especificada

Cuando la resistencia,  $R_t$  de un bobinado ha sido determinada por la prueba a temperatura del embobinado,  $t_t$ , la resistencia puede ser corregida a una temperatura especifica,  $t_s$  por la ecuación 5.1 como sigue:

$$R_s = \frac{R_t(t_s + k)}{(t_t + k)} \quad (5.1)$$

donde:

$R_s$  es la resistencia del embobinado, corregido a una temperatura específica,  $t_s$ , en  $\Omega$

$t_s$  es la temperatura específica para la corrección de resistencia, en  $^{\circ}\text{C}$  (ver 5.1.1)

$R_t$  es el valor de prueba de la resistencia del embobinado en  $\Omega$ , a temperatura  $t_t$ .

$t_t$  la temperatura del embobinado cuando la resistencia fue medida, en  $^{\circ}\text{C}$

$k$  es 234.5 para 100% IACS conductividad para el cobre, o 225 para aluminio, basado sobre un volumen de conductividad del 62%

Notas:

Para otro material del bobinado, sé deberá de usar un valor conveniente de  $k$  (inferido a la temperatura para cero resistencia).

Los valores para  $t_s$  y  $t_t$  en la ecuación ( 5.1) serán basados en el mismo método de medida de temperatura. El valor para el  $t_s$  en (5.1) es basado en la de temperatura promedio de embobinado, Método C. Cuando  $t_t$  es obtenido por medición directa de temperatura local en el Método D. el valor para el  $t_t$  en ecuación 1 debe ajustarse para igualar la temperatura promedio del embobinado. Esto puede estimarse asumiendo una relación lineal entre el aumento de temperatura obtenido por los dos métodos.

#### 5.1.9. Cantidades mecánicas

##### 5.1.9.1. Potencia

Se tomarán las mediciones de potencia mecánica con gran cuidado y exactitud. Si es usado un freno mecánico, el peso, deberá ser cuidadosamente determinado y compensado. Si un dinamómetro es usado para las mediciones, las perdidas por fricción, acople y rodamientos deben ser compensadas. Un dinamómetro propiamente dimensionado debe ser usado tal que las perdidas por acoplamiento, fricción, fricción del aire medidas por el dinamómetro (vea la nota debajo) tasada de la máquina probada no deben ser mayor que 15% del rendimiento nominal de la máquina probada; y ellas deben ser sensibles a un cambio de torque de 0.25% del torque nominal.

Nota:

Un dinamómetro es definido como un dispositivo para aplicar torque al miembro rotativo o la máquina de prueba. Está

provisto con los medios para indicar el torque y la velocidad, y no esta limitado a una base de soporte de construcción. Un transductor de torque en línea puede usarse para proporcionar una medida directa de torque en el eje de la máquina de prueba.

Cuando se requiere la prueba de eficiencia a través del Método B para mantener la exactitud y repetición de las pruebas, los errores de la instrumentación para la medición del torque mecánico no serán mayores que  $\pm 0.2\%$  a escala completa.

Cuando se usa un dinamómetro, la potencia de eje del dinamómetro, en vatios, es obtenida por la ecuación siguiente:

$$power = \omega T = \frac{(T \cdot n)}{k} \quad (\text{vatios}) \quad (5.2)$$

donde:

$T$  es el torque  
 $n$  es la velocidad rotacional  
 $k$  es 9.549, sí  $T$  esta en N.m  
 $k$  es 7.043, si  $T$  esta en lbf.p

#### 5.1.9.2. Estabilización de pérdidas en rodamientos

Algunos motores pueden experimentar un cambio en las pérdidas por fricción hasta que los rodamientos alcancen una condición estable, En rodamientos antifricción lubricados con grasa, la estabilización no ocurre hasta que estos no excedan la presencia de grasa en las rutas de las partes en movimiento. Esto puede requerir un numero de horas de funcionamiento para estabilizar la entrada en vatios en vacío. Puede considerarse que la estabilización ha ocurrido siempre que la potencia de entrada en vacío (o acoplado a un dinamómetro (no energizado) no varíe por más de 3% entre dos lecturas sucesivas al mismo voltaje en un intervalo de media hora.

#### 5.2. Procedimiento de prueba

En la presente sección se define el procedimiento que con lleva a determinar la eficiencia de un motor de

inducción trifásico a través de la prueba de rotor bloqueado del motor. Pero antes de continuar no está demás de mencionar lo siguiente.

PRECAUCION

Debido a lo peligroso de las corrientes, voltajes y las fuerzas desarrolladas en este tipo de pruebas, precauciones de seguridad deberán ser tomadas para todas las pruebas. Ningún esfuerzo es hecho aquí para listar o repasar las precauciones de seguridad generales que son establecidas a lo largo de la industria. Sin embargo, esta norma incluye precauciones de seguridad especiales aplicables a las pruebas particulares descritas. Todas las pruebas deben realizarse por personal calificado y experimentado.

Una vez considerado lo anterior se procede a realizar la prueba del motor pero es de importancia recordar algunos parámetros del motor que serán de utilidad al momento de interpretar los resultados de las mismas.

5.2.1. Determinación de la eficiencia

La eficiencia es la relación entre la potencia de salida y la potencia total de entrada. La potencia de salida es igual a la potencia de entrada menos las pérdidas por lo tanto si dos o tres variables (salida, entrada o pérdidas) son conocidas es posible determinar la eficiencia por unas de las siguientes ecuaciones.

$$Eficiencia = \frac{Potencia\ de\ Salida}{Potencia\ de\ Entrada} \quad (5.3)$$

$$Eficiencia = \frac{Potencia\ de\ entrada - Pérdidas}{Potencia\ de\ Entrada} \quad (5.4)$$

(particularmente aplicables a motores)

$$Eficiencia = \frac{Potencia\ de\ Salida}{Potencia\ de\ salida - Pérdidas} \quad (5.5)$$

(particularmente aplicables a generadores)

Excepto que se especifique lo contrario la eficiencia será determinada para voltajes y frecuencias nominales. La eficiencia puede ser determinada mas correctamente de los resultados de las pruebas si los voltajes no varían significativamente del voltaje nominal y el desbalance del voltaje no exceda el 0.5% ( según sección 5.1.5) Cuando el punto de carga esta disponible a otro voltaje diferente del nominal, puede combinarse con el método del circuito equivalente (Método F y F1) para calcular el rendimiento a voltaje nominal.

#### 5.2.2. Métodos de pruebas para eficiencia.

La variedad de métodos para determinar la eficiencia y las perdidas son identificadas como sigue:

- Método A. Entrada-Salida.
- Método B. Entrada-Salida con segregación de perdidas y medición indirecta de perdidas de carga misceláneas.
- Método C. Duplicado de la maquina con segregación de perdidas y medición indirecta de perdidas misceláneas.
- Método E. Medición de la potencia eléctrica bajo carga con segregación de perdidas y medición directa de perdidas misceláneas.
- Método E1. Medición de la potencia eléctrica bajo carga, con segregación de perdidas y asumiendo perdidas misceláneas de carga.
- Método F. Circuitos equivalente con medición directa de perdidas misceláneas de carga.
- Método F1. Circuitos equivalente asumiendo las perdidas misceláneas de carga.
- Método C/F. Circuito equivalente calibrado al punto de carga por el método C, con medición indirecta de perdidas misceláneas de carga.
- Método E/F. Circuito equivalente calibrado al punto de carga por el método E, con medición directa de perdidas misceláneas de carga.
- Método E1/F1. Circuito equivalente calibrado al punto de carga por el método E, asumiendo perdidas misceláneas de carga.

#### 5.2.3. Guía para seleccionar el método de prueba para determinar la eficiencia.

En general el método de Entrada-Salida (método A) a máquinas de potencia fraccionaria. Siempre que no se especifique lo contrario el método de Entrada -Salida deberá

ser aplicado a motores horizontales, polifásicos, jaula de ardilla y motores con potencia de 1-250hp(1-190kW).

Con segregación de pérdidas(Método B). El método B podría ser seleccionado cuando se desean las pérdidas para cada componente del motor(según la cláusula 5) es diseñada o cuando la precisión y repetibilidad son requeridas. Por ejemplo para el programa EEM(B4).

Para motores verticales en el rango de 1-250hp (1-190kW)podrían también ser probados por el Método B. Si las condiciones de construcción lo permiten. Pero si las condiciones de construcción no lo permiten o para motores verticales de mayor potencia se pueden utilizar los métodos de pruebas E, E1,F ó F1.

Para motores polifásicos con un rango de potencia superior al de 250hp(190kW) pueden utilizarse los métodos B, C, E, E1, F ó F1 dependiendo de la disponibilidad en cuanto a facilidad que la prueba requiera. Cuando la practica, la calibración de carga del circuito equivalente(Métodos C/F, E/F ó E1/F1) proporciona la simplicidad de poder determinar a un nivel confiable de la prueba el rendimiento para varias cargas por la solución del circuito equivalente.

#### 5.2.4. Resumen del procedimiento de prueba.

Una vez seleccionado el método de prueba y haber tomado todas las consideraciones anteriores se procede de la siguiente manera

- Proporcione un método de fijación adecuado ala maquina de inducción ya que en este tipo de prueba se desarrollan esfuerzos mecánicos muy altos.
- Bloquee el rotor de la maquina(motor o generador) considerando el torque definido en la placa característica del mismo o en su defecto utilizar como referencia el proporcionado en la Tabla C.1 mostrada en el anexo C.
- Identifique la corriente nominal del motor que se encuentra en la placa característica del mismo, en el caso de que no se encuentre la corriente nominal se podrá tomar como referencia la tabla de motores mostradas en el anexo C. Con cualquiera de estos valores determine el calibre del conductor con el cual se conectara el motor al banco de autotransformadores considerando la corriente nominal del motor, de acuerdo al código NEC (Tabla D.1).
- Verifique que el equipo de pruebas no se encuentre en operación.

- Desconecte cualquier conexión que pudiera existir entre los terminales del equipo de ensayos anteriores.
- Energizar el banco de pruebas tomando en cuenta el paso anterior.
- Antes de seguir con el procedimiento tome en cuenta lo siguiente: evite en lo posible colocar equipos de medición sobre el banco de pruebas ya que este produce fuertes campos magnéticos y si los instrumentos no poseen protección contra este podrían sufrir algún daño.
- Identifique los diferentes valores de voltaje que proporciona el banco de autotransformadores.
- Impleméntese un circuito en el cual se deban incluir medidores tales como amperímetros, voltímetros, medidores de frecuencia, vatímetros así como otros que se consideren necesarios.
- Conéctense los alimentadores del motor (incluyendo todos los equipos de medición) al terminal de menor voltaje del equipo.
- Energice el banco de pruebas.
- Verifique si con este voltaje aplicado se alcanza la corriente nominal del motor.
- En el caso de no haber alcanzado la corriente nominal desconéctese la maquina y proceda a aplicar el voltaje siguiente que proporciona el banco de autotransformadores. Repita este procedimiento hasta alcanzar al menos la corriente nominal del motor.
- Realizar la lectura de los medidores instalados. Es notar en este punto que las lecturas deben realizarse lo más rápido posible porque el motor o generador podría estar sometido a una corriente mayor que la nominal.
- Una vez realizadas las mediciones de las cantidades mencionadas anteriormente es posible realizar los cálculos de rendimiento de la maquina. Como se detallan en la mayoría de textos de maquinas eléctricas o más específicamente en el estándar IEEE Std-112.

Notas:

Es de hacer notar que esta prueba se realiza no exactamente a corriente nominal sino que en un rango entre esta y el 125% de la corriente nominal.

Las lecturas deben realizarse con la mayor rapidez posible para evitar de esta forma posibles daños en la maquina y en el equipo.

### 5.3. Presentación de los resultados

Existen dos tipos de pruebas que son realizadas en la mayoría de maquinas eléctricas, para el caso de los motores y generadores de inducción son las pruebas rutinarias y

las pruebas específicas. La diferencia entre ellas estriba en que las primeras deben realizarse a toda máquina antes de ponerse a operar, incluso estas pruebas deben realizarse cuando esta sea nueva. Por otra parte las pruebas específicas son realizadas para ciertos casos en los cuales se requiera más exactitud de las características de la máquina. Entre las pruebas rutinarias de una máquina de inducción se pueden mencionar:

- Prueba de vacío sin carga
- Prueba a rotor bloqueado
- Medición de resistencia de los devanados
- Medición de temperatura en los devanados

En las pruebas especializadas de las máquinas de inducción se realizan además de todas las pruebas rutinarias que se les realizan a las máquinas inducción otros tipos de pruebas que pueden ser de interés para el fabricante o para el propietario de la máquina.

El estándar IEEE Std-112 recomienda la forma de presentar los resultados para las pruebas rutinarias como se muestra en la Tabla 5.2 y las para las pruebas específicas el mismo estándar recomienda utilizar el formato mostrados en la Tabla 5.3.

Tabla 5.2. Formato recomendado para presentar los resultados de las pruebas rutinarias en máquinas de inducción según IEEE Std-112.

PRUEBAS RUTINARIAS EN MAQUINAS DE INDUCCION.

Nombre del fabricante. \_\_\_\_\_ Fecha de la prueba. \_\_\_\_\_  
 Dirección del fabricante. \_\_\_\_\_ Orden de fabricación No. \_\_\_\_\_  
 Empresa. \_\_\_\_\_ Orden de la empresa NC. \_\_\_\_\_

Datos de placa

Hp/kw nominal	Factor de servicio	Velocidad nominal r/min	Fases	Frecuencia (HZ)	Voltaje	Amperios

Tipo	Estructura	Aumento de temperatura.	Temp. ambiente y clase de aislamiento	Tiempo de operación	Letra de diseño	Letra código para bloquear

Características de las pruebas

Serie No	Sin carga (vacío)					Rotor bloqueado				Voltaje de circuito abierto*	Prueba de voltaje de alto potencial	Resistencia entre terminales del estator.	
	Voltaje	Frecuencia Hz	Velocidad r/min	Amperios	Kilowatts	Voltios	Frecuencia Hz	Amperios	Kilowatts			Ohms.	Temp. C

Prueba para maquinas con rotor bobinado.

Aprobado por: \_\_\_\_\_ Fecha de la prueba. \_\_\_\_\_

Tabla 5.3. Formato recomendado para presentar los resultados de las pruebas especializadas en maquinas de inducción según IEEE Std-112

PRUEBAS ESPECIALIZADAS EN MAQUINAS DE INDUCCION.

Nombre del fabricante. \_\_\_\_\_ Fecha de la prueba. \_\_\_\_\_  
 Dirección del fabricante. \_\_\_\_\_ Orden de fabricación No \_\_\_\_\_  
 Empresa. \_\_\_\_\_ Orden de la empresa No \_\_\_\_\_

HP/kw nominal	Factor de servicio	Velocidad nominal r/min	Fases	Frecuencia (Hz)	Voltaje	Amperios.	Tipo	Estructura

Aumento de temperatura.

Condiciones de la prueba				Aumento de la temperatura. _____ C			
Horas de rotación.	Voltaje de línea	Corriente de línea.	Enfriamiento del aire C	Estator		Rotor	
				bobinado		bobinado	
				Por el método			Por el método

Características

Porcentaje del deslizamiento nominal	Corriente de línea sin carga	Voltaje secundario estable	Voltaje secundario por vuelta a carga nominal.	Resistencia a 25 C, entre líneas.
				Prim.
				Sec.

Torque de arranque* en _____ con % voltios aplicados	Torque de rotor* bloqueado en _____ con _____% del voltaje aplicado	Corriente de arranque (rotor bloqueado) con _____% volt. aplicado

Eficiencia y factor de potencia

Porcentaje de eficiencia			Porcentaje de factor de potencia		
carga nominal	75% de carga	50% de carga	carga nominal	75% de carga.	50% de carga

\*Indicar las unidades del torque: como N.m o lb-ft

\*indicar el método como: Termómetro, termocupla, resistencias o detectores embebidos.

Aprobado por: \_\_\_\_\_ fecha. \_\_\_\_\_

## CONCLUSIONES DEL CAPITULO V

El equipo deberá ser operado tomando en cuenta todas las consideraciones de seguridad para el personal que realice las pruebas mencionadas. También será responsabilidad del que realice la prueba de seleccionar los equipos e instrumentos adecuados para que los resultados puedan ser aprobados por las recomendaciones del estándar IEEE Std 112-1996.

El procedimiento de prueba debe ser considerado como se detalla en este capítulo y de esta manera se podrá realizar las pruebas sin ocasionar daños al equipo de prueba como también en la máquina que se está sometiendo a prueba.

Para que los resultados de una prueba tenga validez se deben considerar no solamente la exactitud con que son medidas las variables eléctricas sino que todos aquellos aspectos al momento de realizar la prueba que puedan afectar el sistema que se está analizando. Estos parámetros a considerar podrán ir desde condiciones ambientales, variables mecánicas y sin descuidar las variables eléctricas las cuales podrían reflejar cualquier variación de las otras.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Standards test procedure for polyfase induction motors and generators IEEE Std 112-1996. New York. 1997.

## CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

El método de diseño elegido ha sido adaptado para el diseño de los autotransformadores, ya que este, está orientado, al diseño de transformadores de potencia y distribución no a este tipo de maquina con que se construyo el equipo.

La configuración elegida para conectar las unidades monofásicas y así poder obtener la potencia trifásica deseada, ha sido, la configuración estrella; ya que esta provee un sistema de voltajes balanceados además de acceso al conductor neutro de gran importancia tanto para la seguridad del equipo como para la seguridad del personal que realizaría las pruebas, recomendaciones sugeridas por el estándar IEEE Std 112-1996.

Se debe tener en cuenta que el equipo construido ha sido implementado a partir de equipo fuera de uso o en mal estado, principalmente de transformadores que han sufrido algún tipo de avería en el lado de bajo voltaje. Esto debido a que en el país no se cuenta con industria que construya este tipo de maquina. Por lo anterior el método de construcción ha sido de tipo artesanal y no industrial como seria lo esperado. Los resultados obtenidos de las pruebas, han sido mas que aceptable sobre todo considerando lo anterior.

Para la elaboración de los ensayos de rotor bloqueado se debe seguir todas las recomendaciones, procedimientos y pruebas que se encuentran en el estándar IEEE Std 112-1996 antes mencionado, ya que esta es la base para realizar de una manera segura y confiable este tipo de pruebas.

Se debe tomar en cuenta que el equipo construido, es una parte del banco de pruebas de motores de inducción por lo que es recomendable realizar las pruebas hasta que este banco sea funcional, es decir, hasta que la mayoría de los elementos hayan sido diseñados.

Adicionalmente se debe hacer énfasis en la seguridad del equipo, en donde un estudio exhaustivo en el ramo de protecciones eléctricas debe ser realizado, ya que el autotransformador representa un riesgo muy alto con respecto a fallas a tierra.

ANEXO A

Tabla A.1 Valores de eficiencia nominal y mínima a carga completa para motores eficientes de 0 a 250HP

HP	2 POLOS		4 POLOS		6 POLOS		8 POLOS	
	Eficiencia Nominal	Eficiencia Mínima						
MOTORES ABIERTOS								
1.0	-	-	82.5	80.0	80.0	77.0	74.0	70.0
1.5	82.5	80.0	84.0	81.5	84.0	81.5	75.5	72.0
2.0	84.0	81.5	84.0	81.5	85.5	82.5	85.5	82.5
3.0	84.0	81.5	86.5	84.0	86.5	84.0	86.5	84.0
5.0	85.5	82.5	87.5	85.5	87.5	85.5	87.5	85.5
7.5	87.5	85.5	88.5	86.5	88.5	86.5	88.5	86.5
10.0	88.5	86.5	89.5	87.5	90.2	88.5	89.5	87.5
15.0	89.5	87.5	91.0	89.5	90.2	88.5	89.5	87.5
20.0	90.2	88.5	91.0	89.5	91.0	89.5	90.2	88.5
25.0	91.0	89.5	91.7	90.2	91.7	90.2	90.2	88.5
30.0	91.0	89.5	92.4	91.0	92.4	91.0	91.0	89.5
40.0	91.7	90.2	93.0	91.7	93.0	91.7	91.0	89.5
50.0	92.4	91.0	93.0	91.7	93.0	91.7	91.7	90.2
60.0	93.0	91.7	93.6	92.4	93.6	92.4	92.4	91.0
75.0	93.0	91.7	94.1	93.0	93.6	92.4	93.6	92.4
100.0	93.0	91.7	94.1	93.0	94.1	93.0	93.6	92.4
125.0	93.6	92.4	94.5	93.6	94.1	93.0	93.6	92.4
150.0	93.6	92.4	95.0	94.1	94.5	93.6	93.6	92.4
200.0	94.5	93.6	95.0	94.1	94.5	93.6	93.6	92.4
250.0	94.5	93.6	95.4	94.5	95.4	94.5	94.5	93.6
MOTORES ENCERRADOS								
1.0	75.5	72.0	82.5	80.0	80.0	77.0	74.0	70.0
1.5	82.5	80.0	84.0	81.5	85.5	82.5	77.0	74.0
2.0	84.0	81.5	84.0	81.5	86.5	84.0	82.5	80.0
3.0	85.5	82.5	84.5	85.5	87.5	85.5	84.0	81.5
5.0	87.5	85.5	87.5	85.5	87.5	85.5	85.5	82.5
7.5	88.5	86.5	89.5	87.5	89.5	87.5	85.5	82.5
10.0	89.5	87.5	89.5	87.5	89.5	87.5	88.5	86.5
15.0	90.2	88.5	91.0	89.5	90.2	88.5	88.5	86.5
20.0	90.2	88.5	91.0	89.5	90.2	88.5	89.5	87.5
25.0	91.0	89.5	92.4	91.0	91.7	90.2	89.5	87.5
30.0	91.0	89.5	92.4	91.0	91.7	90.2	91.0	89.5
40.0	91.7	90.2	93.0	91.7	93.0	91.7	91.0	89.5
50.0	92.4	91.0	93.0	91.7	93.0	91.7	91.7	90.2
60.0	93.0	91.7	93.6	92.4	93.6	92.4	91.7	90.2
75.0	93.0	91.7	94.1	93.0	93.6	92.4	93.0	91.7
100.0	93.6	92.4	94.5	93.6	94.1	93.0	93.0	91.7
125.0	94.5	93.6	94.5	93.6	94.1	93.0	93.6	92.4
150.0	94.5	93.6	95.0	94.1	95.0	94.1	93.6	92.4
200.0	95.0	94.1	95.0	94.1	95.0	94.1	94.1	93.0
250.0	95.4	94.5	95.0	94.1	95.0	94.1	94.5	93.6

Tabla A.2. Valores de eficiencia nominal y mínima para carga completa para motores diseño E de 0 a 250H

HP	2 POLOS		4 POLOS		6 POLOS		8 POLOS	
	Eficiencia Nominal	Eficiencia Mínima						
MOTORES ABIERTOS								
0.75	-	-	-	-	82.5	80	-	-
1.0	-	-	86.5	84	84.0	81.5	78.5	75.5
1.5	86.5	84.0	87.5	85.5	87.5	85.5	81.5	78.5
2.0	87.5	85.5	87.5	85.5	88.5	86.5	88.5	86.5
3.0	87.5	85.5	89.5	87.5	89.5	87.5	89.5	87.5
5.0	88.5	86.5	90.2	88.5	90.2	88.5	90.2	88.5
7.5	90.2	88.5	91.0	89.5	91.0	89.5	91.0	89.5
10.0	91.0	89.5	91.7	90.2	92.4	91.0	91.7	90.2
15.0	91.0	89.5	92.4	91.0	92.4	91.0	91.7	90.2
20.0	92.4	91.0	93.0	91.7	92.4	91.0	92.4	91.0
25.0	93.0	91.7	93.6	92.4	93.6	92.4	92.4	91.0
30.0	93.0	91.7	94.1	93.0	93.6	92.4	93.0	91.7
40.0	93.6	92.4	94.5	93.6	94.5	93.6	93.0	91.7
50.0	93.6	92.4	95.4	94.5	94.5	93.6	93.6	92.4
60.0	93.6	92.4	95.4	94.5	95.0	94.1	94.1	93.0
75.0	94.5	93.6	95.4	94.5	95.4	94.5	95.0	94.1
100.0	95.0	94.1	95.4	94.5	95.4	94.5	95.0	94.1
125.0	95.4	94.5	95.4	94.5	95.4	94.5	95.0	94.1
150.0	95.8	95.0	95.8	95.0	95.8	95.0	95.4	94.5
200.0	95.8	95.0	95.8	95.0	95.8	95.0	95.4	94.5
250.0	95.8	95.0	96.2	95.4	96.2	95.4	95.8	95.0
MOTORES ENCERRADOS								
0.75	-	-	-	-	82.5	80	-	-
1.0	-	-	86.5	84	84.0	81.5	78.5	75.5
1.5	86.5	84.0	87.5	85.5	86.5	84.0	82.5	80.0
2.0	87.5	85.5	87.5	85.5	88.5	86.5	86.5	84.0
3.0	88.5	86.5	88.5	86.5	89.5	87.5	88.5	86.5
5.0	90.2	88.5	89.5	87.5	90.2	88.5	89.5	87.5
7.5	91.0	89.5	90.2	88.5	91.7	90.2	89.5	87.5
10.0	91.0	89.5	91.0	89.5	92.4	91.0	91.0	89.5
15.0	91.7	90.2	92.4	91.0	92.4	91.0	91.0	89.5
20.0	92.4	91.0	93.0	91.7	92.4	91.0	91.7	90.2
25.0	93.0	91.7	93.6	92.4	93.6	92.4	91.7	90.2
30.0	93.6	92.4	94.1	93.0	93.6	92.4	92.4	91.0
40.0	94.1	93.0	94.5	93.6	94.1	93.0	92.4	91.0
50.0	94.5	93.6	95.0	94.1	94.1	93.0	93.0	91.7
60.0	94.5	93.6	95.0	94.1	95.0	94.1	93.0	91.7
75.0	94.5	93.6	95.4	94.5	95.0	94.1	93.6	92.4
100.0	95.0	94.1	95.4	94.5	95.4	94.5	93.6	92.4
125.0	95.4	94.5	95.8	95.0	95.4	94.5	94.5	93.6
150.0	95.8	95.0	95.8	95.0	95.8	95.0	94.5	93.6
200.0	96.2	95.4	96.2	95.4	96.2	95.4	95.0	94.1
250.0	96.2	95.4	96.2	95.4	96.2	95.4	95.4	94.5

ANEXO B

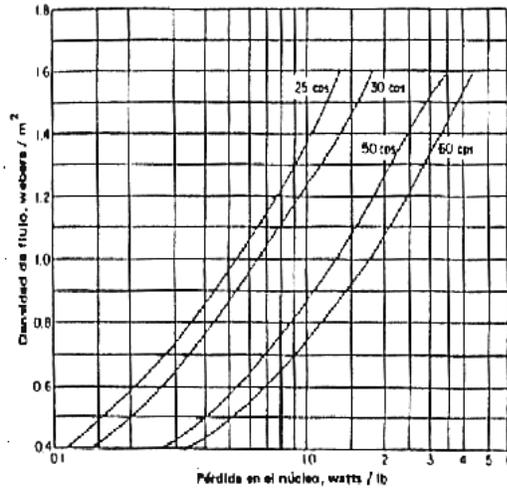
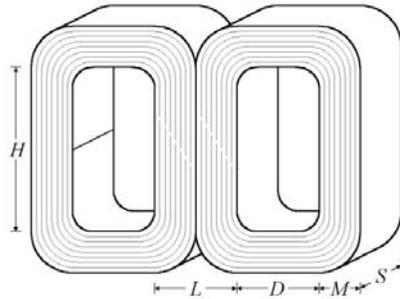


Figura B.1 Curva de perdidas de potencia por unidad de masa

Calculo de los parámetros de los transformadores que se desarmaron para la obtención de materiales.

Transformador de 10 kva:



- L = 7.71 cm
- D = 5.6 cm
- H = 14.3 cm
- M = 3.855 cm
- S = 14.4 cm

Potencia nominal:  $S = 10 \text{ KVA}$

Del lado secundario:

Numero de vueltas  $N = 24 / 48$

$$V_s = 120 / 240 \text{ V}$$

$$I_{snom} = \frac{10 \times 10^3}{240} = 41.667 \text{ A}$$

Área de sección transversal del conductor del secundario (platina de cobre):

$$A_{Cu} = 7.3 \text{ mm} \times 1.63 \text{ mm} = 11.915 \text{ mm}^2 = 0.01847 \text{ pulg}^2$$

Densidad de corriente del conductor secundario:

$$J = \frac{I_{noms}}{A_{Cu}} = \frac{41.67}{0.01847} = 2256.063 \frac{\text{A}}{\text{pulg}^2}$$

Flujo en la sección central del núcleo:

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{V_s}{4.44 f N}, \quad f = 60 \\ &= \frac{240}{4.44 \cdot 60 \cdot 48} \\ &= 0.01877 \text{ weber} = 1.877 \times 10^6 \text{ líneas} \end{aligned}$$

El área de sección transversal del brazo central del núcleo es:

$$\begin{aligned} A_n &= L \times S = 7.71 \text{ cm} \times 14.4 \text{ cm} = 111.024 \text{ cm}^2 \\ &= 8.60438 \text{ pulg}^2 \end{aligned}$$

Por lo tanto, la densidad de flujo es:

$$\begin{aligned} B &= \frac{\Phi}{A_n} = \frac{1.887 \times 10^6}{8.604} \\ &\approx 109065.24 \frac{\text{líneas}}{\text{pulg}^2} \end{aligned}$$

El valor de la constante  $c$  para el transformador de 10 KVA se puede determinar por medio de la ecuación (2.28):

$$\begin{aligned} c &= \sqrt{\frac{NI}{4.44 f \Phi}} = \sqrt{\frac{48 \cdot 41.67}{4.44 \cdot 60 \cdot 0.018774}} \\ &= 20 \end{aligned}$$

Transformador de 15 kva:

L =	7.40 cm
D =	6.4 cm
H =	16.8 cm
M =	3.7 cm
S =	12.3 cm

Potencia nominal:  $S = 15 \text{ KVA}$

Del lado secundario:

Numero de vueltas  $N = 32 / 64$

$V_s = 120 / 240 \text{ V}$

$$I_{snom} = \frac{15 \times 10^3}{240} = 62.5 \text{ A}$$

Área de sección transversal del conductor del secundario (platina de cobre):

$$A_{Cu} = 7.44 \text{ mm} \times 3.7 \text{ mm} = 27.528 \text{ mm}^2 = 0.04267 \text{ pulg}^2$$

Densidad de corriente del conductor secundario:

$$J = \frac{I_{noms}}{A_{Cu}} = \frac{62.50}{0.0426} = 1464.7813 \frac{\text{A}}{\text{pulg}^2}$$

Flujo en la sección central del núcleo:

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{V_s}{4.44 f N}, \quad f = 60 \\ &= \frac{240}{4.44 \cdot 60 \cdot 64} \\ &= 0.01408 \text{ weber} = 1.40766 \times 10^6 \text{ líneas} \end{aligned}$$

El área de sección transversal del brazo central del núcleo es:

$$\begin{aligned} A_n &= L \times S = 7.4 \text{ cm} \times 12.3 \text{ cm} = 45.51 \text{ cm}^2 \\ &= 7.05406 \text{ pulg}^2 \end{aligned}$$

Por lo tanto, la densidad de flujo es:

$$B = \frac{\Phi}{A_n} = \frac{1.40766 \times 10^6}{7.054}$$

$$\approx 99.77636 \times 10^3 \frac{\text{lneas}}{\text{pulg}^2}$$

El valor de la constante  $c$  para el transformador de 15 KVA se puede determinar por medio de la ecuación (2.28):

$$c = \sqrt{\frac{NI}{4.44 f \Phi}} = \sqrt{\frac{64 \cdot 62.5}{4.44 \cdot 60 \cdot 0.01408}}$$

$$c = 32.66$$

Transformador de 100 kva tipo acorazado:

$$L = 7.1 \text{ cm}$$

$$S = 25.3 \text{ cm}$$

Potencia nominal:  $S = 100 \text{ KVA}$

Del lado secundario:

Numero de vueltas  $N = 8 / 16$

$$V_s = 120 / 240 \text{ V}$$

$$I_{snom} = \frac{100 \times 10^3}{240} = 416.667 \text{ A}$$

Área de sección transversal del conductor del secundario (placa de aluminio)

$$A_{Al} = 178 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} = 356 \text{ mm}^2 = 0.552 \text{ pulg}^2$$

Densidad de corriente del conductor secundario:

$$J = \frac{I_{noms}}{A_{Al}} = \frac{416.667}{0.552} = 755.103 \frac{\text{A}}{\text{pulg}^2}$$

Flujo en la sección central del núcleo:

$$\Phi = \frac{V_s}{4.44 f N}, \quad f = 60$$

$$= \frac{240}{4.44 \cdot 60 \cdot 16}$$

$$= 0.056 \text{ weber} = 5.631 \times 10^6 \text{ líneas}$$

El área de sección transversal del brazo central del núcleo es:

$$A_n = L \times S = 7.1 \text{ cm} \times 25.3 \text{ cm} = 179.63 \text{ cm}^2$$

$$= 27.843 \text{ pulg}^2$$

Por lo tanto, la densidad de flujo es:

$$B = \frac{\Phi}{A_n} = \frac{5.631 \times 10^6}{27.843}$$

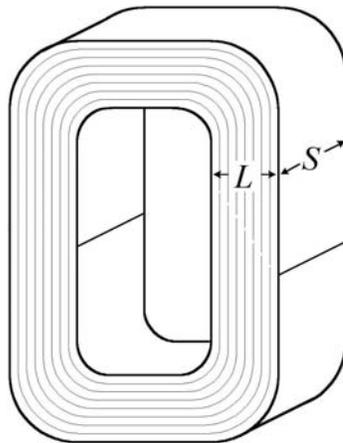
$$\approx 101.115 \times 10^3 \frac{\text{líneas}}{\text{pulg}^2}$$

El valor de la constante  $c$  para el transformador de 15 KVA se puede determinar por medio de la ecuación (2.28):

$$c = \sqrt{\frac{NI}{4.44 f \Phi}} = \sqrt{\frac{16 \cdot 416.667}{4.44 \cdot 60 \cdot 0.0563}}$$

$$c = 21.082$$

Transformador de 100 kva tipo núcleo:



$$L = 10.5 \text{ cm}$$

$$S = 22 \text{ cm}$$

Potencia nominal:  $S = 100 \text{ KVA}$

Del lado secundario:

Numero de vueltas  $N = 10 / 20$

$$V_s = 120 / 240 \text{ V}$$

$$I_{snom} = \frac{100 \times 10^3}{240} = 416.667 \text{ A}$$

Área de sección transversal del conductor del secundario (placa de aluminio)

$$A_{Al} = 247 \text{ mm} \times 1.35 \text{ mm} = 333.45 \text{ mm}^2 = 0.517 \text{ pulg}^2$$

Densidad de corriente del conductor secundario:

$$J = \frac{I_{noms}}{A_{Al}} = \frac{416.667}{0.517} = 806.168 \frac{\text{A}}{\text{pulg}^2}$$

Flujo en la sección central del núcleo:

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{V_s}{4.44 f N}, \quad f = 60 \\ &= \frac{240}{4.44 \cdot 60 \cdot 16} \\ &= 0.045 \text{ weber} = 4.505 \times 10^6 \text{ líneas} \end{aligned}$$

El área de sección transversal del brazo central del núcleo es:

$$\begin{aligned} A_n &= L \times S = 10.5 \text{ cm} \times 22 \text{ cm} = 231 \text{ cm}^2 \\ &= 35.805 \text{ pulg}^2 \end{aligned}$$

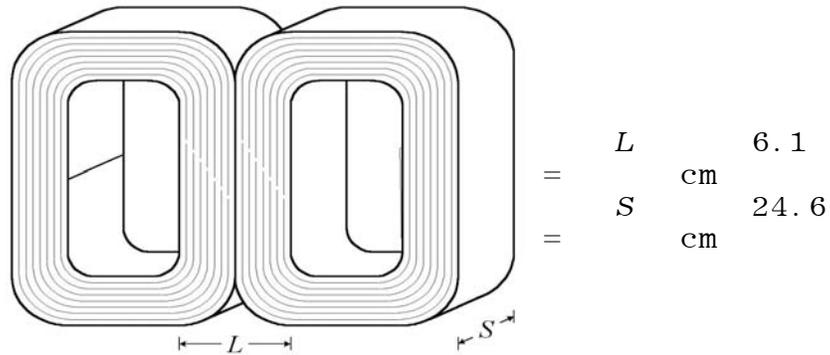
Por lo tanto, la densidad de flujo es:

$$\begin{aligned} B &= \frac{\Phi}{A_n} = \frac{4.505 \times 10^6}{35.805} \\ &\approx 125.806 \times 10^3 \frac{\text{líneas}}{\text{pulg}^2} \end{aligned}$$

El valor de la constante  $c$  para el transformador de 100 KVA tipo núcleo se puede determinar por medio de la ecuación (2.28):

$$\begin{aligned} c &= \sqrt{\frac{NI}{4.44 f \Phi}} = \sqrt{\frac{20 \cdot 416.667}{4.44 \cdot 60 \cdot 0.04505}} \\ c &= 26.352 \end{aligned}$$

Transformador de 167 kva tipo acorazado:



Potencia nominal:  $S = 100$  KVA

Del lado secundario:

Numero de vueltas  $N = 9 / 18$

$V_s = 120 / 240$  V

$$I_{snom} = \frac{167 \times 10^3}{240} = 695.833 \text{ A}$$

Área de sección transversal del conductor del secundario (placa de aluminio)

$$A_{Al} = 253 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm} = 404.8 \text{ mm}^2 = 0.627 \text{ pulg}^2$$

Densidad de corriente del conductor secundario:

$$J = \frac{I_{noms}}{A_{Al}} = \frac{695.83}{0.627} = 1109.002 \frac{\text{A}}{\text{pulg}^2}$$

Flujo en la sección central del núcleo:

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{V_s}{4.44 f N}, \quad f = 60 \\ &= \frac{240}{4.44 \cdot 60 \cdot 18} \\ &= 0.0501 \text{ weber} = 5.005 \times 10^6 \text{ líneas} \end{aligned}$$

El área de sección transversal del brazo central del núcleo es:

$$\begin{aligned} A_n &= L \times S = 6.1 \text{ cm} \times 24.6 \text{ cm} = 300.12 \text{ cm}^2 \\ &= 46.519 \text{ pulg}^2 \end{aligned}$$

Por lo tanto, la densidad de flujo es:

$$B = \frac{\Phi}{A_n} = \frac{5.005 \times 10^6}{46.519}$$
$$\approx 107.591 \times 10^3 \frac{\text{líneas}}{\text{pulg}^2}$$

El valor de la constante  $c$  para el transformador de 167 KVA se puede determinar por medio de la ecuación (2.28):

$$c = \sqrt{\frac{NI}{4.44 f \Phi}} = \sqrt{\frac{18 \cdot 695.83}{4.44 \cdot 60 \cdot 0.05005}}$$
$$c = 30.649$$

ANEXO C

Tabla C.1. Características típicas de motores de inducción trifásicos con rotor de jaula de ardilla.

Hp	Polos	Rpm a plena carga	Amps a plena carga		Amps. Con rotor bloqueado a 220 volt.	torque Lbs-pie			% de eficiencia a plena carga	Factor de potencia a plena carga
			220 volts	440volts.		A plena carga	Max.	En el arranque.		
1	2	3450	2,9	1,45	25	1,5	4,5	2,6	82	0,82
	4	1750	3,2	1,60		3,0	9,0	5,9	80	0,76
	6	1160	3,6	1,80		4,5	12,4	9,0	80	0,68
	8	870	4,0	2,00		6,0	15,0	9,0	78	0,63
2	2	3500	5,4	2,70	45	3,0	8,2	5,2	83	0,87
	4	1750	5,8	2,90		6,0	18,0	15,0	83	0,81
	6	1160	6,6	3,30		9,1	22,7	16,0	82	0,72
	8	870	7,6	3,80		12,1	27,4	18,0	79	0,65
3	2	3500	7,8	3,90	60	4,5	11,2	7,8	85	0,89
	4	1750	8,4	4,20		9,0	25,0	23,0	85	0,82
	6	1160	9,6	4,80		13,6	34,0	24,0	84	0,73
	8	870	10,8	5,40		18,1	40,7	27,9	84	0,65
5	2	3500	13,0	6,50	90	7,5	16,8	11,0	85	0,89
	4	1750	13,6	6,80		15,0	33,7	28,0	85	0,85
	6	1160	15,0	7,50		22,7	51,0	36,0	85	0,77
	8	870	16,4	8,20		30,2	68,0	39,0	84	0,71
7 1/2	2	3500	19,2	9,60	120	11,3	24,0	17,0	85	0,90
	4	1750	20,0	10,00		22,5	48,0	39,0	85	0,87
	6	1160	21,6	10,80		34,0	73,0	51,0	85	0,80
	8	870	23,0	11,50		45,3	97,0	56,0	84	0,76
10	2	3500	25,6	12,80	150	15,0	30,0	22,0	85	0,90
	4	1750	26,4	13,20		30,0	60,0	52,0	85	0,87
	6	1160	28,0	14,00		45,3	90,0	68,0	85	0,82
	8	870	30,0	15,00		60,4	120,0	75,0	85	0,77
15	2	3500	38,0	19,00	225	22,5	45,0	34,0	86	0,90
	4	1750	39,0	19,50		45,0	90,0	74,0	86	0,88
	6	1160	40,0	20,00		68,0	136,0	95,0	86	0,85
	8	870	43,0	21,50		90,0	181,0	113,0	86	0,79
20	2	3500	50,0	25,00	295	30,0	60,0	45,0	87	0,90
	4	1750	51,0	25,50		60,0	120,0	90,0	87	0,88
	6	1160	53,0	26,50		90,6	181,0	122,0	87	0,85
	8	870	56,0	28,00		121,0	242,0	151,0	87	0,80
25	2	3500	62,0	31,00	365	37,5	75,0	50,0	88	0,90
	4	1750	62,0	31,00		75,0	150,0	112,0	88	0,89
	6	1160	64,0	32,00		113,0	226,0	152,0	88	0,87
	8	870	69,0	34,50		151,0	302,0	188,0	88	0,81
30	2	3500	74,0	37,00	435	45	90	67	89	0,90
	4	1750	74,0	37,00		90	180	135	89	0,89
	6	1160	76,0	38,00		136	272	183	89	0,87
	8	870	82,0	41,00		181	362	226	88	0,82
40	2	3500	90,0	49,00	575	60	120	81	89	0,90
	4	1750	90,0	49,00		120	240	180	89	0,90
	6	1160	100,0	50,00		181	362	244	89	0,88
	8	870	106,0	53,00		242	484	302	88	0,84

Tabla C1. (continuación)

Hp	Polos	Rpm a plena carga	Amps a plena carga		Amps. Con rotor bloqueado a 220 volt.	torque Lbs-pie			% de eficiencia a plena carga	Factor de potencia a plena carga
			220 volts	440volts.		A plena carga	Max.	En el arranque.		
50	2	3500	122,0	61,00	725	75	150	93	89	0,90
	4	1750	122,0	61,00		150	300	225	89	0,90
	6	1160	126,0	63,00		227	454	306	89	0,88
	8	870	136,0	68,00		302	762	377	88	0,84
75	2	3500	182,0	91,00	1075	113	226	124	90	0,90
	4	1750	182,0	91,00		225	450	337	90	0,90
	6	1160	188,0	94,00		240	680	458	90	0,88
	8	870	192,0	96,00		453	906	565	89	0,86
100	2	3500	242,0	121,00	1450	150	300	165	90	0,90
	4	1750	242,0	121,00		300	600	375	90	0,90
	6	1160	248,0	124,00		453	906	565	90	0,89
	8	870	256,0	128,00		604	1208	755	89	0,89
125	4	1750	300,0	150,00	1800	375	750	410	90	0,91
	6	1160	306,0	153,00		566	1132	705	90	0,91
	8	870	316,0	158,00		755	1510	940	89	0,90
	10	690	324,0	162,00		951	1902	1140	89	0,89
150	4	1750	354,0	177,00	2175	450	900	405	91	0,91
	6	1160	360,0	180,00		680	1360	850	91	0,91
	8	870	366,0	183,00		906	1812	1130	90	0,90
	10	690	380,0	190,00		1141	2282	1370	89	0,89
200	4	1750	474,0	237,00	2900	600	1200	600	91	0,91
	6	1160	480,0	240,00		906	1812	1130	91	0,91
	8	870	488,0	244,00		1208	2416	1510	90	0,90
	10	690	506,0	253,00		1522	3044	1825	89	0,89
250	4	1750	590,0	295,00	3600	750	1500	750	91	0,91
	6	1160	596,0	298,00		1133	2266	1415	91	0,91
	8	870	604,0	302,00		1510	3020	1855	90	0,90
	10	690	618,0	309,00		1903	3806	2280	90	0,90

ANEXO D

Tabla D.1. Ampacities of Single Insulated Conductors Rated Through 2000 Volt In the Air Based on Ambient Air Temperature of 30°C(86°F) (Table 310-17, NEC 1987)

Size	Temperature Rating of the conductor . See table 310-13								Size
	160°C (140°F)	75°C (167°F)	85°C (185°F)	90°C (194°F)	60°C (140°F)	75°C (167°F)	85°C (185°F)	90°C (194°F)	
	TYPE TW <sup>1</sup>	TYPE FEPW, RH, RHW, THWN, XHHW,ZW	TYPES V	TYPE TA, TBS, SA, AVB, SIS, FEP, FEPS,RHH, THHN, XHHW, MI	TYPE TW	TYPE RH,RHW, THW, THWN, XHHN	TYPE V	TYPE TA, TBS, SA, AVB, SIS, RHH, THHN, XHHW, MI	
COPPER				ALUMINIUM OR COPPER-CLAD ALUMINIUM					
18				18					
16				24					
14	25	30	30	35					
12	30	35	40	40	25	30	30	35	12
10	40	50	55	55	35	40	40	40	10
8	60	70	75	80	45	55	60	60	8
6	80	95	100	105	60	75	80	80	6
4	105	125	135	140	80	100	105	110	4
3	120	145	160	165	95	115	125	130	3
2	140	170	185	190	110	135	145	150	2
1	165	195	215	220	130	155	165	175	1
1/0	195	230	250	260	150	180	195	205	1/0
2/0	225	265	290	300	175	210	225	235	2/0
3/0	260	310	335	350	200	240	265	275	3/0
4/0	300	360	390	405	235	280	305	315	4/0
250	340	405	440	455	265	315	345	335	250
300	375	445	485	505	290	350	380	395	300
350	420	505	550	570	330	395	430	445	350
400	455	545	595	615	355	425	465	480	400
500	515	620	675	700	405	485	525	545	500
600	575	690	750	780	455	540	595	615	600
700	630	755	825	855	500	595	650	675	700
750	655	785	855	885	515	620	675	700	750
800	680	815	885	920	535	645	700	725	800
900	730	870	950	985	580	700	760	785	900
1000	780	935	1020	1055	625	750	815	845	1000
1250	890	1065	1160	1200	710	855	930	960	1250
1500	980	1175	1275	1325	795	950	1035	1075	1500
1750	1070	1280	1395	1445	875	1050	1145	1185	1750
2000	1155	1385	1505	1560	960	1150	1250	1335	2000

AMPACITY CORRECTION FACTORS

Ambient temp °C	For ambient temperatures other than 30C(86 F), multiply the ampacities shown above by the appropriate factor shown below.								Ambient temp °F
21-25	1.08	1.05	1.04	1.04	1.08	1.05	1.04	1.04	70-77
26-30	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	79-86
31-35	.91	.94	.95	.96	.91	.94	.95	.96	88-95
36-40	.82	.88	.90	.91	.82	.88	.90	.91	97-104
41-45	.71	.82	.85	.87	.71	.82	.85	.87	106-113
46-50	.58	.75	.80	.82	.58	.75	.80	.82	115-122
51-55	.41	.67	.74	.76	.41	.67	.74	.76	124-131
56-60		.58	.67	.71		.58	.67	.71	133-140
61-70		.33	.52	.58		.33	.52	.58	142-158
70-80			.30	.41			.3	.41	160-176

ANEXO E

Tabla E.1 Listado de materiales utilizados para la construcción del banco trifásico para pruebas en motores de inducción a rotor bloqueado

MATERIAL	DESCRIPCIÓN	PROVEEDOR
Conductor de los bobinados	Placa de aluminio de área de sección transversal rectangular, se usaron aproximadamente 30 m de conductor por transformador	Se extrajo de transformadores de distribución fuera de uso, que fueron donados por la Universidad y por personas particulares, 8 en total
Núcleos ferromagnéticos	Núcleos laminados de transformadores de 75 kVA tipo acorazado	Se extrajeron de 3 transformadores de distribución idénticos fuera de uso, donados por la Universidad
Papel aislante NOMEX	Capaz de soportar altas temperaturas, aprox 210° C. Se usaron aproximadamente 33 m por transformador	FACAR SA de CV
Papel aislante COPACO	Capaz de soportar esfuerzo mecánico. Se usó como protección para los terminales del embobinado preformado	FACAR SA de CV
Barniz Aislante	Se utilizó para darle fijeza y aislamiento tanto a los núcleos ferromagnéticos como a los embobinados	FACAR SA de CV
Cinta de empalme	Se utilizó para adherir el papel COPACO al NOMEX y a la placa de aluminio	FACAR SA de CV
Remaches de golpe de aluminio de 3/16"x1/4 "	Se utilizaron para hacer la unión mecánica de las derivaciones	VIDRÍ SA de CV
Remaches de golpe de aluminio de 3/4"x1/4 "	Se utilizaron para hacer la unión mecánica de las derivaciones	Se mandaron a fabricar a taller de torno
Papel lija # 400	Se utilizó para remover el material aislante adherido al conductor	VIDRÍ SA de CV
Solvente mineral	Se utilizó para remover residuos de polvo y suciedades de los núcleos ferromagnéticos	VIDRÍ SA de CV
Angulares de 2 1/4"x1/4" de 1 1/2"x /2"	Se utilizaron para construir la estructura que soportaría a los Tres autotransformadores, con un peso aproximado de 500 lbs por cada unidad	VIDRÍ SA de CV
Electrodo para hierro dulce		
Rodos	Se utilizaron para darle movilidad al equipo	3 unidades se adquirieron en hueseras y los 4 restantes se obtuvieron de equipo fuera de uso, donado por la facultad de medicina, cada uno es capaz de soportar un peso aproximado de 300 lbs

Lamina de 3/64 "	Se utilizó para cubrir la parte frontal, superior y posterior de la estructura	DIDELCO SA de CV
Lamina Perforada	Se utilizó para cubrir las partes laterales de la estructura	DIDELCO SA de CV
Remaches de 3/16"1/2"	Se utilizó para fijar la lamina de Lamina de 3/64 "	VIDRÍ SA de CV
Tela y resina de fibra de vidrio	Se utilizó para aislar los terminales evitando que haya contacto entre Ellos	
Cable forrado 1/0 y 2/0	Se utilizó para unir los terminales del autotransformador y los terminales de potencia	Donación de la unidad de desarrollo físico de la Universidad
Terminales de ojo	Se utilizaron para fijar el cable forrado a los terminales de los autotransformadores con los terminales de potencia	CASA AMA