

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**ESCUELA DE INGENIERÍA**

**ANÁLISIS TÉCNICO DE LA EFICIENCIA EN MOTORES ASINCRÓNICOS**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**CUEVA HERRERA CRISTIAN RAMIRO**

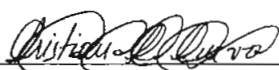
**DIRECTOR: ING. LUIS TAPIA**

**QUITO, SEPTIEMBRE - 2003**

## DECLARACIÓN

Yo, CRISTIAN RAMIRO CUEVA HERRERA, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley, Reglamento de Propiedad Intelectual y por la normatividad institucional vigente.



---

**Cristian R. Cueva H.**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Cristian Ramiro Cueva Herrera, bajo mi supervisión.



---

**Ing. Luis Tapia**  
**DIRECTOR DE PROYECTO**

## **AGRADECIMIENTO**

*La palabra sola no basta para agradecer lo que las acciones han permitido.*

*Desde el inicio de los decretos de mi progenitora hasta la calida sonrisa de mi primogénita han permitido conseguir este objetivo.*

*La convivencia diaria con mis maestros y compañeros de aula merecen la eterna remembranza por permitir la formación del ser humano aquí presente.*

*A mí estimada familia, por la ayuda brindada en los momentos de quebranto.*

*...Siempre agradecido*

## DEDICATORIA

*TU... MI LUZ Y MI ÁNGEL*

*MIS FUERZAS Y MI ESPÍRITU*

*MI LIBERTAD Y MI SENDERO*

*GRACIAS POR PERMANECER A MI LADO*

*Este esfuerzo está ofrendado al apoyo único de una madre. Te dedico este trabajo con todo mi corazón.*

*ELIZABETH HERRERA OJEDA*

# CONTENIDO

<b>RESUMEN</b>	1	
<b>PRESENTACIÓN</b>	2	
<b>CAPITULO 1: FUNDAMENTOS DE LAS MÁQUINAS ASINCRÓNICAS.</b>		
1	Introducción	4
1.2	El Motor Asíncrono	5
1.2.1	Tipos de Motores	5
1.2.2	Partes Constitutivas	6
1.2.3	Esquema de los Devanados	7
1.2.4	El Estator	7
1.2.5	El Rotor	8
1.2.6	El Colector y las Escobillas	9
1.2.7	El Núcleo	9
1.3	Operación del Motor Asíncrono	10
1.3.1	Conexión de los Bobinados del Estator	10
1.3.2	Conexión de los Bobinados del Rotor Devanado	11
1.4	Variables Electromagnéticas	12
1.4.1	Modelación de la Fuerza Magnetomotriz	12
1.4.1.1	Naturaleza de la Onda de Fuerza Magnetomotriz	19
1.4.1.2	Análisis Gráfico	22
1.4.2	Campo Magnético	23
1.4.3	Voltaje Generado	25
1.4.4	El Torque	28
1.4.5	Rotación del Motor Asíncrono	31
1.4.5.1	Velocidad de Giro	31
1.4.5.2	Deslizamiento	32
1.4.5.3	Característica Torque-Velocidad	33
1.4.5.4	Operación del Motor como Generador y Freno	34
1.5	Circuito Equivalente	35
1.5.1	Circuito Equivalente Por Fase	36
1.5.2	Circuito aproximado	40
1.6	Distribución de Potencia	41
1.7	Tipificación de Pérdidas	43
1.7.1	Pérdidas Mecánicas	43
1.7.2	Pérdidas en los Conductores	43
1.7.3	Pérdidas en el Hierro o Núcleo	44
1.7.3.1	Pérdidas en los Devanados de Estator Debido a la Corriente de Excitación.	45
1.7.3.2	Pérdidas en los Devanados de Estator Debido a Corrientes de Foucault	45
1.7.3.3	Pérdidas en el Núcleo o Hierro Por Corrientes de Foucault	46
1.7.3.4	Pérdidas por Histéresis	47
1.7.3.5	Pérdidas por Altas Frecuencias	49

1.7.3.5.1	Pérdidas de Pulsos	49
1.7.3.5.2	Pérdidas Superficiales	50

## **CAPITULO 2: DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS PROPUESTOS POR LAS NORMAS IEC 34-2 Y ANSI IEEE 112**

2.1	Introducción	52
2.2	Norma IEC 34-2	53
2.2.1	Generalidades	53
2.2.2	Terminología	54
2.2.3	Temperatura de Referencia	55
2.2.4	Métodos de Ensayo	56
2.2.5	Pérdidas en la Máquina Asíncrona	57
2.2.5.1	Pérdidas Constante	57
2.2.5.2	Pérdidas en Carga	57
2.2.5.3	Pérdidas Adicionales en Carga	57
2.2.6	Determinación de la Eficiencia	58
2.2.6.1	Pérdidas Constantes	58
2.2.6.1.1	Ensayo en Vacío a la Tensión Nominal	58
2.2.6.1.2	Ensayo en Vacío a la Tensión Variable	59
2.2.6.2	Pérdidas en Carga	59
2.2.6.2.1	Métodos de los Valores Calculados	60
2.2.6.3	Pérdidas Adicionales en Carga	60
2.2.7	Medición Directa de la Eficiencia	60
2.3	Norma ANSI IEEE 112	61
2.3.1	Mediciones Eléctricas	61
2.3.2	Corrección a una Temperatura Especifica	62
2.3.3	Eficiencia	62
2.3.3.1	Método de Pérdidas Separadas	63
2.3.3.1.1	Método E	63
2.3.3.1.2	Método F: Calculo del Circuito Equivalente	63
2.3.4	Pérdidas	64
2.3.4.1	Pérdidas del Estator $I^2R$	64
2.3.4.2	Pérdidas del Rotor $I^2R$	64
2.3.4.3	Pérdidas del Núcleo, Fricción y Ventilación	65
2.3.4.4	Pérdidas Extrañas con Carga	66
2.3.4.4.1	Medición Directa	66
2.4	Revisión General de los Métodos Propuestos	67
2.4.1	Comparación Entre Ensayo	68

## **CAPITULO 3: ENSAYOS PROPUESTOS EN NORMA**

3.1	Generalidades	70
3.1.1	Instrumentación Digital : del Power Logic	70
3.1.1.1	Descripción de la Tornillería	71
3.1.1.2	Parte Posterior del Power Logic	72
3.1.1.3	Conexión del Power Logic	73

3.1.1.4	Parámetros de Medición	74
3.1.2	Medición de la Resistencia	75
3.1.2.1	Método del Voltímetro Amperímetro	75
3.1.2.2	Método del Puente de Wheatstone.	76
3.1.2.3	Resultado de Medición	77
3.1.2.3.1	Método del Voltímetro Amperímetro con Error por Corriente	77
3.1.2.3.2	Método del Puente de Wheatstone	79
3.1.2.4	Análisis de Resultados	79
3.2	Ensayos en el Motor Asíncrono	80
3.2.1	Ensayo en Vacío Acoplado	80
3.2.2	Ensayo en Vacío a la Tensión Nominal	84
3.2.3	Ensayo de Rotor Bloqueado	87
3.2.4	Ensayo en Vacío a Tensión Variable	89
3.2.5	Ensayo de Rotación Inversa	92
3.2.6	Ensayo de Variación de Corriente	96

#### **CAPITULO 4: CÁLCULOS Y VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS**

4.1	Introducción	99
4.1.1	Resumen de las Mediciones Efectuadas	100
4.2	Análisis y Evaluación de Errores	102
4.2.1	Clasificación de Errores.	102
4.2.2	Errores Límites y Clasificación de Instrumentos	103
4.2.3	Cálculo de Errores	104
4.2.3.1	Análisis de los Errores Determinados	106
4.3	Comparación entre los Valores de las Mediciones Obtenidas	107
4.3.1	Análisis de la Desviación Ocurrida Entre Mediciones	109
4.4	Cálculos	110
4.4.1	Pérdidas Constantes	111
4.4.1.1	Ensayo en Vacío a Tensión Nominal	112
4.4.2	Pérdidas en el Núcleo.	112
4.4.2.1	Ensayo en Vacío Acoplado.	113
4.4.2.2	Ensayo en Vacío a la Tensión Variable.	113
4.4.3	Pérdidas Extrañas con Carga en Alta y Baja Frecuencia.	118
4.4.3.1	Cálculos para Determinar las Pérdidas Extrañas con Carga	120
4.4.4	Parámetros de la Máquina	121
4.4.4.1	Circuito Equivalente	122
4.4.4.1.1	Cantidades en por Unidad	128
4.4.4.1.2	Resumen de los Parámetros Determinados	128
4.4.4.2	Circuito Equivalente Aproximado.	129
4.4.5	Resumen de los Cálculos Realizados	133
4.5	Eficiencia	134
4.5.1	Cálculo de la Eficiencia para el Circuito Equivalente	135
4.5.1.1	Resumen del Cálculo de la Eficiencia con el Circuito Equivalente	138



4.5.1	Cálculo de la Eficiencia para el Circuito Equivalente Aproximado.	140
4.5.3	Resumen de los Cálculos	142
4.5.4	Análisis de los Valores Calculados de Eficiencia	142
4.6	Validación	144
4.6.1	Validación de los Parámetros de la Máquina	144
4.6.2	Validación del Valor de la Eficiencia Calculada	146

## **CAPITULO 5: CRITERIOS PARA NORMALIZACIÓN**

5.1	Introducción	153
5.2	Objetivo	153
5.3	Campo de Aplicación	153
5.4	Generalidades	154
5.5	Definiciones	154
5.5.1	Eficiencia	154
5.5.2	Pérdidas Totales	154
5.5.3	Pérdidas en las Máquinas Asíncronas	154
5.5.3.1	Pérdidas en los Conductores	154
5.5.3.2	Pérdidas en el Núcleo	155
5.5.3.3	Pérdidas de Fricción y Ventilación	155
5.5.3.4	Pérdidas Extrañas con Carga	155
5.6	Medición de la Resistencia	155
5.6.1	Corrección de la Resistencia a la temperatura de referencia	155
5.7	Temperatura de Referencia	156
5.8	Procedimiento de Ensayos	157
5.8.1	Ensayos para la determinación de las Pérdidas	157
5.8.2	Descripción del Procedimiento de los Ensayos Propuestos	157
5.8.2.1	Ensayo en Vacío a la Tensión Nominal.	157
5.8.2.2	Ensayo en Vacío a la Tensión Variable.	158
5.8.2.3	Ensayo en Vacío Acoplado	158
5.8.2.4	Ensayo de Variación de Corriente	158
5.8.2.5	Ensayo de Rotación Inversa	159
5.8.2.6	Ensayo de Rotor Bloqueado	159
5.9	Determinación de la Eficiencia	160
5.9.1	Totalización de Pérdidas	160
5.9.1.1	Pérdidas Constantes	160
5.9.1.2	Pérdidas en Carga	161
5.9.1.3	Pérdidas adicionales en Carga	161
5.9.1.4	Método del Circuito Equivalente	161
5.9.2	Métodos Directos	163
5.9.2.1	Ensayo al freno	163
5.9.2.2	Ensayo con Máquina Auxiliar Calibrada	164
5.9.2.3	Ensayo en Oposición	164
5.9.2.4	Ensayo en Oposición con Marcha en Paralelo sobre la Red	164

## **CAPITULO 6: RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES.**

6.1	Conclusiones	165
6.2	Recomendaciones	169

<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>171</b>
-----------------------------------	------------

### **ANEXOS**

Anexo 1:	EXPERIMENTO DE FARADAY	174
Anexo 2:	ECUACIONES TRIGONOMÉTRICAS DE SERIE DE FOURIER	177
Anexo 3:	CLASES DE MOTORES ASINCRÓNICOS	178
Anexo 4:	MEDICIONES CON POWER LOGIC	180
Anexo 5:	PROTOCOLO DE PRUEBA	186
Anexo 6:	NORMA IEC 34-2	187
Anexo 7:	NORMA ANSI IEEE 112	193

## RESUMEN

De acuerdo a las normas internacionales, la eficiencia del motor, se puede determinar a través de métodos directos e indirectos. Los métodos directos se caracterizan por la medición de las variables de entrada y de salida, lo que permite definir la eficiencia como la relación de la potencia de salida a la potencia de entrada. Los métodos indirectos, definen las pérdidas y los parámetros que existen en el motor por medio de los ensayos necesarios, se calcula el circuito equivalente y se determina la eficiencia para las condiciones nominales del motor. La norma europea, indica como preferente al método indirecto o "Totalización de Pérdidas". Los ensayos que se realizan son: (1) Ensayo en Vacío Acoplado (2) Ensayo en Vacío a la Tensión Nominal (3) Ensayo en Vacío a la tensión Variable (4) Ensayo a Rotor Bloqueado (5) Ensayo de Variación de Corriente (6) Ensayo de Rotación Inversa. La medición de los ensayos se realiza con instrumentación analógica y con instrumentación digital. La instrumentación digital genera menor porcentaje de error que los instrumentos analógicos y la desviación producida en las mediciones entre ambas tecnologías están en el orden del 5%.

Para los cálculos necesarios se requiere de la determinación de la resistencia de corriente directa, la misma que se puede determinar a través de varios métodos de medición, en este proyecto se aplican los métodos del voltímetro amperímetro con error por corriente y el método del puente de Wheatstone, al aplicar los métodos mencionados, se obtuvo un valor de  $1.67 \Omega$ .

Las pérdidas constantes o rotacionales, representan alrededor del 40% de las pérdidas totales. Las pérdidas en el núcleo constituyen cerca del 55% de las pérdidas rotacionales. Las pérdidas de fricción y las pérdidas de ventilación denominadas en conjunto como pérdidas mecánicas, implican alrededor del 45% de las pérdidas constantes o rotacionales. Las pérdidas extrañas con carga constituyen un aproximado del 9% de las pérdidas totales. La eficiencia determinada con el método indirecto es en promedio del 71%.

## PRESENTACIÓN

El presente trabajo esta constituido por 6 capítulos. En el primer capítulo, se revisan los fundamentos de la máquina asincrónica, se inicia con una descripción del motor, los componentes y la forma de operación, se continúa con la explicación de las variables electromagnéticas, iniciando con la modelación de la fuerza magnetomotriz y exponiendo la naturaleza de la misma. Se examinan los conceptos del Campo Magnético que se genera en el motor asincrónico, así como el Voltaje Generado, precisando el voltaje de transformador y el voltaje por velocidad. Se estudia el Torque que crea la interacción de los campos magnéticos de estator y rotor, estableciendo las ecuaciones correspondientes a la relación torque velocidad. Se muestran las ecuaciones debidas al deslizamiento. En este capítulo además se realiza la deducción del circuito equivalente por fase, empleando, la relación de transformación y las equivalencias requeridas. Para finalizar el capítulo, se detallan las pérdidas que acontecen en el motor sincrónico, sentando las ecuaciones para cada tipo de pérdidas.

En el capítulo 2, se realiza la descripción de los ensayos propuestos en las normas IEC 34-2 y ANSI IEEE 112. Se inicia con la revisión de la norma IEC 34-2 indicando las generalidades y la terminología. Luego se procede a revisar los ensayos planteados para la determinación de la eficiencia, definiendo el ensayo recomendado por esta norma y detallando el proceso a seguir. De manera análoga se procede con la norma ANSI IEEE 112, puntualizando los procesos planteados. Se finaliza con una revisión general de los métodos propuestos y realizando la comparación entre los ensayos que las formulan normas.

En las generalidades del capítulo 3, se realiza una descripción del Power Logic y se detallan los métodos que se emplean en la medición de la resistencia y se realizan los ensayos de los métodos citados, determinando el valor de la resistencia de estator, cuyo valor se emplea en los cálculos requeridos que se indican en el siguiente capítulo. Los ensayos descritos en la sección anterior se

realizan en este capítulo, se plantea el objetivo a cumplir, se indica el equipo a utilizar, se señala la información y el procedimiento a efectuarse en el ensayo planteado y se recopilan los datos obtenidos en el ensayo. Se plantea la realización de 6 ensayos: (1) Ensayo en Vacío Acoplado. (2) Ensayo en Vacío a la Tensión Nominal. (3) Ensayo en Vacío a la tensión Variable. (4) Ensayo a Rotor Bloqueado. (5) Ensayo de Variación de Corriente. (6) Ensayo de Rotación Inversa. Estos ensayos son medidos con la instrumentación analógica y con la instrumentación digital.

En el capítulo 4, tomando en cuenta los resultados que se obtuvieron en el capítulo 3 se efectúa lo siguiente: (1) análisis y evaluación de los errores que las mediciones obtenidas con instrumentación analógica y digital generaron en el proceso, (2) comparación entre los valores obtenidos con ambas tecnologías de medición, (3) cálculos correspondientes y (4) validación de resultados.

En los cálculos se determinan: las pérdidas constantes, las pérdidas en el núcleo, las pérdidas mecánicas, las pérdidas extrañas con carga, los parámetros de la máquina para el circuito equivalente exacto y aproximado y la eficiencia. Todos estos valores se determinan para las dos alternativas de medición.

La validación realizada, se efectuó comparando los resultados obtenidos con varias fuentes de referencia.

El capítulo 5 recopila los criterios para Normalización, respecto al tema de la eficiencia de los motores asíncronos. Se dan consideraciones básicas y específicas acerca del tema en cuestión.

Se finaliza este trabajo, indicando las conclusiones que se obtuvieron de esta investigación e indicando las sugerencias necesarias.

# CAPÍTULO 1

## FUNDAMENTOS DE LAS MÁQUINAS ASINCRÓNICAS

### 1.1 INTRODUCCIÓN

En 1831, se registró por primera vez el intercambio entre la energía eléctrica y la energía mecánica, dando origen a aplicaciones que son cruciales en la sociedad. El avance tecnológico ha permitido el desarrollo de diversos esquemas de máquinas motrices y básicamente existen dos tipos de máquinas de corriente alterna: la máquina síncrona y la máquina de inducción o asíncrona.

Las máquinas asíncronas pueden funcionar como generador o como motor. Por lo general trabajan en régimen de motor.

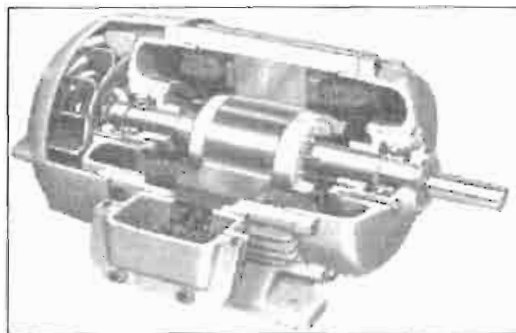
Las máquinas asíncronas se fabrican de diversas potencias, desde una fracción hasta varios miles de caballos. Tienen características de velocidad sensiblemente constante y características de Torque que varía ampliamente según los diseños. Existen máquinas que poseen un elevado par de arranque, otras en cambio lo poseen reducido, hay tipos diseñados para que absorban una corriente de arranque bien moderada y otras que están previstos para absorber una corriente de arranque elevada. Se las construyen para prácticamente todas las tensiones y frecuencias de servicio normalizadas y muy a menudo están equipadas para trabajar a dos tensiones nominales distintas.

La máquina asíncrona es, sin lugar a dudas, la máquina más utilizada en los accionamientos industriales. Esta máquina fue inventada por Tesla a finales del siglo pasado, y demostró las ventajas de los sistemas de corriente alterna con respecto a los sistemas de corriente continua. Desde ese momento y hasta el presente, se ha hecho insustituible el uso masivo de esta máquina en la industria debido a: Facilidad de operación, regulación del sentido del giro, reducido tamaño, no contaminan, bajo costo, amplia gama de potencia y facilidad de disponibilidad de la energía eléctrica.

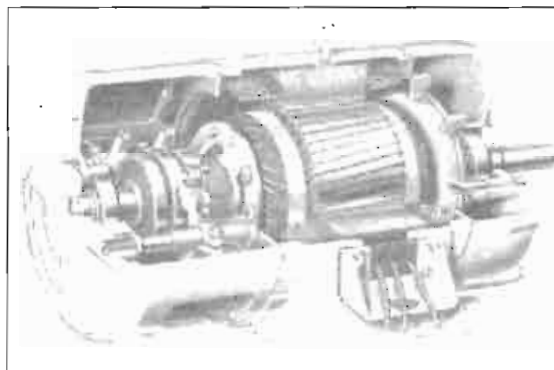
## 1.2 EL MOTOR ASINCRÓNICO

### 1.2.1 TIPOS DE MOTORES

Los motores asincrónicos se clasifican de acuerdo al tipo de rotor: (1) rotor Jaula de Ardilla<sup>1</sup> (2) rotor Devanado.



*Figura 1.1: Rotor Jaula de Ardilla*



*Figura 1.2: Rotor Devanado*

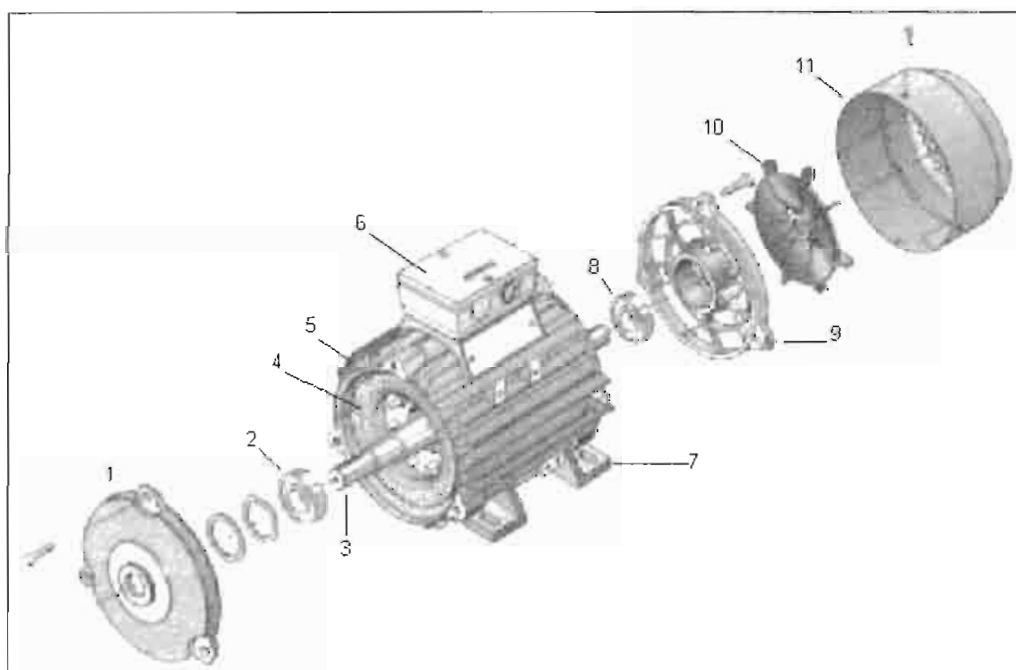
---

<sup>1</sup> En la variedad jaula de ardilla se tiene: jaula simple y doble jaula de ardilla

## 1.2.2 PARTES CONSTITUTIVAS<sup>2</sup>

El motor asincrónico trifásico se compone de las siguientes partes:

1. Tapa o escudo frontal
2. Cojinete de bolas, el cual se coloca con empaques.
3. Eje o árbol al cual se sujeta el rotor.
4. Bobinas o devanados de armadura
5. Carcasa
6. Caja de Bornes
7. Base o soporte.
8. Cojinete posterior
9. Escudo posterior que sirve para alojar al ventilador.
10. Ventilador, que permite el enfriamiento del motor.
11. Tapa posterior.



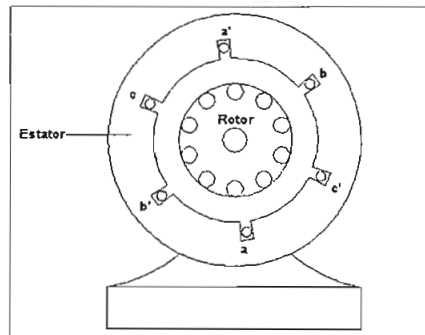
*Figura 1.3: Componentes del Motor Asincrónico.*

<sup>2</sup> Referencia Bibliográfica 9



### 1.2.3 ESQUEMA DE LOS DEVANADOS<sup>3</sup>.

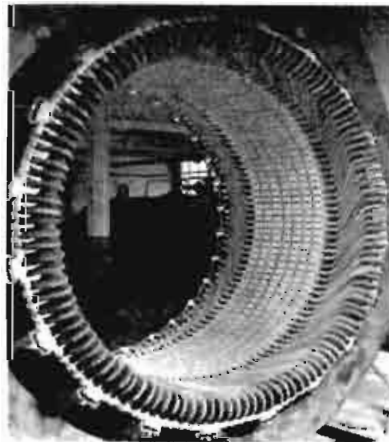
En la figura 1.4, se esquematiza un corte transversal del motor asincrónico, se puede apreciar la representación de los dos bobinados: el estatórico y el rotórico.



*Figura 1.4: Corte Transversal del Motor Asincrónico.*

### 1.2.4 EL ESTATOR

El estator o armadura consiste en una carcasa de fundición, con un núcleo formado por chapas magnéticas y un arrollamiento constituido por bobinas individuales alojadas en las ranuras del núcleo.



*Figura 1.5: El Estator*

<sup>3</sup> Referencia Bibliográfica 4

### 1.2.5 EL ROTOR<sup>4</sup>

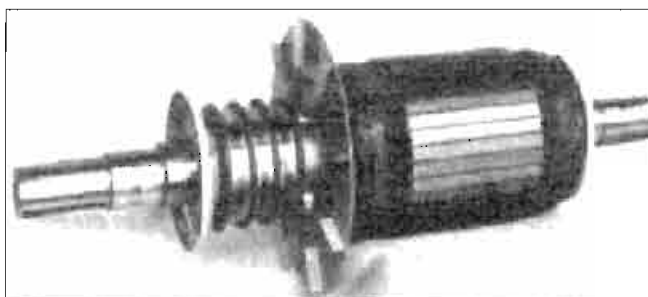
Se construyen dos clases de rotor para el motor asíncrono:

- a) *El rotor de jaula de ardilla*, el cual consiste en una serie de barras conductoras colocadas en ranuras talladas en la cara del rotor y con sus extremos puestos en corto circuito. Este diseño hace referencia a un rotor de jaula de ardilla, porque los conductores parecen las ruedas de ejercicio en donde suelen jugar las ardillas o los ratones de laboratorio. El usuario no tiene acceso a los bobinados.



*Figura 1.6: Rotor Jaula de Ardilla*

- b) *El rotor devanado*: esta variante presenta *anillos deslizantes o colector* que permiten el acceso a los devanados del rotor. En la figura 1.7 se aprecia al rotor con tres anillos deslizantes que se ubican en el eje.



*Figura 1.7: Rotor Devanado con Anillos Deslizantes.*

---

<sup>4</sup> Referencia Bibliográfica 9

### 1.2.6 EL COLECTOR Y LAS ESCOBILLAS<sup>5</sup>

El colector y las escobillas constituyen el nexo que comunica a los bobinados del rotor con el exterior, con el objeto de que el usuario manipule los terminales de acuerdo a su conveniencia.

El colector puede ser de dos tipos (a) axial y (b) radial. El axial tiene delgas en forma de barra paralelas al eje y el Radial tiene delgas en forma de cuñas perpendiculares al eje.

Las escobillas se construyen de tamaños, formas y materiales diversos, según el tipo de motor al cual están destinadas. Estas permiten el paso de la corriente de las bobinas del rotor y frotan sobre las delgas del colector, están sujetas a desgaste permanente eléctrico y mecánico.

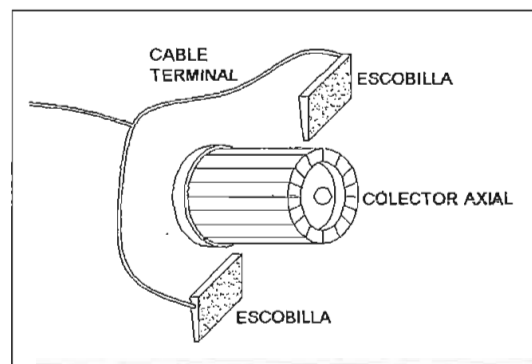


Figura 1.8: El Colector y las Escobillas

### 1.2.7 EL NÚCLEO

El núcleo del estator y del rotor se conforma de un conjunto de láminas o mejor conocidas como *chapas magnéticas* que se ajustan a presión.

Este diseño permite disminuir las corrientes parásitas que se crean en los núcleos y que constituyen pérdidas a las máquinas.

<sup>5</sup> Referencia Bibliográfica 9

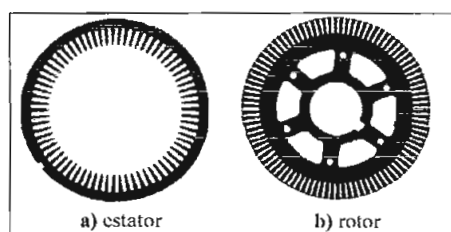


Figura 1.9: Laminas del Núcleo

### 1.3 OPERACIÓN DEL MOTOR ASINCRÓNICO.

La operación del motor asincrónico se asocia con la forma de conexión de los devanados del estator.

#### 1.3.1. CONEXIÓN DE LOS BOBINADOS DEL ESTATOR<sup>6</sup>

En la figura se observa (a) El corte transversal del motor. En las ranuras del estator se alojan las bobinas a las que se les denomina *fases*. En la figura se tiene las fases a-a', b-b' y c-c', estas bobinas están conectadas de modo que forman 3 arrollamientos independientes iguales. (b) Indica de manera esquemática la disposición de las bobinas tanto del rotor como del estator.

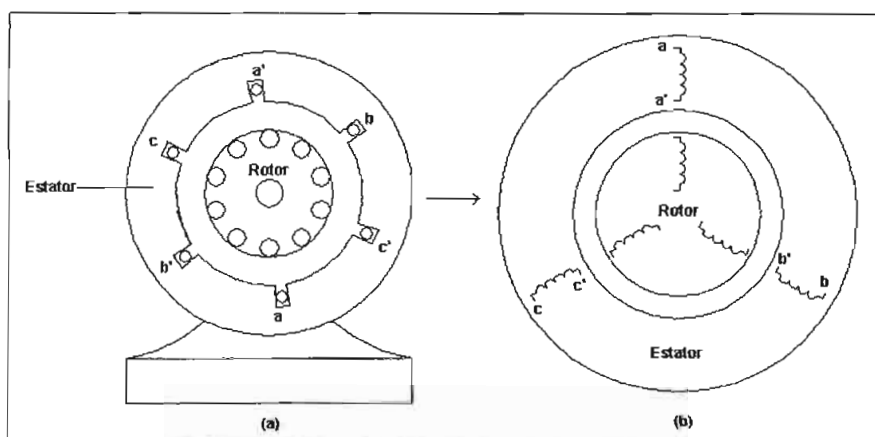


Figura 1.10: (A) Corte Transversal del Motor Asincrónico y (B) Devanados del Estator y del Rotor.

<sup>6</sup> Referencia Bibliográfica 9

Por lo general, a las bobinas del estator pueden ser conectadas en *estrella* (Y) o en *triángulo* (delta  $\Delta$ ). Para el caso de conexión en estrella, los terminales a-b-c son los disponibles para que el usuario se conecte a la red eléctrica y los puntos a'-b'-c' se unen formando un solo punto a dicho punto se le conoce como *neutro*.

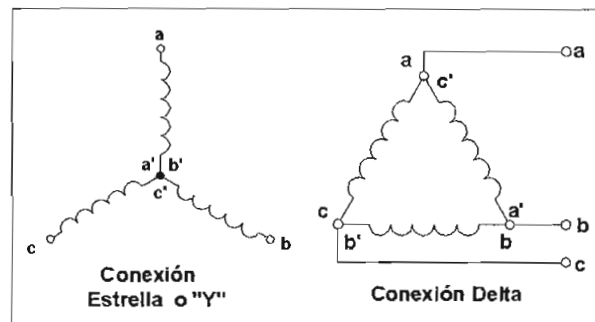


Figura 1.11: Conexión de las Bobinas del Estator

Para el caso de conexión en triángulo o delta  $\Delta$ , se conectan los nodos: a-c', b-a', c-b' formándose tres puntos que son el arribo de la alimentación trifásica de la red eléctrica. Aquí no existe punto físico de neutro.

### 1.3.2. CONEXIÓN DE LOS BOBINADOS DEL ROTOR DEVANADO<sup>7</sup>

Los terminales disponibles se deben unir entre si, formando un punto común. Si no se realiza esta conexión, la máquina se comporta como *un transformador*.

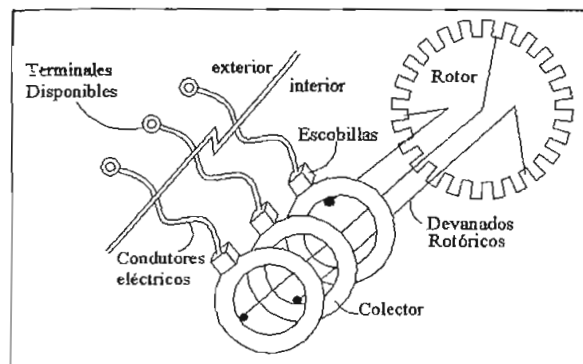


Figura 1.12: Esquema de Conexión de las Bobinas del Rotor.

<sup>7</sup> Referencia Bibliográfica 9

Por lo general la máquina de rotor devanado cuenta con seis terminales de salida provenientes del estator y tres terminales de salida provenientes del rotor. En la figura 1.13 se esquematiza a los terminales de salida.

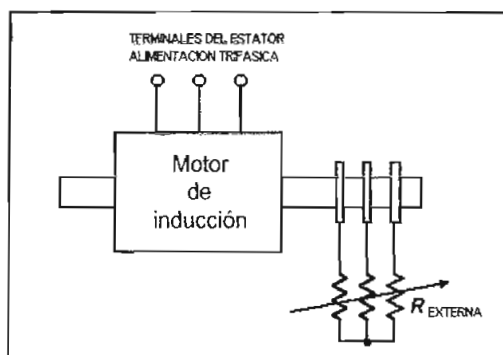


Figura 1.13: Terminales del Estator y del Rotor

## 1.4 VARIABLES ELECTROMAGNÉTICAS

Al aplicar voltaje en los terminales de las bobinas del estator, se producen fenómenos físicos de carácter electromecánicos que ocurren simultáneamente. La circulación de corriente genera campos magnéticos giratorios tanto en el estator como en el rotor. En el rotor se inducen corrientes procedentes del estator. Aparecen las *Fuerzas magnetomotrices*, *Torque electromagnético*, se vence la inercia y se inicia el giro del rotor.

### 1.4.1 MODELACIÓN DE LA FUERZA MAGNETOMOTRIZ<sup>8</sup>.

La circulación de corriente eléctrica a través de un conductor sólido, produce un campo magnético alrededor del conductor, cuyas líneas o flujo magnético son de forma circular<sup>9</sup>. Este suceso fue argumentado por Andre-Marie Ampere (Ley de Ampere). Esta ley es aplicable, independientemente de la forma del conductor eléctrico. Las máquinas motrices, se caracterizan por los conjuntos

<sup>8</sup> Referencia Bibliográfica 3

<sup>9</sup> Referencia Bibliográfica 7

de espiras que la integran, que al ser recorridas por una corriente eléctrica, se obtiene un gran flujo magnético.

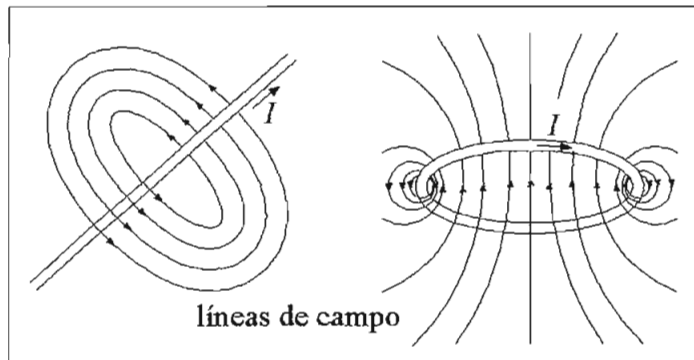


Figura 1.14: Líneas de Campo por la Circulación de Corriente.

Al ubicar un devanado (de  $n$  vuelta), en un estator constituido por dos ranuras frontales se genera campo de acuerdo a *ley de la mano derecha*.

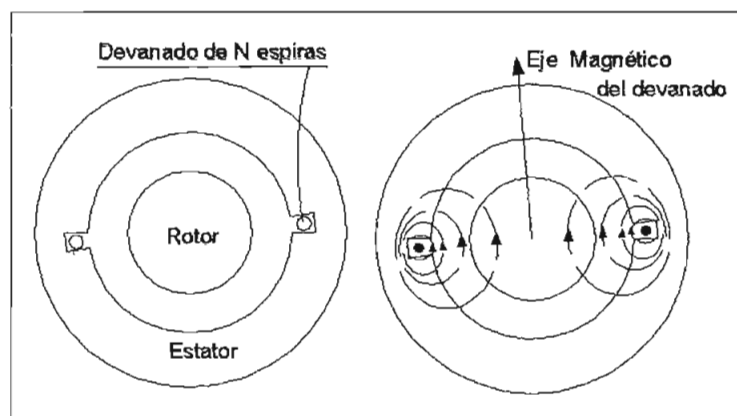


Figura 1.15: Estructura Sencilla con una sola Bobina

*μ<sub>Fe</sub> >> μ<sub>0</sub>*  
 La permeabilidad del estator y el rotor es mucho mayor que la del aire como consecuencia de esto la reluctancia de esta estructura se concentra en el entrehierro<sup>10</sup>. Por la simetría de la estructura la magnitud del campo magnético es igual en ambos entrehierros, pero con dirección opuesta.

<sup>10</sup>Espacio entre los núcleos de la estructura que forma parte del circuito magnético.

La ecuación matemática de la Fuerza magnetomotriz, se basa en la primera ecuación de Maxwell, la misma que establece que “la integral de línea de la intensidad de campo magnético  $H$  alrededor de una trayectoria  $C$  es igual a la corriente total que pasa a través de cualquier superficie  $S$  que enlaza esa trayectoria.” Aplicando la ley a la estructura que adoptada y omitiendo la corriente de desplazamiento de la ecuación de Maxwell<sup>11</sup>, omisión que es válida debido al tamaño de las máquinas y a la frecuencia (industrial) que trabajan y se obtiene la ecuación en forma magneto-cuasi-estática.

$$\oint_C H \cdot dl = \oint_S J \cdot da \quad \text{Ecuación (1.1)}$$

$H$  = Campo Magnético.

$J$  = Densidad de Corriente.

De la ecuación 1.1 la relación entre la Fuerza magnetomotriz y la intensidad de campo magnético es:

$$F = N \cdot i = \oint_C H \cdot dl \quad \text{Ecuación (1.2)}$$

$F$  = Fuerza Magnetomotriz.

$N$  = Número de espiras.

$i$  = Corriente que circula por la bobina.

Si toda la reluctancia del circuito magnético se concentra en el entrehierro, conduce al resultado de que la expresión  $\oint_C H \cdot dl$  es muy pequeña por lo tanto se puede despreciar y por consiguiente la Fuerza magnetomotriz es el entrehierro debe estar distribuida tal que:

$$F = N \cdot i \quad \text{Ecuación (1.3)}$$

La ecuación (1.3), representa el primer modelo matemático de la fuerza magnetomotriz. Al extender linealmente la estructura anterior, se podrá graficar la forma de la onda de la fuerza magnetomotriz.

En la figura 1.16 se puede percatar que la forma de la onda es rectangular alterna, donde la amplitud de cada escalón es  $Ni/2$ .

<sup>11</sup> En el anexo “EL EXPERIMENTO DE FARADAY” se obtiene, las ecuaciones correspondientes de la ley de Faraday-Lenz y de Maxwell, respecto a la corriente de desplazamiento.



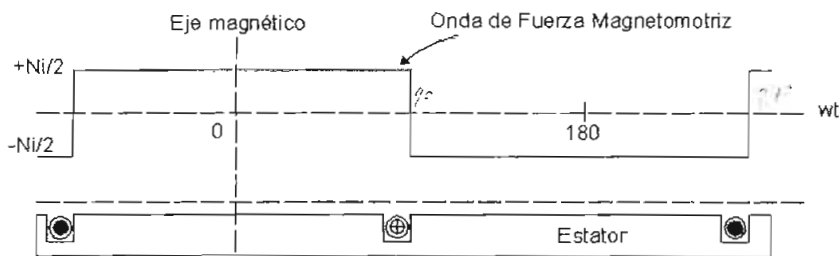


Figura 1.16: Extensión Lineal del Estator con dos Ranuras

Al aplicar la descomposición con series de Fourier<sup>12</sup> se obtiene una onda conocida como fundamental y otras conocidas como armónicas impares (No se consideran las armónicas, por que no son representativas. Todos los armónicos de orden tres y múltiplos de tres, son nulos en los motores trifásicos porque las fuerzas magnetomotrices de las tres fases están desfasadas 120 grados.). La onda de componente fundamental es:

$$F(x) = \left( \frac{2Ni}{\pi} \right) \times \cos(\theta) \quad \text{Ecuación 1.4}$$

$F(x)$  = Componente Espacial Fundamental de la onda de Fuerza Magnetomotriz.

$N$  = Número de espiras.

$I$  = Corriente que circula por la bobina.

$\theta$  = ángulo medido desde el eje magnético de la bobina del estator.

Que al superponerse a la función cuadrática se aprecia que el valor máximo está alineado con el eje magnético creado por la bobina.

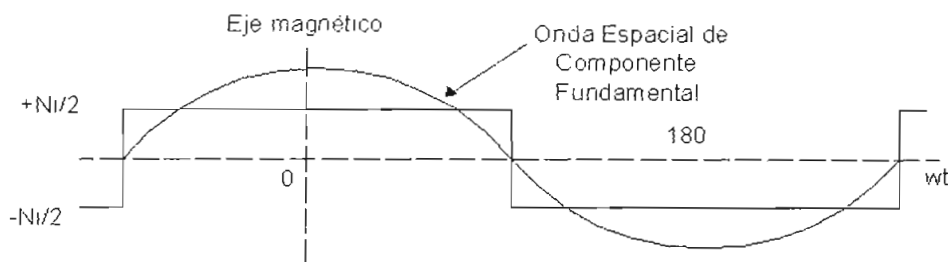


Figura 1.17: Onda Cuadrática y Onda de Componente Fundamental

Este resultado preliminar nos muestra el efecto producido con un solo bobinado.

<sup>12</sup> En el anexo "ECUACIONES DE SERIES DE FOURIER" se indican las fórmulas correspondientes.

El segundo paso para modelar la ecuación de la fuerza magnetomotriz de una máquina asincrónica trifásica, consiste en analizar el efecto que se produce en una estructura estática que contiene varias ranuras en las mismas que se ha colocado una de las tres fases y circula una corriente alterna en el tiempo. En la figura 1.18 se grafica lo descrito.

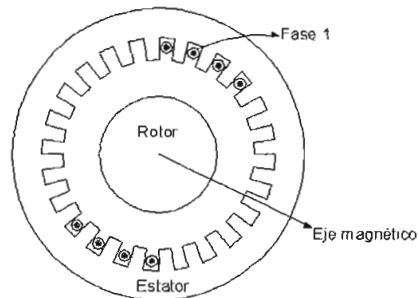


Figura 1.18: Estator con una Fase

Se procede a determinar la forma de la onda espacial de la fuerza magnetomotriz, con ayuda de la descomposición de las series de Fourier. Para conseguir esta onda, volvemos a extender de modo lineal al estator y al rotor. Se obtiene una onda conformada por una serie de escalones, esta onda es la fuerza magnetomotriz. Cada escalón tendrá una altura o magnitud, que dependerá del número de espiras y la magnitud de la corriente que circule por la fase en cuestión. En la figura 1.19, se tiene a la estructura extendida, con el bobinado de fase en las ranuras correspondientes, la onda de la fuerza magnetomotriz, adquiere la forma de onda conocida como diente de sierra.

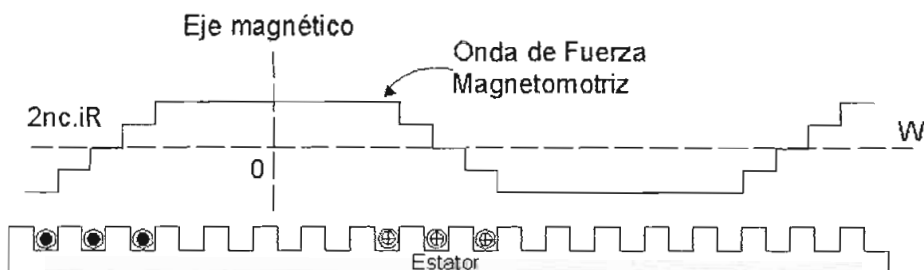


Figura 1.19: Estator Extendido con Bobinas de Fase 1 Y Fmm

Aplicando la descomposición de las series de Fourier se obtiene:

$$F(x) = \left( \frac{4N_{FASE,R}i_R}{\pi} \right) \times \cos(\theta) \quad \text{Ecuación 1.5}$$

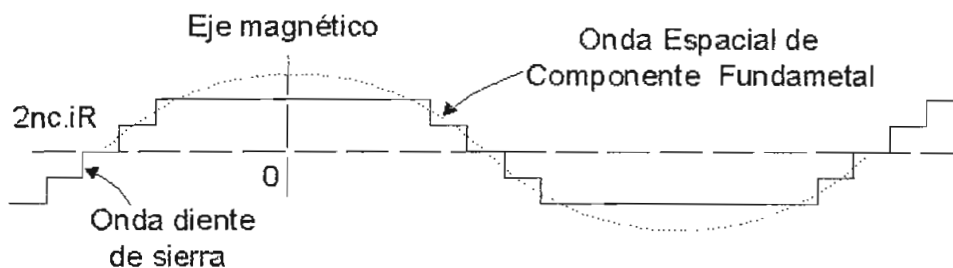
Donde:

$F(x)$  = Componente Fundamental de la onda de Fuerza Magnetomotriz.

$N_{FASE,R}$  = Número de espiras de la fase R.

$i_R$  = Corriente que circula por la fase R.

Ahora, se superponen las dos ondas, es decir la onda diente de sierra y la onda espacial de componente fundamental y se puede apreciar que se ha producido una mejor aproximación a la forma senoidal de la fuerza magnetomotriz, al distribuir una fase en el estator.

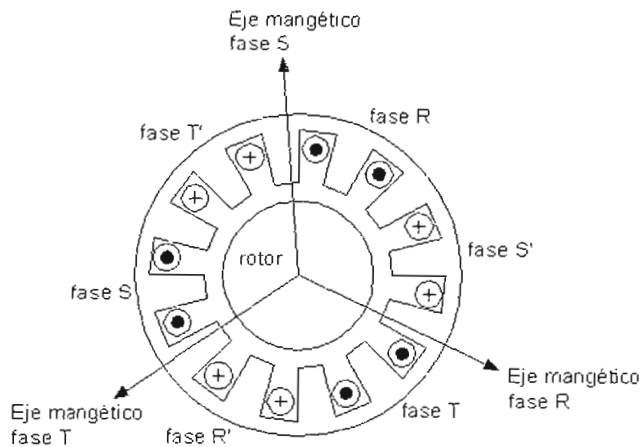


*Figura 1.20: Superposición de la Onda Diente de Sierra y la Onda Espacial de Componente Fundamental*

Al tener tres fases<sup>13</sup> dispuestas como se indica en la figura 1.21 recorridas por corrientes balanceadas se crean los campos magnéticos cuyos ejes se alinean de acuerdo a la ley de la mano derecha. Debe avizorarse que la entrada y salida de las corrientes se produce de manera alternada. Al adoptar como positiva la entrada de las corrientes entonces la salida de éstas será negativa con lo cual la

<sup>13</sup> Cuya nomenclatura será R, S, T para cada una de las fases respectivamente.

fase R es positiva, la fase S será negativa y así de manera sucesiva, ocurre la alternancia de corrientes.

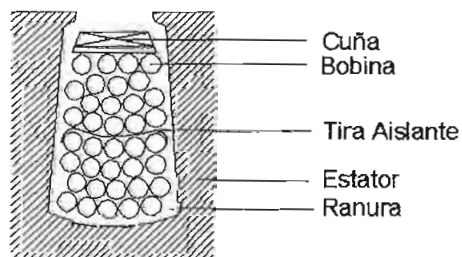


*Figura 1.21: Máquina Asincrónica Trifásica*

Es así que lo que se obtiene, es un conjunto de tres fuerzas magnetomotrices generadas por las tres fases, las ondas de fuerza magnetomotriz son de forma de diente de sierra (igual que la obtenida para una sola fase), con ayuda de la descomposición de las series de Fourier, se obtiene las ondas espaciales de componente fundamental. Las tres ondas así obtenidas, se distancian  $120^{\circ}$  grados, donde los ejes de cada onda se ubican en el máximo de la onda.

La mayoría de los motores trifásicos están provistos de un arrollamiento estático de doble capa, es decir, con igual número de bobinas que de ranuras y van conectadas formando tres arrollamientos llamados fases y están siempre conectadas en estrella o en triángulo. Dichas bobinas se distribuyen de tal manera que la onda de fuerza magnetomotriz tenga una distribución sinusoidal espacial.

En la figura 1.22 se muestra un detalle de lo comentado en el párrafo anterior.



*Figura 1.22: Arrollamiento Estático de Doble Capa*

### 1.4.1.1 Naturaleza de la onda de fuerza magnetomotriz<sup>14</sup>

Para explorar la naturaleza de onda de fuerza magnetomotriz, se retoma el resultado obtenido en la ecuación 1.5, que resultó del análisis realizado a la fuerza magnetomotriz cuando se tiene una sola fase circulada por una corriente  $i$ .

$$F(x) = \left( \frac{4Ni}{\pi} \right) \times \cos(\theta)$$

Al graficar esta ecuación se obtiene la curva mostrada en la figura 1.23, la magnitud o altura de la curva esta dada por el factor  $(4Ni/\pi)$ .

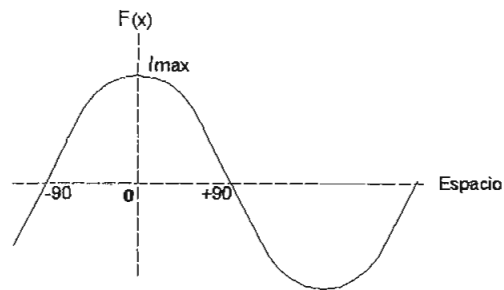


Figura 1.23: Onda Espacial Fundamental de Fmm de la Fase R

Si La corriente  $i$  es alterna en el tiempo, se modela como sigue:

$$i = I_{\max} \cos(\omega t) \quad \text{Ecuación 1.6}$$

Si a la ecuación 1.6 se la reemplaza en la ecuación de la fuerza magnetomotriz resulta:

$$F(x) = \left( \frac{4NI_{\max}}{\pi} \right) \times \cos(\theta) \times \cos(\omega t) \quad \text{Ecuación 1.7}$$

Entonces la magnitud queda definida por el número de vueltas del bobinado de fase  $N$  la magnitud máxima de la corriente que circula por la bobina  $I_{\max}$  y un coeficiente numérico igual a 1,2. La ecuación 1.8 evidencia lo descrito

<sup>14</sup> Referencia Bibliográfica 3

$$F_{\max} = \left( \frac{4.N.I_{\max}}{\pi} \right) \quad \text{Ecuación 1.8}$$

En la ecuación 1.7 se realiza el producto de cosenos con lo que se obtiene:

$$F = F_{\max} \left[ \frac{\cos(\theta - \omega t)}{2} + \frac{\cos(\theta + \omega t)}{2} \right] \quad \text{Ecuación 1.9}$$

$$F = \frac{F_{\max}}{2} \cdot \cos(\theta - \omega t) + \frac{F_{\max}}{2} \cdot \cos(\theta + \omega t) \quad \text{Ecuación 1.10}$$

Al revisar la ecuación 1.10 se advierte que:

$$F = F_{\text{POSITIVA}} + F_{\text{NEGATIVA}} \quad \text{Ecuación 1.11}$$

Este resultado muestra que la onda de la fuerza magnetomotriz obtenida de una fase se divide en la suma de dos ondas, la una positiva y la otra negativa.

$$F_{\text{POSITIVA}} = \frac{F_{\max}}{2} \cdot \cos(\theta - \omega t) \quad \text{Ecuación 1.12}$$

$$F_{\text{NEGATIVA}} = \frac{F_{\max}}{2} \cdot \cos(\theta + \omega t) \quad \text{Ecuación 1.13}$$

Estas ondas son de naturaleza alterna y son ondas viajeras rotatorias. Además cada una de estas ondas posee la mitad de la amplitud de la onda original y al observar sus argumentos, se advierte que la onda  $F_{\text{POSITIVA}}$  va hacia  $+\theta$  y que la onda  $F_{\text{NEGATIVA}}$  va hacia  $-\theta$  ambas a velocidad angular  $\omega$  ver figura 1.24.

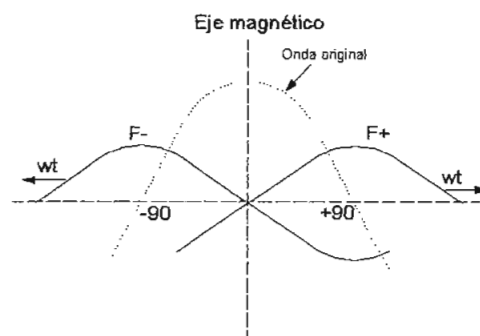


Figura 1.24: Ondas Positiva y Negativa

Cuando se tienen tres fases, las tres ondas espaciales fundamentales de fuerza Magnetomotriz están separadas 120 grados eléctricos en el espacio. Teniendo en cuenta que las corrientes que circulan por cada fase, tienen una magnitud que varían senoidalmente con el tiempo y que se encuentran en condición de equilibrio, se expresan como:

$$i_R = I_{MAX} \cos (\omega t) \quad \text{Ecuación 1.14}$$

$$i_S = I_{MAX} \cos (\omega t - 120^\circ) \quad \text{Ecuación 1.15}$$

$$i_T = I_{MAX} \cos (\omega t + 120^\circ) \quad \text{Ecuación 1.16}$$

Donde:

$I_{MAX}$  = Magnitud de la Corriente

$i_{R-S-T}$  = Corriente en la fase R-S-T

Si la secuencia de fase es: R-S-T se tiene:

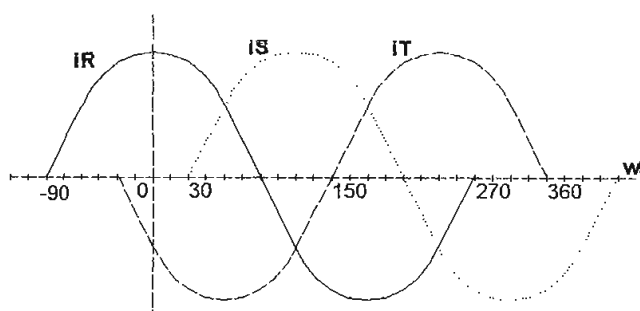
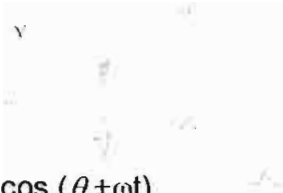


Figura 1.25: Forma de Onda de las Corrientes de Fase

En la ecuación 1.11 se determinó que:

$$F = F \text{ positiva} + F \text{ negativa}$$

Que resultado del análisis de una fase. Al agregarse las otras dos fases cuyos ejes están desfasados 120 grados, se obtendrán las siguientes ecuaciones de fuerza magnetomotriz:



Fase R 
$$F = \frac{F \max}{2} \cos (\theta - \omega t) + \frac{F \max}{2} \cos (\theta + \omega t)$$
 Ecuación 1.18

Fase S 
$$F = \frac{F \max}{2} \cos (\theta - \omega t) + \frac{F \max}{2} \cos (\theta + \omega t + 120^\circ)$$
 Ecuación 1.19

Fase T 
$$F = \frac{F \max}{2} \cos (\theta - \omega t) + \frac{F \max}{2} \cos (\theta + \omega t - 120^\circ)$$
 Ecuación 1.20

Para obtener la ecuación Total de la fuerza magnetomotriz se suman las ecuaciones 1.18, 1.19, 1.20.

$$F \text{ total} = \Sigma F \text{ positiva} + \Sigma F \text{ negativas} \quad \text{Ecuación 1.21}$$

La sumatoria de las ondas en sentido negativos da como resultado cero.

$$\Sigma F \text{ negativas} = 0 \quad \text{Ecuación 1.22}$$

Entonces la fuerza resultante será

$$F \text{ total} = \frac{3F \max}{2} \cos (\theta - \omega t) \quad \text{Ecuación 1.23}$$

Esta ecuación es el modelo matemático que se deseaba determinar. Al revisar ecuación 1.23 se aprecia que la magnitud de la resultante es constante y el ángulo  $\omega t$  señala la rotación de la onda alrededor del entrehierro a velocidad angular  $\omega$  constante.

#### 1.4.1.2 Análisis Gráfico

La fuerza magnetomotriz total se puede determinar de manera gráfica. Si la secuencia de fase es: R-S-T se tiene la forma de ondas indicadas en la figura 1.25



En  $t = 0$  :  $I_R = I_{MAX}$   $I_S = I_{MAX}/2 = I_T$  (en dirección negativa)

Donde la fuerza magnetomotriz de la fase R tiene el valor máximo y la fuerza magnetomotriz de la fase S y T son iguales a  $F_S = F_T = F_{MAX}/2$  (en dirección negativa). Los vectores de fuerza magnetomotriz de las fases se dibujan sobre los ejes magnéticos. La resultante se obtiene de la suma de las fuerza magnetomotriz individuales, donde:  $F_{TOTAL} = \frac{3}{2} F_{MAX}$ , centrado en el eje de la fase R.

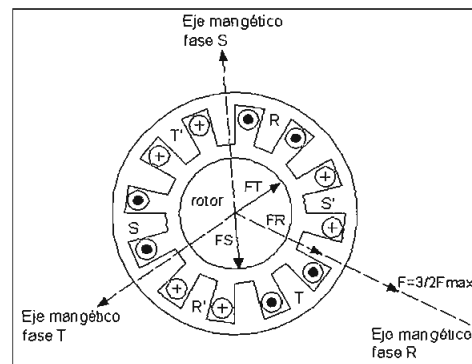


Figura 1.26: Vectores de Fmm

## 1.4.2 CAMPO MAGNÉTICO<sup>15</sup>

Para el análisis del campo magnético se recurrirá a la estructura inicial que se utilizó para la modelación de la fuerza magnetomotriz. Obsérvese la figura 1.27.

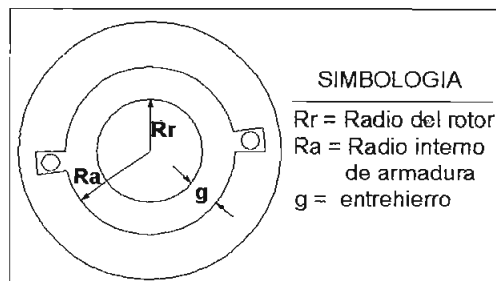


Figura 1.27: Estructura con dos Ranuras

<sup>15</sup> Referencia Bibliográfica 3

De la ecuación 1.2

$$F = Ni = \oint_c H \cdot dl$$

Se estableció que la fuerza magnetomotriz es igual a la integral de línea de H a través del entrehierro. Como H es radial constante, la integral de línea es igual al producto del flujo magnético H por la longitud del entrehierro g de lo cual se logra:

$$H = F/g \quad \text{Ecuación 1.25}$$

Si revisamos la ecuación 1.25 se podrá advertir que H tendrá forma idéntica que la ecuación de la fuerza magnetomotriz, pero alterada por el factor  $1/g$ .

Además la onda espacial de componente fundamental del campo magnético se puede obtener de la onda espacial fundamental de la fuerza magnetomotriz.

$$H_a = \frac{F(x)}{g} = \left( \frac{2Ni}{g\pi} \right) \times \cos(\theta) \quad \text{Ecuación 1.26}$$

En la figura 1.28 y 1.29 se presentan las ondas de fuerza magnetomotriz y la del campo magnético, así como las de sus componentes espaciales fundamentales respectivamente.

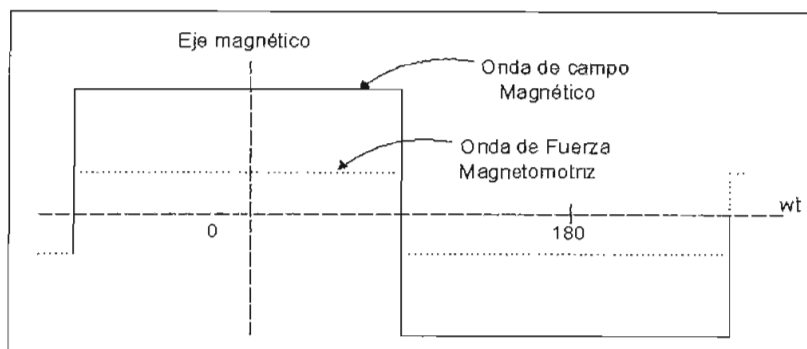


Figura 1.28: Ondas de F.M.M. y Campo Magnético

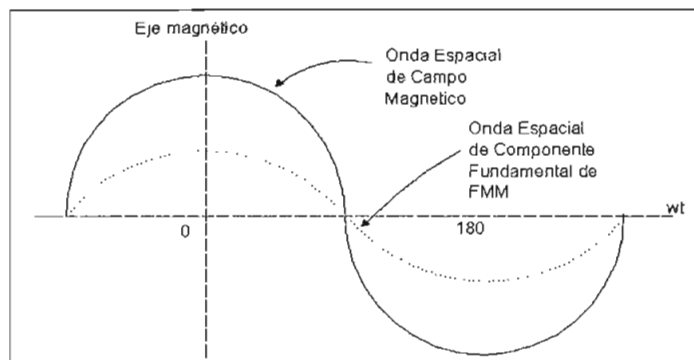


Figura 1.29: Ondas Espaciales de Componente Fundamental de F.M.M. y Campo Magnético

El proceso para determinar la ecuación del campo magnético en el caso de una fase o  $n$  fases es similar que el realizado para la fuerza magnetomotriz.

#### 1.4.3 VOLTAJE GENERADO<sup>16</sup>

La figura 1.30 representa un motor trifásico, con dos polos en el rotor. Cuando gira el rotor produce una *Onda Espacial de Densidad de Flujo*:  $B = B_{MAX} \cdot \cos \theta$

Donde:

$B$  = Onda espacial de densidad de flujo

$B_{MAX}$  = Valor máximo de la densidad

$\theta$  = radianes eléctricos medido a partir del eje magnético del rotor

El flujo magnético por polo entre el entrehierro es:

$$\Phi = \int B_{MAX} \cdot \cos \theta \cdot L \cdot r \cdot d\theta \quad \text{Ecuación 1.27}$$

Donde.

$\Phi$  = flujo magnético

$L$  = longitud del rotor

$r$  = radio

<sup>16</sup> Referencia Bibliográfica 3

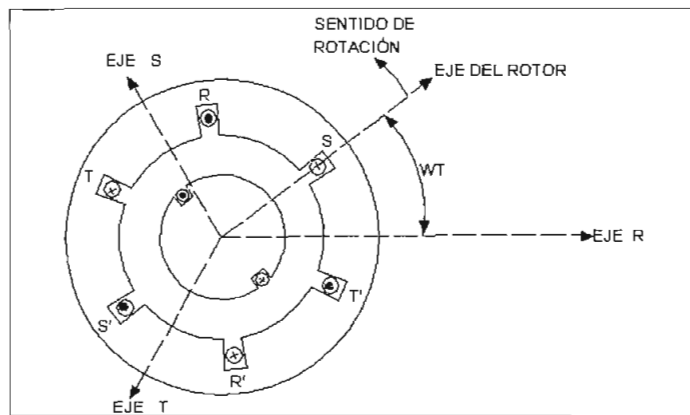


Figura 1.30: Máquina Trifásica con dos Polos

Así, para una máquina de dos polos.

$$\Phi = 2 \cdot B_{\text{MAX}} \cdot L \cdot r \quad \text{Ecuación 1.28}$$

Si la máquina tiene P polos entonces.

$$\Phi = \frac{2}{P} 2B_{\text{max}} L r \quad \text{Ecuación 1.29}$$

Con el rotor girando a velocidad angular  $\omega$  constante, los Encadenamientos de Flujo  $\lambda$  son:

$$\lambda = N \Phi \cos \omega t \quad \text{Ecuación 1.30}$$

Aplicando la ley de Faraday, el voltaje inducido en la bobina del estator es:

$$e = \frac{d\lambda}{dt} = \omega N \Phi \sin \omega t + N \frac{d\Phi}{dt} \cos \omega t \quad \text{Ecuación 1.31}$$

De la ecuación 1.31

$$N \frac{d\Phi}{dt} \cos \omega t \quad \text{Ecuación 1.32}$$

Es conocido como voltaje de transformador. Se presenta cuando la amplitud de B varía con el tiempo.

El término:  $\omega N \Phi \text{ sen } \omega t$  Ecuación 1.33

Es conocido como voltaje (por velocidad) que se genera debido al movimiento relativo de la onda de flujo en el entrehierro. En estado estable el voltaje generado es el voltaje por velocidad entonces

$$E = - \omega N \Phi \text{ sen } \omega t \quad \text{Ecuación 1.34}$$

Si remplazamos la ecuación 1.29 en 1.34 se tiene.

$$E = - \omega N \frac{2}{p} \cdot 2 \cdot B_{\text{MAX}} \cdot L \cdot r \cdot \text{sen } \omega t \quad \text{Ecuación 1.35}$$

Donde:

$B = B_{\text{MAX}} \text{ sen } \omega t$  (Densidad de flujo)

$\omega_m = \frac{2\omega}{p}$  (velocidad angular mecánica)

$2LN$  = longitud total de conductores

La ecuación 1.35 se puede expresar como

$$e = B \cdot (2LN) (-r \cdot \omega_m) = B \cdot (2LN) (V) \quad \text{Ecuación 1.36}$$

Donde:

$V = -r\omega_m$ . (Velocidad lineal)

Con esto el valor instantáneo de  $e$  la ecuación 1.34 es.

$$E_{\text{MAX}} = \omega N \Phi = 2 \lambda f N \Phi \quad \text{Ecuación 1.37}$$

Y su valor r.m.s (eficaz) es.

$$E_{\text{rms}} = \frac{2\lambda}{\sqrt{2}} f N \Phi = \sqrt{2} \lambda f N \Phi \quad \text{Ecuación 1.38}$$

#### 1.4.4 EL TORQUE <sup>17</sup>

En la figura 1.31 se muestra la interacción del campo del estator y del rotor. El ángulo formado entre los dos ejes se representa como  $\delta_{SR}$ . Ambos ejes giran a velocidad sincrónica  $\omega$ .

El torque se produce por la tendencia de los dos campos a alinear los ejes magnéticos. Si la dimensión del entrehierro "g" es pequeña y suponiendo que el flujo de dispersión del estator y del rotor tiende a cero, entonces se define la fuerza magnetomotriz de los devanados del estator y del rotor como:

$$F_{SR} = H \cdot g \quad \text{Ecuación 1.39}$$

$F_{SR}$  = Fuerza magnetomotriz de los devanados del estator y del rotor

H = Campo en el entrehierro

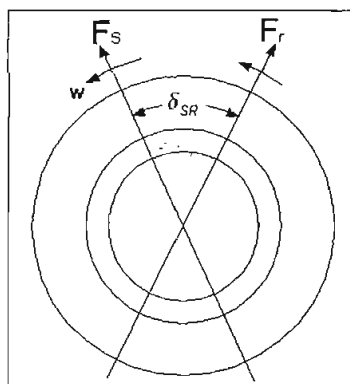


Figura 1.31: Interacción de Campos del Estator y del Rotor

Estas fuerzas magnetomotrices se pueden representar por vectores en el espacio  $F_S$  y  $F_R$  a lo largo de los ejes magnéticos del estator y del rotor respectivamente. Esto se indica en la figura 1.32

<sup>17</sup> Referencia Bibliográfica 4

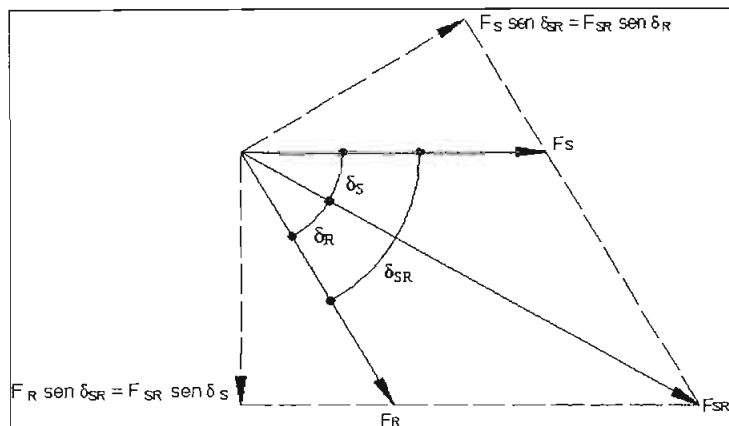


Figura 1.32: Diagrama Vectorial de las Ondas de Fmm

El valor de  $F_{SR}$  se obtiene aplicando la ley del paralelogramo

$$F_{SR}^2 = F_S^2 + F_R^2 + 2F_S F_R \cos \delta_{SR} \quad \text{Ecuación 1.40}$$

De la ecuación 1.39  $H_{MAX}$  resulta:

$$H_{MAX} = \frac{F_{SR}}{g} \quad \text{Ecuación 1.41}$$

Se recurre a la determinación de la coenergía del campo magnético que se almacena en el entrehierro, para lo cual se recuerda que:

- La densidad de coenergía es:  $\mu_0 H^2 / 2$
- La densidad promedio de coenergía con respecto al volumen de entrehierro es  $\mu_0 / 2$  veces el valor promedio de  $H^2$
- El valor promedio del cuadrado de una onda senoidal es la mitad de su valor máximo.

La coenergía total es:

$W' = (\text{densidad promedio de coenergía}) (\text{volumen de entrehierro})$

$$w' = \left( \frac{\mu_0}{4} H_{MAX}^2 \right) (\pi D L g)$$

Reemplazando la ecuación 1.41

$$w' = \left( \frac{\mu_0 F_{SR}^2}{4 g^2} \right) (\pi D L g) = \frac{\mu_0 \pi D L}{4 g} F_{SR}^2 \quad \text{Ecuación 1.42}$$

Donde

D = diámetro promedio del entrehierro

L = longitud axial del entrehierro

g = longitud del entrehierro

$\mu_0$  = permeabilidad del espacio vacío =  $4 \pi \times 10^{-7}$  (H/m)

En la ecuación anterior se reemplaza la ecuación 1.40 se obtiene

$$w' = \frac{\mu_0 \pi D L}{4 g} (F_S^2 + F_R^2 + 2 F_S F_R \cos \delta_{SR}) \quad \text{Ecuación 1.43}$$

Para obtener el par T se realiza la derivación de la ecuación 1.43

$$T = \frac{\partial w'}{\partial \delta} = - \frac{\mu_0 \pi D L}{2 g} F_S F_R \text{sen} \delta_{SR} \quad \text{Ecuación 1.44}$$

Para adaptar la ecuación 1.44 para una máquina de P polos, el par es:

$$T = - \frac{P}{2} \frac{\mu_0 \pi D L}{2 g} F_S F_R \text{sen} \delta_{SR} \quad \text{Ecuación 1.45}$$

El signo menos indica que los campos tienden alinearse entre si.

De la figura 1.32 se obtiene:

$$F_S \text{sen} \delta_{SR} = F_{SR} \text{sen} \delta_R \quad \text{Ecuación 1.46}$$

$$F_R \text{sen} \delta_{SR} = F_{SR} \text{sen} \delta_S \quad \text{Ecuación 1.47}$$

Al reemplazar la ecuación 1.46 en la ecuación 1.45 se obtiene



$$T = -\frac{P}{2} \frac{\mu_0 \pi D L}{2g} F_{SR} F_R \text{sen} \delta_R \quad \text{Ecuación 1.48}$$

Si expresamos el campo en términos del flujo total por polo, entonces:

$$B = \frac{\mu_0 F_{SR}}{g} \quad \text{Ecuación 1.49}$$

Si reemplazamos la ecuación 1.49 en la ecuación del torque se tiene:

$$T = -\frac{P}{2} \frac{\pi D L}{2} B_{SR} F_R \text{sen} \delta_R \quad \text{Ecuación 1.50}$$

Si se define al flujo resultante por polo  $\Phi$  como:

$\Phi =$  (Valor promedio de B sobre un polo) (área del polo)

$$\Phi = \frac{2 D L B}{P} \quad \text{Ecuación 1.51}$$

La ecuación anterior al ser reemplazada en la ecuación 1.50 se tiene:

$$T = -\frac{P^2}{2^2} \frac{\pi}{2} \Phi_{SR} F_R \text{sen} \delta_R \quad \text{Ecuación 1.52}$$

Donde:

T = Torque.

P = polos.

$\Phi_{SR}$  = Flujo resultante estator-rotor.

$F_R$  = Fuerza magnetomotriz de rotor.

Sen  $\delta_R$  = Angulo del eje de la Fuerza magnetomotriz de rotor.

## 1.4.5 ROTACIÓN DEL MOTOR ASINCRÓNICO

### 1.4.5.1 Velocidad de Giro<sup>18</sup>

Por definición la velocidad angular  $\omega$  es:

$$\omega = 2\pi f \quad \text{Ecuación 1.53}$$

<sup>18</sup> Referencia Bibliográfica 6

Medida en radianes eléctricos por segundo. Si se considera una máquina de  $P$  polos, la velocidad mecánica  $\omega_m$  del giro es:

$$\omega_m = \frac{2\omega}{P} \quad \text{Ecuación 1.54}$$

Medida en radianes por segundo. La velocidad de giro puede ser expresada en revoluciones por minuto, que es lo más utilizado en el ambiente industrial.

$$N = \frac{120f}{P} \quad (\text{rev / min}) \quad \text{Ecuación 1.54}$$

Donde:

$N$  = velocidad de giro

$f$  = frecuencia industrial (60 Hz)

$P$  = polos

#### 1.4.5.2 Deslizamiento<sup>19</sup>

Como se ha determinado, los campos magnéticos del estator y del rotor giran a la misma velocidad sincrónica definida en la ecuación 1.54; al crearse el torque, si éste es lo suficientemente fuerte, hará que el rotor de la máquina empiece el giro. La velocidad del rotor no alcanza la velocidad definida en la ecuación 1.54, es algo menor que esta. El deslizamiento se define como la diferencia entre las velocidades del campo giratorio y la del rotor.

$$S = n_{campo} - n_{rotor} \quad \text{Ecuación 1.55}$$

Al deslizamiento se lo ha acostumbrado a expresar en por unidad.

$$S = \frac{n_{campo} - n_{rotor}}{n_{campo}} \quad \text{Ecuación 1.56}$$

El motor asincrónico, tiene un comportamiento análogo al del transformador, con la diferencia de que ocurre la transformación de frecuencia, esto se da por efecto del deslizamiento. Entonces se define la frecuencia del rotor como frecuencia de deslizamiento y es el producto entre el deslizamiento y la frecuencia en el estator.

<sup>19</sup> Referencia Bibliográfica 5

$$f_{ROTOR} = S \cdot f_{ESTATOR} \quad \text{Ecuación 1.57}$$

La máquina asincrónica puede ser utilizada como un variador de frecuencia.

### 1.4.5.3 Característica Torque-Velocidad<sup>20</sup>

Las fórmulas que expresan las particularidades de funcionamiento de la máquina asincrónica pueden presentarse en forma algo complicada por abarcar distintas variables. Resulta eficaz, para simplificar las ecuaciones, describirlas en forma no dimensional en función de ciertas relaciones. Si se considera que el torque interno pasa por su máximo cuando es máxima la potencia suministrada a  $r2/s$ , esto implica que la potencia será mayor cuando la impedancia  $r2/s$  iguale en magnitud a la impedancia existente entre ella y la tensión constante aplicada a los terminales de estator, o para un deslizamiento  $S_{MAX}$  en el que cumpla:

$$\frac{r2}{S_{max}} = \sqrt{r1^2 + (x1 + x2)^2}$$

La relación Torque-deslizamiento se expresa como relación entre las razones  $T/T_{max}$  y  $S/S_{max}$ .

$$\frac{T}{T_{max}} = \frac{2 \left[ r1 + \sqrt{r1^2 + (x1 + x2)^2} \right] \frac{r2}{S}}{\left( r1 + \frac{r2}{S} \right)^2 + (x1 + x2)^2}$$

Donde:

$T$  = Torque desarrollado por la máquina.

$T_{max}$  = Torque máximo.

$r1,2$  = resistencia del estator y rotor respectivamente.

$x1,2$  = reactancia de dispersión de estator y rotor respectivamente.

Si se reemplaza la relación  $r2/S_{MAX}$  en la relación  $T/T_{max}$  se obtiene:

$$\frac{T}{T_{max}} = \frac{2}{\frac{S}{S_{max}} + \frac{S_{max}}{S}} \quad \text{Ecuación 1.58}$$

<sup>20</sup> Referencia Bibliográfica 3

Donde:

$T$  = Torque desarrollado por la máquina.

$T_{max}$  = Torque máximo.

$S$  = Deslizamiento.

$S_{max}$  = Deslizamiento para torque máximo.

#### 1.4.5.4 Operación del Motor como Generador y Freno

##### 1.4.5.4.1 Región motor (1)

Corresponde al funcionamiento normal del motor, la velocidad queda entre cero y la velocidad sincrónica esto implica que el deslizamiento vaya de 1 a 0 respectivamente.

##### 1.4.5.4.2 Región de frenado (3)

En esta región el deslizamiento es mayor que 1, esto ocurre cuando el motor se impulsa en dirección contraria al sentido de giro, es decir contra la dirección de rotación de su campo magnético, esto se consigue con ayuda de una fuente mecánica capaz de contrarrestar el torque interno de la máquina o con la inversión de las fases de la alimentación del suministro eléctrico. Como aplicación de esta región es utilizada para realizar el frenado del motor.

##### 1.4.5.4.3 Región de generador (2)

Para que la máquina asincrónica trabaje como generador, se debe hacer que el rotor de la máquina gire a velocidad mayor a la sincrónica. El deslizamiento algebraicamente será negativo.

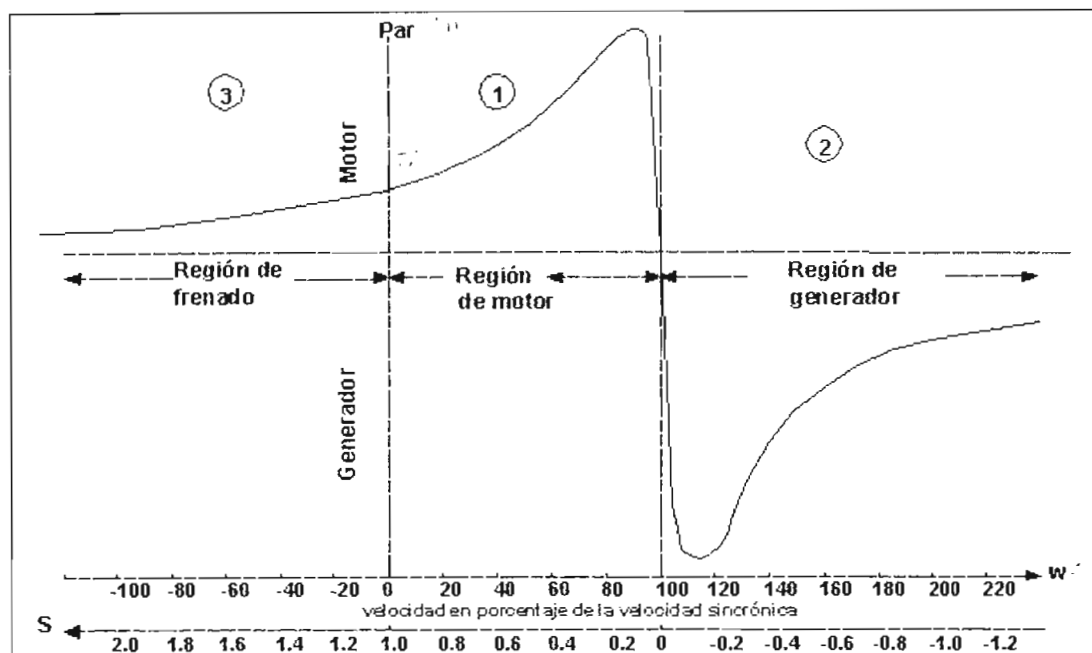


Figura 1.33: Rangos de Operación del Motor

## 1.5 EL CIRCUITO EQUIVALENTE

Se modela a un motor asíncrono trifásico de rotor devanado que se ha construido con el mismo número de polos y de fases en estator y rotor. En la figura 1.34 se indica la conexión del motor asíncrono a la red trifásica infinita.

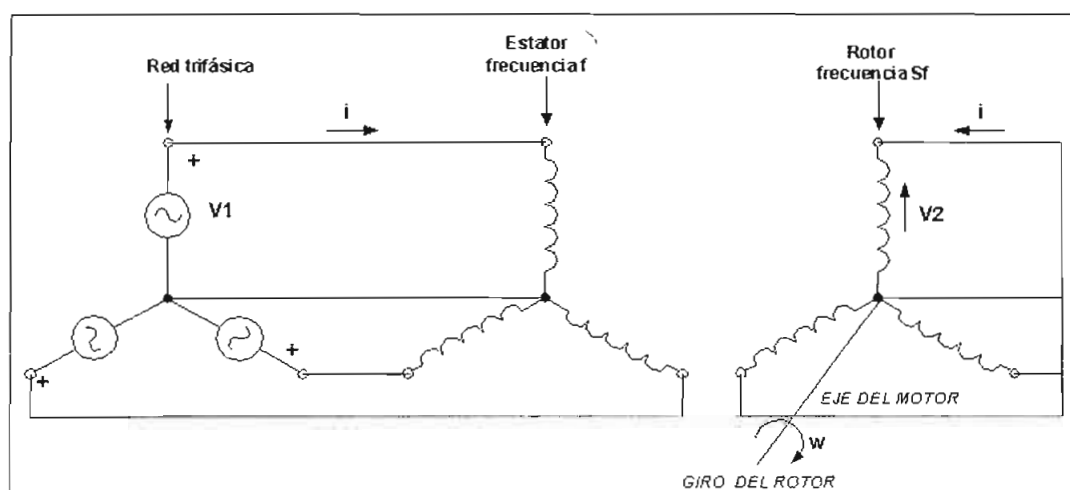


Figura 1.34: Conexión del Motor Asíncrono a la Red Infinita

### 1.5.1 EL CIRCUITO EQUIVALENTE POR FASE<sup>21</sup>.

El voltaje  $V_1$  (fase-neutro) se obtiene aplicando la ley de voltajes de Kirchoff. La circulación de corriente  $i_1$  provoca la aparición de un voltaje generado  $E_{rms}$  entonces al aplicar la ecuación de voltajes de Kirchoff se obtiene tres términos que conforman la ecuación. El primero corresponde al voltaje aplicado de la fuente infinita, el segundo corresponde a la caída de voltaje a través de la impedancia del estator y el tercer término corresponde al voltaje generado.

$$\vec{V}_1 = \vec{I}_1(r1 + jx1) + \vec{E}_1 \quad \text{Ecuación 1.59}$$

Donde:

$V_1$  = voltaje fasorial en terminales del estator.

$I_1$  = corriente fasorial del estator.

$r1$  = resistencia de corriente directa del estator

$x1$  = reactancia de dispersión del estator

$E_1$  = voltaje generado

La corriente del estator al circular provoca dos efectos puntuales:

1. Crea una corriente en el rotor, se le conoce como corriente de carga. ( $I_2$ )
2. Crea una corriente propia de dispersión que produce el flujo resultante en el entrehierro ( $I_\phi$ )

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_2 + \vec{I}_\phi \quad \text{Ecuación 1.60}$$

Esta última, es la que provoca efectos eléctricos en el estator.

- Genera la corriente que circula por el núcleo del estator, produciendo lo que se conoce como pérdidas parásitas  $I_C$ .
- Genera la corriente de magnetización del estator  $I_M$ .

<sup>21</sup> Referencia Bibliográfica 3

$$\vec{I}_\phi = \vec{I}_C + \vec{I}_M \quad \text{Ecuación 1.61}$$

Para representar a la corriente de pérdidas parásitas y a la corriente de magnetización, se coloca una resistencia y una inductancia en paralelo, tal como se indica en la figura 1.35.

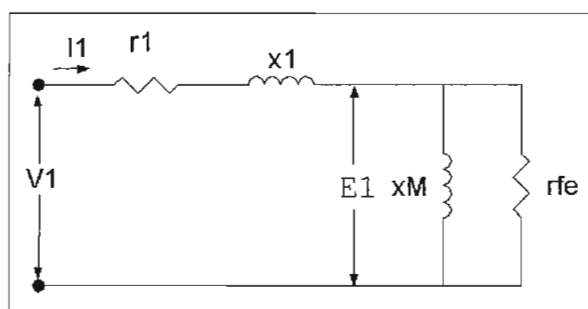


Figura 1.35: Circuito Equivalente Considerando el Estator

En la figura 1.36 se realiza un esquema equivalente de la máquina cuando está sin girar y no se ha realizado la transferencia de los parámetros del rotor.

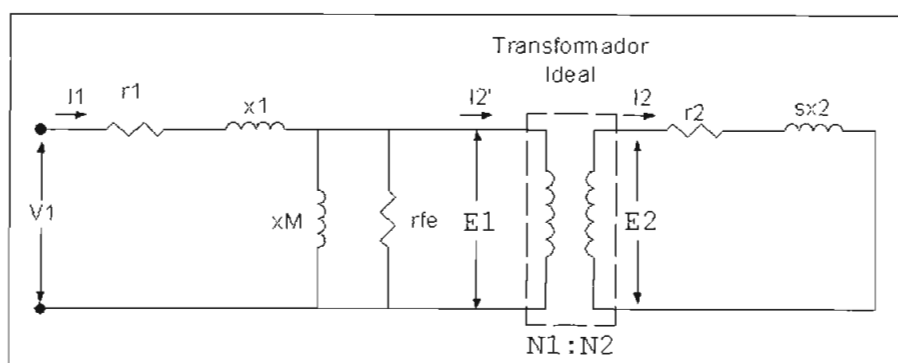


Figura 1.36: Circuito Equivalente con Rotor Parado

Se deben referir los parámetros del secundario (rotor) al primario (estator), con la ayuda de la relación de vueltas. El rotor, se puede representar de forma equivalente, a través de una impedancia.

Si:

$$a = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{Ecuación 1.62}$$

$a$  = relación del número de vueltas

$N_1$  = número de vueltas del primario

$N_2$  = número de vueltas del secundario

Ahora se realiza la transferencia de parámetros. Para el voltaje generado del rotor equivalente, se tiene:

$$\vec{E}_2 = a\vec{E}_{ROTOR} \quad \text{Ecuación 1.63}$$

$E_2$  = voltaje inducido en el rotor equivalente

$E_{ROTOR}$  = voltaje inducido en el rotor físico

$$\vec{I}_2 = \frac{\vec{I}_{ROTOR}}{a} \quad \text{Ecuación 1.64}$$

$I_2$  = corriente en el rotor equivalente

$I_{ROTOR}$  = corriente en el rotor físico

$$Z_2 = a^2 Z_{ROTOR} \quad \text{Ecuación 1.65}$$

$Z_2$  = impedancia de dispersión a la frecuencia de deslizamiento

$Z_{ROTOR}$  = impedancia del rotor físico

La impedancia de dispersión se declara como:

$$Z_2 = r_2 + jSx_2 \quad \text{Ecuación 1.66}$$

$r_2$  = resistencia efectiva

$x_2$  = reactancia de dispersión a la frecuencia de deslizamiento

En la figura 1.37, se indica gráficamente la ecuación 1.66



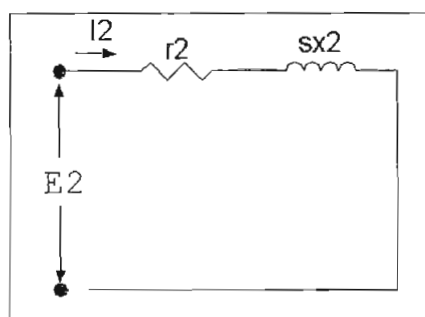


Figura 1.37: Rotor Equivalente

Para acoplar el circuito de estator y de rotor equivalente, se empatan o vinculan los voltajes generados en ambas partes a través del deslizamiento, debido a que el voltaje generado en el rotor varía proporcionalmente al voltaje generado en el lado primario, entonces:

$$\vec{E}_2 = S\vec{E}_1 \quad \text{Ecuación 1.67}$$

La corriente de carga debe ser igual a la corriente del rotor equivalente

$$\vec{I}_2 = \vec{I}_{CARGA} \quad \text{Ecuación 1.68}$$

Si se realiza la relación entre las ecuaciones 1.67 y 1.68 se obtiene el valor de la impedancia del rotor equivalente.

$$\frac{\vec{E}_2}{\vec{I}_2} = \frac{S\vec{E}_1}{\vec{I}_{CARGA}} = r2 + JSx2 \quad \text{Ecuación 1.69}$$

De la ecuación 1.69 se despeja el voltaje generado en el Estator y luego se divide para el deslizamiento y se obtiene:

$$\vec{E}_1 = \vec{I}_2 \left( \frac{r2}{S} + Jx2 \right) \quad \text{Ecuación 1.70}$$

De esta manera se obtiene el circuito equivalente del motor asincrónico.

En la figura 1.38 se indica el circuito equivalente por fase obtenido.

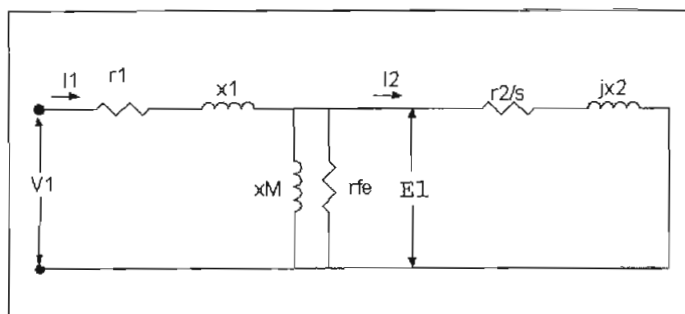


Figura 1.38: Circuito Equivalente

### 1.5.2 CIRCUITO EQUIVALENTE APROXIMADO<sup>22</sup>.

Pueden establecerse diversos esquemas de circuitos equivalentes de un motor asíncrono que se diferencien en la precisión y en las hipótesis simplificadoras aceptadas. El circuito teóricamente exacto aplica o suma la rama de magnetización, entre las constante del rotor y las del estator (ver figura 1.38). En el circuito equivalente aproximado se admite que la rama magnetizante esté derivada de los terminales de la fase tal como se indica en la figura 1.39, en vez de estar derivada entre las constante del rotor y del estator. En esta forma se desprecia la de tensión producida por este componente en la impedancia del estator, de modo que la potencia suministrada al estator resulta aumentada.

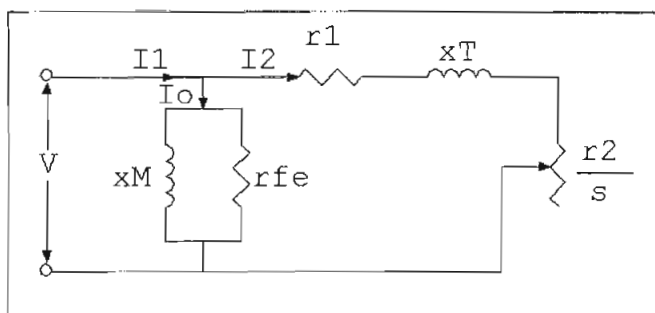


Figura 1.39: Circuito Equivalente Aproximado

Los valores de las resistencias  $r_1$  y  $r_2$ , que por lo general se consideran numéricamente iguales cuya suma da el valor de  $R_{eq}$  (resistencia equivalente) y el valor de  $x_T$  resulta de la suma de las reactancias de dispersión  $x_1$  y  $x_2$ .

<sup>22</sup> Referencia Bibliográfica 5

## 1.6 DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA

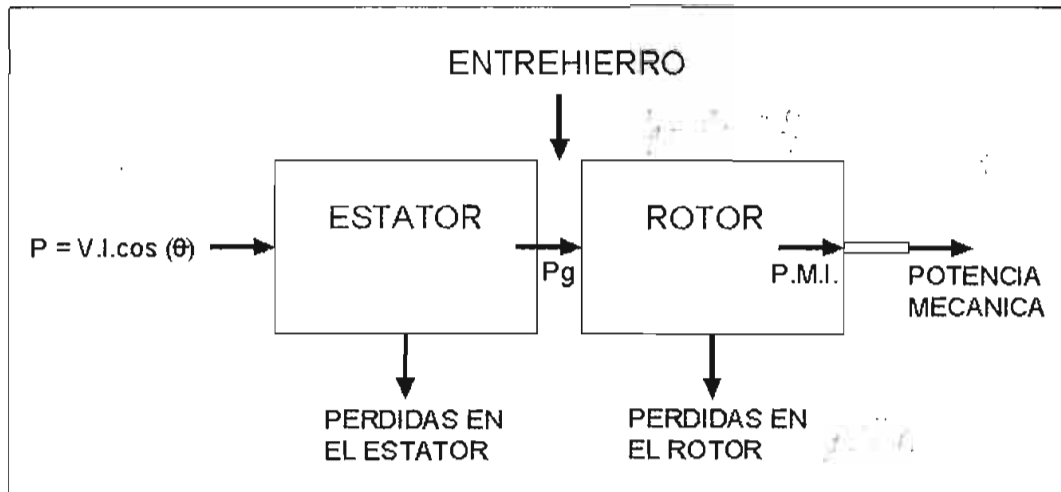


Figura 1.40: Flujos de Potencia en el Motor Asíncrono

En la figura 1.40 se muestra el flujo de potencia que ocurre en el motor asíncrono. La potencia eléctrica suministrada a los terminales del estator se define como:

$$P_1 = V_1 \times I_1 \times \cos \theta \quad \text{Ecuación 1.71}$$

Tanto en el estator como en el rotor se producen las pérdidas debido a la resistencia eléctrica. La potencia mecánica de salida difiere de la potencia eléctrica de entrada debido a las pérdidas no solo de carácter resistivo, sino también por factores de temperatura, fricción, ventilación y pérdidas extrañas que se dan por el funcionamiento del motor.

$$P_{MECANICA} = P_{ELECTRICA} - PERDIDAS \quad \text{Ecuación 1.72}$$

Para determinar las pérdidas, nos valemos del circuito equivalente. La potencia se determina como:

$$P = I^2 \times R \quad \text{Ecuación 1.73}$$

Las pérdidas en el estator son:

En la resistencia efectiva del estator:  $P_{R,EST} = I_1^2 \times r_1 \quad \text{Ecuación 1.74}$

En el núcleo o rama en paralelo del estator:  $P_\phi = V_1 I_\phi \cos \phi_0 \quad \text{Ecuación 1.75}$

Las pérdidas en el rotor son:

En la resistencia efectiva del rotor:  $P_{R.ROT} = I_2^2 \times r_2$  Ecuación 1.76

Ahora, se define la potencia mecánica interna del motor como:

$$P_{MEC.INTER} = I_2^2 \times r_2 \times \left( \frac{1-S}{S} \right) \quad \text{Ecuación 1.77}$$

Con lo cual, la potencia que se transmite desde el estator hacia el rotor a través del entrehierro, será la suma de la potencia mecánica interna y las pérdidas del rotor. Esto se evidencia en la ecuación 1.78

$$P_{TRANS.E-R} = I_2^2 \times \left( \frac{r_2}{S} \right) \quad \text{Ecuación 1.78}$$

El torque interno se define como la relación entre la potencia mecánica interna y la velocidad de rotación del rotor.

$$T_{INTERNO} = \frac{P_{MEC.INT}}{\omega_{ROTOR}} \quad \text{Ecuación 1.79}$$

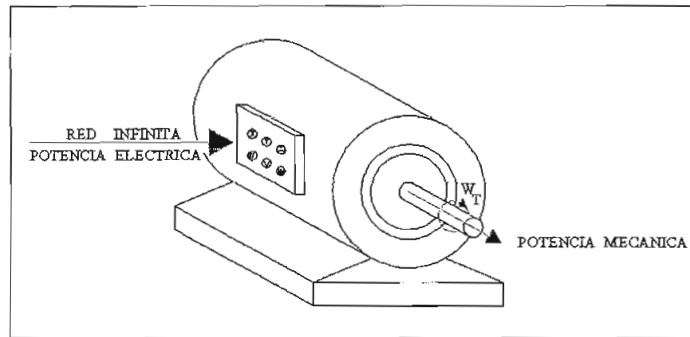
Al reemplazar las ecuaciones correspondientes se obtiene

$$T_{INTERNO} = I_2^2 \frac{r_2}{S} \times \frac{1}{\omega_s} \quad \text{Ecuación 1.79}$$

El torque interno y la potencia mecánica interna, no son los valores de salida disponibles en el eje debido a las pérdidas por funcionamiento. Para obtener los valores disponibles de estas dos variables, se debe restar estas pérdidas.

## 1.7 TIPIFICACIÓN DE PÉRDIDAS

Como la máquina eléctrica está constituida fundamentalmente por materiales magnéticos, conductores y aislantes se detallan las siguientes pérdidas.



### 1.7.1 PÉRDIDAS MECÁNICAS<sup>23</sup> ( $P_M$ )

Ocurren por el giro del rotor, corresponden a las pérdidas por ventilación forzosa, al roce del rotor con el aire y al roce en los cojinetes y en las escobillas. Además de la propia potencia que absorbe el ventilador.

### 1.7.2 PÉRDIDAS EN LOS CONDUCTORES ( $P_{cu}$ )

Corresponde a las pérdidas por efecto Joule en todos los devanados de la máquina y se cuantifican por:

$$P_{cu} = RI^2$$

Es conocido que la resistencia eléctrica de un material, es una medida de la facilidad con la que fluye la carga dentro del material<sup>24</sup>. Se define la resistencia eléctrica como la relación del voltaje a través del material a la corriente que pasa

<sup>23</sup> Referencia Bibliográfica 6

<sup>24</sup> Referencia Bibliográfica 7

por él. Las unidades de resistencia son voltios sobre amperios, pero se definió una unidad aparte, del SI, llamada el Ohm.

La resistencia de un conductor es proporcional a su longitud e inversamente proporcional al área de su sección transversal. Al combinar estos dos enunciados se define la resistividad ( $\rho$ ):

$$\rho \equiv R \times \frac{A}{L}$$

$\rho$  no depende de las dimensiones del conductor, sólo del tipo de material.

En algunos materiales, sus resistividades tienen una fuerte dependencia de la temperatura. Dicha dependencia térmica se puede representar por la siguiente aproximación lineal:

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

El parámetro  $\alpha$  ( $0,0039$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) $^{-1}$  para el cobre) es el coeficiente de temperatura para la resistividad, y  $\rho_0$  ( $1,72 \times 10^{-8}$   $\Omega \cdot \text{m}$  para el cobre) es la resistividad de la temperatura de referencia,  $T_0$ , que, normalmente, es  $20^{\circ}\text{C}$ .

Las resistividades de la mayor parte de los metales aumentan con la temperatura, hablando en términos generales, la mayor temperatura provoca mayores vibraciones en los átomos de las redes, lo cual, a su vez, impiden con mayor eficacia el movimiento de los electrones que se desplazan.

### 1.7.3 PÉRDIDAS EN EL HIERRO O NÚCLEO ( $P_H$ )

En todas las partes ferromagnéticas de la máquina se producen pérdidas por corriente de excitación, Foucault e histéresis; que se traducen en un calentamiento del motor.

Las pérdidas del hierro o núcleo se han tipificado 5 clases:

1. Pérdidas en los devanados de estator debido a la corriente de excitación.
2. Pérdidas en los devanados de estator por corrientes de Foucault.

3. Pérdidas en el núcleo o hierro por corrientes de Foucault.
4. Pérdidas por histéresis.
5. Pérdidas de altas frecuencias.

### 1.7.3.1 Las Pérdidas en los Devanados de Estator debido a la Corriente de Excitación

Son constantes bajo cualquier carga. La corriente de excitación es aquella corriente adicional del estator necesaria para crear el flujo de entrehierro resultante y es función de la fuerza contraelectromotriz, esta corriente es la diferencia vectorial de las corrientes de estator y rotor. Es conocido que esta se divide en dos componentes: la corriente de pérdidas en el núcleo y la corriente de magnetización.

$$\text{Pérdidas en los devanados de estator} = I_{\phi}^2 R_{\text{estator}}$$

### 1.7.3.2 Pérdidas en los Devanados de Estator por Corrientes de Foucault.

Las Corrientes de Foucault son corrientes eléctricas inducidas en los materiales conductores y magnéticos, como consecuencia de la variación del flujo magnético.

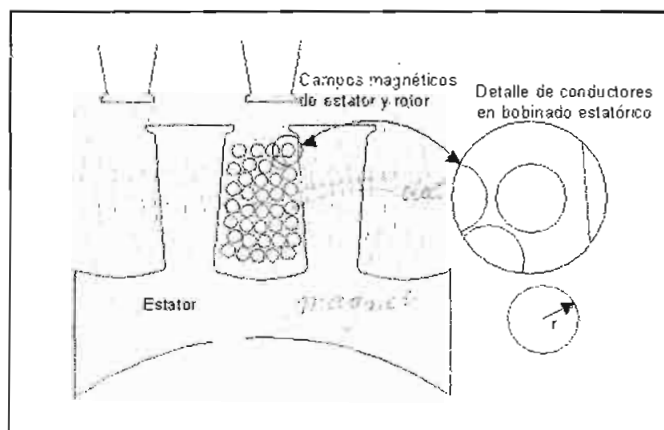


Figura 1.42: Acción de Campos sobre Conductor

En la figura se intenta bosquejar la acción magnética en un conductor de estator por la presencia de los campos de rotor y estator.

Si el radio del conductor es "r" se puede definir las pérdidas en el conductor por corrientes de Foucault a través de la siguiente ecuación:

$$P_{FOUCAULT} = \frac{\pi^3 \cdot [r \cdot f \cdot B]^2}{\rho} \cdot 10^{-06}$$

Siendo:

$\rho$  = resistividad del material

f = frecuencia

B = flujo magnético.

Estas pérdidas son de bajo valor y generalmente se las incluye en las pérdidas del cobre del estator.

### 1.7.3.3 Pérdidas en el Núcleo o Hierro por Corrientes de Foucault.

Es conocido que para inhibir el desarrollo de las corrientes de Foucault se realiza la laminación del núcleo. En la figura 1.43 se traza las dimensiones (n x m) de la "cara polar" de la chapa, así como el flujo que le atraviesa:

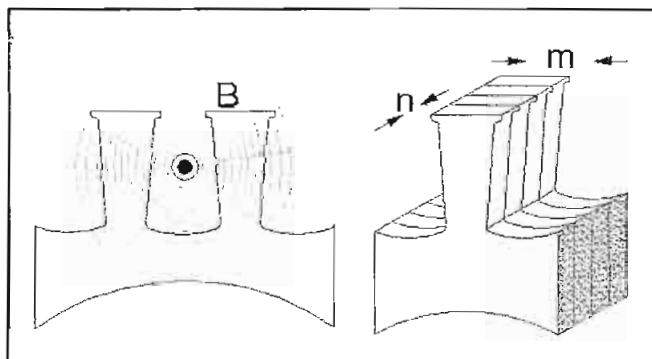


Figura 1.43: Dimensiones de la Cara Polar del Núcleo



Con lo cual estas pérdidas son proporcionales a la resistividad del material, espesor de la lámina, al cuadrado de la frecuencia y al cuadrado de la inducción máxima e inversamente proporcional al peso específico del material.

$$P_{Fe \text{ FOUCAULT}} = kf \times f^2 \times B^2 \cong k V^2$$

Donde:

$$Kf = \text{constante de Foucault} \cong 1 \times 10^{-6} \cdot \frac{\rho}{\delta} \cdot (m \cdot n)^2$$

$\delta$  = peso específico

$\rho$  = resistividad

$m \cdot n$  = espesor de la lámina.

$f$  = frecuencia industrial

$B$  = densidad de flujo.

$V$  = voltaje aplicado.

#### 1.7.3.4 Pérdidas por Histéresis.

Histéresis<sup>25</sup>: es la relación entre el campo magnético  $B$  y la intensidad magnética  $H$ . Para cuantificarla se utiliza un solenoide:

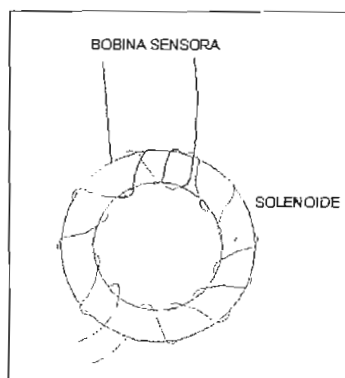


Figura 1.44: Solenoide con Bobina Sensora

$$B = \mu_0 n I$$

Siendo:

<sup>25</sup> Referencia Bibliográfica 7

$\mu_0$  = permeabilidad del material

$n$  = número de espiras por unidad de longitud.

$I$  = la corriente que circula por la estructura.

$B$  se mide con una bobina sensora. Al gráfico siguiente se le conoce como curva de magnetización.

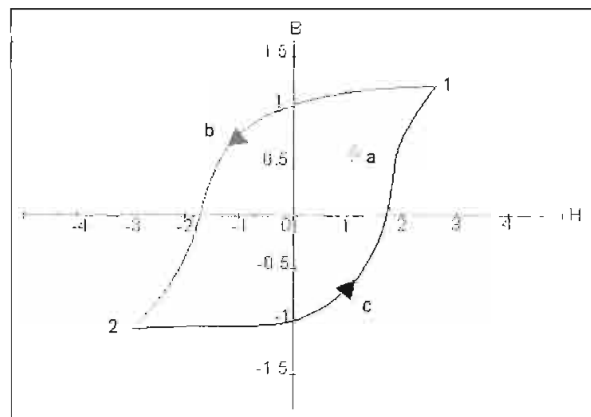


Figura 1.45: Curva de Magnetización

Una curva de magnetización con esta forma se le llama ciclo de histéresis y muestra el fenómeno de histéresis.

La presencia de la histéresis indica que hay una irreversibilidad del proceso de magnetización.

Se cuantifican las pérdidas por histéresis por:

$$P_{HISTERESIS} = KH \cdot f \cdot B^2$$

Donde:

$KH$  = constante de histéresis  $\cong 0.048$

$f$  = frecuencia industrial.

$B$  = densidad de flujo.

### 1.7.3.5 Pérdidas de Altas Frecuencias.

Estas pérdidas están constituidas por: pérdidas de pulsos y pérdidas superficiales. Se manifiestan por fricción en la superficie del estator y del rotor, afectando al torque desarrollado y por ende reducen la velocidad de giro.

#### 1.7.3.5.1 Pérdidas de pulsos<sup>26</sup>

La distribución del flujo en el entrehierro no es sinusoidal, esto ocurre por la existencia de ranuras o dientes en el estator y el rotor.

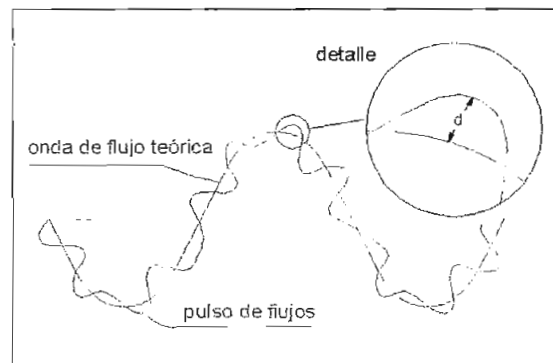


Figura 1.46: Distribución de Flujo

La frecuencia del pulso es:

$$\text{En estator: } f_{pe} = \frac{n}{60} \cdot e$$

$$\text{En rotor: } f_{pr} = \frac{n}{60} \cdot h$$

Donde:

$n$  = velocidad de giro del rotor en RPM.

$e$  = número de ranuras del estator.

$h$  = número de ranuras de rotor.

<sup>26</sup> Referencia Bibliográfica II

La magnitud del pulso depende de la abertura de los dientes del rotor, la distancia entre las ranuras del rotor.

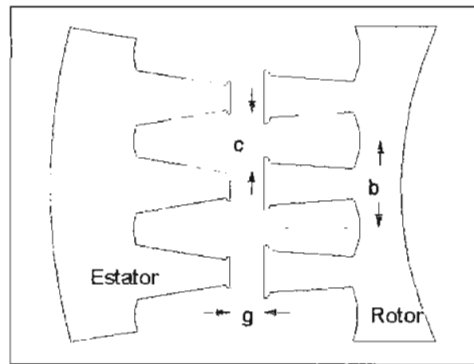


Figura 1.47: Dimensiones de los Dientes del Núcleo

Tal como se indica en la siguiente ecuación:

$$pulso = \frac{c}{2 \cdot b - 3c}$$

#### 1.7.3.5.2 Pérdidas superficiales

Al ocurrir los pulsos, se generan las pérdidas superficiales; si la lámina o chapa es de espesor "m.n" estas pérdidas se cuantifican como:

$$P_{SUPERFICIALES} = K_f \cdot \left( \frac{pulso}{g} \right)^2 \cdot B^2$$

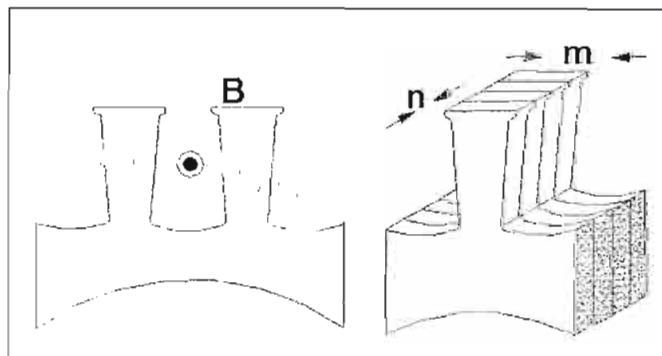


Figura 1.48: Dimensiones del Espesor de las Láminas

Donde:

$K_f$  = constante de Foucault.

$g$  = entrehierro

Con lo cual las pérdidas de alta frecuencia se definen como:

Pérdidas de alta frecuencia =  $P$  superficiales longitud del núcleo.

En resumen, las pérdidas en el hierro o núcleo tienen 5 componentes, las cuales están ligadas o se cuantifican de acuerdo a las dimensiones de las chapas, la resistividad y el tipo de material utilizado para su construcción.

## **CAPÍTULO 2**

### **DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS PROPUESTOS POR LAS NORMAS IEC 34-2 Y ANSI IEEE 112.**

#### **2.1 INTRODUCCIÓN**

El 15 de septiembre de 1904, los delegados al Congreso Internacional Eléctrico, que se sostuvo en St. Louis, EE.UU., adoptaron un informe que incluyó las palabras siguientes: "se debe afianzar el co-funcionamiento de las sociedades técnicas del mundo, por la designación de una Comisión de delegados para considerar la regularización, la nomenclatura y evaluaciones de los aparatos eléctricos y las maquinarias." Como resultado, se fundó oficialmente el IEC en junio de 1906, en Londres Inglaterra, donde se instaló su Oficina Central. En 1938 el IEC produjo la primera edición del Vocabulario Electrotécnico Internacional (IEV). En 1948 la Oficina Central del IEC se trasladó de Londres a Ginebra, Suiza. El IEC es la organización principal global que prepara y publica normas internacionales de todas las tecnologías eléctricas, electrónicas y relacionadas. Éstas sirven como una base para la regularización nacional y como referencias cuando existen ofertas internacionales y contratos. Las normas internacionales de IEC facilitan el comercio en el mundo debido a que quita barreras técnicas comerciales.

En 1916 el Instituto Americano de Ingenieros Eléctricos (ahora IEEE) invitó la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME), Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), Instituto Americano de Ingeniería en Minería y Metalurgia (AIMME) y la Sociedad Americana de Comprobación de Materiales (ASTM) para establecer un cuerpo nacional que trabaje en el desarrollo de las normas. Es así que en 1918 se fundó el ANSI por cinco sociedades de ingenieros y tres agencias gubernamentales. En toda su historia, el ANSI ha mantenido como su meta primaria el perfeccionamiento de competitividad global de EE.UU.

## 2.2 NORMA IEC 34-2<sup>27</sup>

La norma IEC 34-2 tiene por objetivo definir los métodos de determinación de la eficiencia de las máquinas eléctricas rotativas a partir de ensayos. Es aplicable a todas las máquinas eléctricas rotativas de todas las dimensiones, se excluyen las máquinas para vehículos de tracción.

Algunos tipos especiales de máquinas, tales como las conmutatrices, motores de colector y motores asincrónicos monofásicos pueden exigir la aplicación de otros métodos de determinación de pérdidas, pero sin embargo, los principios contenidos en la presente norma pueden adaptarse para la definición de dichos métodos.

### 2.2.1 GENERALIDADES

Los ensayos se efectuarán con una máquina en perfecto estado, con todos sus elementos montados en perfecto estado y en funcionamiento normal.

Los aparatos de medida y sus accesorios tales como los transformadores de medida, shunts y puentes utilizados durante estos ensayos serán de una clase de precisión que no exceda 0,2.

Los aparatos de medida se elegirán de forma que proporcionen lecturas en la parte útil de la escala, tales que se pueda fácilmente estimar una fracción de división que corresponda a una proporción de la lectura real.

La velocidad de rotación se medirá con ayuda de un contador numérico o de un tacómetro.

Para la medida del deslizamiento, se determinará la velocidad de sincronismo a partir de la frecuencia de la corriente de alimentación en el curso del ensayo.

---

<sup>27</sup> International Electrotechnical Commission. Rotating electrical machines part 2, Methods for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from test Geneva Amendment 2, 1996, 21 pages.

### 2.2.2 TERMINOLOGÍA<sup>28</sup>

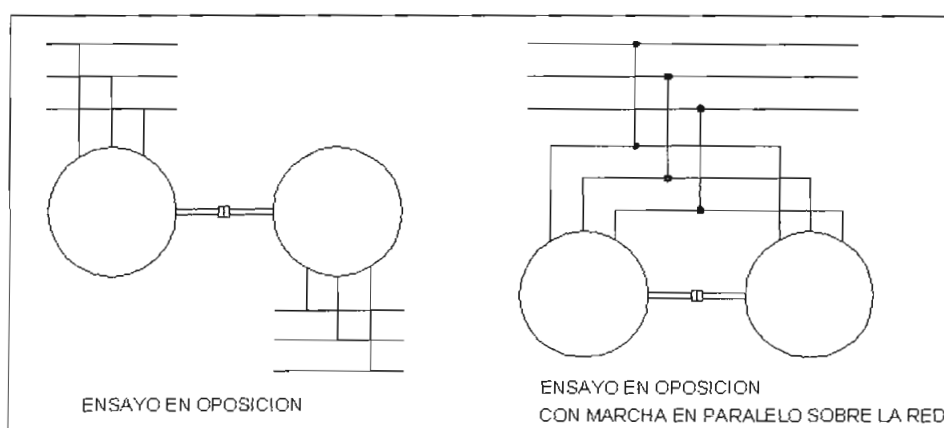
**EFICIENCIA:** Relación de la potencia útil a la potencia absorbida, expresadas en las mismas unidades que se indican, generalmente en forma porcentual.

**PÉRDIDAS TOTALES:** Diferencia entre la potencia absorbida y la potencia útil.

**ENSAYO DE FRENO:** Ensayo en el cual la potencia mecánica de salida de una máquina que funciona como motor, se determina a partir de la medición del torque del eje, con un freno o dinamómetro y la medida simultánea de la velocidad de rotación.

**ENSAYO CON LA MÁQUINA AUXILIAR CALIBRADA:** Ensayo en el cual la potencia mecánica absorbida o generada por una máquina eléctrica, se calcula a partir de la potencia eléctrica de entrada o de salida de una máquina auxiliar calibrada y aplicada mecánicamente a la máquina en ensayo.

**ENSAYO EN OPOSICIÓN:** Ensayo en el cual se acoplan mecánicamente dos máquinas idénticas calculándose las pérdidas totales por diferencias de las potencias eléctricas que una absorbe y la otra suministra. (Fig. 2.1)



*Figura 2.1: Ensayos en Oposición*

<sup>28</sup> Norma IEC 34-2, Sección 4



**ENSAYO EN OPOSICIÓN CON MARCHA EN PARALELO SOBRE LA RED:** Ensayo en el cual dos máquinas idénticos se acoplan mecánicamente y se conectan ambas a la red, la cual suministra la energía eléctrica correspondiente a las pérdidas totales de ambas.

**ENSAYO DE DESACELERACIÓN:** Ensayo en el cual las pérdidas de una máquina se calculan de la fase de desaceleración de la máquina, cuando únicamente estas pérdidas están presente.

**ENSAYO EN VACÍO:** Ensayo en el cual una máquina funciona como motor sin proporcionar potencia mecánica útil en el eje.

**ENSAYO EN CIRCUITO ABIERTO:** Ensayo en el cual una máquina funciona con sus bornes en circuito abierto.

**ENSAYO CALORIMÉTRICO:** Ensayo en el cual se determinan las pérdidas de la máquina a partir de la cantidad de calor que producen.

### 2.2.3 TEMPERATURA DE REFERENCIA<sup>29</sup>.

Las pérdidas  $I^2R$  se deben corregir temperaturas presentadas a continuación:

CLASE TÉRMICA DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO	TEMPERATURA DE REFERENCIA °C
A,E	75
B	95
F	115
H	130

*Tabla 2.1*

<sup>29</sup> Norma IEC 34-2, Sección 5

#### 2.2.4 MÉTODOS DE ENSAYO<sup>30</sup>

Los ensayos se pueden clasificar dentro de una de las tres siguientes categorías:

- Medida de la potencia absorbida y de la potencia útil de una sola máquina.  
Ello implica en general la medida de la potencia mecánica absorbida o suministrada por la máquina.
- Medida de la potencia absorbida y de la potencia útil de dos máquinas en oposición, por ejemplo dos máquinas idénticas o una máquina a ensayar acoplada a una máquina calibrada. Tiene por objeto eliminar la medida de la potencia mecánica absorbida o suministrada por una máquina.
- Medida de las pérdidas reales de una máquina bajo determinadas condiciones. Estas pérdidas no son en general las pérdidas totales pero comprenden ciertas pérdidas particulares. El método puede en todo caso ser aplicado para calcular las pérdidas totales o para calcular las pérdidas particulares.

La elección del ensayo a efectuar depende de los datos a determinar, de la precisión deseada, del tipo y de las dimensiones de la máquina considerada.

Cuando se disponen de varios métodos de ensayos para un tipo dado de máquina, se indicará el método preferente<sup>31</sup>.

Se distingue entre medidas de eficiencia directa e indirecta. La medida directa de la eficiencia consiste en medir directamente la potencia suministrada por la máquina y la potencia que ella absorbe. La medida indirecta de la eficiencia consiste en medir las pérdidas de la máquina añadiendo estas pérdidas a la potencia suministrada por la máquina, con esto se obtiene la potencia absorbida. La medida indirecta de la eficiencia puede ser efectuada por los métodos siguientes.

- Determinación de las pérdidas separadas para su posterior adición.
- Determinación de las pérdidas totales.

---

<sup>30</sup> Norma IEC 34-2, Sección 6

<sup>31</sup> Norma IEC 34-2 Sección 9.1.3.2

Los métodos para la determinación de la eficiencia de la máquina se apoyan sobre un cierto número de hipótesis; no es por tanto posible establecer una comparación entre las pérdidas obtenidas por medición directa y las obtenidas por medición de las pérdidas separadas.

## **2.2.5 PÉRDIDAS<sup>32</sup> EN LA MÁQUINA ASINCRÓNICA**

### **2.2.5.1 Pérdidas Constantes**

- a) Pérdidas en el hierro y pérdidas adicionales en vacío en otras partes metálicas
- b) Pérdidas debidas a fricción.
- c) Las pérdidas totales por ventilación en la máquina, incluyendo la potencia absorbida por los ventiladores y por las máquinas auxiliares que forman parte integral de la misma. Las pérdidas en las máquinas auxiliares como ventiladores externos, bombas de agua y de aceite que no forman parte integrante de la máquina pero que están destinados exclusivamente a la máquina en cuestión, se deben incluir únicamente si existe un acuerdo previo.

### **2.2.5.2 Pérdidas con Carga**

- Pérdidas  $I^2R$  (por efecto Joule) en los devanados primarios.
- pérdidas  $I^2R$  (por efecto Joule) en los devanados secundarios.
- Pérdidas eléctricas en las escobillas (si las hay)

### **2.2.5.3 Pérdidas Adicionales con Carga**

- Pérdidas adicionales introducidas por la carga en el hierro y otras partes metálicas diferentes a los conductores.

---

<sup>32</sup> Norma IEC 34-2, Sección 8

- Pérdidas por corrientes de Foucault en los conductores de devanados primarios o secundarios debidas a la pulsación del flujo dependiente de la corriente.

## 2.2.6 DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA<sup>33</sup>

**Totalización de Pérdidas:** La eficiencia se puede calcular a partir de la Totalización de pérdidas, las cuales se consideran como la suma de las pérdidas determinadas en la siguiente forma:

### 2.2.6.1 Pérdidas Constantes

Para su determinación se promueven tres ensayos:

- ensayo en vacío a la tensión nominal.
- ensayo con máquina auxiliar calibrada.
- ensayo en vacío a la tensión variable.

El ensayo recomendado es: ensayo en vacío a la tensión nominal. Permite determinar la totalización de las pérdidas constantes. El ensayo con máquina auxiliar calibrada es referente a un método directo e implica medir con exactitud los parámetros de la máquina acoplada así como las pérdidas que ésta presenta. El ensayo en vacío a la tensión variable permite la separación de las pérdidas constantes.

#### 2.2.6.1.1 *Ensayo en vacío a la tensión nominal.*

La suma de las pérdidas independientes de la intensidad, se determina por el método de la marcha en vacío del motor. La máquina se alimenta a su tensión y frecuencia nominales. La potencia absorbida, disminuida en las pérdidas por efecto Joule en el arrollamiento primario ( $RI^2$ ) da el total de las pérdidas

---

<sup>33</sup> Norma IEC 34-2, Sección 8

independientes de la intensidad. Las pérdidas por efecto Joule en el arrollamiento secundario ( $RI^2$ ) se pueden despreciar.

#### *2.2.6.1.2 Ensayo en vacío a la tensión variable.*

Las pérdidas definidas en el numeral a) y la suma de las pérdidas definidas en el numeral b) y c), también se pueden determinar por separado haciendo funcionar la máquina como un motor en vacío a su frecuencia nominal, pero a diferentes tensiones.

La potencia absorbida, menos las pérdidas  $I^2R$  (pérdidas por efecto Joule) en el devanado primario se grafica sobre un diagrama en función del cuadrado de la tensión. Se obtiene así, a bajas saturaciones, una línea recta que se puede extrapolar hasta un valor nulo de la tensión para dar la suma de las pérdidas de b) y c). Se debe tener en cuenta que a tensión muy baja las pérdidas graficadas en el diagrama pueden ser altas debido al aumento de las pérdidas en el devanado secundario cuando el deslizamiento aumenta. Esta parte del diagrama no se debe tener en cuenta cuando se está trazando la línea recta.

#### **2.2.6.2 Pérdidas con carga (Pérdidas normales dependientes de la intensidad).**

Para su determinación se realizan tres ensayos:

- Ensayo con carga a tensión nominal.
- Valores calculados.
- Ensayo con carga a tensión reducida.

Los ensayos con carga a tensión nominal y tensión reducida son ensayos directos. Las pérdidas son calculadas a la intensidad correspondiente de la carga aplicada.

El método preferente es el de valores calculados, se determinan los parámetros de la máquina de ensayo.

### 2.2.6.2.1 *Método de los valores calculados*

Las Pérdidas  $I^2R$  (por efecto Joule) en los devanados primarios se calculan a partir de las resistencias de los arrollamientos primarios, medidos con corriente continua y reducida a la temperatura de referencia. Para los motores de rotor devanado, las pérdidas  $I^2R$  del devanado secundario se pueden calcular a partir de las resistencias, medidas con corriente continua y corregida a la temperatura de referencia y de la corriente secundaria deducida de un circuito equivalente, teniendo en cuenta la verdadera relación de transformación de la máquina. El tipo de diagrama circular que se debe utilizar debe ser establecido mediante un acuerdo entre el fabricante y el comprador. Para el ensayo en carga, las pérdidas en las escobillas, no pueden medirse directamente. Éstas se deben interpretar como el producto de la corriente que fluye en las escobillas por una caída de tensión determinada. La caída de tensión en todas las escobillas de una misma fase debe ser equivalente a 1 voltio para las escobillas de carbón o en grafito, y a 0.3 voltios para las escobillas de carbón metalizado.

### 2.2.6.3 **Pérdidas adicionales con carga.**

Salvo especificación contraria se admite que las pérdidas adicionales con carga varían como el cuadrado de la intensidad primaria y que su valor total a plena carga es igual al 0,5% de la potencia nominal absorbida para los motores

$$\text{Pérdidas adicionales con carga} = (\text{Potencia absorbida}/200) \text{ (W)}$$

## 2.2.7 **MEDICIÓN DIRECTA DE LA EFICIENCIA**<sup>34</sup>

Los métodos directos que se promueven son 4:

- Ensayo al freno
- Ensayo con máquina auxiliar calibrada.

---

<sup>34</sup> Norma IEC 34-2, Sección 9.3

- Ensayo en oposición.
- Ensayo en oposición con marcha en paralelo sobre la red.

Como se ha mencionado la medida directa de la eficiencia consiste en medir directamente la potencia suministrada por la máquina y la potencia que ella absorbe.

En la sección 2.2.2 TERMINOLOGÍA, se describe cada ensayo.

## **2.3 NORMA ANSI IEEE-112**<sup>35</sup>

La norma da instrucciones para dirigir de manera general los ensayos para determinar las características de funcionamiento de los motores y generadores polifásicos asincrónicos.

### **2.3.1 MEDICIONES ELÉCTRICAS**<sup>36</sup>

- Todas las cantidades medidas son valores rms a menos que se especifique otra cosa
- El suministro de energía deberá tener una forma de onda sinusoidal y proporcionar voltajes equilibrados.
- Los instrumentos de medida serán seleccionados para dar indicaciones en la parte adecuada de la escala, donde se estime un fragmento de una división fácilmente.
- Las ensayos deberán ser realizadas para un desbalance de voltaje que no exceda el  $\pm 0.5\%$
- Las corrientes de líneas deberán ser medidas para cada fase del motor.

---

<sup>35</sup> AMERICAN NATIONAL STANDARD, IEEE. Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. New York, 1978, 31 pages.

<sup>36</sup> ANSI IEEE 112, Sección 3

### 2.3.2 CORRECCIÓN A UNA TEMPERATURA ESPECÍFICA<sup>37</sup>

Para la corrección de la resistencia a una temperatura específica se empleará la siguiente ecuación:

$$R_s = R_t \left( \frac{t_s + k}{t_t + k} \right) \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde:

$R_s$  = Resistencia corregida a una específica temperatura.

$R_t$  = Valor de resistencia de ensayo.

$t_s$  = Temperatura específica.

$t_t$  = Temperatura de ensayo.

$k$  = Constante de valor 234,5 para cobre.

### 2.3.3 EFICIENCIA<sup>38</sup>

Es la relación de la potencia de salida a la potencia de entrada. La potencia eléctrica es medida directamente. La potencia mecánica puede ser medida directamente u obtenida por la sustracción de pérdidas de la potencia eléctrica.

Se tienen cuatro métodos para determinar la eficiencia, tres de los cuatro son métodos de medición directa en los cuales la potencia eléctrica y mecánica son medidas directamente. La diferencia entre los tres métodos se encuentra en la manera de medir la potencia mecánica. El método indirecto determina las pérdidas de la máquina de manera individual.

Los métodos son los siguientes:

- Método del freno
- Método del dinamómetro

<sup>37</sup> ANSI IEEE 112, Sección 4.1.3

<sup>38</sup> ANSI IEEE 112 Sección 4.2



- Método de máquinas duplicadas
- Método de pérdidas separadas

### 2.3.3.1 Método de Pérdidas Separadas<sup>39</sup>

La potencia de entrada será medida como se indica en el método E o calculado como se describe en el método F. La potencia de salida será determinada por la sustracción de las pérdidas de la potencia de entrada.

Las pérdidas de la máquina asincrónica son:

Tipo de pérdidas	Descripción
(a) Fricción y ventilación	Pérdidas mecánicas debido a fricción de cojinetes y ventilación.
(b) núcleo	Pérdidas en el acero
(c) $I^2 R$ del estator	$I^2 R$ de los bobinados del estator
(d) $I^2 R$ del rotor	$I^2 R$ de los bobinados del rotor
(e) pérdidas extrañas	Pérdidas en el acero y pérdidas por corrientes de Eddy en los conductores.

Tabla 2.2

#### 2.3.3.1.1 Método E<sup>40</sup>

Para obtener los datos requeridos, es necesario se acoplar a la máquina en ensayo a través de correas o engranajes a una carga variable. Este permitirá determinar la medición de la potencia de entrada, además se requiere obtener datos de resistencia de estator, corrientes de línea, voltaje en terminales, deslizamiento y pérdidas.

#### 2.3.3.1.2 Método F<sup>41</sup>: Cálculo del Circuito Equivalente

Cuando no se hacen ensayos bajo carga, las características de operación son calculadas de la impedancia sin carga y de los datos del circuito equivalente.

<sup>39</sup> ANSI IEEE 112 Sección 4.2.3

<sup>40</sup> ANSI IEEE 112 Sección 4.2.3.1

<sup>41</sup> ANSI IEEE 112. Sección 4.2.3.2

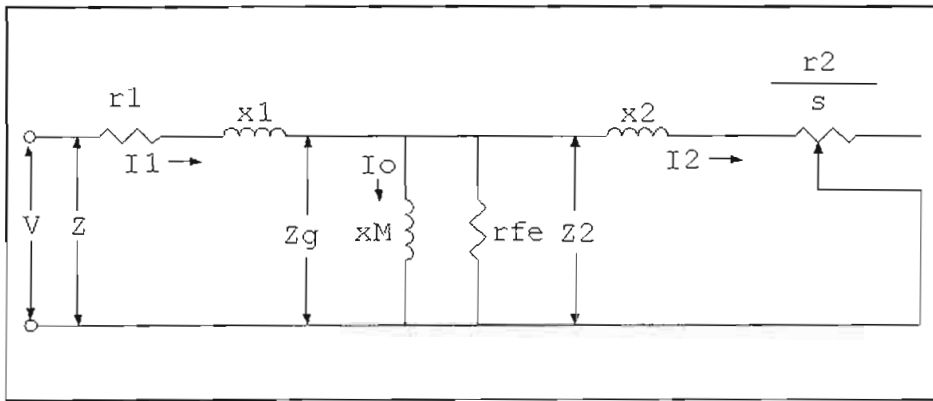


Figura 2.2: Circuito Equivalente

### 2.3.4 PÉRDIDAS<sup>42</sup>

#### 2.3.4.1 Pérdidas del Estator $I^2R$ .

En vatios son iguales a:

$$1.5 I^2 R \text{ para 3-fases}$$

$$2.0 I^2 R \text{ para 2-fases}$$

Donde  $I$  es la corriente rms medida o calculada por terminal y  $R$  es la resistencia de corriente directa entre cualquiera de las dos líneas terminales corregida a una temperatura específica.

#### 2.3.4.2 Pérdidas del Rotor $I^2R$

Las pérdidas  $I^2R$  del rotor incluidas las pérdidas de los contactos de las escobillas, para rotor devanado deben ser determinadas del deslizamiento utilizando las ecuaciones siguientes:

Pérdidas  $I^2R$  del rotor como motor = (mediciones de potencia de entrada del estator – pérdidas  $I^2R$  del estator – pérdidas del núcleo) x deslizamiento.

<sup>42</sup> ANSI IEEE 112. Sección 4.3

### 2.3.4.3 Pérdidas del Núcleo, Fricción y Ventilación

La lectura de potencia de entrada es el total de las pérdidas en el motor sin carga. Sustrayendo las pérdidas  $I^2R$  del estator de la potencia de entrada se obtiene la suma de las pérdidas del núcleo, fricción y ventilación.

La separación de las pérdidas del núcleo de las pérdidas de fricción y ventilación se puede hacer por lecturas de voltaje, corriente, y potencia de entrada a valor de frecuencia y voltaje que oscila del 125 por ciento de valor de voltaje.

Se traza una curva de potencia de entrada contra voltaje la curva así obtenida se extiende a cero voltaje. La intercepción en cero con el eje del voltaje son las pérdidas por fricción y ventilación.

La intercepción se determina con precisión si se traza la entrada de potencia en contra del cuadrado del voltaje para valores menores al rango de voltaje. Un ejemplo de estas curvas se muestra en la figura 2.3

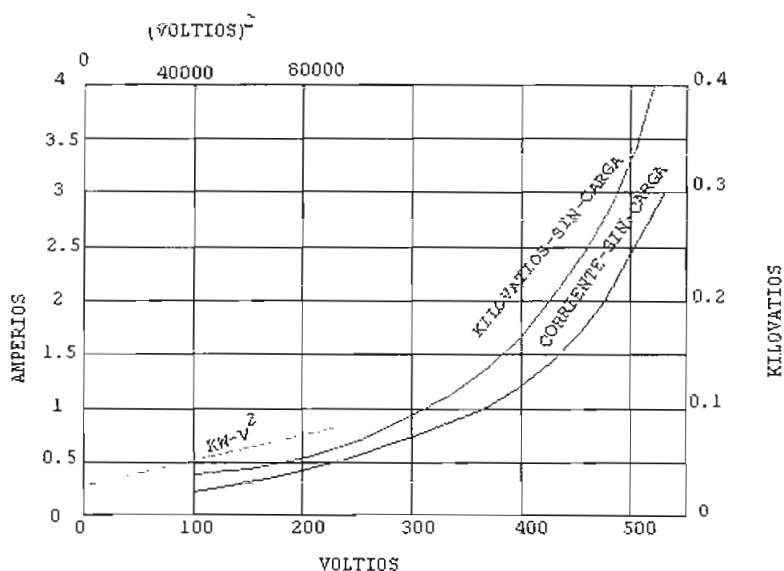


Figura 2.3: Extrapolación de Curvas

### 2.3.4.4 Pérdidas Extrañas con Carga<sup>43</sup>

#### 2.3.4.4.1 Medición Directa<sup>44</sup>

Las pérdidas extrañas con carga ocurridas a frecuencia fundamental pueden ser determinadas al aplicar corrientes polifásicas balanceadas a los terminales del bobinado del estator con el rotor removido. La entrada de potencia eléctrica menos las pérdidas  $I^2 R$  del estator a la resistencia de ensayo es igual a las pérdidas extrañas con carga a frecuencia fundamental.

Durante este ensayo los cojinetes y otras partes estructurales en los que se puede inducir corrientes deben estar en su lugar. La corriente usada para hacer este ensayo se identificará como  $I_t$

Las pérdidas extrañas con carga ocurridas a altas frecuencias pueden ser determinadas con un ensayo de rotación-inversa. Con el motor completamente ensamblado, voltaje polifásico balanceado es aplicado a los terminales del estator. El rotor es manejado por medios externos a la velocidad sincrónica en la dirección opuesta a la rotación del campo del estator. La potencia eléctrica de entrada es medida. Las pérdidas extrañas con carga (sll) deben ser calculadas como siguen:

$$sll = LLs + LLr$$

En esta ecuación los valores de  $LLs$  y  $LLr$  son para los mismos valores de corrientes  $I_t$  de los bobinados de estator.

Donde:

$LLs = W_s$  – pérdidas  $I^2R$  de los bobinados del estator.

Las pérdidas  $I^2R$  del devanado de estator deben ser el producto de el numero de fases,  $I_t^2$ , y  $r_1$  tomadas en cada punto de carga.

<sup>43</sup> Pérdidas Extrañas con carga = Stray-load loss

<sup>44</sup> Norma ANSI IEEE 112, Sección 4.3.4.2

$LLr = (Pr - Pf) - (Wr - LLs - \text{pérdidas } I^2R \text{ de los bobinados del estator})$

Las pérdidas  $I^2R$  del devanado de estator deben ser el producto de el número de fases,  $I^2t$ , y  $r_1$  tomadas en cada punto de carga.

$LLs =$  pérdidas extrañas con carga a frecuencia fundamental.

$LLr =$  pérdidas extrañas con carga a altas frecuencias.

$r_1 =$  resistencia de fase del estator. Para una máquina trifásica se toma como la mitad de la resistencia entre terminales.

$Pr =$  potencia requerida para manejar el rotor al aplicar voltajes en los bobinados del estator.

$Pf =$  potencia requerida para manejar el rotor sin aplicar voltajes en los bobinados del estator.

$Ws =$  potencia eléctrica de entrada en los bobinados del estator con el rotor Removido

$Wr =$  potencia eléctrica de entrada en los bobinados del estator durante la ensayo de rotación inversa.

## 2.4 REVISIÓN GENERAL DE LOS MÉTODOS PROPUESTOS.

El concepto de Eficiencia se define de forma análoga en ambas normas.

En la siguiente tabla se puede observar los métodos de medición directa que las normas proponen para calcular la eficiencia, cabe recordar que el método de medición directa consiste en medir la potencia eléctrica de consumo y la potencia mecánica de entrega.

Método Propuesto	Norma IEC 34-2	Norma ANSI IEEE 112
Freno o Dinamómetro	Si	Si
Máquina auxiliar trabada o máquinas duplicadas	Si	Si
En oposición	Si	Si
En oposición con marcha en paralelo sobre la red	Si	Si

*Tabla 2.3*

La eficiencia del motor asincrónico también puede ser medida por el método de medición indirecta. La norma IEC propone como el ensayo preferente el método de "Totalización de Pérdidas" y la norma ANSI IEEE aunque no lo admite como el método predilecto indica el método de "Pérdidas Separadas".

Ambos métodos se basan en la determinación de las pérdidas ocurridas en la máquina, con lo cual la eficiencia se determina por la relación entre la potencia de entrada menos las pérdidas, a la potencia de entrada.

#### **2.4.1 COMPARACIÓN ENTRE ENSAYOS**

En la norma IEC 34-2 se indica el ensayo a realizar de acuerdo al tipo de pérdidas a determinar, de manera similar, la norma ANSI IEEE 112 indica el tipo de pérdidas y el ensayo correspondiente.

Para resumir el tipo de ensayo indicado en cada norma, en la tabla 2.4 se ha reunido la información acerca de las pérdidas y el ensayo a efectuarse.

Tipo de Pérdidas	ENSAYOS A EFECTUAR		Observaciones
	Norma IEC 34-2	Norma ANSI IEEE 112	
Norma IEC 34-2 Pérdidas constantes Norma ANSI IEEE 112 Pérdidas en el Núcleo, Fricción, Ventilación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensayo en Vacío a tensión nominal.</li> <li>• Ensayo en vacío a tensión Variable.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensayo en Vacío a tensión nominal</li> <li>• Ensayo en vacío a tensión Variable</li> </ul>	Las pérdidas constantes definidas así en la norma IEC 34-2 son las correspondientes a las pérdidas en el núcleo, fricción y ventilación descritas en la norma ANSI IEEE 112.
Pérdidas por efecto Joule $I^2R$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Circuito equivalente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Circuito equivalente.</li> </ul>	Para establecer el circuito equivalente, se procede a determinar los parámetros del motor asíncrono esto es medir la resistencia estática y realizar los ensayos de: vacío, vacío acoplado y rotor bloqueado.
Norma IEC 34-2 Pérdidas adicionales Norma ANSI IEEE 112 Pérdidas extrañas con carga a baja y alta frecuencia (stray load loss)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asumir 0.5 % de potencia nominal de entrada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensayo de variación de corriente</li> <li>• Ensayo de Rotación Inversa</li> </ul>	

Tabla 2.4

En el capítulo 3, se realiza la descripción del procedimiento de cada ensayo.

## CAPÍTULO 3

### ENSAYOS PROPUESTOS EN NORMAS

#### 3.1 GENERALIDADES

Las mediciones se efectúan con instrumentación analógica y digital.

A continuación se presenta un resumen del instrumento digital "Power Logic", tomado del manual de instrucciones indicado en la referencia 17.

##### 3.1.1 INSTRUMENTACIÓN DIGITAL: EL POWER LOGIC<sup>45</sup>

Es un dispositivo de instrumentación digital, adquisición de datos y control de múltiples funciones.



*Figura 3.1: El Power Logic*

Está equipado con un puerto de comunicaciones RS-485 que facilita la integración con un sistema de monitoreo y control. Proporciona valores rms verdadero capaz de producir mediciones con una buena precisión de cargas altamente no lineales. La pantalla de LED con capacidad de seis dígitos permite visualizar más de 50 valores medidos.

---

<sup>45</sup> SQUARE D. INSTRUCTION BULLETINS No 3020IM9807. POWER LOGIC CIRCUIT MONITOR SERIES 2000 INSTALLATION AND OPERATION. December 1998 La Vergne, TN USA



### 3.1.1.1 Descripción de la Tornillería

En la figura 3.2 se muestra un detalle de la parte frontal del Power Logic. A continuación aparece una descripción del mismo.

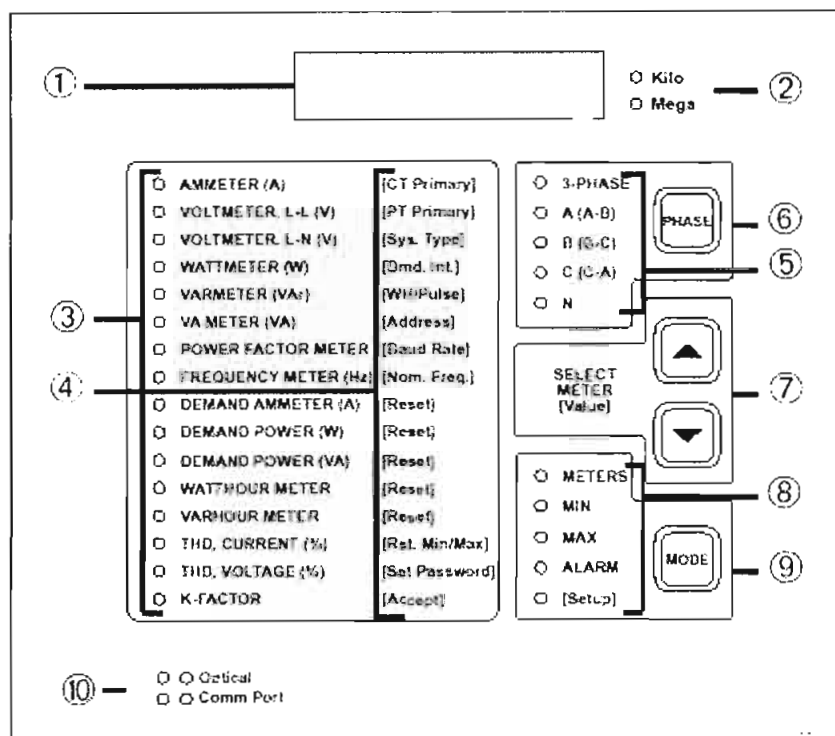


Figura 3.2: Detalle de la Parte Frontal del Power Logic

1. Pantalla de LED de 6 dígitos. Para la presentación local de valores medidos.
2. LED Kilo/Mega. El LED Kilo se ilumina cuando se muestra el valor en millares.
3. LED indicadores del medidor. El LED iluminado indica el valor mostrado.
4. Parámetros de instalación y restablecimiento. Estos valores atenuados mostrados entre corchetes se utilizan para instalar el Power Logic.
5. LED indicadores de fase. Indican la fase del valor mostrado.
6. Botón de selección PHASE (fase). selecciona la fase.
7. Botones SELECT METER (seleccionar medidor). Presione estos botones para cambiar el valor medido mostrado.
8. LED indicadores del modo. Estos LED indican el modo de presentación actual.
9. Botón de selección MODE (modo). selecciona el modo de presentación.
10. Puerto de comunicaciones ópticas.

### 3.1.1.2 Parte Posterior del Power Logic

En la figura 3.3 se muestra la parte posterior del Power Logic

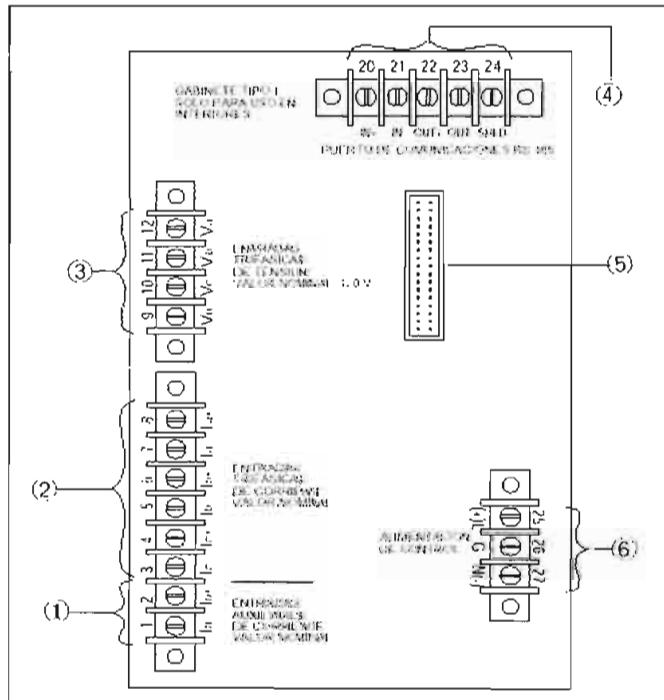


Figura 3.3: Parte Posterior Del Power Logic

1. Entradas auxiliares de corriente
2. Entradas trifásicas de corriente
3. Entradas trifásicas de tensión
4. Terminales del puerto de comunicaciones RS-485
5. Conector del módulo de entrada /salida
6. Terminales de alimentación de control

En el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela Politécnica Nacional se ha implementado un gabinete de madera, en el cual se ha albergado al instrumento. El mencionado gabinete permite el transporte del aparato sin dificultad; se le ha provisto de protecciones equivalentes de IEC 947 y le han colocado terminales adecuados que permiten la conexión con la parte posterior del aparato.

### 3.1.1.3 Conexión del Power Logic

En la figura 3.4 se indica la conexión del Power Logic que se utiliza en los ensayos respectivos.

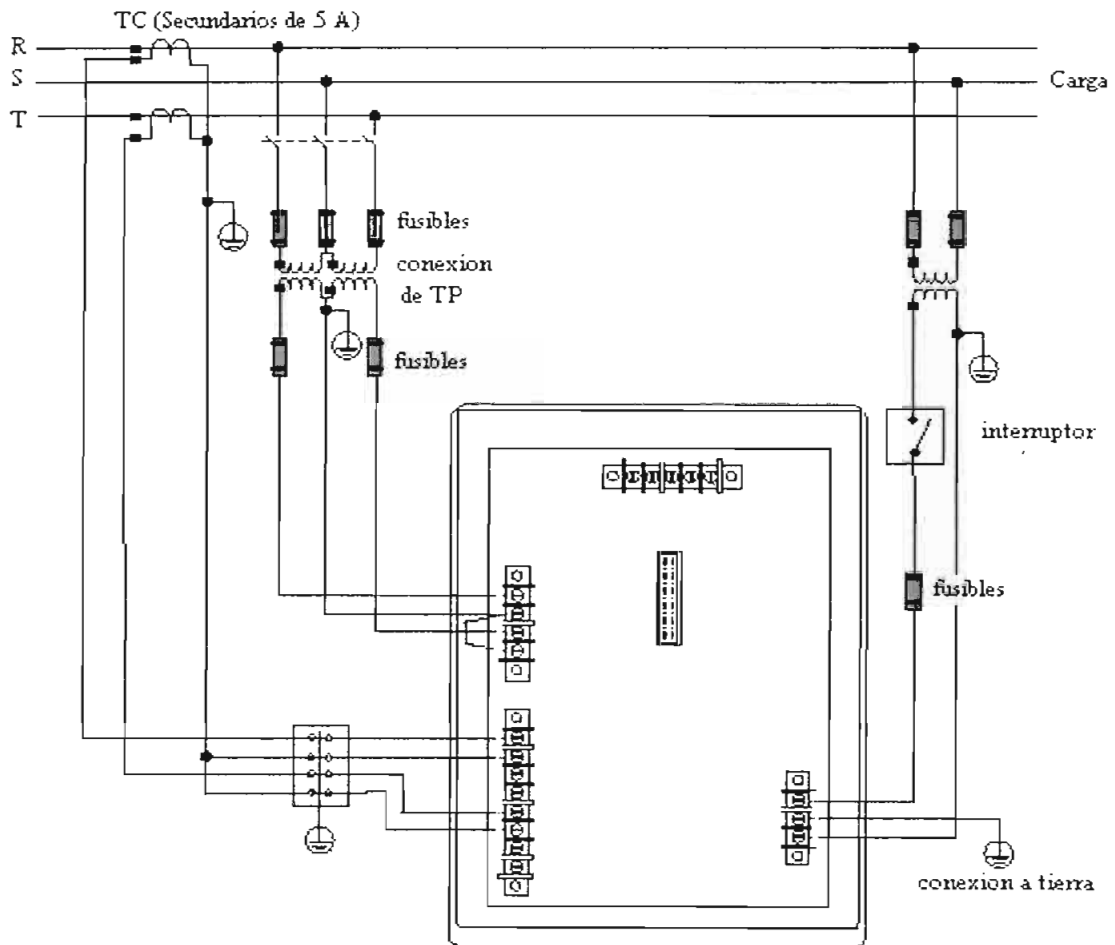


Figura 3.4: Conexión Delta 3 Fases y 3 Hilos

### 3.1.1.4 Parámetros de Medición

El Power Logic permite realizar lecturas en tiempo real, lecturas de energía, lecturas de demanda y valores de análisis de la energía. A continuación se resumen los parámetros de medición.

#### 3.1.1.4.1 Lecturas en tiempo real

- Corriente por fase y trifásicas.
- Tensión, línea línea, línea neutro
- Potencia real, Potencia reactiva y Potencia aparente, por fase y trifásica
- Factor de potencia, por fase y trifásica.
- Frecuencia, temperatura, THD (corriente y tensión), factor K.

#### 3.1.1.4.2 Lecturas de energía

- Energía acumulada, real, reactiva y aparente

#### 3.1.1.4.3 Lecturas de demanda

- Corriente de demanda
- Factor de Potencia media
- Potencia real, reactiva y aparente de demanda

#### 3.1.1.4.4 Valores de análisis de la energía

- Factor de Cresta
- Demanda del factor K
- Desplazamiento del factor de potencia
- Tensión y corriente fundamentales.
- Potencia real fundamental
- Potencia armónica
- Desequilibrio
- Rotación de fase
- Ángulos y magnitudes armónicas.

### 3.1.2 MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA<sup>46</sup>

Para la medición de la resistencia del devanado estático se emplearán dos métodos de medición:

- a.- Método del VOLTÍMETRO AMPERÍMETRO
- b.- Método del PUENTE DE WHEATSTONE.

#### 3.1.2.1 Método del Voltímetro Amperímetro.

En la figura 3.3 se puede distinguir las dos variantes de este método.

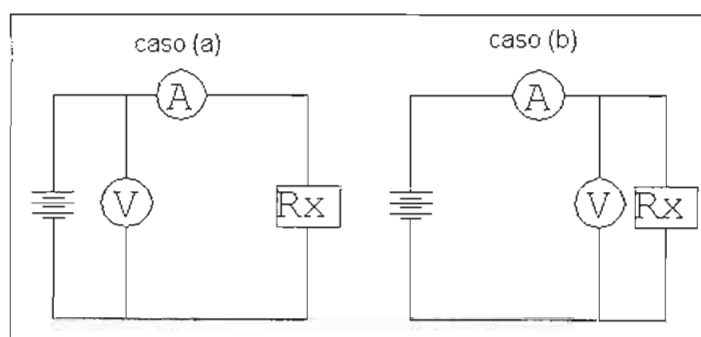


Figura 3.3: Método del Voltímetro Amperímetro

El caso (a) es conexión con error por voltaje, permite mejor exactitud en la medición de resistencias altas; al caso (b) se tiene conexión con error en la corriente y es mejor para medir resistencias bajas.

Las ecuaciones para determinar la resistencia desconocida y el error absoluto son:

Caso a  $R_x = \frac{V}{I} - R_a$       Error absoluto:  $\epsilon = R_a$

Caso b  $R_x = \frac{V}{I - \frac{V}{R_v}}$       Error absoluto:  $\epsilon = V / R_v$

<sup>46</sup> Referencia Bibliográfica 10

Donde:

$R_x$  = resistencia desconocida.

$V$  = lectura de voltaje.

$I$  = lectura de corriente

$R_a$  = resistencia del amperímetro.

$R_v$  = resistencia del voltímetro.

### 3.1.2.2 Método del Puente de Wheatstone.

El puente de Wheatstone es un cuadrilátero constituido por dos resistencias fijas de valor conocido (A y B), un reóstato (P), un galvanómetro, una fuente de corriente continua (E) y la resistencia en investigación (X).

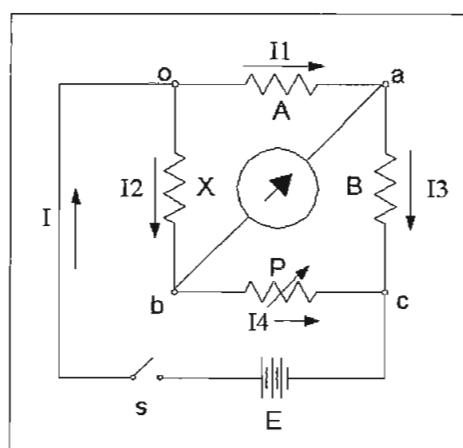


Figura 3.4: Conexión del Puente de Wheatstone

En este puente la resistencia desconocida se equilibra con otras resistencias de valores conocidos. A los extremos a y b del puente se conecta un galvanómetro y entre o y c se conecta una fuente de corriente continua o batería. Los brazos A y B están ordinariamente formados con valores en potencia de 10 ó múltiplos de 10 con el objeto de que el error sea lo menos posible. Se dice que el puente está balanceado cuando al variar P hacemos que el galvanómetro marque cero, en estas condiciones podríamos hacer el análisis matemático.

Si:

$$I_1 = I_3 \quad \text{e} \quad I_2 = I_4$$

Si a y b están al mismo potencial  $E_{oa} = E_{ob}$   
 Y por consiguiente:  $I_1 A = I_2 X$  (A)  
 Por las mismas consideraciones:  $E_{ac} = E_{bc}$   $I_3 B = I_4 P$   
 Y por ser:  $I_1 = I_3$ ;  $I_2 = I_4$  entonces  $I_1 B = I_2 P$  (B)

Si dividimos (A) para (B) tendremos:

$$\frac{I_1 A}{I_1 B} = \frac{I_2 X}{I_2 P} \quad ; \quad \frac{A}{B} = \frac{X}{P} \quad \text{De donde: } X = \frac{A}{B} P$$

De donde la ecuación final es la del puente de wheatstone, además A y B los brazos de relación y P brazo de equilibrio del puente.

### 3.1.2.3 Resultado de Medición

Las mediciones se efectuaron antes y después de realizar los ensayos de ensayo.

- Los ensayos son realizados en el motor ubicado en la mesa número 11 del laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela Politécnica Nacional, cuyos datos técnicos son:

CETEL	BRUXELLES	
TIPO: S611	No.17	F: 60 Hz
V: 220/380	A: 7/4.04	T min: 1800
HP: 3	FASES: 3	

#### 3.1.2.3.1 Método del Voltímetro Amperímetro con Error por Corriente

##### Equipo utilizado:

- Amperímetro

Marca: YEW\*

---

\* YOKOGAWA ELECTRIC WORKS LTD

Tipo: 2011

Escalas: 1A / 3A / 10A / 30 A

Clase: 0,5

Drop: 50 mV

- Voltímetro

Marca: YEW

Tipo: 2011

Escalas: 30 V / 100 V / 300 V / 1000 V

Clase: 0,5

Relación  $\Omega/V$ : 1000  $\Omega/V$

### Desarrollo

Se armó el circuito indicado en la figura 3.3 caso b, conexión con error en la corriente ya que permite mejor precisión en la medición de resistencias de bajo valor.

Conociendo que:  $R_x = \frac{V}{I - \frac{V}{R_v}}$  Y el error absoluto es:  $\varepsilon = V / R_v$

Se midió en la escala de 30 V con lo que  $R_v = 30 \text{ V} \times 1000 \text{ } \Omega/V = 30\,000 \text{ } \Omega$

### Tabla de Datos y Cálculos

Lecturas	Voltaje (v)	Corriente (A)	Error absoluto (%)	Rx calculada ( $\Omega$ )
Lectura 1	8	4,8	0,026	1.66
Lectura 2	8	4,6	0,026	1.74
Lectura 3	8	4,7	0,026	1.70
Promedio				1.7
Intervalo de error				$\pm 0.04$

*Tabla 3.1*

El valor de la resistencia por el método Voltímetro amperímetro es:  **$1.7 \pm 0.04 \text{ } \Omega$**



### 3.1.2.3.2 Método del Puente de Wheatstone

#### Equipo utilizado:

- Resistencias:

A y B: 89  $\Omega$ , 2.2 A marca CENCO

P: 44  $\Omega$ , 3.1 A marca CENCO

Donde:

A y B = brazos de relación.

P = brazo de equilibrio.

#### Desarrollo

Se armó el circuito indicado en la figura 3.4

La resistencia desconocida se calcula como:  $X = \frac{A}{B} P$

Se aplicó 15 voltios (DC) y se equilibró el puente con la resistencia P.

#### Tabla de Datos y Cálculos

Lecturas	P ( $\Omega$ )	X calculada ( $\Omega$ )
Lectura 1	1.6	1.6
Lectura 2	1.6	1.6
Lectura 3	1.7	1.7
	Promedio	1.63
	Intervalo de error	$\pm 0.05$

*Tabla 3.2*

El valor de la resistencia por el método del puente es: **1.63  $\pm$  0.05  $\Omega$**

### 3.1.2.4 Análisis de Resultados

En el siguiente cuadro se resumen los resultados obtenidos.

MÉTODO	R calculada ( $\Omega$ )
Voltímetro-Amperímetro	$1.7 \pm 0.04 \Omega$
Puente de Wheatstone	$1.63 \pm 0.05 \Omega$

*Tabla 3.3*

Para escoger el valor de la resistencia del devanado estatórico, se procederá ha establecer los valores máximos y mínimos de las mediciones realizadas, este análisis permite determinar el intervalo de los valores de resistencia comunes determinados en ambos métodos y que son válidos para la realización de los cálculos pertinentes. Con el método del voltímetro-amperímetro el valor de la resistencia es de  $1.7 \pm 0.04 \Omega$  lo que implica que el valor más alto será de  $1.74 \Omega$  y el mínimo será de  $1.66 \Omega$ . En el caso del puente de Wheatstone el valor de la resistencia medida es  $1.63 \pm 0.05 \Omega$  siendo el valor más alto  $1.68 \Omega$ . y el mínimo será de  $1.58 \Omega$ . con estos valores se puede determinar que el intervalo común se inicia en  $1.66 \Omega$  y llega a  $1.68 \Omega$ . Se escogerá el valor de  $1.67 \Omega$  por ser un valor que se encuentra dentro del intervalo aceptado.

## 3.2 ENSAYOS EN EL MOTOR ASINCRÓNICO

El motor en investigación se encuentra acoplado a una máquina de corriente continua, la misma que servirá para hacer girar al motor asincrónico a la velocidad sincrónica. La máquina tiene los siguientes datos técnicos.

*Marca:* CETEL BRUXELLES *Tipo:* S 611  
*E:* 110 V *V:* 110 *A:* 22.7 *Tm:* 1800 *W:* 2500

### 3.2.1 ENSAYO EN VACÍO ACOPLADO

Ensayo recalado en ambas normas de acuerdo a la tabla 2.4

#### 3.2.1.1 Objetivo:

Separar las pérdidas de histéresis y corrientes de Foucault de las otras pérdidas.

### 3.2.1.2 Equipo Utilizado

- Máquina de Corriente Continua acoplada a máquina de ensayo.
- Resistencias
  - Marca: CENCO
  - R: 10  $\Omega$ -4,4 A (arranque) 357  $\Omega$ -3,1 A (control)
- Vatímetro de bajo factor de potencia.
  - Marca: YEW
  - Tipo: C1102 2041
  - Escalas: 1A, 5A, 120V, 240V.
  - Clase: 0.5
  - Características: posición horizontal,  $\text{Cos } \varphi=0.2$
- Voltímetro.
  - Marca: YEW
  - Tipo: 1607405
  - Escalas: 260/130/65 V
  - Clase: 0.5
  - E: 260V: 10mA 130/65 V: 19 mA.
  - Características: hierro móvil, bobina fija, tensión de ensayo superior a 500V.
- Amperímetro.
  - Marca: GOSSEN
  - Tipo: 1704 00143/1815647
  - Escalas: 12/24 A
  - Clase: 0.5
  - E: 12A: 3.5 m $\Omega$  - 3.7  $\mu$ H / 24 A: 2.2 m $\Omega$  - 14  $\mu$ H
  - Características: hierro móvil, bobina fija, tensión de ensayo superior a 500 V
- Estroboscopio.

Marca: General Radio Company

Tipo: 1531

V: 125 V

F: 50-60 Hz.

- Analizador industrial: Power Logic.

### 3.2.1.3 Información

De acuerdo a la norma IEC 34-2 sección 9.1.1.2 y la norma ANSI IEEE 112 sección 4.6.2 Las pérdidas constantes se pueden determinar por separado haciendo funcionar la máquina desconectada de la red, a la velocidad sincrónica por medio de un motor calibrado. En este ensayo el motor asincrónico es conducido a la velocidad sincrónica (1800 rpm), como el deslizamiento es cero, la corriente en el rotor es también cero y las pérdidas restantes (núcleo y ventilación) son proporcionadas por la máquina de corriente continua.

### 3.2.1.4 Procedimiento<sup>47</sup>

- Armar el circuito indicado en la figura 3.5 para medición con instrumentación analógica y la figura 3.6 para instrumentación digital.

*Con instrumentación analógica*

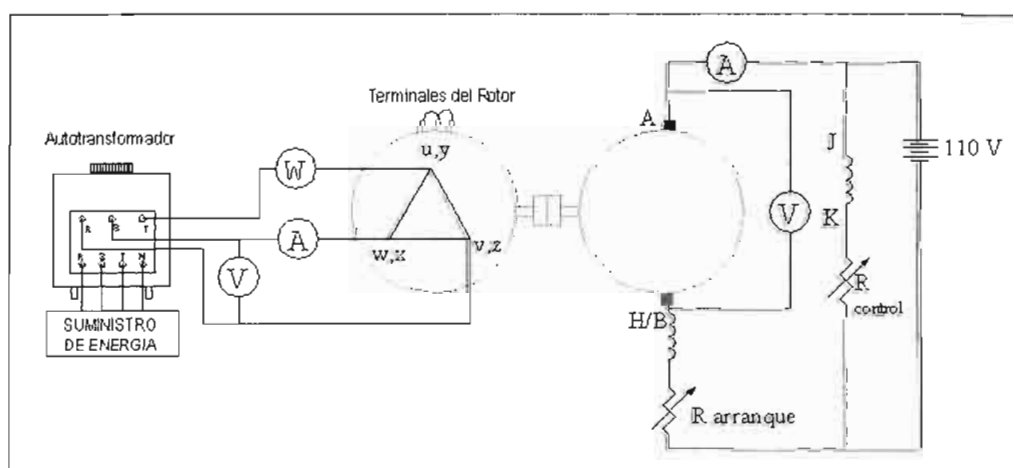


Figura 3.5

<sup>47</sup> Referencia Bibliográfica 18

### Con instrumentación digital

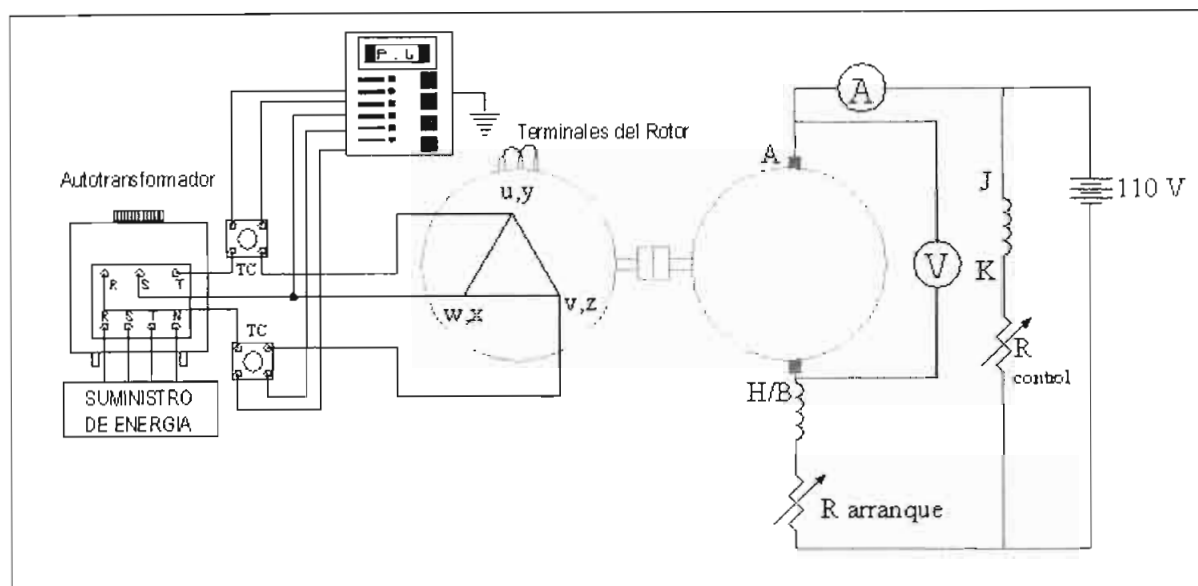


Figura 3.6

- b) Verificar que ambas máquinas giren en el mismo sentido.
- c) Accionar el motor de continua hasta que alcance la velocidad sincrónica del motor asincrónico, para lo cual se manipula la resistencia de control.
- d) Alcanzada la velocidad sincrónica, alimentar al motor asincrónico con voltaje nominal (según dato técnico de placa).
- e) Anotar lecturas de los valores de potencia, voltaje y corriente.

#### 3.2.1.5 Datos Obtenidos

##### Instrumentación Analógica

Ensayo	Potencia (W)	Voltaje (V)	Corriente (A)
Vacio acoplado	272.8	220	3.4

Tabla 3.4

##### Instrumentación Digital<sup>91</sup>

Ensayo	Potencia (W)	Voltaje (V)	Corriente (A)
Vacio acoplado	262.6	220	3.3

Tabla 3.5

<sup>91</sup> Los datos y gráficos obtenidos se indican en el anexo "lecturas del Power Logic"

### 3.2.2 ENSAYO EN VACÍO A LA TENSION NOMINAL

Ensayo determinado en ambas normas de acuerdo a la tabla 2.4

#### 3.2.2.1 Objetivo

Conocer las pérdidas del núcleo, fricción y ventilación del motor asincrónico.

#### 3.2.2.2 Equipo

- Motor asincrónico de ensayo.
- Vatímetro de bajo factor de potencia.  
Marca: YEW  
Tipo: C1102 2041  
Escalas: 1A, 5A, 120V, 240V.  
Clase: 0.5  
Características: posición horizontal,  $\text{Cos } \varphi=0.2$
- Voltímetro.  
Marca: YEW  
Tipo: 1607405  
Escalas: 260/130/65 V  
Clase: 0.5  
E: 260V: 10mA      130/65 V: 19 mA.  
Características: hierro móvil, bobina fija, tensión de ensayo superior a 500 V
- Amperímetro.  
Marca: GOSSEN  
Tipo: 1704 00143/1815647  
Escalas: 12/24 A  
Clase: 0.5  
E: 12A: 3.5 m $\Omega$  - 3.7  $\mu\text{H}$  /      24 A: 2.2 m $\Omega$  - 14  $\mu\text{H}$   
Características: hierro móvil, bobina fija, tensión de ensayo superior a 500 V

- Analizador industrial: Power Logic.

### 3.2.2.3 Información

De acuerdo a la norma IEC 34-2, Sección 9.1.1.1; Norma ANSI IEEE 112, Sección 4.6.2

La suma de las pérdidas constante, se determinan por el método de funcionamiento como motor en vacío. La máquina se alimenta a su tensión y frecuencia nominales. Se aplica voltaje nominal al motor sin carga, la potencia absorbida disminuida en las pérdidas  $I^2 R$  del estator es igual a las pérdidas del motor en vacío, que corresponden a las pérdidas en el núcleo, pérdidas por fricción y ventilación, pérdidas por histéresis y pérdidas de Foucault. El deslizamiento es pequeño y la resistencia referida del rotor es alta. No se toma en cuenta las pérdidas  $I^2 R$  (por efecto Joule) en el devanado secundario.

### 3.2.2.4 Procedimiento<sup>48</sup>

- Armar el diagrama indicado en la figura 3.7 y 3.8 para instrumentación analógica e instrumentación digital respectivamente.

Instrumentación analógica

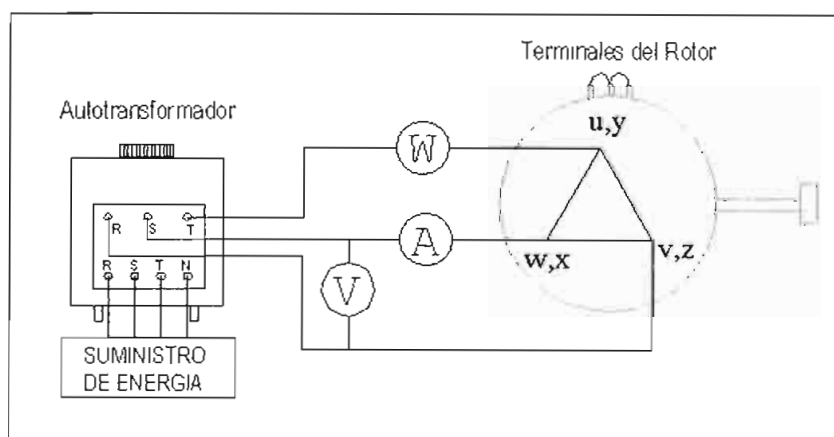


Figura 3.7

<sup>48</sup> Referencia Bibliográfica 18

## Instrumentación digital

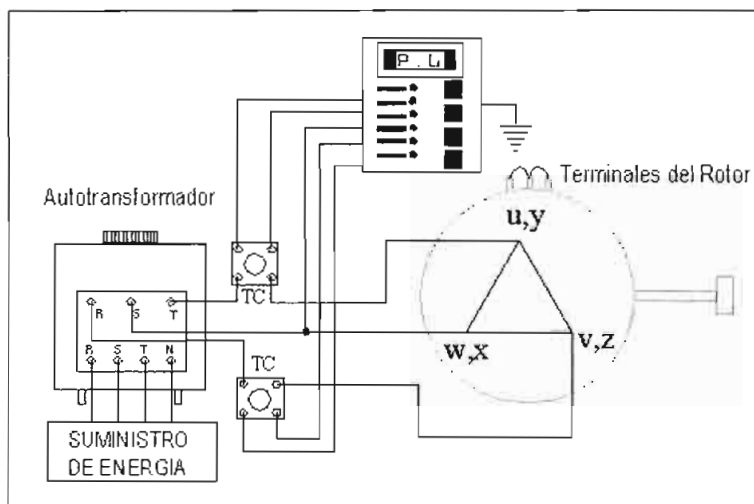


Figura 3.8

- b) Aplicar voltaje nominal (dato técnico de placa)
- c) tomar lecturas de potencia, voltaje y corriente.

## 3.2.2.5 Datos Obtenidos

## Instrumentación analógica

Ensayo	Potencia (W)	Voltaje (V)	Corriente (A)
Vacío a tensión nominal	442.35	220	3.56

Tabla 3.6

## Instrumentación digital

Ensayo	Potencia (W)	Voltaje (V)	Corriente (A)
Vacío a tensión nominal	421.78	220	3.39

Tabla 3.7



### 3.2.3 ENSAYO DE ROTOR BLOQUEADO

Ensayo determinado en ambas normas de acuerdo a la tabla 2.4

#### 3.2.3.1 Objetivo

Determinar las pérdidas a condición de deslizamiento unitario.

#### 3.2.3.2 Equipo Utilizado

- Motor asincrónico de ensayo.
- Autotransformador.
- Vatímetro de bajo factor de potencia.

Marca: YEW

Tipo: C1102 2041

Escalas: 1A, 5A, 120V, 240V.

Clase: 0.5

Características: posición horizontal,  $\text{Cos } \varphi=0.2$

- Voltímetro.

Marca: YEW

Tipo: 1607405

Escalas: 260/130/65 V

Clase: 0.5

E: 260V: 10mA      130/65 V: 19 mA.

Características: hierro móvil, bobina fija, tensión de ensayo superior a 500 V.

- Amperímetro.

Marca: GOSSEN

Tipo: 1704 00143/1815647

Escalas: 12/24 A

Clase: 0.5

E: 12A: 3.5 m $\Omega$  - 3.7  $\mu$ H      /      24 A: 2.2 m $\Omega$  - 14  $\mu$ H

Características: hierro móvil, bobina fija, tensión de ensayo superior a 500 V.

- Analizador industrial: Power Logic.

### 3.2.3.3 Información<sup>49</sup>

Al motor en ensayo se le aplica un nivel de voltaje que permita obtener la corriente nominal. El rotor debe estar bloqueado. En esas condiciones el rotor no gira, el deslizamiento es igual a la unidad, no hay pérdidas por fricción y ventilación.

### 3.2.3.4 Procedimiento<sup>50</sup>

- Amar el circuito indicado en el diagrama de la figura 3.7 y 3.8 correspondiente a la instrumentación analógica y digital respectivamente.
- Aplicar valor de voltaje para que circule corriente nominal (ver dato técnico de placa )
- Anotar lecturas de potencias, voltaje y corriente.

### 3.2.3.5 Datos Obtenidos

Instrumentación analógica

Ensayo	Potencia (W)	Voltaje (V)	Corriente (A)
Rotor bloqueado	331.82	48	7

Tabla 3.8

Instrumentación digital

Ensayo	Potencia (W)	Voltaje (V)	Corriente (A)
Rotor bloqueado	310.24	47	7.06

Tabla 3.9

<sup>49</sup> Norma IEC 34-2, Sección 9.1.2.2 y la norma ANSI IEEE 112, Sección 4.2.3.2.

<sup>50</sup> Referencia Bibliográfica 18

### 3.2.4 ENSAYO EN VACÍO A TENSIÓN VARIABLE

Ensayo reiterado en ambas normas de acuerdo a la tabla 2.4

#### 3.2.4.1 Objetivo

Determinar y separar las pérdidas del núcleo de las pérdidas de fricción y ventilación a través de extrapolación de curvas.

#### 3.2.4.2 Equipo Utilizado

- Motor asincrónico de ensayo.
- Autotransformador.
  
- Vatímetro de bajo factor de potencia.  
    Marca: YEW  
    Tipo: C1102 2041  
    Escala: 1A, 5A, 120V, 240V.  
    Clase: 0.5  
    Características: posición horizontal,  $\text{Cos } \varphi=0.2$
  
- Voltímetro.  
    Marca: YEW  
    Tipo: 1607405  
    Escala: 260/130/65 V  
    Clase: 0.5  
    E: 260V: 10mA      130/65 V: 19 mA.  
    Características: hierro móvil, bobina fija, tensión de ensayo superior a 500 V.
  
- Amperímetro.  
    Marca: GOSSEN  
    Tipo: 1704 00143/1815647

Escalas: 12/24 A

Clase: 0.5

E: 12A: 3.5 mΩ - 3.7 μH / 24 A: 2.2 mΩ - 14 μH

Características: hierro móvil, bobina fija, tensión de ensayo superior a 500 V.

- Analizador industrial: Power Logic.

### 3.2.4.3 Información<sup>51</sup>

Las pérdidas del núcleo y la suma de las pérdidas fricción y ventilación, se determinan por separado haciendo funcionar la máquina como un motor en vacío a su frecuencia nominal, pero a diferentes tensiones. La potencia absorbida, menos las pérdidas  $I^2R$  (pérdidas por efecto Joule) en el devanado primario se grafica sobre un diagrama en función del cuadrado de la tensión.

Se obtiene así, a bajas saturaciones, una línea recta que se puede extrapolar hasta un valor nulo de la tensión para dar la suma de las pérdidas de fricción y ventilación.

Se debe tener en cuenta que a tensión muy baja las pérdidas graficadas en el diagrama pueden ser altas debido al aumento de las pérdidas en el devanado secundario cuando el deslizamiento aumenta.

Esta parte del diagrama no se debe tener en cuenta cuando se está trazando la línea recta.

Las pérdidas por fricción y las totales por ventilación se obtienen por extrapolación a un valor cero de la tensión como se indicó anteriormente.

---

<sup>51</sup> Norma IEC 34-2, Sección 9.1.1.3 y a la Norma ANSI IEEE 112, Sección 4.6.2

Para separar las pérdidas en vacío que ocurren en el motor, se aplica valores de voltaje que oscilan hasta el 125% del valor nominal.

#### 3.2.4.4 Procedimiento

- a) Armar el circuito indicado en el diagrama de la figura 3.7 y 3.8 correspondiente a la instrumentación analógica y digital respectivamente.
- b) Aplicar pasos de valores de voltaje hasta el 125% del valor nominal.
- c) Tomar lectura de potencia, voltaje, corriente para cada paso de valor de voltaje.

#### 3.2.4.5 Datos Obtenidos

Instrumentación analógica

Pasos de voltaje	Voltaje (V)	Potencia (W)	Corriente (A)
Paso 1	50	182,40	1,1
Paso 2	60	186,27	1,2
Paso 3	80	205,85	1,3
Paso 4	100	221,49	1,5
Paso 5	120	261,16	1,6
Paso 6	140	313,68	2,1
Paso 7	160	332,31	2,4
Paso 8	180	356,69	2,7
Paso 9	200	404,66	3,2
Paso 10	220	445,20	3,6
Paso 11	230	471,70	3,6

Tabla 3.10

## Instrumentación digital

Pasos de voltaje	Voltaje (V)	Potencia (W)	Corriente (A)
Paso 1	50	175,104	1,05
Paso 2	60	178,818	1,09
Paso 3	80	197,168	1,24
Paso 4	100	220,314	1,44
Paso 5	120	245,178	1,49
Paso 6	140	285,133	1,95
Paso 7	160	315,018	2,25
Paso 8	180	352,422	2,57
Paso 9	200	388,469	3,04
Paso 10	220	427,392	3,37
Paso 11	230	442,832	3,40

Tabla 3.11

3.2.5 ENSAYO DE ROTACIÓN INVERSA<sup>52</sup>

## 3.2.5.1 Objetivo

Determinar las pérdidas extrañas con carga ocurridas a altas frecuencias.

## 3.2.5.2 Equipo Utilizado

- Máquina de Corriente Continua acoplada a máquina de ensayo.
- Resistencias  
 Marca: CENCO  
 R: 10  $\Omega$ -4,4 A (arranque) 357  $\Omega$ -3,1 A (control)
- Amperímetro para señal de corriente continua  
 Marca: YEW  
 Tipo: 2011

<sup>52</sup> Norma ANSI IEEE 112 sección 4.3.4.2.1

Escalas: 1A / 3A / 10A / 30 A

Clase: 0,5

Drop: 50 mV

- Voltímetro para señal de corriente continua

Marca: YEW

Tipo: 2011

Escalas: 30 V / 100 V / 300 V / 1000 V

Clase: 0,5

Relación  $\Omega/V$ : 1000  $\Omega/V$

- Vatímetro de bajo factor de potencia.

Marca: YEW

Tipo: C1102 2041

Escalas: 1A, 5A, 120V, 240V.

Clase: 0.5

Características: posición horizontal,  $\text{Cos } \varphi=0.2$

- Voltímetro.

Marca: YEW

Tipo: 1607405

Escalas: 260/130/65 V

Clase: 0.5

E: 260V: 10mA      130/65 V: 19 mA.

Características: hierro móvil, bobina fija, tensión de ensayo superior a 500V.

- Amperímetro.

Marca: GOSSEN

Tipo: 1704 00143/1815647

Escalas: 12/24 A

Clase: 0.5

E: 12A: 3.5 mΩ - 3.7 μH / 24 A: 2.2 mΩ - 14 μH

Características: hierro móvil, bobina fija, tensión de ensayo superior a 500 V

- Estroboscopio.  
Marca: General Radio Company  
Tipo: 1531  
V: 125 V  
F: 50-60 Hz.
  
- Analizador industrial: Power Logic.

### 3.2.5.3 Información<sup>53</sup>

Las pérdidas extrañas con carga ocurridas a altas frecuencias pueden ser determinadas con un ensayo de rotación-inversa. Se aplican voltaje polifásico balanceado a los terminales del estator del motor completamente ensamblado.

El rotor se hace girar por medios externos a la velocidad sincrónica en la dirección opuesta a la rotación del campo del estator.

La corriente usada para hacer este ensayo se identificará como It.

### 3.2.5.4 Procedimiento

- a) Armar el diagrama indicado en al figura 3.5 y 3.6
- b) Verificar que el sentido de giro del campo del estator del motor asincrónico sea contrario al de la máquina de continua.
- c) Llevar al motor asincrónico a velocidad sincrónica con ayuda de la máquina de corriente continua y realizar las lecturas de voltaje y corriente en motor de corriente continua.

---

<sup>53</sup> Norma ANSI IEEE 112 sección 4.3.4.2.1



- d) Alimentar con voltaje al motor en ensayo, de tal manera que circule corriente  $I_t$ .

$$\text{Siendo: } I_t = \sqrt{I_n^2 - I_m^2}$$

Donde:  $I_n$  = Corriente nominal.

$I_m$  = corriente en vacío o corriente de magnetización.

Para el presente proyecto,  $I_n = 7 \text{ A}$  e  $I_m = 3.48 \text{ A}$  (valor obtenido de la prueba de vacío a la tensión nominal) e  $I_t \approx 6.073 \text{ A}$

- e) Se anotan los valores de voltaje y corriente del motor de corriente continua y los valores de potencia, voltaje y corriente del motor de ensayo.

### 3.2.5.5 Datos Obtenidos

Instrumentación analógica

Corriente ~ (A)	Voltaje ~ (V)	Potencia W	Voltaje de armadura - (V)	Corriente de armadura - (A)
0	0	0	110	1.65
6.1	50	312.64	110	2.9

Tabla 3.12

Instrumentación digital<sup>54</sup>

Corriente ~ (A)	Voltaje ~ (V)	Potencia W	Voltaje de armadura - (V)	Corriente de armadura - (A)
0	0	0	110	1.6
6.08	47	345.13	110	2.9

Tabla 3.13

<sup>54</sup> Los valores de voltaje y corriente de armadura, no se midieron con el Power Logic, debido a que este analizador no realiza mediciones de señal continua.

### 3.2.6 ENSAYO DE VARIACIÓN DE CORRIENTE<sup>55</sup>

#### 3.2.6.1 Objetivo

Determinar las pérdidas a frecuencia fundamental.

#### 3.2.6.2 Equipo Utilizado

- Motor asincrónico de ensayo.
- Vatímetro de bajo factor de potencia.  
 Marca: YEW  
 Tipo: C1102 2041  
 Escalas: 1A, 5A, 120V, 240V.  
 Clase: 0.5  
 Características: posición horizontal,  $\text{Cos } \varphi=0.2$
- Voltímetro.  
 Marca: YEW  
 Tipo: 1607405  
 Escalas: 260/130/65 V  
 Clase: 0.5  
 E: 260V: 10mA      130/65 V: 19 mA.

Características: hierro móvil, bobina fija, tensión de ensayo superior a 500 V

- Amperímetro.  
 Marca: GOSSEN  
 Tipo: 1704 00143/1815647  
 Escalas: 12/24 A  
 Clase: 0.5  
 E: 12A: 3.5 m $\Omega$  - 3.7  $\mu\text{H}$  /      24 A: 2.2 m $\Omega$  - 14  $\mu\text{H}$

<sup>55</sup> Norma ANSI IEEE 112 sección 4.3.4.2

Características: hierro móvil, bobina fija, tensión de ensayo superior a 500 V

- Analizador industrial: Power Logic.

### 3.2.6.3 Información<sup>56</sup>

Las pérdidas extrañas con carga ocurridas a frecuencia fundamental pueden ser determinadas al aplicar corrientes polifásicas balanceadas a los terminales del bobinado del estator con el rotor removido. La entrada de potencia eléctrica menos las pérdidas  $I^2 R$  del estator a la resistencia de ensayo es igual a las pérdidas extrañas con carga a frecuencia fundamental. Durante este ensayo los cojinetes y otras partes estructurales en los que se puede inducir corrientes deben estar en su lugar. La corriente usada para hacer este ensayo se identificará como  $I_t$ .

### 3.2.6.4 Procedimiento

- Armar el diagrama indicado en la figura 3.9 y 3.10 para instrumentación analógica y digital respectivamente.

Instrumentación analógica

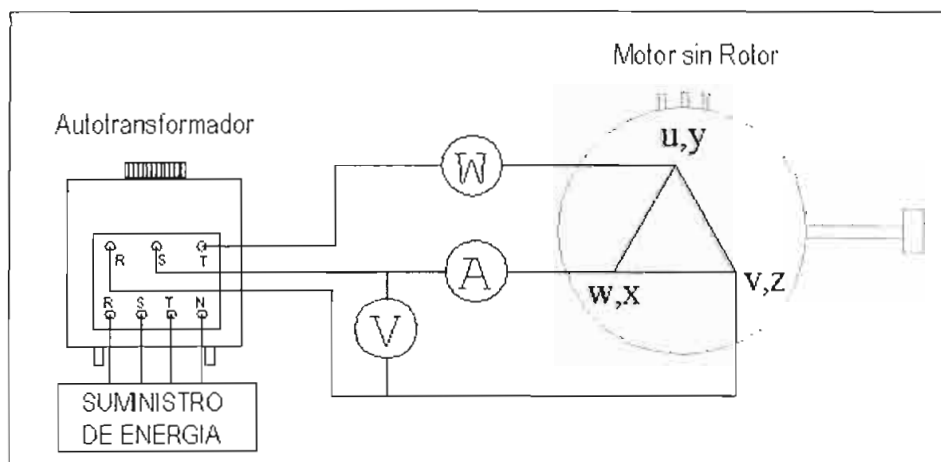


Figura 3.9

<sup>56</sup> Norma ANSI IEEE-112, Sección 4.3.4.2.

## Instrumentación digital

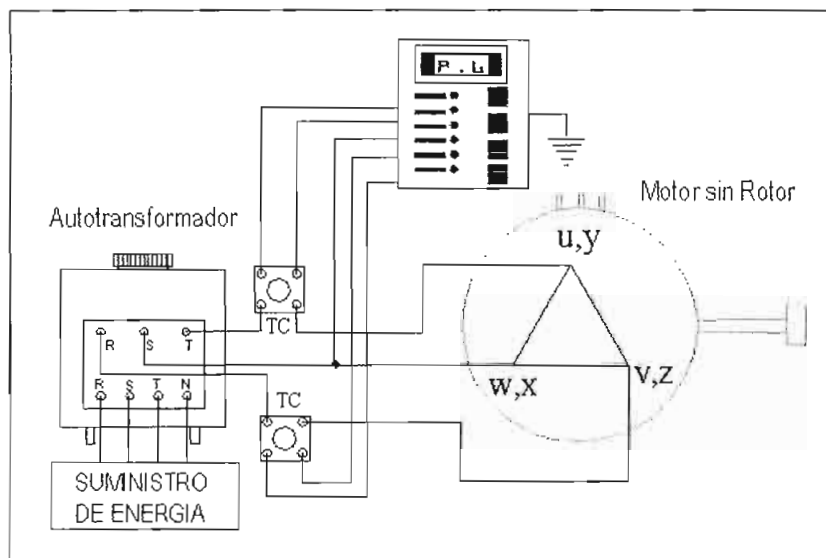


Figura 3.10

- Alimentar al motor con voltaje hasta alcanzar el valor de corriente igual a  $I_t$ .
- Anotar los valores de potencia, voltaje y corriente.

## 3.2.6.5 Datos Obtenidos

## Instrumentación analógica

Corriente ~ (A)	Voltaje ~ (V)	Potencia (W)
6	23	230.5

Tabla 3.14

## Instrumentación digital

Corriente ~ (A)	Voltaje ~ (V)	Potencia (W)
6.0	25.50	236.32

Tabla 3.15

## CAPÍTULO 4

### CÁLCULOS Y VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS

#### 4.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo 2, sección “*comparación entre ensayos*” se establecieron los ensayos que ambas normas indican para determinar la eficiencia del motor asincrónico.

Es así que se planteó realizar 6 ensayos:

- Ensayo en Vacío Acoplado.
- Ensayo en Vacío a La Tensión Nominal.
- Ensayo de Rotor Bloqueado.
- Ensayo en Vacío a Tensión Variable.
- Ensayo de Rotación Inversa.
- Ensayo de Variación de Corriente.

Los ensayos son medidos con instrumentos analógicos y con instrumentación digital, siguiendo el lineamiento planteado por las normas.

En el capítulo 3 se realizó las mediciones correspondientes a cada ensayo. Se indicó el objetivo a seguir, la información respecto del ensayo, el procedimiento, el equipo utilizado y los datos obtenidos.

En este capítulo se desarrollarán los cálculos requeridos en cada ensayo para determinar las pérdidas y por ende la eficiencia que se produce en el motor asincrónico.

Luego de realizar los cálculos requeridos, se procederá a validar los resultados, para lo cual se reunirá información de textos, manuales y protocolos de ensayos entregados por los fabricantes de las máquinas.

#### 4.1.1 RESUMEN DE LAS MEDICIONES EFECTUADAS

Para visualizar de manera ordenada y resumida los datos obtenidos en los ensayos efectuados, a continuación se indican los mismos:

ENSAYO EN VACÍO ACOPLADO			
Tipo de instrumentación	P (W)	V (V)	I (A)
Analógica	272.8	220	3.4
Digital	262.6	220	3.3

*Tabla 4.1*

ENSAYO EN VACÍO A LA TENSIÓN NOMINAL			
Tipo de instrumentación	P (W)	V (V)	I (A)
Analógica	442.35	220	3.56
Digital	421.78	220	3.39

*Tabla 4.2*

ENSAYO A ROTOR BLOQUEADO			
Tipo de instrumentación	P (W)	V (V)	I (A)
Analógica	331.82	48	7
Digital	310.24	47	7

*Tabla 4.3*

<b>ENSAYO EN VACÍO A LA TENSIÓN VARIABLE</b>						
	<b>Instrumentación Analógica</b>			<b>Instrumentación Digital</b>		
	<b>P (W)</b>	<b>V (V)</b>	<b>I (A)</b>	<b>P (W)</b>	<b>V (V)</b>	<b>I (A)</b>
Paso 1	182,40	50	1,1	175,104	50	1,05
Paso 2	186,27	60	1,2	178,818	60	1,09
Paso 3	205,85	80	1,3	197,168	80	1,24
Paso 4	221,49	100	1,5	220,314	100	1,44
Paso 5	261,16	120	1,6	245,178	120	1,49
Paso 6	313,68	140	2,1	285,133	140	1,95
Paso 7	332,31	160	2,4	315,018	160	2,25
Paso 8	356,69	180	2,7	352,422	180	2,57
Paso 9	404,66	200	3,2	388,469	200	3,04
Paso 10	445,20	220	3,6	427,392	220	3,37
Paso 11	471,70	230	3,6	442,832	230	3,40

Tabla 4.4

<b>ENSAYO DE ROTACIÓN INVERSA</b>					
<b>Tipo de Instrumentación</b>	<b>P(W)</b>	<b>V (V)</b>	<b>I (A)</b>	<b>V<sub>A</sub></b>	<b>I<sub>A</sub></b>
<b>Analógica</b>	0	0	0	110	1.65
	312.5	50	6.1	110	2.9
<b>Digital</b>	0	0	0	110	1.6
	345.13	47	6.08	110	2.9

Tabla 4.5

<b>ENSAYO DE VARIACIÓN DE CORRIENTE</b>			
<b>Tipo de instrumentación</b>	<b>P (W)</b>	<b>V (V)</b>	<b>I (A)</b>
<b>Analógica</b>	230.5	23	6
<b>Digital</b>	236.323	25	6

Tabla 4.6

## 4.2 ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE ERRORES<sup>57</sup>

La exactitud hace referencia al grado de aproximación o cercanía al valor real de la cantidad medida. La precisión es el grado de concordancia dentro de un grupo de mediciones y es afectada por la condición del instrumento el cual permite la aproximación de los valores captados debido a la limitación de la escala.

### 4.2.1 Clasificación de Errores.

Los errores pueden provenir de diferentes fuentes y por lo general se clasifican en tres clases:

- Los errores graves o gruesos: ocurren por lo general debido a fallas humanas en la lectura o en la utilización de los instrumentos así como el registro y el cálculo de los resultados de las mediciones.
- Los errores sistemáticos: se deben a fallas de los instrumentos, como partes defectuosas o gastadas y efectos ambientales sobre el equipo del usuario. Se dividen en dos categorías:
  - Los errores instrumentales: son inseparables a los instrumentos de medición a causa de su estructura mecánica.
  - Los errores de calibración: hace que el instrumento de lecturas altas o bajas a lo largo de toda la escala, debido al descuido al no ajustar el dispositivo a cero antes de efectuar una medición.
- Los errores aleatorios: se deben a causas desconocidas y ocurren incluso cuando todos los errores sistemáticos se han considerado en experimentos

---

<sup>57</sup> Referencia Bibliográfica 10



bien diseñados, por lo general se presentan pocos errores aleatorios pero llegan a ser importantes en trabajos de gran exactitud.

#### 4.2.2 Errores Límites y Clasificación de Instrumentos

En la mayoría de los instrumentos, la exactitud está garantizada por un cierto porcentaje de la lectura en plena escala. Los límites de las desviaciones de valores especificados se conocen como errores límites o errores de garantía.

Los cálculos, combinando errores de garantía, se realizan con frecuencia.

Los instrumentos de medición se clasifican según dos puntos de vistas: por la precisión (o clase de exactitud) y por tipo de trabajo.

Los instrumentos se clasifican en tres grupos:

- De Laboratorio.
- Portátiles.
- De Tablero.

Relacionando ambas clasificaciones tenemos que en el grupo de los instrumentos de laboratorio, se incluyen aquellos que debido a su alto grado de precisión están comprendidos entre los instrumentos cuyo error relativo se ubica entre 0 y 0,2%.

El grupo de instrumentos portátiles comprenden aquellos instrumentos cuyo error relativo se ubica entre 0.5 y 1%

Los instrumentos de tablero son de tipo operacional, la clase de exactitud se comprende entre 1.5 y 5%

Se han convenido 7 clases de exactitud para los instrumentos de medición.

Clase	0.1	0.2	0.5	1	1.5	2.5	5
<b>Error en condiciones nominales de trabajo</b>	$\pm 0.1$	$\pm 0.2$	$\pm 0.5$	$\pm 1$	$\pm 1.5$	$\pm 2.5$	$\pm 5$

Tabla 4.7

### 4.2.3 Cálculo de Errores

Los instrumentos analógicos, que están disponible en el laboratorio de Máquinas Eléctricas, son instrumentos portátiles, cuyo error relativo es 0.5 %

El analizador industrial, conocido como Power Logic admite un error relativo del 0.2% (Manual de Referencia del Power Logic, capítulo 1, página 3)

El error que se calcula es el Error Límite

$$\text{Error Límite} = (\text{clase}/100) \times \text{Fondo de escala} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

$$\% \text{ error} = \frac{\text{Error.límite}}{\text{Lectura}} \times 100\% \quad \text{Ecuación 4.2}$$

ENSAYO EN VACÍO ACOPLADO						
Instrumentación	P (W)	% Error Potencia	V (V)	% Error Voltaje	I (A)	% Error Corriente
Analógica	272,8	2,20	220	0,59	3,4	1,76
Digital	262,6	0,0008	220	0,0009	3,3	0,06

Tabla 4.8

ENSAYO EN VACÍO A TENSIÓN NOMINAL						
Instrumentación	P (W)	% Error Potencia	V (V)	% Error Voltaje	I (A)	% Error Corriente
Analógica	442,35	1,36	220	0,59	3,56	1,69
Digital	421,78	0,0005	220	0,0009	3,39	0,06

Tabla 4.9

ENSAYO DE ROTOR BLOQUEADO						
Instrumentación	P (W)	% Error Potencia	V (V)	% Error Voltaje	I (A)	% Error Corriente
Analógica	331,82	1,81	48	0,68	7	0,86
Digital	310,24	0,0006	47	0,0043	7	0,03

Tabla 4.10

ENSAYO EN VACÍO A LA TENSIÓN VARIABLE											
INSTRUMENTACIÓN ANALÓGICA						INSTRUMENTACIÓN DIGITAL					
voltaje	% de Error	potencia	% de Error	corriente	% de Error	voltaje	% de Error	potencia	% de Error	corriente	% de Error
50	2,60	182,40	3,29	1,1	5,45	50	0,0040	175,104	0,00114	1,05	0,19
60	2,17	186,27	3,22	1,2	5,22	60	0,0033	178,818	0,00112	1,09	0,18
80	1,63	205,85	2,91	1,3	4,62	80	0,0025	197,168	0,00101	1,24	0,16
100	1,30	221,49	2,71	1,5	3,95	100	0,0020	220,314	0,00091	1,44	0,14
120	1,08	261,16	2,30	1,6	3,82	120	0,0017	245,178	0,00082	1,49	0,13
140	0,93	313,68	1,91	2,1	2,93	140	0,0014	285,133	0,00070	1,95	0,10
160	0,81	332,31	1,81	2,4	2,53	160	0,0013	315,018	0,00063	2,25	0,09
180	0,72	356,69	1,68	2,7	2,22	180	0,0011	352,422	0,00057	2,57	0,08
200	0,65	404,66	1,48	3,2	1,88	200	0,0010	388,469	0,00051	3,04	0,07
220	0,59	445,20	1,35	3,6	1,69	220	0,0009	427,392	0,00047	3,37	0,06
230	0,57	471,70	1,27	3,6	1,68	230	0,0009	442,832	0,00045	3,4	0,06

Tabla 4.11

ENSAYO DE ROTACIÓN INVERSA										
	Potencia	% de Error	Voltaje	% de Error	Corriente	% de Error	Voltaje	% de Error	Corriente	% de Error
Instr. Anal.	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	110,00	1,36	1,65	3,03
	312,50	1,92	50,00	0,65	6,10	0,98	110,00	1,36	2,90	1,72
Instr. Dig.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	110,00	1,36	1,60	3,13
	354,13	0,000565	47,00	0,00426	6,08	0,0329	110,00	1,36	2,90	1,72

Tabla 4.12

ENSAYO DE VARIACIÓN DE CORRIENTE						
Instrumentación	P (W)	% Error Potencia	V (V)	% Error Voltaje	I (A)	% Error Corriente
Analógica	230,5	2,60	23	1,41	6	1,00
Digital	236,323	0,0008	25	0,0080	6	0,03

Tabla 4.13

#### 4.2.3.1 Análisis de los Errores Determinados.

En el Ensayo de Vacío Acoplado, el porcentaje de error de mayor magnitud ocurre con el valor de potencia que presenta una desviación de un 2%, esta medición se realizó con el instrumento analógico. El promedio de error, se encuentra en el orden del 1.5 %, que representa un valor aceptable de margen de error.

En el Ensayo de Vacío a la Tensión Nominal el mayor error ocurre con el valor medido de corriente que indica un 1.69% a instrumentación analógica. El promedio de error, se ubica en 1.2%, representa un valor permitido.

En el Ensayo de Vacío a la Tensión Variable, se procede a medir las magnitudes para pasos de voltaje, la escala escogida para los instrumentos analógicos es la mayor, con el objeto realizar todas las mediciones sin interrumpir el proceso. Al realizar lo mencionado, los valores de menor magnitud presentan un mayor error y los valores altos presentan un bajo error (ver tabla 4.11). El error límite depende de la escala utilizada en la medición, pues su definición se basa en este valor.

El mayor valor promedio de error ocurre en la medición de corriente (3.3%) y el promedio general de error es del 2.2%, que son valores tolerables.

En los Ensayos de Variación de Corriente y Rotación Inversa, el porcentaje de error mantiene un rango semejante a los otros ensayos, donde los valores medidos de potencia presentan mayor error (2.6% y 1.9%) y el promedio de error se encuentran en 1.2% y 1.7% respectivamente. Estos valores indican que las mediciones realizadas son razonables.

El promedio colectivo de error es de 1.6 %. En consecuencia este dato confirma que los valores obtenidos en las mediciones de los ensayos efectuados son aceptables.

### 4.3 COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES DE LAS MEDICIONES OBTENIDAS

Previo a la realización de los cálculos, se procede a comparar y determinar la desviaciones entre los valores determinados con la instrumentación analógica y con la instrumentación digital. La desviación se establece en base a los valores logrados con la tecnología digital, debido a que el error que genera es menor y la exactitud es mayor.

<b>ENSAYO EN VACÍO ACOPLADO</b>			
<b>Instrumentación</b>	<b>P (W)</b>	<b>V (V)</b>	<b>I (A)</b>
<b>Analógica</b>	272,8	220	3,4
<b>Digital</b>	262,6	220	3,3
<b>Desviación (%)</b>	3,88	0	3,03

*Tabla 4.14*

<b>ENSAYO EN VACÍO A LA TENSIÓN NOMINAL</b>			
<b>Instrumentación</b>	<b>P (W)</b>	<b>V (V)</b>	<b>I (A)</b>
<b>Analógica</b>	442,35	220	3,56
<b>Digital</b>	421,78	220	3,39
<b>Desviación (%)</b>	4,88	0	5,01

*Tabla 4.15*

<b>ENSAYO A ROTOR BLOQUEADO</b>			
<b>Instrumentación</b>	<b>P (W)</b>	<b>V (V)</b>	<b>I (A)</b>
<b>Analógica</b>	331,82	48	7
<b>Digital</b>	310,24	47	7
<b>Desviación (%)</b>	6,96	2,13	0,00

*Tabla 4.16*

ENSAYO EN VACÍO A LA TENSIÓN VARIABLE									
	IA	ID		IA	ID		IA	ID	
Pasos	P (W)	P (W)	Desv (%)	V (V)	V (V)	Desv (%)	I (A)	I (A)	Desv (%)
Paso 1	182,4	175,1	4,17	50	50	0	1,1	1,05	4,76
Paso 2	186,27	178,82	4,17	60	60	0	1,2	1,09	10,09
Paso 3	205,85	197,17	4,40	80	80	0	1,3	1,24	4,84
Paso 4	221,49	220,31	0,53	100	100	0	1,5	1,44	4,17
Paso 5	261,16	245,18	6,52	120	120	0	1,6	1,49	7,38
Paso 6	313,68	285,13	10,01	140	140	0	2,1	1,95	7,69
Paso 7	332,31	315,02	5,49	160	160	0	2,4	2,25	6,67
Paso 8	356,69	352,42	1,21	180	180	0	2,7	2,57	5,06
Paso 9	404,66	388,47	4,17	200	200	0	3,2	3,04	5,26
Paso 10	445,2	427,39	4,17	220	220	0	3,6	3,37	6,82
Paso 11	471,7	442,83	6,52	230	230	0	3,6	3,4	5,88

Tabla 4.17

ENSAYO DE ROTACIÓN INVERSA			
Instrumentación	P(W)	V (V)	I (A)
Analógica	312,5	50	6,1
Digital	345,13	47	6,08
Desviación (%)	9,45	6,38	0,33

Tabla 4.18

ENSAYO DE VARIACIÓN DE CORRIENTE			
Instrumentación	P (W)	V (V)	I (A)
Analógica	230,5	23	6
Digital	236,3	25	6
Desviación (%)	2,46	8,00	0,00

Tabla 4.19

### 4.3.1 Análisis de la Desviación Ocurrida Entre Mediciones

En esta sección se revisa la desviación que existe entre los valores de las mediciones realizadas con instrumentación digital y la analógica. Las magnitudes de los errores obtenidos con la instrumentación digital son bajas, por tal motivo se la considera como referencia para determinar la desviación que existe entre los valores registrados.

En el Ensayo de Vacío Acoplado, el valor de potencia registrado indica un 9.3% de desviación y el valor de corriente indica un 3.3% de desviación con respecto a la medición obtenida con la instrumentación digital (ver tabla 4.14). La desviación promedio que se genera es del 6,3%.

En el ensayo de Vacío a la Tensión Nominal, los valores de potencia y corriente no supera el 5% de desviación (ver tabla 4.15), esto implica que las mediciones efectuadas tienen congruencia entre si.

En el ensayo de Rotor Bloqueado, el valor de potencia presenta una desviación aproximada del 7% y la corriente indica una desviación del 2% (ver tabla 4.16).

Al revisar los ensayos de Rotación Inversa y Variación de Corriente, la desviación promedio se ubica en un 6.5% (ver tabla 4.18 y 4.19), lo que confirma que existe una adecuada validez de las mediciones efectuadas.

En el ensayo de Vacío a la Tensión Variable, la desviación promedio para los valores de potencia es del 4.6% y para los valores de corriente es del 6.2% (ver tabla 4.17), en este ensayo se realizan mediciones sucesivas para diferentes pasos de voltaje, sin interrumpir el proceso, lo que hace que la desviación se mantenga casi constante.

La desviación general es alrededor del 5%, esto implica que la precisión obtenida, tanto con instrumentación analógica como con la instrumentación digital, es aceptable.

## 4.4 CÁLCULOS

Con los ensayos efectuados se procederá a calcular lo siguiente:

1. Pérdidas constantes.
2. Pérdidas en el Núcleo.
3. Pérdidas mecánicas.
4. Pérdidas extrañas con carga en baja y alta frecuencia.
5. Parámetros de la máquina.

Un parámetro importante requerido para los cálculos, es el valor de la resistencia estática, corregida a la temperatura específica. En el Cáp. 3 sección 3.1.2.4 se determinó el valor de la resistencia de estator.

$$R_{\text{estator}} = 1.67 \, \Omega$$

La norma IEC 34-2 en la sección 5 y la Norma ANSI IEEE 112 en la Sección 4.2.2.5.3 indican que la medición de la resistencia de estator se debe corregir a una temperatura determinada de acuerdo a la CLASE TÉRMICA DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO<sup>58</sup> (ver tabla 2.1 del capítulo 2)

Para la corrección de la resistencia a una temperatura específica se empleará la siguiente ecuación:

$$R_s = R_t \left( \frac{t_s + k}{t_t + k} \right) \quad \text{Ecuación 4.3}$$

<sup>58</sup> para información de CLASE DE MOTORES ASINCRÓNICOS ver anexo correspondiente



Donde:

$R_s$  = Resistencia corregida a la temperatura de referencia.

$R_t$  = Valor de resistencia de ensayo.

$t_s$  = Temperatura específica.

$t_t$  = Temperatura ( $25^{\circ}\text{C}$ ).

$k$  = Constante de valor 234,5 para cobre.

Resistencia de ensayo ( $\Omega$ )	Corrección a la temperatura específica de $75^{\circ}\text{C}$ ( $\Omega$ )
1,67	1.99

*Tabla 4.20*

El valor determinado para  $r_1$  es de  $1.99 \Omega$  el mismo que será utilizado para realizar los cálculos respectivos.

#### 4.4.1 PÉRDIDAS CONSTANTES

Para la determinación de las pérdidas constantes se han promovido dos ensayos:

- 1.- Ensayo en Vacío a la Tensión Nominal.
- 2.- Ensayo en Vacío a la Tensión Variable.

El primer ensayo permite determinar el total de las pérdidas constantes o conocidas como pérdidas rotacionales ó pérdidas independientes de la intensidad.

El segundo ensayo da a conocer las pérdidas que integran o conforman las pérdidas constantes, es decir permite determinar las pérdidas del núcleo, las pérdidas mecánicas (pérdidas por fricción y ventilación) y el total de la suma de las dos. Los cálculos con este ensayo se realizan en la sección 4.2.2

#### 4.4.1.1 Ensayo en Vacío a Tensión Nominal

Este ensayo permite obtener la suma de las pérdidas independientes de la intensidad o pérdidas constantes. La potencia absorbida por el motor al ser disminuida en las pérdidas por efecto Joule en el arrollamiento primario o estático ( $RI^2$ ) da el total de las pérdidas independientes de la intensidad. Las pérdidas por efecto Joule en el arrollamiento secundario o rotórico ( $RI^2$ ) se pueden despreciar.

Corregida la resistencia estática a la temperatura de referencia, se procede a determinar las pérdidas constantes.

$$\text{Pérdidas constantes} = P \text{ absorbida} - 3I^2R_{\text{estator.}} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Tipo de instrumentación	P absorbida (W)	I (A)	$3I^2R_{\text{estator.}}$ (W)	Pérdidas constantes (W)
Instrumentación analógica	442.35	3.56	76.04	366.31
Instrumentación digital	421.78	3.39	68.96	352.82

Tabla 4.21

#### 4.4.2 PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO.

Las pérdidas en el núcleo, se determinan de manera directa con el ensayo de Vacío Acoplado.

Al hacer girar al motor en ensayo, a la velocidad asincrónica con ayuda de un motor acoplado, las pérdidas mecánicas (fricción y ventilación) se eliminan.

De esta manera, la potencia que absorbe el motor disminuida por las pérdidas ocurridas en el arrollamiento del estator genera el valor de las pérdidas en el núcleo.

Como se mencionó en el numeral 4.2.1 el ensayo en Vacío a Tensión Variable, permite conocer las pérdidas del núcleo y las mecánicas.

#### 4.4.2.1 Ensayo en Vacío Acoplado.

Las pérdidas en el núcleo son:

$$\text{Pérdidas Núcleo} = P \text{ abs. VACÍO ACOPLADO} - 3 \cdot I^2 \cdot R_{\text{ESTATOR}} \quad \text{Ecuación 4.5}$$

Tipo de instrumentación	P absorbida (W)	I (A)	Pérdidas en el Núcleo (W)
Analógica	272.8	3.4	203.4
Digital	262.6	3.3	197.3

Tabla 4.22

#### 4.4.2.2 Ensayo en Vacío a la Tensión Variable.

La potencia absorbida disminuida por las pérdidas  $I^2R$  en el devanado primario se grafica sobre un diagrama en función del cuadrado de la tensión. Se obtiene así, a bajas saturaciones, una línea recta que se puede extrapolar hasta un valor nulo de la tensión para dar la suma de las pérdidas mecánicas.

Con los datos indicados en la tabla 4.4 se procede a graficar la curva.

$$P \text{ absorbida} - 3I^2R_{\text{estator}} \text{ Versus Voltaje}^2 \quad \text{Ecuación 4.6}$$

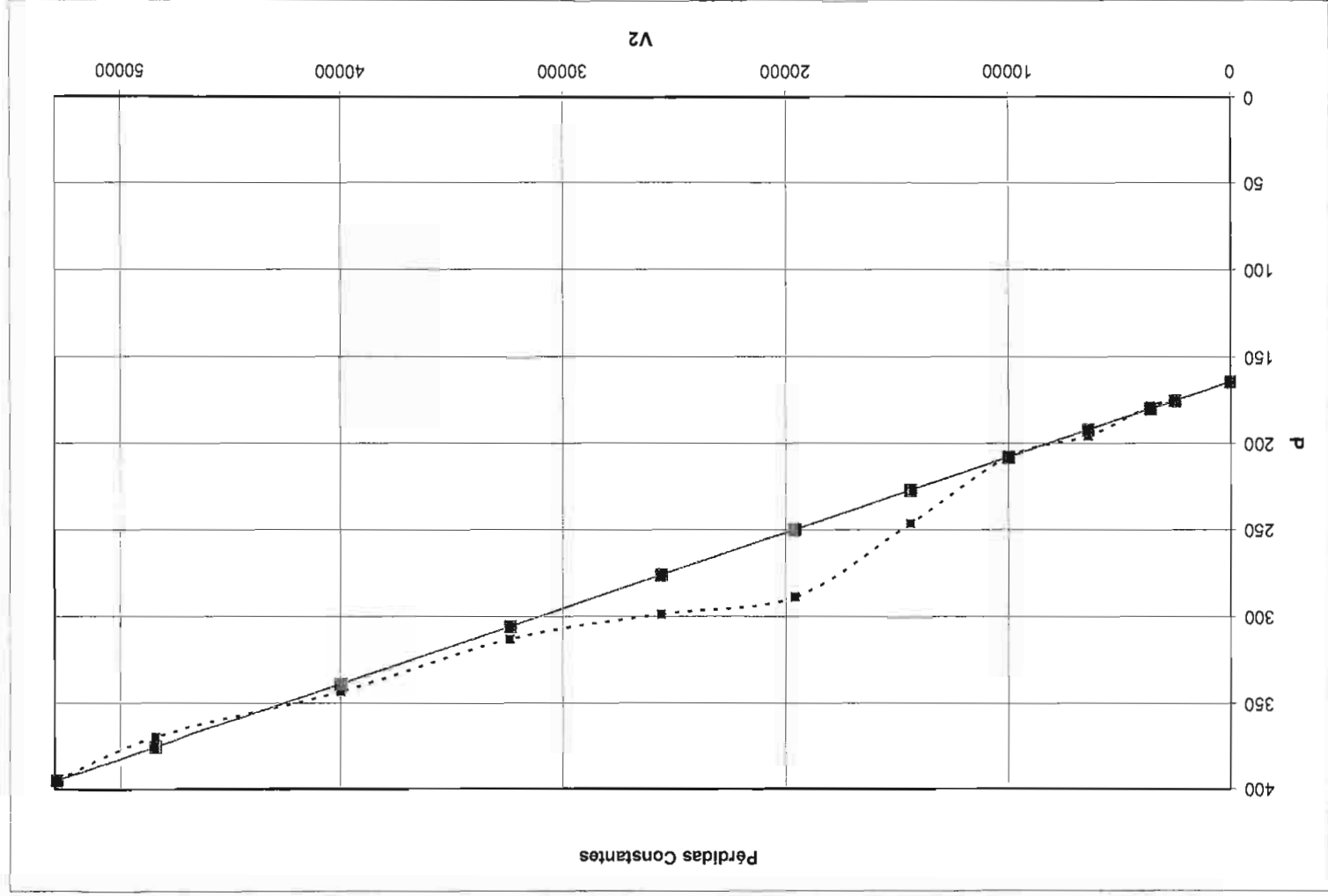
## Instrumentación analógica.

Voltaje (V)	Potencia (W)	Corriente (A)	V <sup>2</sup> (V)	Pabs-3I <sup>2</sup> R (W)
50	182,40	1,1	2500	175,14
60	186,27	1,2	3600	178,33
80	205,85	1,3	6400	195,71
100	221,49	1,5	10000	207,62
120	261,16	1,6	14400	246,37
140	313,68	2,1	19600	288,47
160	332,31	2,4	25600	298,61
180	356,69	2,7	32400	312,95
200	404,66	3,2	40000	343,22
220	445,20	3,6	48400	369,59
230	471,70	3,6	52900	394,80

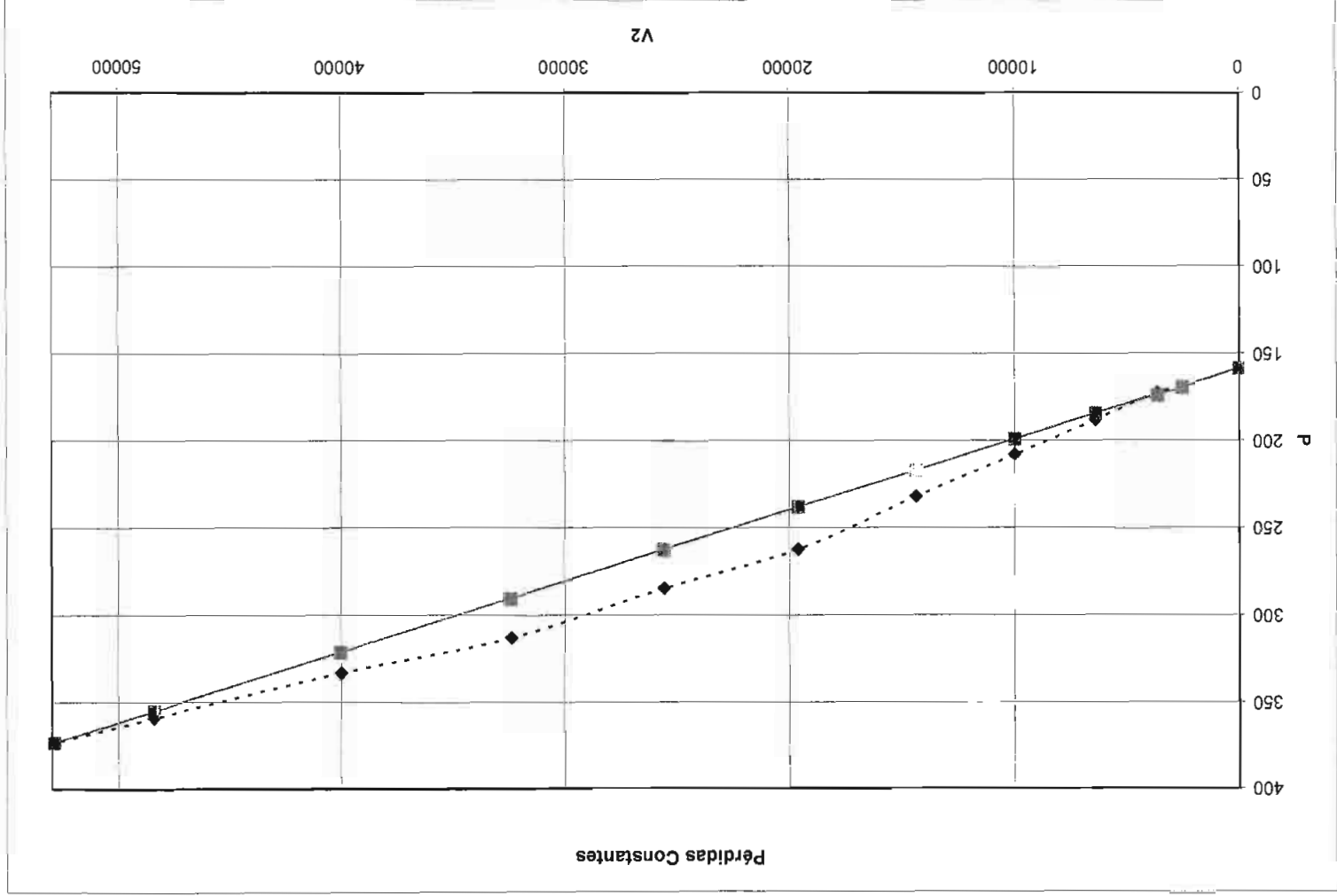
## Instrumentación digital.

Voltaje (V)	Potencia (W)	Corriente (A)	V <sup>2</sup> (V)	Pabs-3I <sup>2</sup> R (W)
50	175,104	1,05	2500	168,55
60	178,818	1,09	3600	171,66
80	197,168	1,24	6400	188,02
100	220,314	1,44	10000	207,80
120	245,178	1,49	14400	231,83
140	285,133	1,95	19600	262,38
160	315,018	2,25	25600	284,60
180	352,422	2,57	32400	312,95
200	388,469	3,04	40000	333,02
220	427,392	3,37	48400	359,15
230	442,832	3,40	52900	373,43

Curva: Potencia versus Voltaje<sup>2</sup> para instrumentación analógica.



Curva: Potencia versus Voltaje<sup>2</sup> para instrumentación digital.



La curva:  $(P \text{ absorbida} - 3I^2R_{\text{estator}})$  Versus  $\text{Voltaje}^2$  tiene una tendencia lineal.

Se procede a definir la ecuación de la recta:

- Para instrumentación Analógica:

$$P = \left( \frac{44 \times V}{10000} \right) + 164.22 \quad \text{Ecuación 4.7}$$

- Para instrumentación Digital:

$$P = \left( \frac{40 \times V}{10000} \right) + 158.38 \quad \text{Ecuación 4.8}$$

Para determinar las pérdidas mecánicas, se extiende la recta de extrapolación. El valor que resulta del corte con el eje de ordenadas será el valor de mencionadas pérdidas.

- Con instrumentación Analógica:

$$\text{Pérdidas mecánicas} = 164.22 \text{ W}$$

- Con instrumentación Digital:

$$\text{Pérdidas mecánicas} = 158.38 \text{ W}$$

Para definir las pérdidas del núcleo se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Pérdidas del núcleo} = P \text{ total} - 3 I^2 R - \text{Pérdidas del mecánicas}$$

- Con instrumentación Analógica:

$$\begin{aligned} \text{Pérdidas del núcleo} &= P \text{ total} - 3 I^2 R - \text{Pérdidas mecánicas} \\ &= 445.20 - (3 \times 3.6^2 \times 2) - 164.22 \\ &= 205.37 \text{ W} \end{aligned}$$

- Con instrumentación Digital:

$$\begin{aligned} \text{Pérdidas del núcleo} &= P \text{ total} - 3 I^2 R - \text{Pérdidas mecánicas} \\ &= 427.392 - (3 \times 3.37^2 \times 2) - 158.38 \\ &= 200.77 \text{ W} \end{aligned}$$

Resumen.

ENSAYO EN VACÍO A LA TENSIÓN VARIABLE		
Tipo de instrumentación	Pérdidas Mecánicas (W)	Pérdidas en el Núcleo (W)
Analógica	164.22	205.37
Digital	158.38	200.77

Tabla 4.23

#### 4.4.3 PÉRDIDAS EXTRAÑAS CON CARGA EN ALTA Y BAJA FRECUENCIA.

Las pérdidas extrañas con carga se determinan con la realización de dos ensayos:  
Para la determinación de estas pérdidas se realizó dos ensayos:

- 1.- Ensayo de Rotación Inversa
- 2.- Ensayo de variación de Corriente.



El ensayo de Rotación Inversa permite determinar las pérdidas extrañas con carga ocurridas a altas frecuencias. Para este efecto, se aplicó voltaje polifásico balanceado a los terminales del estator del motor en investigación.

El rotor del motor en investigación es llevado por medios externos a la velocidad sincrónica en la dirección opuesta a la rotación del campo del estator.

Se registran los valores de potencia, voltaje y corriente que suceden en el motor asincrónico, así como los valores de voltaje y corriente que el motor acoplado requiere para impulsar al rotor del motor asincrónico, a velocidad de sincronismo, bajo dos condiciones: sin aplicar voltaje y aplicando voltaje al motor asincrónico.

La corriente usada para hacer este ensayo se identificará como  $I_t$ .

En el ensayo de variación de corriente las pérdidas extrañas con carga ocurridas a frecuencia fundamental pueden ser determinadas al aplicar corrientes polifásicas balanceadas a los terminales del bobinado del estator con el rotor removido.

La entrada de potencia eléctrica menos las pérdidas  $I^2R$  del estator a la resistencia de ensayo es igual a las pérdidas extrañas con carga a frecuencia fundamental. La corriente usada para hacer este ensayo se identificará como  $I_t$ .

La norma ANSI IEEE 112, indica las ecuaciones a ser utilizadas para determinar las pérdidas extrañas con carga. Es así que:

$$s_{II} = LL_s + LL_r \quad \text{Ecuación 4.9}$$

$s_{II}$  = Pérdidas Totales Extrañas con Carga

$LL_s$  = pérdidas extrañas con carga a frecuencia fundamental.

$LL_r$  = pérdidas extrañas con carga a altas frecuencias.

En esta ecuación los valores de  $LL_s$  y  $LL_r$  son para los mismos valores de corrientes  $I_t$  de los bobinados de estator.

$$LLs = Ws - 3.I^2 .R_{ESTATOR} \quad \text{Ecuación 4.10}$$

$$LLr = (Pr-Pf)-(Wr-LLs - 3.I^2 .R_{ESTATOR}) \quad \text{Ecuación 4.11}$$

Pr = potencia requerida para manejar el rotor al aplicar voltajes en los bobinados del estator.

Pf = potencia requerida para manejar el rotor sin aplicar voltajes en los bobinados del estator.

Ws = potencia eléctrica de entrada en los bobinados del estator con el rotor removido

Wr = potencia eléctrica de entrada en los bobinados del estator durante la ensayo de rotación inversa.

#### 4.4.3.1 Cálculos para determinar las Pérdidas Extrañas con Carga

Se emplean los datos indicados en las tablas 4.5 y 4.6:

##### Para instrumentación analógica

- $LLs = Ws - 3 I t^2 R_{estator}.$   
 $= 230.5 - 3 \times 6^2 \times 2$   
 $= 10.885 \text{ W}$
- $LLr = (Pr-Pf)-(Wr-LLs- 3 I t^2 R_{estator}.)$

$$Pr = V \times I = 110 \times 2.9 = 319 \text{ W}$$

$$Pf = V \times I = 110 \times 1.65 = 181.5 \text{ W}$$

$$LLr = (Pr-Pf)-(Wr-LLs- 3 I t^2 R_{estator}.)$$

$$= (319 - 181.5) (312.5 - 10.885 - 3.6^2 \cdot 2)$$

$$= 55.5 \text{ W}$$

- $s_{II} = LL_s + LL_r$ 

$$= 10.885 + 55.5$$

$$= 66.385 \text{ W}$$

De manera similar se procede con las mediciones realizadas con el Power Logic:

$$s_{II} = LL_s + LL_r$$

$$= 20.32 + 34.189$$

$$= 54.512 \text{ W}$$

Resumen:

PÉRDIDAS EXTRAÑAS CON CARGA	
Tipo de instrumentación	Pérdidas Extrañas con carga (W)
Analógica	63.38
Digital	54.51

*Tabla 4.24*

#### 4.4.4 PARÁMETROS DE LA MÁQUINA

En el capítulo 1, se planteó dos esquemas de circuitos equivalentes, el exacto y el aproximado. La diferencia entre ambos es la ubicación de la rama de magnetización, en el circuito exacto, la rama de magnetización se le ubica entre las constantes del estator y del rotor. Mientras que en el circuito aproximado, la rama de excitación se ubica antes de la impedancia del estator.

Para la determinación de ambos circuitos, se requiere de tres ensayos:

- 1.- Ensayo en vacío a la tensión nominal.
- 2.- Ensayo en vacío acoplado.
- 3.- Ensayo a Rotor Bloqueado.

Como se ha mencionado el ensayo de vacío a la tensión nominal da notificación con respecto a la corriente de excitación y las pérdidas rotacionales o constantes. El ensayo de vacío acoplado permite determinar las pérdidas del núcleo y el ensayo de rotor bloqueado permite conocer las impedancias de dispersión.

#### 4.4.4.1 Circuito Equivalente

La Norma ANSI IEEE 112<sup>59</sup> indica los parámetros a ser determinados y las ecuaciones correspondientes, así como el detalle del circuito (figura 4.1)

Los parámetros a determinar son:  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_{fe}$ ,  $x_1$ ,  $x_M$ ,  $x_2$

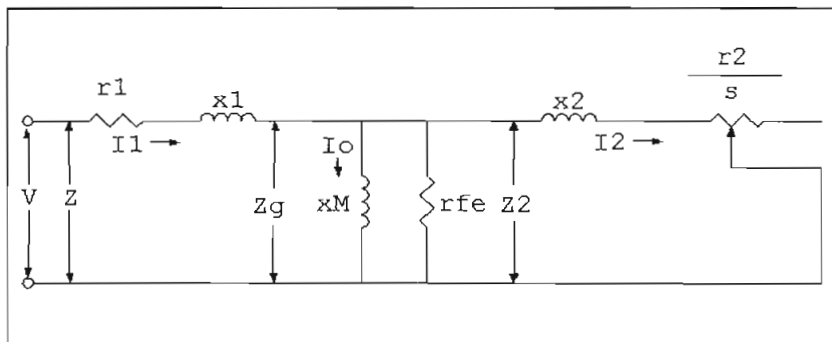


Figura 4.1: Circuito Equivalente Exacto

A. Para iniciar el cálculo se requiere asumir dos datos:

##### 1) Reactancias de Dispersión

La norma ANSI IEEE 112 indica la siguiente relación entre  $x_1$  y  $x_2$ :

$(x_1/x_2) = 1$  para motores clase A, D y motores de rotor devanado.

$(x_1/x_2) = 0.67$  para motores clase B.

<sup>59</sup> Norma ANSI IEEE 112, página 29

$(x_1/x_2) = 0.43$  para motores clase C.

Para el presente trabajo, la relación a utilizar es  $(x_1/x_2) = 1$

2) relación entre reactancia de dispersión  $x_1$  la reactancia de magnetización  $x_M$ :

La norma ANSI IEEE 112 indica que la relación entre  $x_1$  y  $x_M$  es de 0.1

$$x_1 / x_M = 0.1 \quad \text{ó} \quad x_M = 10 \cdot x_1$$

*B. Se procede a calcular los volt-amperios reactivos:*

Se calcula los volt-amperios reactivos (VAR) con los datos de las ensayos de vacío nominal y rotor bloqueado. Para diferenciar los datos calculados se utilizan los siguientes subíndices:

$a$  = cantidades pertenecientes al ensayo de vacío.

$b$  = cantidades pertenecientes al ensayo de rotor bloqueado.

La ecuación para el cálculo es:

$$VAR = \sqrt{(mVI_L)^2 - W} \quad \text{Ecuación 4.12}$$

Donde:

VAR = volt-amperios reactivos

$m$  = número de fases (en el presente caso 3)

$V$  = voltaje de fase.

$I_L$  = corriente de fase.

$W$  = potencia absorbida por el motor asincrónico.

Con los datos de instrumentación analógica se tiene:

En vacío

$$VAR_o = \sqrt{(mV_o I_{o1})^2 - W_o}$$

$$VAR_o = 1282.39 \text{ vars}$$

En bloqueado

$$VAR_b = \sqrt{(mV_b I_{b1})^2 - W_b}$$

$$VAR_b = 478.1 \text{ vars}$$

C. Determinados los VAR en vacío y en rotor bloqueado se procede a determinar la reactancia de dispersión  $x1$  a través de la ecuación siguiente:

$$x1_b = \left( \frac{VAR_b}{m \cdot I_b^2 \cdot \left(1 + \frac{x1}{x2} + \frac{x1}{xM}\right)} \right) \cdot \left( \frac{x1}{x2} + \frac{x1}{xM} \right) \quad \text{Ecuación 4.13}$$

Donde:

$x1_b$  = reactancia de dispersión de estator a rotor bloqueado a la frecuencia  $f1$

$VAR_b$  = volt-amperios reactivos a condición de rotor bloqueado

$m$  = número de fases.

$I_b$  = corriente de fase<sup>60</sup> en ensayo de rotor bloqueado.

$$x1 / x2 = 1$$

$$x1 / xM = 0.1$$

La norma sugiere que la ensayo de rotor bloqueado se realice a una frecuencia del 25 % de la frecuencia nominal (para 60 Hz corresponde a 15 Hz) sin embargo los

<sup>60</sup> Para el presente trabajo:  $I \text{ fase} = I \text{ línea} / \sqrt{3}$  debido a que el motor se conecta en delta o triángulo

efectos de la frecuencia son despreciables para los motores normales de menos de 25 hp.

Para la conversión de  $x_{1b}$  (reactancia de dispersión de estator a rotor bloqueado a la frecuencia  $f_1$ ) a  $x_1$  (reactancia de dispersión de estator a frecuencia nominal), se emplea la ecuación 4.14

$$x_1 = \frac{f_{nominal}}{f_1} x_{1b} \quad \text{Ecuación 4.14}$$

En el presente trabajo, el ensayo se realizó a frecuencia nominal, esto implica que

$$x_{1b} = x_1$$

Con los datos de instrumentación analógica se tiene:

$$x_1 = 5.11 \, \Omega$$

Calculado el valor de  $x_1$ , se calcula  $x_2$ , con ayuda de la relación asumida para la reactancia de dispersión, de lo cual se obtiene:

$$x_1 = x_2 = 5.11 \, \Omega$$

D. Determinado el valor de la reactancia de dispersión  $x_1$  se procede a determinar la reactancia de magnetización  $x_M$ , para lo cual se utiliza la siguiente ecuación:

$$x_M = \left( \frac{m.V_o^2}{VAR_o - m.I_o^2.x_1} \right) \times \left( \frac{1}{1 + \frac{x_1}{x_M}} \right)^2 \quad \text{Ecuación 4.15}$$

Donde:

$x_M$  = reactancia de magnetización.

$m$  = número de fases

$V_o$  = voltaje de línea

$VAR_o$  = volt-amperios reactivos a condición de vacío

$I_o$  = corriente de línea en ensayo de vacío a la tensión nominal.

$x_1$  = reactancia de dispersión de estator a frecuencia nominal.

$x_1 / x_M = 0.1$

Con los datos de instrumentación analógica se tiene:

$$x_M = 98.55 \Omega$$

E. Para determinar la resistencia del núcleo ( $r_{fe}$ ), se necesita calcular el valor de las pérdidas del núcleo. Esto es posible con los datos de la ensayo de vacío acoplado:

$$\text{Pérdidas del núcleo} = P \text{ abs. en vacío acoplado} - 3 I_o^2 r_{\text{estator}}$$

Con los datos de instrumentación analógica se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Pérdidas del núcleo} &= 272.8 - 3 \cdot 3.4^2 \cdot 2 \\ &= 203.44 \text{ W} \end{aligned}$$

El valor de  $r_{fe}$  se determina con la fórmula 4.16 y 4.17

$$g_{fe} = \frac{P_{\text{núcleo}}}{m V_o^2} \left( 1 + \frac{x_1}{x_M} \right)^2 \quad \text{Ecuación 4.16}$$

$$r_{fe} = \frac{1}{g_{fe}} \quad \text{Ecuación 4.17}$$

Donde:

$g_{fe}$  = conductancia del núcleo.

$P_{\text{núcleo}}$  = pérdidas en el núcleo.

$m$  = número de fases.



$V_o$  = voltaje de línea.

$x_1$  = reactancia de dispersión de estator a frecuencia nominal.

$x_M$  = reactancia de magnetización.

$r_{fe}$  = resistencia del núcleo.

Con los datos de instrumentación analógica se tiene:

$$g_{fe} = 1.65 \text{ E-03 ohmios}^{-1}$$

$$\text{De lo cual: } r_{fe} = 603.27 \Omega$$

F. Por último se determina el valor de la resistencia del rotor referida al estator.

Se emplea la ecuación 4.18

$$r_2 = \frac{\frac{W_b}{m \cdot I_b^2} - r_1}{\left(1 + \frac{x_2}{x_2} \frac{x_1}{x_M}\right)^2 - \left(\frac{x_2}{x_1}\right)^2 (x_1^2 \cdot g_{fe})} \quad \text{Ecuación 4.18}$$

Donde:

$W_b$  = potencia determinada en la ensayo de rotor bloqueado.

$m$  = número de fases.

$I_b$  = corriente de línea en la ensayo de rotor bloqueado.

$r_1$  = resistencia de estator.

$x_1$  = reactancia de dispersión de estator a frecuencia nominal.

$x_M$  = reactancia de magnetización.

$g_{fe}$  = conductancia del núcleo.

Con los datos de instrumentación analógica se tiene:

$$r_2 = 4.48 \Omega$$

#### 4.4.4.1.1 CANTIDADES EN POR UNIDAD<sup>61</sup>

El valor en por unidad (pu) de cualquier cantidad se define como la relación de la cantidad a su base y se expresa como un decimal. Los valores bases que se adoptan son los valores nominales.

Para el sistema trifásico, si el sistema se conecta en estrella o "Y"

$$V \text{ base LINEA-LINEA} = \sqrt{3} V \text{ base FASE}$$

Si el sistema se conecta en triángulo o "Δ"

$$I \text{ base LINEA-LINEA} = \sqrt{3} \times I \text{ base FASE}$$

Los parámetros de la máquina asíncrona se expresan en por unidad, definiendo y determinando previamente los valores base:

$$Z \text{ base} = V \text{ base} / I \text{ base}$$

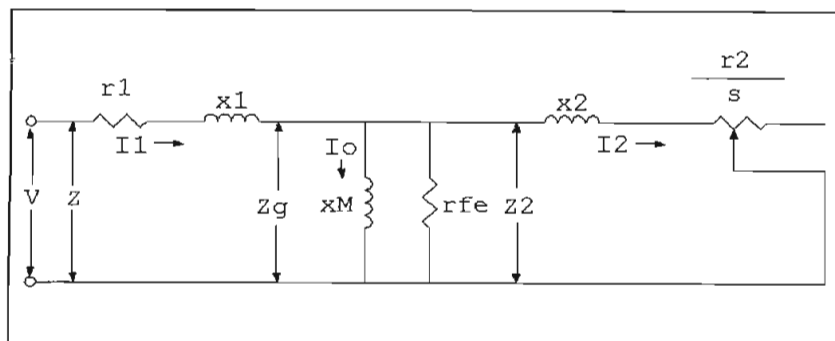
$$Z \text{ pu} = Z \text{ calculada} / Z \text{ base}$$

En el presente proyecto los valores nominales del motor asíncrono son 220 V y 7 A, estos valores se adoptan como bases:  $V \text{ base} = 220 \text{ V}$ ;  $I \text{ base} = 7 / \sqrt{3} \approx 4 \text{ A}$

$$Z \text{ base} = 220 \text{ V} / 4 \text{ A} \approx 55 \Omega$$

#### 4.4.4.1.2 Resumen de los Parámetros Determinados

Para el siguiente circuito equivalente:



<sup>61</sup> Referencia Bibliográfica 11

Los parámetros de la máquina calculados para instrumentación analógica y digital, así como los valores en pu son:

CIRCUITO EQUIVALENTE EXACTO				
Parámetro	Instrumentación	Instrumentación	Instrumentación	Instrumentación
	Analógica ( $\Omega$ )	Analógica (pu)	Digital ( $\Omega$ )	Digital (pu)
r1	1.67	0,036	1.67	0.036
r2	4.48	0,082	4.08	0.074
rfe	645.08	11,85	666.5	12.243
x1 = x2	5.11	0,093	5.26	0.096
xM	98.55	1,81	103.41	1.899

Tabla 4.25

#### 4.4.4.2 Circuito Equivalente Aproximado.

Como referencia se determinaran los parámetros del circuito equivalente aproximado en vista de que es utilizado por algunos autores.

En la figura se aprecia el circuito equivalente aproximado.

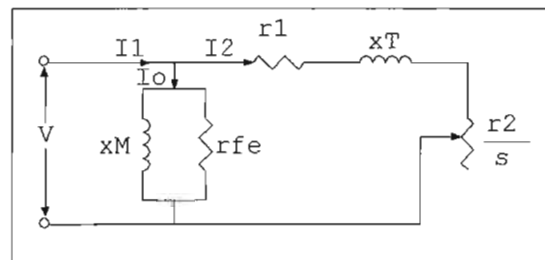


Figura 4.2: Circuito Equivalente Aproximado

Los parámetros a determinar son: r1, r2, rfe, x1, x2, xM. Se recuerda que los parámetros son por fase. Es así que si el motor se conecta en Y, el valor del

voltaje de fase será:  $V_{FASE} = \frac{V_{LINEA}}{\sqrt{3}}$  con  $I_{FASE} = I_{LINEA}$  mientras que si el motor se

conecta en triángulo la corriente de fase será:  $I_{FASE} = \frac{I_{LINEA}}{\sqrt{3}}$  con  $V_{FASE} = V_{LINEA}$

El procedimiento es el siguiente:

- a. Definir el valor de la resistencia del núcleo (rfe)

Con los valores obtenidos del ensayo de vacío acoplado se plantea la ecuación 4.19 la cual permite definir el valor de rfe:

$$r_{fe} = \frac{3V_o^2}{P_{núcleo}} \quad \text{Ecuación 4.19}$$

Donde:

rfe = resistencia del núcleo

Vo = Voltaje de vacío a la tensión nominal.

P núcleo = Pérdidas en el núcleo

- b. El valor de corriente que circula por la rama de magnetización (xM y rfe).

Al realizar el ensayo en vacío, el deslizamiento es muy bajo y se obtiene el circuito indicado en la figura 4.3

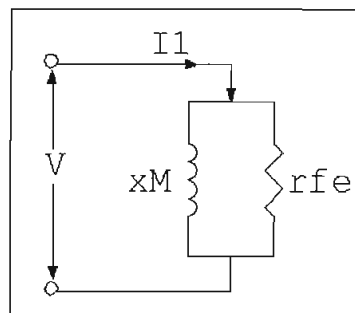


Figura 4.3: Circuito Equivalente al aplicar el Ensayo de Vacío.

La corriente de ingreso (I1) se reparte por las dos ramas, la de la resistencia del núcleo y la de la reactancia de magnetización.

El cálculo de la corriente que circula por la rama de la resistencia es:

$$I_{rfe} = \frac{V_o}{r_{fe}} \quad \text{Ecuación 4.20}$$

El cálculo de la corriente que circula por la rama de la reactancia de magnetización es:

$$I_{xM} = \sqrt{I_M^2 - I_{rfe}^2} \quad \text{Ecuación 4.21}$$

- c. Calcular el valor de la reactancia de magnetización.

Con el cálculo de la corriente que circula por la reactancia de magnetización, se calcula el valor de la reactancia de magnetización, para lo cual se emplea la ecuación indicada a continuación.

$$xM = \frac{V_o}{I_{xM}} \quad \text{Ecuación 4.22}$$

- d. Con los datos del ensayo de rotor bloqueado se determina el valor de la impedancia total.

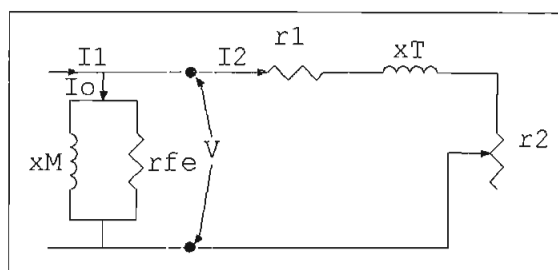


Figura 4.4: Circuito Equivalente a Ensayo de Rotor Bloqueado

Al realizar el ensayo de rotor bloqueado, el deslizamiento es 1 y se obtiene el circuito indicado en la figura 4.4. Como la rama de magnetización es colocada al inicio con el voltaje aplicado y la corriente determinada se calcula los valores de impedancia, resistencia y reactancia equivalente.

$$Z_{eq} = \frac{V_b}{I_b} \quad \text{Ecuación 4.23}$$

$$R_{eq} = \frac{P_b}{3 \cdot I_b^2} \quad \text{Ecuación 4.24}$$

$$xT = \sqrt{Zeq^2 - Req^2} \quad \text{Ecuación 4.25}$$

Donde:

$Zeq$  = Impedancia equivalente para la condición de rotor bloqueado.

$Req$  = Resistencia equivalente para la condición de rotor bloqueado.

$xT$  = Reactancia equivalente para la condición de rotor bloqueado.

$Vb$  = Voltaje de fase determinada en el ensayo de rotor bloqueado

$Ib$  = Corriente de fase determinada en el ensayo de rotor bloqueado

$Pb$  = Potencia trifásica determinada en el ensayo de rotor bloqueado

- e. Determinado el valor de  $Req$ , se procede a determinar el valor de la resistencia  $r_1$  y  $r_2$ . Para esto se divide para 2 el valor de la resistencia  $Req$  y el valor obtenido corresponde a  $r_1$  y  $r_2$ .

Para instrumentación analógica se tienen los siguientes cálculos:

$$a) \quad rfe = \frac{3V_{oa}^2}{P_{mcleo}} = 695.27 \, \Omega$$

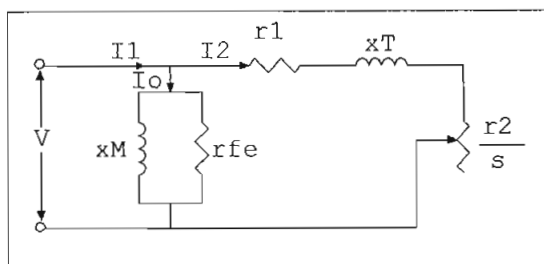
$$b) \quad I_{rfe} = \frac{V_o}{rfe} = 0.32 \, A \quad I_{xM} = \sqrt{I_M^2 - I_{rfe}^2} = 3.55 \, A$$

$$c) \quad xM = \frac{V_o}{IxM} = 62.04 \, \Omega$$

$$d) \quad Z_{eq} = \frac{Vb}{Ib} = 11.88 \, \Omega \quad R_{eq} = \frac{Pb}{3Ib^2} = 6.77 \, \Omega \quad xT = \sqrt{Zeq^2 - Req^2} = 9.75 \, \Omega$$

$$e) \quad r_1 = r_2 = Req/2 = 3.38 \, \Omega$$

Resumiendo los datos obtenidos:



CIRCUITO EQUIVALENTE APROXIMADO				
Parámetro	Instrumentación Analógica ( $\Omega$ )	Instrumentación Analógica (pu)	Instrumentación Digital ( $\Omega$ )	Instrumentación Analógica (pu)
R1	3,39	0,062	3,17	0,058
r2	3,39	0,062	3,17	0,058
rfe	695,27	12,641	736,08	13,383
xT	9,76	0,177	9,75	0,177
xM	62,04	1,128	65,15	1,185

Tabla 4.26

#### 4.4.5 RESUMEN DE LOS CÁLCULOS REALIZADOS

Para visualizar de manera resumida los resultados obtenidos, se indican los valores calculados, con instrumentación analógica y digital.

##### 4.3.5.1 Pérdidas.

	Instrumentación Analógica (W)	Instrumentación Digital (W)
Pérdidas constantes (1)	366.31	352.82
Pérdidas del núcleo (2)	208.8	197.3
Pérdidas constantes (3)	369.8	359.16
Pérdidas en el núcleo (3)	205.37	200.77
Pérdidas mecánicas	164.22	158.38
Pérdidas extrañas con carga	54.502	66.385

Tabla 4.27

- (1) Valores determinados con el ensayo de vacío a la tensión nominal.
- (2) Valores determinados con el ensayo de vacío acoplado
- (3) Valores determinados con el ensayo de vacío a la tensión variable

#### 4.5.1 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA PARA EL CIRCUITO EQUIVALENTE

En la figura se indica la red equivalente obtenida.

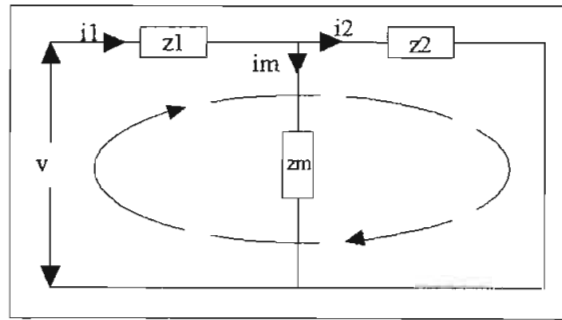


Figura 4.5: Red Equivalente

Donde:

$$z1 = r1 + j x1$$

$$z2 = (r2/s) + j x2$$

$$zm = rfe \perp xM \text{ (impedancia resultante de la operación en paralelo)}$$

Al aplicar la ley de voltajes de Kirchoff en el lazo indicado en la figura, se puede determinar directamente el valor de la corriente de carga ( $i2$ ).

$$\vec{V} = (i1 \times z1) + (i2 \times z2)$$

Donde:

$\vec{V}$  = Fasor de voltaje (voltaje nominal)

$\vec{i}_{1,2}$  = Fasor de corriente de estator (corriente nominal) y de rotor

$Z_{1,2}$  = Impedancias de estator y rotor.

Despejando el valor de la corriente  $i2$ :



$$\vec{i}_2 = \frac{\vec{V} - \vec{i}_1 \times z_1}{z_2}$$

Previo al cálculo de  $i_2$ , se procede a determinar el valor de  $z_2$

Si:  $z_2 = r_2/s + j x_2$

Esto implica que para determinar el valor de  $z_2$  se necesita conocer el valor del deslizamiento, el mismo que tiene que ser el nominal

De acuerdo a la referencia 20, el valor nominal de  $s \approx 0.086$  (para el motor en ensayo)

Aplicando el valor del deslizamiento se obtiene:

Para instrumentación analógica (ver datos de la tabla 4.28):

$$z_2 = 51.8 + j 5.11 (\Omega)$$

Remplazando los valores correspondientes se obtiene:

$$|V_1| = 220 \text{ V}$$

$$|i_1| = 7 \text{ A}$$

$$z_1 = 1.66 + j 5.11 (\Omega)$$

$$i_2 = 3.92 - j 0.98 \text{ (A)}$$

$$|i_2| = 4.04 \text{ (A)}$$

$$\theta = 14^\circ \text{ en retraso}$$

Determinado el Valor de  $i_2$ , se procede a determinar las pérdidas, las potencias transferidas y la eficiencia.

Las pérdidas generales en el motor asincrónico son:

$$\text{Pérdidas constantes o rotacionales} = 366.31 \text{ W}$$

$$\text{Pérdidas } I^2 r \text{ de estator} = 3 \cdot i_1^2 \cdot r_1 = 244 \text{ W}$$

$$\text{Pérdidas } I^2 r \text{ de rotor} = 3 \cdot i_2^2 \cdot r_2 = 220.8 \text{ W}$$

Las pérdidas adicionales son:

De acuerdo a la norma IEC 34-2 se tiene:

Pérdidas adicionales = 0.5 % de Potencia nominal = 7.46 W

Pérdidas totales = 838.8 W

De acuerdo a la norma ANSI IEEE 112 se tiene:

Pérdidas Extrañas con carga = 63.38 W

Pérdidas totales = 894.19 W

Ahora se determina la Potencia Mecánica Interna, la Potencia de Salida y la Potencia de entrada. Determinado los valores de potencia se procede a calcular la eficiencia:

$$\eta = (1 - (\text{Pérdidas} / \text{Potencia de Entrada})) * 100$$

La potencia mecánica interna desarrollada por el motor asincrónico es:

$$P_{MEC.INTER} = I_2^2 \times r_2 \times \left( \frac{1-S}{S} \right)$$

La potencia de salida se determina restando de la potencia mecánica interna las pérdidas rotacionales o constantes y las pérdidas adicionales o pérdidas extrañas con carga.

$$\text{Pot Salida} = P_{MEC.INTER} - (\text{Pérdidas constantes} + \text{Pérdidas adicionales})$$

La potencia de entrada se define sumando la potencia de salida con las pérdidas totales

$$\text{Pot. Entrada} = \text{Pot. Salida} + \text{Pérdidas Totales}$$

## Norma IEC 34-2

$$P_{\text{MEC INT}} = 2323.6 \text{ W}$$

$$P_{\text{SALIDA}} = 1949.8 \text{ W}$$

$$P_{\text{ENTRADA}} = 2788.13 \text{ W}$$

$$\eta = 71 \%$$

## Norma ANSI IEEE 112

$$P_{\text{MEC INT}} = 2323.6 \text{ W}$$

$$P_{\text{SALIDA}} = 1893.93 \text{ W}$$

$$P_{\text{ENTRADA}} = 2788.13 \text{ W}$$

$$\eta = 69 \%$$

De manera análoga se realizan los cálculos con los datos adquiridos con instrumentación digital

La norma ANSI IEEE 112 en la página 31 expone una hoja de trabajo en la cual se determina la eficiencia. La hoja de trabajo se puede transcribir en una hoja electrónica, la ventaja es que permite realizar el cálculo de la eficiencia para diferentes valores de deslizamiento.

#### 4.5.1.1 Resumen del Cálculo de la Eficiencia con el Circuito Equivalente

	INSTRUMENTACIÓN ANALÓGICA		INSTRUMENTACIÓN DIGITAL	
	Norma IEC 34-2	Norma ANSI IEEE 112	Norma IEC 34-2	Norma ANSI IEEE 112
$\eta \%$	71	69	72.7	71

Tabla 4.29

SOLUCIÓN DEL CIRCUITO EQUIVALENTE						
ÍTEM	ECUACIÓN	Valores Nominales	PASO 1	PASO 2	PASO 3	PASO 4
1	S=	0,086666667	0,066666667	0,053333333	0,04	0,023333333
2	r2/S=	51,81	67,35	84,19	112,25	192,43
3	x2=	5,11	5,11	5,11	5,11	5,11
4	$z2^2=(2)^2+(3)^2=$	2710,15	4562,13	7113,65	12626,17	37054,87
5	$g2=(2)/(4)=$	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
6	gfe=	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	$g=(5)+(6)=$	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
8	$b2=(3)/(4)=$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	Bm=	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
10	$b=(8)+(9)=$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
11	$Y^2=(7)^2+(10)^2=$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	$rg=(7)/(11)=$	36,05	41,41	44,96	47,39	44,84
13	r1=	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66
14	$r=(12)+(13)=$	37,71	43,07	46,62	49,05	46,50
15	$xg=(10)/(11)=$	20,89	28,43	36,23	47,44	67,39
16	x1=	5,11	5,11	5,11	5,11	5,11
17	$x=(15) + (16)=$	26,00	33,54	41,34	52,55	72,50
18	$Z=RAIZ\{(14)^2 + (17)^2\}=$	45,81	54,59	62,31	71,88	86,13
19	$I1= V / (18)=$	4,80	4,03	3,53	3,06	2,55
20	$I2=RAIZ\{(4)^*(11)\}=$	1,25	1,34	1,46	1,68	2,38
21	Pot. Entr= $m*(19)^2*(14)=$	2609,82	2098,64	1743,50	1378,34	910,05
22	PML= $m*(20)^2*(2)=$	242,63	365,33	538,80	945,78	3264,51
23	Pérd estat= $m*(19)^2*(13)=$	114,88	80,88	62,07	46,65	32,49
24	Per nucl= $m*(19)^2*(6)/(11)=$	198,24	202,85	205,74	208,47	211,60
25	Per l(2)R= $(1)^*(22)=$	21,03	24,36	28,74	37,83	76,17
26	Pérd rotacional=	366,61	366,61	366,61	366,61	366,61
27	PEC =	63,38	63,38	63,38	63,38	63,38
28	PÉRDIDA TOTAL(de 23 a 27)=	764,14	738,08	726,54	722,94	750,25
29	Potencia de salida= $(21)-(28)=$	1845,68	1360,57	1016,96	655,40	159,81
30	EFICIENCIA(%)= $1-(28)/(21)=$	<b>70,72</b>	<b>64,83</b>	<b>58,33</b>	<b>47,55</b>	<b>17,56</b>
31	factor de pot= $100*((14)/(18))=$	82,33	78,90	74,82	68,23	53,99
32	HP de salida= $(29)/746$	2,47	1,82	1,36	0,88	0,21
33	Velocidad= $(1-(1))*Vel Sin$	1644,00	1680,00	1704,00	1728,00	1758,00
34	Torque= $Kt*(29)/(33)=$	10,72	7,73	5,70	3,62	0,87

Indicaciones:

El valor indicado dentro del paréntesis corresponde al número de ÍTEM

Para el torque en newton – metros  $Kt = 9.549$

m = número de fases.

#### 4.5.2 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA PARA EL CIRCUITO EQUIVALENTE APROXIMADO.

En la red equivalente aproximada, los cálculos son semejantes a los realizados con el circuito exacto.

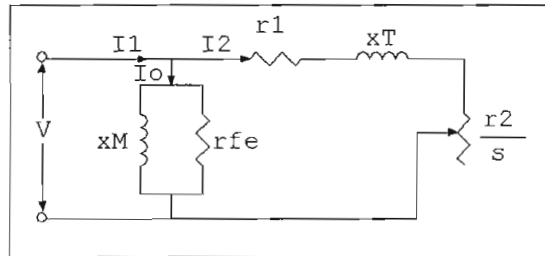


Figura 4.6: Red Equivalente Aproximada

Al aplicar las leyes de Kirchoff se tiene:

$$I_0 = z_M / v$$

$$I_2 = I_1 - I_0$$

Siendo:

$z_M$  = paralelo entre  $x_M$  y  $r_{fe}$ .

$V$  = voltaje nominal

$I_0$  = corriente de la rama de magnetización

$I_1$  = corriente nominal

$I_2$  = corriente de carga.

Para instrumentación analógica:

$$z_M = r_{fe} \perp x_M = 5.7 + j 61.5 \ \Omega$$

$$I_0 = (z_M / v) = 0.32 - j 0.09 \text{ (A)}$$

$$|I_0| = 0.34 \text{ A}$$

$$\theta = 15.62^\circ \text{ (en adelanto)}$$

$$\begin{aligned}
 I_2 &= I_1 - I_0 \\
 &= 6.97 - j 0.09 \text{ (A)} \\
 |I_2| &= 6.67 \text{ A} \\
 \theta &= 0.79^\circ \text{ (en atraso)}
 \end{aligned}$$

Luego se procede a determinar las pérdidas, las potencias y la eficiencia

- Pérdidas constantes = 366.31 W
- $I^2 r$  estator + rotor = 987.9 W ( r de estator es igual a la del rotor)

Para la norma IEC 34-2

- Pérdidas adicionales = 7.46 W
- Pérdidas totales = 1362.08 W

Para la norma ANSI IEEE 112

- Pérdidas Extrañas con carga = 63.38 W
- Pérdidas totales = 1417.93 W

Se determina La potencia mecánica, la potencia de salida y se calcula la eficiencia.

Norma IEC 34-2

$$\begin{aligned}
 P_{\text{MEC INT}} &= 5205.7 \text{ W} \\
 P_{\text{SALIDA}} &= 4831.63 \text{ W} \\
 P_{\text{ENTRADA}} &= 6193.65 \text{ W} \\
 \eta &= 78 \%
 \end{aligned}$$

Norma ANSI IEEE 112

$$\begin{aligned}
 P_{\text{MEC INT}} &= 5205.7 \text{ W} \\
 P_{\text{SALIDA}} &= 4775.71 \text{ W} \\
 P_{\text{ENTRADA}} &= 6193.65 \text{ W} \\
 \eta &= 77 \%
 \end{aligned}$$

De manera análoga se realizan los cálculos con los datos adquiridos con instrumentación digital.

CIRCUITO EQUIVALENTE APROXIMADO			
INSTRUMENTACIÓN ANALÓGICA		INSTRUMENTACIÓN DIGITAL	
	Norma IEC 34-2	Norma ANSI IEEE 112	
$\eta$ %	78	77	77.73
			76.78

*Tabla 4.30*

### 4.5.3 RESUMEN DE LOS CÁLCULOS

	INSTRUMENTACIÓN ANALÓGICA		INSTRUMENTACIÓN DIGITAL	
	Norma IEC 34-2	Norma ANSI IEEE 112	Norma IEC 34-2	Norma ANSI IEEE 112
$\eta$ % (exacto)	71	69	72.7	71
$\eta$ % (aproximado)	78	77	77.73	76.78

*Tabla 4.31*

### 4.5.4 Análisis de los Valores Calculados de Eficiencia

La eficiencia se calculó de acuerdo al método indirecto denominado Totalización de Pérdidas, el mismo que consiste en determinar las pérdidas y aplicar las ecuaciones correspondientes para calcular la potencia mecánica interna, la potencia de salida, la potencia de entrada y la eficiencia.

Los valores de eficiencia calculados de acuerdo a la norma IEC 34 – 2, indica un ligero incremento respecto a los valores calculados de acuerdo a la norma ANSI IEEE 112. Esta diferencia en los valores, se debe a que la norma IEC 34-2, asume un valor de 0.5% de la potencia nominal para las pérdidas adicionales. Esto causa que el total de pérdidas sea menor que el determinado con la norma americana y por consecuencia la eficiencia resulta incrementada.

Los valores de eficiencia calculados con los datos adquiridos con instrumentación analógica, sufren un decremento respecto a los valores de eficiencia calculados con los datos adquiridos con instrumentación digital. Los instrumentos analógicos utilizados poseen menor clase de exactitud que el instrumento digital. Esto implica que las mediciones capturadas sean menos precisas y por ende se genere mayor error. Este incremento de error se refleja en los valores calculados de los parámetros de la máquina, las pérdidas y la eficiencia.

En la tabla 4.31 se muestran los valores calculados de eficiencia para el circuito equivalente exacto y aproximado, tanto con instrumentación analógica como con instrumentación digital.

Para el circuito equivalente aproximado, los valores calculados de eficiencia con instrumentación analógica e instrumentación digital y de acuerdo a la norma IEC 34-2 y ANSI IEEE 112 son mayores que los valores calculados para el circuito equivalente exacto. En el circuito equivalente aproximado se ubica a la rama de magnetización a los terminales de estator y la impedancia de estator se configura en serie con la impedancia de rotor, generando una impedancia equivalente que resulta de adición de las impedancias de estator y rotor.

En el circuito equivalente exacto  $r_1 = 1.67\Omega$ ,  $r_2 = 4.49\Omega$  y en el circuito equivalente aproximado  $r_1 = r_2 = 3.38\Omega$  y el valor de la reactancia para el circuito equivalente exacto es de  $5.11\Omega$  mientras que para el circuito equivalente aproximado es de  $9.75\Omega$  (para instrumentación analógica)

Al aplicar voltaje a los terminales del estator del circuito equivalente exacto, la caída de tensión se reparte en la impedancia de estator y la impedancia de magnetización. Esto no ocurre para el circuito aproximado, pues toda la caída de tensión ocurre en la impedancia de magnetización, como consecuencia, las corrientes de cargas difieren en ambos circuitos. Para el circuito aproximado la corriente de carga es casi igual a la corriente de estator caso que no sucede el en circuito exacto; como consecuencia al calcular la potencia mecánica interna, ésta se altera y afecta a los valores calculados de potencia de salida, potencia de



entrada y eficiencia, haciendo que se incrementen respecto a los valores calculados del circuito equivalente exacto.

El circuito equivalente exacto, permite el cálculo de los parámetros y de la eficiencia de manera fiable.

Para fines didácticos, el circuito equivalente aproximado tiene su justificación debido a la simplicidad del estudio.

## 4.6 VALIDACIÓN

Se realizará la validación de los parámetros obtenidos con el circuito exacto y los valores calculados de eficiencia para el mismo circuito. Para esto se recurre a fuentes de información fiables, que basan su trabajo en normas.

Se emplearán cuatro manuales técnicos de ingeniería eléctrica y el protocolo de prueba del motor en ensayo entregado por el fabricante.

### 4.6.1 VALIDACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA MÁQUINA

Según la referencia 18 en la página 729, tabla 3: Valores Característicos. Para motores trifásicos de 220V, 4 polos:  $r_1 = 0.03$  pu;  $r_2 = 0.077$  pu;  $x = 0.10$  pu.

Según la referencia 19, sección 7, página 238, tabla 7.6. Para motores de 220V, 3 fases, 60 ciclos, menores a 5hp:  $r_1 = 0.018$  pu a 0.05 pu;  $r_2 = 0.010$  pu a 0.098 pu;  $x_1 = x_2 = 0.04$  pu a 0.149 pu.

Los datos determinados en este proyecto son:

CIRCUITO EQUIVALENTE EXACTO				
Parámetro	Instrumentación	Instrumentación	Instrumentación	Instrumentación
	Analógica ( $\Omega$ )	Analógica (pu)	Digital ( $\Omega$ )	Digital (pu)
$r_1$	1.67	0,036	1.67	0.036
$r_2$	4.48	0,082	4.08	0.074
$r_{fe}$	645.08	11,85	666.5	12.243
$X_1 = x_2$	5.11	0,093	5.26	0.096
$x_M$	98.55	1,81	103.41	1.899

Comparación de los parámetros para instrumentación analógica					
Parámetros	Valor calculado en pu	Valor según la referencia 18 en pu	Comparación %	Valor según la referencia 19 en pu	Comparación
r1	0.036	0.034	5.6	0.018 a 0.05	Dentro del rango
r2	0.082	0.077	6.1	0.01 a 0.098	Dentro del rango
x1 = x2	0.093	0.10	7.5	0.04 a 0.149	Dentro del rango
Comparación de los parámetros para instrumentación digital					
Parámetros	Valor calculado en pu	Valor según la referencia 18 en pu	Comparación %	Valor según la referencia 19 en pu	Comparación %
r1	0.036	0.034	5.6	0.018 a 0.05	Dentro del rango
r2	0.074	0.077	4.1	0.01 a 0.098	Dentro del rango
x1 = x2	0.096	0.10	4.2	0.04 a 0.149	Dentro del rango

El valor de la resistencia del devanado de estator r1 es de 0.036 pu para instrumentación analógica y digital. La referencia 18, señala que el valor de resistencia del devanado estático es de  $r1 = 0.034$  pu. Al comparar ambos valores se puede apreciar que están en el mismo orden. La referencia 19 indica un intervalo de 0.018 pu a 0.054 pu para el valor de la resistencia del devanado estático. En este caso el valor de r1 determinado en este proyecto, se encuentra dentro del rango propuesto por la referencia.

El valor de la resistencia del devanado rotórico es de  $r2 = 0.082$  pu para instrumentación analógica y de  $r2 = 0.074$  pu para instrumentación digital. La referencia 18 indica que el valor de la resistencia del devanado del rotor es de 0.077 pu. Al compararlo con el valor determinado con instrumentación analógica se puede ver que existe una ligera desviación en el orden del 7% que es un rango aceptable. Para el caso del valor de la instrumentación digital se puede apreciar fácilmente que los valores guardan similitud. La referencia 19 indica para el valor de la resistencia del devanado del rotor un intervalo de 0.01 pu a 0.098 pu. Los valores calculados de la resistencia del devanado del rotor, 0.082 pu y 0.074 pu

para instrumentación analógica y digital respectivamente, se localizan dentro del rango que indica la referencia.

El valor de la reactancia de dispersión  $x_1 = x_2$  es de 0.093 pu para instrumentación analógica y de  $x_1 = x_2 = 0.096$  pu para instrumentación digital.

La referencia 18 indica que el valor de la reactancia de dispersión es de 0.10 pu.

Si se compara con el valor determinado con instrumentación analógica se puede ver que la desviación alcanza el 7% que es un rango admisible. Para el caso del valor de la instrumentación digital se puede apreciar que la desviación existente es de 4% lo que implica que ambos valores sostienen concordancia. La referencia 19 indica que el valor de la reactancia de dispersión es de 0.04 pu a 0.149 pu. Que al compararse con los valores obtenidos, se aprecia que tanto el valor determinado con instrumentación analógica 0.093 pu y el determinado con instrumentación digital 0.096 pu se ubican en el rango establecido.

#### 4.6.2 VALIDACIÓN DEL VALOR DE LA EFICIENCIA CALCULADA

De acuerdo a las referencias bibliográficas se tiene:

- La referencia 16, página 130, cuadro: "Características del Motor Asíncrono", indica que para motores de tres fases, 220 V, 1800 rpm, 4 polos. Una eficiencia del 80%.
- La referencia 17, página 342, tabla 138: "Eficiencias y Factores de Potencia para Motores de Bajo Voltaje", indica que para motores trifásicos, 220 V, 4 polos, 1800 rpm. Una eficiencia que va desde el 78% al 82%.
- La referencia 18, página 130, tabla 3: "Valores Característicos", manifiesta una eficiencia del 80%.
- La referencia 19, en la sección 7, página 237, indica que la eficiencia esta en el rango de 78 a 80% para motores de 4 polos, 220 V, 3 fases.
- La referencia 20, en la página 250363/15<sup>62</sup>, tabla 2.2.2 indica el valor de la eficiencia, para condiciones nominales a frecuencia de 50 Hz, Voltaje de línea a línea 200 V, deslizamiento  $s = 0.086$ ,  $\eta = 72.7 \%$

---

<sup>62</sup> En la sección de ANEXOS se indican las copias de los documentos originales, entregados por el fabricante.

Con los datos indicados en la tabla 4.31 que resume los valores calculados de eficiencia tanto para instrumentación analógica como digital, de acuerdo a las norma IEC 34-2 y ANSI IEEE 112 y los indicados en las referencias, se procede a realizar la validación, calculando la desviación entre los valores propuestos y resumiendo los resultados en la tabla 4.35

Instrumentación Analógica							
	Valor Calculado (%)	Ref. 16, 17, 18 (%)	Desviación (%)	Ref. 19 (%)	Desviación (%)	Ref. 20 (%)	Desviación (%)
Norma IEC	71	80	11,3	79	10,1	81	12,3
Norma ANSI	69	80	13,8	79	12,7	81	14,8

Instrumentación Digital							
	Valor Calculado (%)	Ref. 16, 17, 18 (%)	Desviación (%)	Ref. 19 (%)	Desviación (%)	Ref. 20 (%)	Desviación (%)
Norma IEC	72,7	80	9,1	79	8,0	81	10,2
Norma ANSI	71	80	11,3	79	10,1	81	12,3

*Tabla 4.35*

La referencia 20, en sus documentos originales indica que el motor asincrónico utilizado para los ensayos, data de 1959 lo que implica que tienen un tiempo de instalación y funcionamiento en el Ecuador de aproximadamente 44 años.

Este dato es importante considerar, antes de realizar el análisis que genera la validación de la eficiencia. No se cuestiona que el paso del tiempo, produce que las pérdidas en el motor se incrementen.

De acuerdo a la referencia 16, la eficiencia se establece en el 80%, mientras que la referencia 17 plantea que el valor de eficiencia está alrededor del 78 % al 82%, lo que implica un valor promedio del 80%. La referencia 18 también establece un valor del 80% para la eficiencia. Las tres referencias bibliográficas citadas coinciden en el valor de la eficiencia, la establecen en un rango del 80 %.

Al realizar el cálculo de la desviación se observa que para el caso de la instrumentación analógica la desviación para la norma IEC 34-2 es del 11.25% y la desviación para la norma ANSI IEEE 112 es del 13.75%. Y en el caso de la instrumentación digital la desviación para la norma IEC 34-2 es del 9.13% y para la norma ANSI IEE 112 es del 11.25%. Los valores determinados indican una desviación promedio aproximada del 11%. Los valores de desviación se encuentran en un rango aceptable, considerando que el motor tiene más 40 años en funcionamiento. Los valores determinados con la instrumentación digital presentan menor desviación con respecto a los valores determinados con instrumentación analógica.

La referencia 19 presenta el intervalo del 78% al 80% para la eficiencia del motor asíncrono, el valor promedio será del 79%. En esta caso al realizar el cálculo de la desviación se observa que para el caso de la instrumentación analógica la desviación para la norma IEC 34-2 es del 10.13% y la desviación para la norma ANSI IEEE 112 es del 12.6%. Y en el caso de la instrumentación digital la desviación para la norma IEC 34-2 es del 7.97% y para la norma ANSI IEE 112 es del 10.13%. Los valores determinados indican una desviación promedio aproximada del 10%. Estos valores se encuentran en un rango admisible.

Se puede apreciar que en base a las referencias de los manuales técnicos de ingeniería eléctrica, la eficiencia que se calculó en este proyecto se encuentra dentro de los rangos difundidos.

En la referencia 20, se muestra un valor del 81.4 %, que al compararlo genera desviaciones parecidas a las desviaciones determinadas con las otras referencias. Para instrumentación analógica la desviación promedio es del 13 % y para instrumentación digital es del 11%. Que son valores tolerables considerando el tiempo de funcionamiento del motor.

El fabricante entrega un gráfico (para frecuencia de 50 Hz) en el que se indica la variación de la eficiencia en función de la velocidad de rotación.

Para comprobar que los valores calculados en este proyecto tienen concordancia con los valores indicados por el fabricante, se trazaré el mismo tipo de gráfico pero a la frecuencia de 60 Hz.

Los datos que el fabricante entrega son:

Nr	1465	1440	1420	1400	1370
.η	48.5	62.5	68.3	72.7	72

Tabla 4.36

El método que el fabricante utiliza para determinar la eficiencia es el método del freno (método directo). Se realiza la conversión de la velocidad de rotación y se calcula el deslizamiento. Este valor se compara con el valor de deslizamiento que el fabricante indica y se comprueba que son el mismo valor.

A frecuencia Nominal: 50 Hz.

La velocidad sincrónica es:

$$\begin{aligned} N_s &= (120 \times f) / \text{polos} \\ &= (120 \times 50) / 4 \\ &= 1500 \text{ rpm} \end{aligned}$$

Para  $N_r = 1370 \text{ rpm}$  el deslizamiento será:  $s = (N_s - N_r) / N_s$   
 $s = 0.086$

A frecuencia nominal de 60Hz,

La velocidad sincrónica es de 1800 rpm

Con la ecuación de transformación de frecuencia (ecuación 4.14):

$$x_1 = \frac{f_{\text{nominal}}}{f_1} x_1' \quad \text{Ecuación 4.14}$$

Se determina la velocidad de rotación a  $N_r = 1370 \text{ rpm}$ .

Aplicando estos valores:

$$N_r = (60/50) (1370) \approx 1644 \text{ rpm}$$

Para comprobar que el valor del deslizamiento es el mismo se reemplaza en la ecuación del deslizamiento y se obtiene que para 60 Hz:

$$S \approx 0.0866$$

Que corresponde al valor de deslizamiento a 50 Hz.

Este procedimiento se repite para cada paso de  $N_r$  que el fabricante indica.

Luego, con los valores de  $N_r$  se procede a determinar el deslizamiento y se procede a determinar la eficiencia de acuerdo a lo indicado en la sección 4.5.1.

Los resultados se indican en la tabla 4.37

$N_r$	1758	1728	1704	1680	1644
$\eta$	48.5	62.5	68.3	72.7	72

*Tabla 4.37*

Con los datos indicados por el fabricante (tabla 4.36) se determina la ecuación que representa la tendencia, que también se muestra en el anexo. Siguiendo con el mismo proceso, se determina la tendencia lineal con lo datos indicados en la tabla 4.37.

La ecuación a 50 Hz es:  $N_r = -202,13 \times P + 1661,06$

La ecuación a 60 Hz es:  $N_r = -223,62 \times P + 1963,91$

Se trazan ambas rectas, las mismas que se indican en el gráfico 4.3:

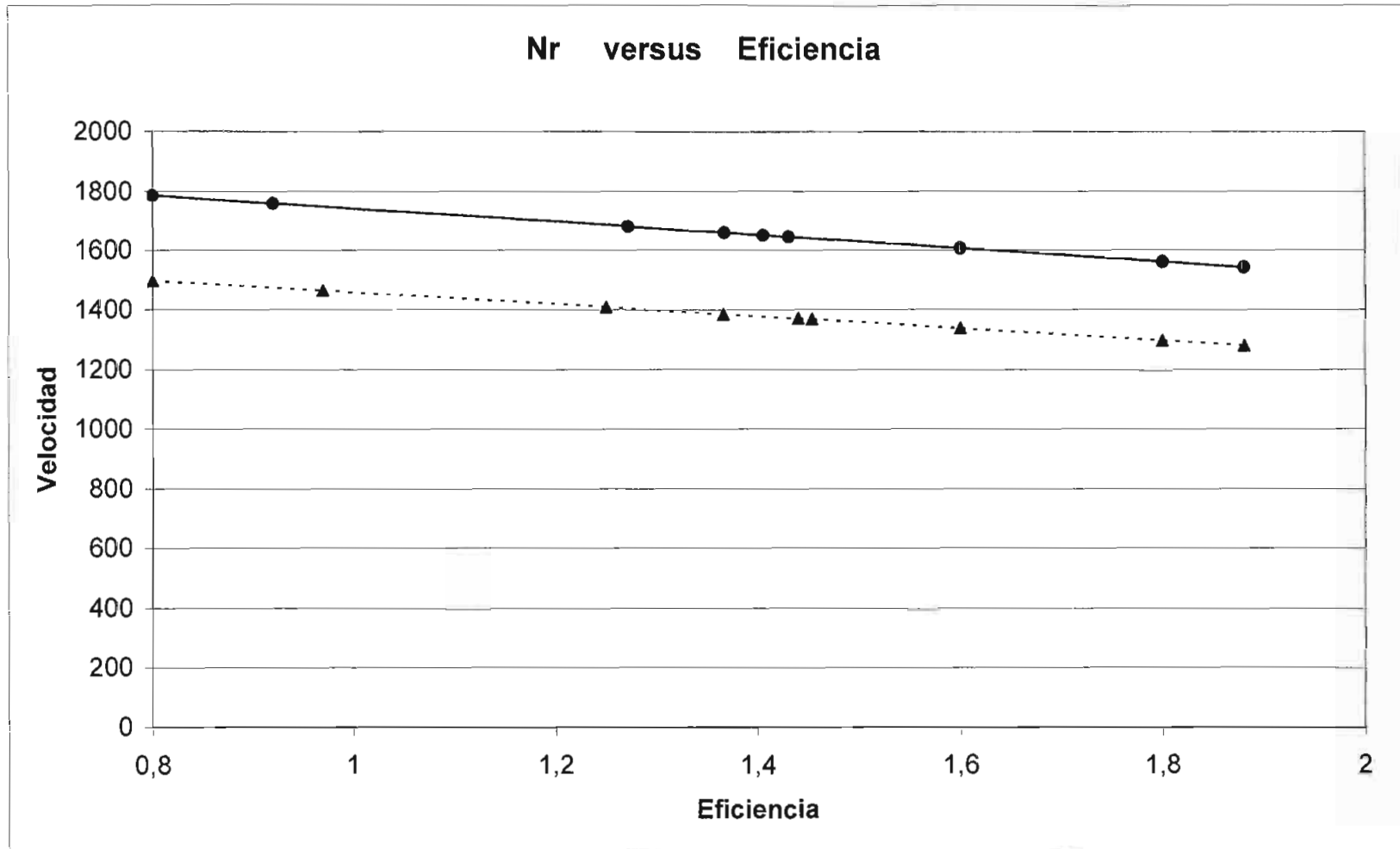


Gráfico 4.3



En el gráfico 4.3, se trazaron las dos rectas determinadas, la curva a 50 Hz es la recta trazada con línea discontinua y la correspondiente a 60 Hz es la línea continua. Ambas rectas, mantienen una distancia proporcional, en todo el intervalo graficado, demostrando que para este caso los efectos de la frecuencia no le afectan considerablemente a la eficiencia.

También es importante acotar, que la eficiencia garantizada por el fabricante se determinó con un método directo, el método del freno, el mismo que consiste en determinar las variables eléctricas de entrada (voltaje, corriente, Potencia), las variables mecánicas de salida (Torque, Velocidad) y precisar la eficiencia. Mientras que la eficiencia determinada en este proyecto es por medio de un método indirecto (totalización de pérdidas).

Los resultados que se han obtenido, son cercanos entre si, demostrando que el método aquí empleado es fiable.

## **CAPÍTULO 5**

### **CRITERIOS PARA NORMALIZACIÓN**

#### **5.1 INTRODUCCIÓN**

La generación industrial ecuatoriana, va evolucionando acorde a los cambios tecnológicos. La tendencia es conseguir la mayor eficiencia en los procesos industriales. Esto ocurre a la par con la predisposición de la globalización, la cual induce a un comercio general.

Si esto último, se instaure, todos los países, deben competir entre sí donde las reglas y normas que se instituyan deben ser generales y garantizar al consumidor y al medio ambiente una calidad de producto estándar. Para establecer reglas, se necesita de investigación y conocer al medio al que se va aplicar.

En el presente capítulo se formulan consideraciones específicas orientadas a la determinación de la eficiencia de las máquinas eléctricas asincrónicas.

#### **5.2 OBJETIVO**

Definir los métodos para determinar la eficiencia de las máquinas eléctricas rotativas a través de ensayos.

#### **5.3 CAMPO DE APLICACIÓN**

Es aplicable a las máquinas eléctricas rotativas asincrónicas.

Algunos tipos especiales de máquinas, tales como las conmutatrices, motores de colector y motores asincrónicos monofásicos pueden exigir la aplicación de otros métodos para la determinación de pérdidas, pero sin embargo, los principios contenidos en el presente capítulo pueden adaptarse para la definición de dichos métodos.

## **5.4 GENERALIDADES**

Los aparatos de medida utilizados durante estos ensayos serán de una clase de precisión que no exceda 0,2.

Los aparatos de medida se elegirán de forma que proporcionen lecturas en la parte útil de la escala, tales que se pueda fácilmente estimar una fracción de división que corresponda a una proporción de la lectura real.

La velocidad de rotación se medirá con un estroboscopio, un contador numérico o de un tacómetro.

## **5.5 DEFINICIONES**

### **5.5.1 EFICIENCIA**

Relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada, expresadas en las mismas unidades y que por lo general se indican en forma porcentual.

### **5.5.2 PÉRDIDAS TOTALES**

Diferencia entre la potencia absorbida y la potencia útil.

### **5.5.3 PÉRDIDAS EN LA MÁQUINA ASINCRÓNICA.**

Las máquinas asincrónicas presentan las siguientes pérdidas:

#### **5.5.3.1 Pérdidas en los Conductores**

Corresponden a las pérdidas por efecto Joule en todos los devanados de la máquina y se cuantifican por:

$$P_{cu} = I^2 R$$

Donde:

I: corriente que circula por los devanados de estator y de rotor.

R: resistencia de corriente directa correspondiente al devanado de estator y rotor.

Se definen dos tipos:

- a) pérdidas en el devanado de estator.
- b) pérdidas en el devanado de rotor

### **5.5.3.2 Pérdidas en el Núcleo**

Pérdidas que ocurren en todas las partes ferromagnéticas de la máquina se producen pérdidas por corriente de excitación, Foucault e histéresis; que se traducen en un calentamiento del motor. Se tipifican en 3 categorías:

- 1 Pérdidas por histéresis.
- 2 Pérdidas en los devanados de estator debido a la corriente de excitación.
- 3 Pérdidas en el núcleo o hierro por corrientes de Foucault.

### **5.5.3.3 Pérdidas de Fricción y Ventilación**

Ocurren por el giro, corresponden a las pérdidas por ventilación forzada, al roce del rotor con el aire, al roce en los cojinetes y en las escobillas, además de la propia potencia que absorbe el ventilador.

### **5.5.3.4 Pérdidas Extrañas con Carga ó Pérdidas Adicionales**

Son pérdidas que ocurren en el núcleo y en los devanados de estator por corrientes de Foucault.

Se tienen 2 clases:

- 1. Pérdidas en los devanados de estator por corrientes de Foucault.
- 2. Pérdidas de altas y bajas frecuencias.

## **5.6 MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA**

Para medir la resistencia de corriente directa, se pueden implementar varios métodos de ensayos, los mismos que dependerán de la exactitud deseada, se

recomienda el método del voltímetro amperímetro con error por corriente, considerando que los instrumentos de medición deben ser de una clase de precisión que no exceda 0,2.

### 5.6.2 CORRECCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TEMPERATURA DE REFERENCIA.

Para realizar la corrección de la resistencia a la temperatura de referencia se empleará la siguiente ecuación:

$$R_s = R_t \left( \frac{t_s + k}{t_t + k} \right)$$

Donde:

$R_s$  = resistencia del arrollamiento en ohmios a una temperatura  $t_s$ .

$R_t$  = resistencia del arrollamiento en ohmios a una temperatura  $t_t$ .

$t_s$  = temperatura de referencia en grados Celsius.

$t_t$  = temperatura ambiente en grados Celsius.

$K = 234.5$  para cobre.

### 5.7 TEMPERATURA DE REFERENCIA

Las pérdidas  $I^2R$  se deben corregir temperaturas presentadas a continuación:

CLASE TÉRMICA DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO	TEMPERATURA DE REFERENCIA °C
A,E	75
B	95
F	115
H	130

## **5.8 PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO**

### **5.8.1 ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS.**

- Con el ensayo de vacío a tensión nominal, se pueden determinar, la sumatoria de las pérdidas indicadas en el numeral 5.5.3.2 y 5.5.3.3
- A través del ensayo de vacío a la tensión variable, se obtiene la separación de las pérdidas indicadas en el numeral 5.5.3.2 y 5.5.3.3.
- Para determinar las pérdidas indicada en el literal 5.5.3.2 se realiza el ensayo en vacío acoplado.
- Se establecen las pérdidas indicadas en el numeral 5.5.3.4 a través de dos ensayos. El primer ensayo denominado Rotación Inversa, el mismo que permite determinar las pérdidas extrañas con carga ocurridas en alta frecuencia. El segundo ensayo es denominado Variación de Corriente el cual permite determinar las pérdidas extrañas con carga ocurridas en baja frecuencia.
- Las pérdidas indicadas en el numeral 5.5.3.1 se determinan de acuerdo a la corriente que circula por los devanados estator y rotor. Previo se determina la resistencia de corriente directa del devanado estatórico

### **5.8.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS PROPUESTOS.**

#### **5.8.2.1 Ensayo en Vacío a la Tensión Nominal**

Se aplican voltajes nominales polifásicos balanceados a los terminales del estator, se realizan lecturas de potencia y corriente. La potencia absorbida disminuida por

las pérdidas en los conductores de los devanados del estator determina la sumatoria de las pérdidas descritas en el numeral 5.5.3.2 y 5.5.3.3

#### **5.8.2.2 Ensayo en Vacío a la Tensión Variable**

Se aplican voltajes nominales polifásicos balanceados que oscilan hasta 125% del valor nominal y se toman lecturas de potencia, corriente y voltaje. Se traza una curva de pérdidas finales en función de voltaje cuadrado. Las pérdidas finales se obtienen disminuyendo de la potencia absorbida las pérdidas en los conductores de los devanados del estator. La curva así obtenida se extrapola para el valor nulo de voltaje el mismo que corresponde al valor de las pérdidas indicadas en el numeral 5.5.3.2 Las pérdidas definidas en el numeral 5.5.3.3 se determinan de la sustracción de las pérdidas finales menos las pérdidas por efecto Joule y las pérdidas del numeral 5.5.3.2

#### **5.8.2.3 Ensayo en Vacío Acoplado**

Para realizar este ensayo se requiere el acoplamiento del motor en ensayo con otro motor. Este último sirve para hacer girar a la velocidad sincrónica el rotor del motor en ensayo. Se lleva el rotor del motor en ensayo a la velocidad sincrónica a través de medios externos comprobando previamente que ambas máquinas giren en el mismo sentido. Se aplican voltajes nominales polifásicos balanceados a los terminales del estator, se realizan lecturas de potencia y corriente. Las pérdidas descritas en el numeral 5.5.3.3 se determinan disminuyendo de la potencia absorbida las pérdidas en los conductores de los devanados del estator.

#### **5.8.2.4 Ensayo de Variación de Corriente**

Se aplican voltajes nominales polifásicos balanceados a los terminales del estator, removido el rotor del motor en ensayo hasta alcanzar el valor de corriente  $I_t$ . Se realizan lecturas de potencia, corriente y voltaje. La potencia absorbida disminuida

por las pérdidas en los conductores de los devanados del estator determina las pérdidas descritas en el numeral 5.5.3.4 ocurridas en altas frecuencias.

Donde:

$$I_t = \sqrt{I_{NOMINAL}^2 - I_{MAGNETIZACION}^2}$$

#### 5.8.2.5 Ensayo de Rotación Inversa

Se lleva el rotor del motor en ensayo a la velocidad sincrónica a través de medios externos comprobando previamente que ambas máquinas giren en sentido contrario. Se aplican voltajes polifásicos balanceados a los terminales del estator, hasta alcanzar el valor de la corriente de prueba  $I_t$ . Se realizan lecturas de potencia y corriente en la máquina de ensayo y se toman lecturas de potencia en la máquina acoplada (sin aplicar y aplicando voltaje a los terminales de la máquina en ensayo.). Las pérdidas descritas en el numeral 5.5.3.4 se determinan a través de la siguiente ecuación.

$$PEC_{ALTAS FRECUENCIAS} = (Pr - Pf) (Pot. Absorbida - PEC_{BAJAS FRECUENCIAS} - mI^2R_{estator})$$

Donde:

PEC = pérdidas extrañas con carga.

Pr = potencia del motor acoplado requerida para manejar el rotor sin aplicar voltaje al motor en ensayo.

Pf = potencia del motor acoplado requerida para manejar el rotor al aplicar voltaje al motor en ensayo.

$mI^2R_{estator}$  = pérdidas en los conductores de los devanados del estator. Siendo m el número de fases.

Las pérdidas totales descritas en el numeral 5.3.3.3, se determinan con la sumatoria de las PEC ocurridas en baja y alta frecuencias.

#### 5.8.2.6 Ensayo a Rotor Bloqueado.

Se aplican voltajes nominales polifásicos balanceados a los terminales del estator hasta que por los conductores del devanado primario circule corriente nominal, se realizan lecturas de potencia, voltaje y corriente.



Se sugiere que esta prueba se realice al 25% del valor de la frecuencia nominal, pues la reactancia de dispersión total a frecuencia nominal se puede obtener de esta prueba si se considera que la reactancia es proporcional a la frecuencia. Sin embargo los efectos de la frecuencia son despreciables para los motores normales de menos de 25HP

## 5.9 DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA

### 5.9.1 TOTALIZACIÓN DE PÉRDIDAS

La eficiencia se determinará iniciando con la determinación de las pérdidas totales, consideradas como la suma de las pérdidas determinadas de la forma siguiente:

#### 5.9.1.1 Pérdidas Constantes (Pérdidas Independientes de la Intensidad)

- La suma de las pérdidas independientes de la intensidad, indicadas en los numerales 5.5.3.2 y 5.5.3.3 se determinan con el ensayo descrito en el numeral 5.8.2.1. La potencia absorbida, disminuida en las pérdidas por efecto Joule en el arrollamiento primario ( $RI^2$ ) da el total de las pérdidas independientes de la intensidad. Las pérdidas por efecto Joule en el arrollamiento secundario ( $RI^2$ ) se pueden despreciar.
- Las pérdidas descritas en el numeral 5.5.3.2 se determinan con el ensayo descrito en el numeral 5.8.2.3 La potencia absorbida, disminuida en las pérdidas por efecto Joule en el arrollamiento primario ( $RI^2$ ) da el total de las pérdidas del núcleo.
- Las pérdidas definidas en el apartado 5.5.3.2 y la suma de las pérdidas definidas en los apartados 5.5.3.3 se pueden determinar separadamente con el ensayo definido en el literal 5.8.2.2 La potencia absorbida, disminuida en las pérdidas por efecto Joule ( $RI^2$ ) en el arrollamiento primario es trasladada a un gráfico en función del cuadrado de la tensión. De esta forma, para débiles saturaciones, se obtiene una línea recta que se

puede extrapolar hasta un valor nulo de la tensión, que nos define la suma de las pérdidas indicadas en los apartados 5.5.3.3

### 5.9.1.2 Pérdidas en Carga (Pérdidas Normales Dependientes de la Intensidad).

Las pérdidas definidas en el apartado 5.5.3.1 a) se calculan apartir de las resistencias de los arrollamientos primarios, medidos con corriente continua y reducida a la temperatura de referencia y la intensidad correspondiente a la carga para la que las pérdidas son calculadas. Para determinar las pérdidas definidas en el apartado 5.5.3.1 b) una vez efectuado el ensayo en carga, las pérdidas en el arrollamiento secundario, se toman iguales al producto del deslizamiento por la potencia total transmitida al arrollamiento secundario.

### 5.9.1.3 Pérdidas Adicionales en Carga.

Las pérdidas definidas en el apartado 5.5.3.4 se determinan según los ensayos indicados en los numerales 5.8.2.5 y 5.8.2.6

### 5.9.1.4 Método del Circuito Equivalente

Cuando no se hacen pruebas bajo carga, se calculan las características de operación sin carga y los datos de la impedancia por el circuito equivalente. Para el cálculo de los parámetros se realizan los ensayos indicados en los numerales 5.8.2.1, 5.8.2.3 y 5.8.2.6. El circuito equivalente es el indicado en la figura.

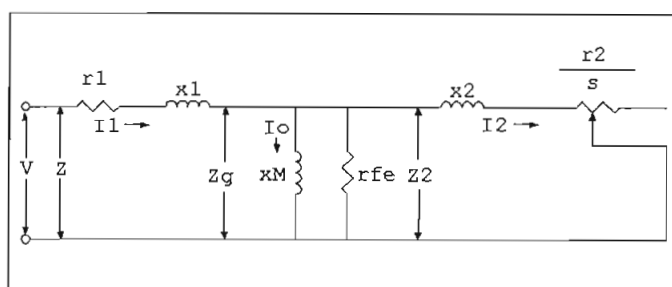


Fig. 5.2: Circuito Equivalente

Se empelará la siguiente relación de la impedancia de dispersión:

$(x1/x2) = 1$  para motores clase A, D y motores de rotor devanado.

$(x1/x2) = 0.67$  para motores clase B.

$(x1/x2) = 0.43$  para motores clase C.

Información.

o = cantidades pertenecientes a la ensayo de vacío.

b = cantidades pertenecientes a la ensayo de rotor bloqueado.

$$VAR = \sqrt{(mVI_L)^2 - W}$$

VAR = volt-amperios reactivos

m = número de fases

V = voltaje de fase.

$I_L$  = corriente de fase.

W = potencia absorbida por el motor asincrónico.

$$x1_b = \left( \frac{VAR_b}{m.I_b^2 \cdot \left(1 + \frac{x1}{x2} + \frac{x1}{xM}\right)} \right) \cdot \left( \frac{x1}{x2} + \frac{x1}{xM} \right)$$

$x1_b$  = reactancia de dispersión de estator a rotor bloqueado a la frecuencia  $f1$

$xM$  = reactancia de magnetización.

$x1$  = reactancia de dispersión de estator a frecuencia nominal.

$x2$  = reactancia de dispersión de estator a frecuencia nominal.

$$xM = \left( \frac{m.V_o^2}{VAR_o - m.I_o^2 \cdot x1} \right) \times \left( \frac{1}{1 + \frac{x1}{xM}} \right)^2$$

$$x1 = \frac{f_{nominal}}{f_1} x1_b$$

Para realizar el cálculo se asume que  $x1/xM = 0.1$

$$Pnucleo = Pvacioacoplado - mI_o^2 r1$$

$$gfe = \frac{Pnucleo}{mV_o^2} \left( 1 + \frac{x1}{xM} \right)^2$$

$$r_{fe} = \frac{1}{g_{fe}}$$

$g_{fe}$  = conductancia del núcleo.

$P$  núcleo = pérdidas en el núcleo.

$r_{fe}$  = resistencia del núcleo.

$$r_2 = \frac{\frac{W_b}{m \cdot I_b^2} - r_1}{\left(1 + \frac{x_2}{x_2} \frac{x_1}{xM}\right)^2 - \left(\frac{x_2}{x_1}\right)^2 (x^2 \cdot 1 \cdot g_{fe})}$$

$r_2$  = resistencia de estator referida al estator.

La eficiencia se determina para los valores nominales de la máquina, donde:

$$\eta = (1 - (\text{Pérdidas} / \text{Potencia..de..Entrada})) * 100$$

## 5.9.2 MÉTODOS DIRECTOS

Se indican los siguientes ensayos:

- Ensayo al Freno
- Ensayo con Máquina Auxiliar Calibrada.
- Ensayo en Oposición.
- Ensayo en Oposición con Marcha en Paralelo sobre la Red.

### 5.9.2.1 Ensayo al Freno.

Cuando la máquina gira en las condiciones nominales de velocidad, tensión e intensidad, la eficiencia se toma igual a la relación entre la potencia útil y la potencia absorbida.

El ensayo se efectuará a una temperatura lo más próxima a la alcanzada en funcionamiento al final del tiempo especificado en el servicio nominal. No se efectuará ninguna corrección para tener en cuenta la variación de la resistencia de los arrollamientos con la temperatura.

#### **5.9.2.2 Ensayo con Máquina Auxiliar Calibrada.**

Cuando la máquina gira en las condiciones nominales de velocidad, tensión e intensidad la eficiencia se toma igual a la relación entre la potencia útil y la potencia absorbida. El ensayo se efectuará a una temperatura lo más próxima a la alcanzada en funcionamiento al final del tiempo especificado en el servicio nominal. No se efectuará ninguna corrección para tener en cuenta la variación de la resistencia de los arrollamientos con la temperatura.

#### **5.9.2.3 Ensayo en Oposición.**

Cuando máquinas idénticas funcionan a condiciones nominales semejantes, las pérdidas se consideraran igualmente repartidas y la eficiencia se calcula partiendo de la mitad de las pérdidas totales y de la potencia eléctrica absorbida. La máquina accionada funciona como un alternador asincrónico si se dispone de una fuente de potencia reactiva magnetizante y se conectan sus bornes a una carga apropiada. El ensayo se efectuará a una temperatura lo más próxima a la alcanzada en funcionamiento al final del tiempo especificado en el servicio nominal. No se efectuará ninguna corrección para tener en cuenta la variación de la resistencia de los arrollamientos con la temperatura.

#### **5.9.2.4 Ensayo en Oposición con Marcha en Paralelo sobre la Red.**

Cuando máquinas idénticas giran en las condiciones nominales, que son prácticamente las mismas, las pérdidas suministradas por la red se consideran como igualmente repartidas y la eficiencia se calcula partiendo de la mitad de las pérdidas totales y de la potencia absorbida por una de las máquinas.

El ensayo se efectuará a una temperatura lo más próxima a la alcanzada en funcionamiento al final del tiempo especificado en el servicio nominal. No se efectuará ninguna corrección para tener en cuenta la variación de la resistencia de los arrollamientos con la temperatura.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 CONCLUSIONES

1. El método de voltímetro amperímetro y el método del puente de Wheatstone (métodos empleados para medir la resistencia de corriente de directa del devanado estático) son métodos que generan una buena precisión en la medición, la cual mucho depende de la clase de exactitud de los instrumentos empleados. El método del voltímetro amperímetro con error por corriente genera un intervalo de error del  $\pm 0.04 \Omega$  y el método del puente de Wheatstone genera un intervalo de error del  $\pm 0.05 \Omega$ .
2. Los errores que se cometen con la instrumentación analógica son de mayor magnitud que los que genera la instrumentación digital, esto ocurre debido al paralaje que constituye una falla humana que interviene en el proceso de lectura. Otro factor importante que interviene en el proceso es la clase de exactitud de los instrumentos de medición utilizados.
3. La instrumentación digital, permite capturar datos con una mejor exactitud que los que se registran con la instrumentación analógica. Con una adecuada configuración del instrumento, éste realiza el trabajo del investigador con respecto a la observación de valores, reduciendo de esta manera las fallas humanas que el proceso de medición puede sufrir.

4. Las desviaciones de las lecturas realizadas con instrumentación analógica con respecto a las realizadas con la instrumentación digital se encuentran en un margen aceptable, la desviación promedio no supera el 5%, este valor permite deducir que la instrumentación analógica es confiable para realizar mediciones en este tipo de procesos.
5. La resistencia de corriente directa debe ser corregida a la temperatura de referencia de acuerdo a la clase térmica de aislamiento del bobinado, pues la no corrección hace que la eficiencia varíe alrededor de un 2%, entonces la corrección de la temperatura avala una mejor exactitud en la determinación de la eficiencia.
6. El valor de las pérdidas constantes o rotacionales están en el orden de los 360 W que representan alrededor del 40% de las pérdidas totales ocurridas en el motor asincrónico de prueba, tanto para instrumentación analógica como para instrumentación digital, determinados de acuerdo al ensayo de vacío a la tensión nominal.
7. El valor de las pérdidas en el núcleo, determinadas de acuerdo al ensayo en vacío acoplado, se encuentran en el orden de los 200W que representan alrededor del 55% de las pérdidas rotacionales o constantes, tanto para instrumentación analógica como para instrumentación digital.
8. Los valores de las pérdidas constantes y de las pérdidas del núcleo, determinadas de acuerdo al ensayo de vacío a la tensión variable, son parecidos, tanto para instrumentación analógica como para instrumentación digital, a los valores obtenidos con los ensayos de vacío a la tensión nominal y vacío acoplado; esto implica que se puede emplear el ensayo de vacío a la tensión variable como sustituto del los ensayos de vacío a la tensión nominal y de vacío acoplado.

9. El valor de las pérdidas mecánicas, determinadas de acuerdo al ensayo en vacío a la tensión variable, se hallan en el orden de los 160W que representan alrededor del 44% de las pérdidas rotacionales o constantes.
10. Las pérdidas extrañas con carga constituyen un aproximado del 9% de las pérdidas totales, tanto para instrumentación analógica como para instrumentación digital. La norma IEC 34-2 no indica el procedimiento para la determinación de estas pérdidas, asume que el 0.5% de la potencia nominal representa el valor de estas pérdidas, mientras que de acuerdo a la norma americana ANSI IEEE 112, el valor de estas pérdidas se obtienen a través de los ensayos de rotación inversa y variación de corriente. La diferencia existente entre ambos valores repercute alrededor del 2 % en el cálculo de la eficiencia.
11. Los valores determinados de acuerdo a las hipótesis planteadas para el circuito aproximado, difieren en el orden del 11 % de los valores determinados respecto al circuito equivalente exacto, el circuito aproximado tiene su justificación para ciertos tipos de aplicaciones, como por ejemplo el análisis del arranque del motor.
12. Como aplicación de la norma ANSI IEEE 112, la eficiencia debe ser determinada a condiciones nominales para el motor en ensayo, esto es, para el valor nominal de voltaje, corriente y deslizamiento. Caso contrario los valores que se determinen para otras condiciones son diferentes.
13. Los valores de eficiencia determinados con el método de Separación de Pérdidas, planteado en la normas, para la máquina asíncrona empleada en este proyecto, se hallan dentro de los rangos establecidos en las referencias bibliográficas. Con la instrumentación analógica se determinó que la eficiencia del motor en ensayo es del 70% y con la instrumentación digital el valor de la eficiencia es del 72%.



14. Los valores de eficiencia calculados en base a los parámetros del circuito equivalente aproximado, presentan una desviación en el orden del 10% respecto a los valores calculados con el circuito equivalente exacto, esto es debido a que se colocó la rama de magnetización a los terminales de estator, provocando que la corriente de carga sea ligeramente menor a la corriente nominal de entrada.
  
15. El fabricante utiliza el método del freno o dinamómetro para determinar el valor de eficiencia a garantizar. Los valores de eficiencia determinados en este proyecto y el valor entregado por el fabricante, presentan una desviación en el orden del 12%, lo que permite concluir que ambos métodos son confiables en la determinación de la eficiencia.
  
16. La norma IEC 34-2, es específica en el tema de la determinación de la eficiencia, manifiesta varios esquemas para determinarla, indica los métodos directos e indirectos y recomienda el método preferente.
  
17. La norma ANSI IEEE 112, abarca más temas respecto a la determinación de las variables del motor asincrónico que la norma IEC 34-2. En el tema de la eficiencia, la norma americana es más específica con respecto al detalle de los procedimientos en los cuales se indican las ecuaciones correspondientes. Las normas muestran los mismos métodos (directos e indirectos) para determinar la eficiencia. La norma ANSI IEEE 112 no se compromete en la recomendación de un método específico para ser aplicado, tal como lo hace la norma europea.

## RECOMENDACIONES

1. Se aconseja, la utilización de la Norma americana ANSI IEEE 112, para determinar a más de la eficiencia otras variables que se involucran en el motor asincrónico, tales como el torque, el deslizamiento, etc. La norma americana, abarca más temas acerca de las variables eléctricas y mecánicas que ocurren en el motor asincrónico, además son más difundidas en nuestro medio.
2. Se sugiere utilizar el método del voltímetro amperímetro con error en corriente para determinar el valor de la resistencia de corriente directa del devanado estatórico, sin dejar de lado que la clase de exactitud de los instrumentos de medición no sea menor a 0,2 y que la corriente utilizada en el ensayo no sea menor al 50% de la corriente nominal.
3. Se propone, que se realicen las mediciones de las prácticas de laboratorio de Máquinas Eléctricas, utilizando el Power Logic, ya que este instrumento presenta, mayor simplicidad en las conexiones, disminuyendo por completo el error de paralaje, este instrumento realiza la adquisición de los datos de manera automática, además procesa información del estado transitorio de las variables eléctricas que son las requeridas para análisis de ingeniería, también permite, el procesamiento de la información de manera ágil a través de hojas electrónicas.
4. Se plantea, realizar el ensayo de vacío a la tensión variable, en vez de realizar dos ensayos: el de vacío a la tensión nominal y el ensayo de vacío acoplado, pues el ensayo de vacío a la tensión variable, es confiable y genera menos errores humanos, también da información por separado de las pérdidas en el núcleo y de las pérdidas mecánicas.

5. Es conveniente, que se realicen los ensayos de rotación inversa y variación de corriente, para determinar las pérdidas extrañas con carga.
6. Se recomienda la utilización del circuito equivalente exacto, con fines didácticos y técnicos, pues permite obtener los valores característicos de la máquina.
7. Es conveniente utilizar el método de pérdidas separadas o totalización de pérdidas, para la determinación de la eficiencia, debido a que permite conocer, las pérdidas que se producen y los parámetros de la máquina, los que a su vez permiten determinar las respuestas del motor para diferentes puntos de carga.
8. Se propone la creación de una norma ecuatoriana, que trate acerca de la determinación de la eficiencia de los motores asíncronos. El presente trabajo puede servir como referencia para la elaboración de la citada norma.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### NORMAS

- 1) INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Rotating electrical machines part 2, Methods for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from test Geneva Amendment 2, 1996, 21 p, il (Amendment IEC 34-2)
- 2) AMERICAN NATIONAL STANDARD, IEEE. Standard test procedure for polyphase induction motors and generators. New York, 1978, 31pages.

### LIBROS

- 3) FITZGERALD, Gerald; Teoría de Máquinas Eléctricas. Quinta Edición. Ediciones McGraw Hill. Interamericana de Mexico SA. 1997
- 4) CHAPMAN. Máquinas Eléctricas. McGraw Hill. México. Enero 1991
- 5) GRAY, R; Máquinas Eléctricas y sistemas accionadores. Tercera Edición. Universitaria. Buenos Aires Argentina. 1977
- 6) THALER, G. WILCOX M. Máquinas eléctricas estado dinámico y permanente. Limusa México 1974.
- 7) FISHBANE, Paul; GASIOROWICZ, Stephen; THORNTON, Stephen. Física para ciencias e ingeniería. Primera edición. Prentice Hall Hispanoamericana, S. A. México. 1993.

- 8) ZILL, Dennis. Ecuaciones Diferenciales con Aplicaciones. Segunda edición. Grupo Editorial Ibero América. México. 1982.
- 9) ROSENBERG. Reparación de Motores Eléctricos. Doceava Edición, Ediciones G. Gill SA. México. 1985.
- 10) KARCZ. Fundamentos de Metrología Eléctrica. Tomo 1. Primera edición. Ediciones Técnicas Marcombo SA. Barcelona. 1999

### **APUNTES DE CLASE**

- 11) Taco V. Luis, "Máquinas Eléctricas" , Escuela Politécnica Nacional

### **DIRECCIONES ELECTRÓNICAS**

- 12) [www.iec.ch](http://www.iec.ch)
- 13) [www.ansi.org](http://www.ansi.org)

### **FOLLETOS**

- 14) SQUARE D. INSTRUCTION BULLETINS No 3020IM9807. POWER LOGIC CIRCUIT MONITOR SERIES 2000 INSTALLATION AND OPERATION. December 1998 La Vergne, TN USA
- 15) LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS, PRACTICAS DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS, MARZO-AGOSTO 2002, QUITO ECUADOR.

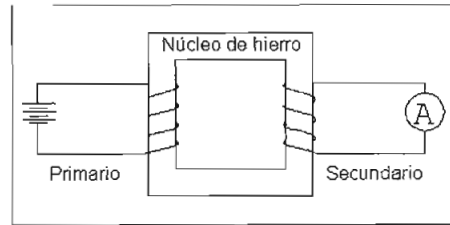
## MANUALES

- 16) W. S. IBBETSON. THE ELECTRIC POWER ENGINEERS' HANDBOOK  
3RD EDITION, GREAT BRITAIN, LOWE AND BRY DONE PRINTER  
LIMITED. LONDON. N.W.C 1951
- 17) SIEMENS, ELECTRICAL ENGINEERING HANDBOOK, 1TH EDITION,  
GREAT BRITAIN, WHITSTABLE LITHO 1996.
- 18) PENDER H. DEL MAR WILLIAM; ELECTRICAL ENGINEERS'  
HANDBOOK, 4TH EDITION, WILEY ENGINEERING HANDBOOK SERIES,  
NEW YORK, JOHN WILEY AND SON.
- 19) KNOWLTON, ARCHER. STANDARD HANDBOOK FOR ELECTRICAL  
ENGINEERS. 9<sup>TH</sup> EDITION, McGRAWHILL BOOK COMPANY INC. 1948

## PROTOCOLO DE PRUEBAS

- 20) SOCIETE ANONYME DE CONSTRUCTIONS MECANIQUES  
ELECTRIQUES ET DE TELEPHONIE "CETEL". MACHINES DIDACTIQUES.  
1959-11-10

## ANEXO 1

**EXPERIMENTO DE FARADAY**

En el experimento de Faraday, al cerrar el interruptor en el circuito 'primario', se produce una corriente en el secundario. Al cabo de un tiempo, la corriente cesa. Si entonces se abre el interruptor, vuelve a aparecer corriente en el secundario, la cual nuevamente cesa al cabo de un tiempo breve. Es importante recalcar que los circuitos primario y secundario se hallan físicamente separados (no hay contacto eléctrico entre ellos). Los resultados del experimento de Faraday (y muchos otros) se pueden entender en términos de una nueva ley experimental, que se conoce como la ley de Faraday-Lenz: La variación temporal del flujo magnético enlazado por un circuito, induce en éste una 'Fem.'  $\varepsilon$  :

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad \text{Ecuación 1}$$

Ley de Lenz: El sentido de la 'Fem.' inducida es tal que siempre tiende a oponerse a la variación del flujo magnético (lo cual explica el signo (-)). La variación temporal del flujo magnético enlazado por un circuito puede deberse a varias causas, entre las cuales se puede mencionar:

- Variación temporal de  $\vec{\beta}$

$$\vec{\beta} = \beta(\vec{r}, t) \quad \text{Ecuación 2}$$

- El circuito se mueve
- El circuito se deforma

Por supuesto, una combinación de las causas anteriores también producirá variación del flujo. Observemos también que la Ley de Faraday es una ley experimental, que no puede deducirse, en su forma general, de ningún otro hecho previamente conocido. Recordemos ahora que la 'Fem.' de un circuito C se define como, en que este campo eléctrico  $\vec{E}$  no es un campo electrostático.

El flujo magnético es  $\Phi$ ,

$$\Phi(S) = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad \text{Ecuación 3}$$

Por lo tanto,

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad \text{Ecuación 4}$$

Supongamos que el circuito no se mueve ni se deforma, entonces la variación del flujo  $\Phi$  sólo puede deberse a la variación temporal de  $\beta$ , es decir  $\vec{\beta} = \beta(\vec{r}, t)$ , luego

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial B}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad \text{Ecuación 5}$$

Usando el teorema de Stokes,

$$\int_S \left( \vec{\nabla} \wedge \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S} = 0 \quad \text{Ecuación 6}$$

Como S es una superficie cualquiera, se tiene la ley de Faraday en forma diferencial,

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Ecuación 7}$$

Que constituye la generalización de la relación  $\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = 0$  (electrostática). Hasta ahora, conocemos las siguientes ecuaciones para el electromagnetismo (en el vacío):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

Además, tenemos la ecuación de continuidad

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad \text{Ecuación 8}$$

Maxwell se dió cuenta que, en el caso de régimen no permanente, la ley de Ampere y la ecuación de continuidad son contradictorias. Eso significa que se debe modificar la ley de Ampere, pues ley de conservación de carga es considerada como mejor establecida. Para preservar lo más posible la forma de la ley de Ampere, Maxwell propuso una modificación de la forma

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 (\vec{J} + \vec{J}_D) \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde  $\vec{J}_D$  debe satisfacer la condición

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{J} + \vec{J}_D) = 0 \quad \text{Ecuación 10}$$

Luego, por la ecuación de continuidad,

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{J} + \vec{J}_D) = 0 \quad \text{Ecuación 11}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} + \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_D = - \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_D = 0 \quad \text{Ecuación 12}$$

Entonces



$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_D = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad \text{Ecuación 13}$$

Esta ecuación no define completamente a  $\vec{J}_D$ . Se encuentra que la elección más simple posible es

$$\vec{J}_D = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Ecuación 14}$$

Satisface todas las condiciones matemáticas y está de acuerdo con toda la evidencia experimental acumulada; por lo tanto la generalización de la ley de Ampere al caso de régimen no permanente es:

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \left( \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \quad \text{Ecuación 15}$$

Esta ecuación incluye a la ecuación de continuidad. La cantidad  $\vec{J}_D$  tiene las dimensiones de una corriente eléctrica -densidad- y se le llama 'corriente de desplazamiento' de Maxwell. Como comentario final podemos indicar que existe una falla lógica en la ley de Ampere cuando hay dependencia temporal de la corriente, Maxwell, elimina esa falla. Esta modificación fue clave para el establecimiento de la teoría unificada de la electricidad y magnetismo.

## ANEXO 2

**ECUACIONES TRIGONOMÉTRICAS DE SERIES DE FOURIER**

**Series de Fourier:** El conjunto de funciones

$$1, \cos(\pi x/p), \cos(2\pi x/p), \dots, \sin(\pi x/p), \sin(2\pi x/p), \sin(3\pi x/p), \dots,$$

Es ortogonal en el intervalo  $-p \leq x \leq p$ . Supongamos que  $f$  es una función definida en el intervalo  $-p \leq x \leq p$  que puede ser desarrollada en la serie trigonométrica, Tal que:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos \frac{n\pi x}{p} + b_n \operatorname{sen} \frac{n\pi x}{p} \right)$$

Donde los coeficientes se definen:

$$a_0 = \frac{1}{p} \int_{-p}^p f(x) dx$$

$$a_n = \frac{1}{p} \int_{-p}^p f(x) \cos \left( \frac{n\pi x}{p} \right) dx$$

$$b_n = \frac{1}{p} \int_{-p}^p f(x) \operatorname{sen} \left( \frac{n\pi x}{p} \right) dx$$

La serie de Fourier de una función par en el intervalo  $-p < x < p$  es la **serie de cosenos**

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos \frac{n\pi x}{p} \right)$$

$$a_0 = \frac{2}{p} \int_0^p f(x) dx$$

$$a_n = \frac{2}{p} \int_0^p f(x) \cos \left( \frac{n\pi x}{p} \right) dx$$

La serie de Fourier de una función impar en el intervalo  $-p < x < p$  es la **serie de senos**

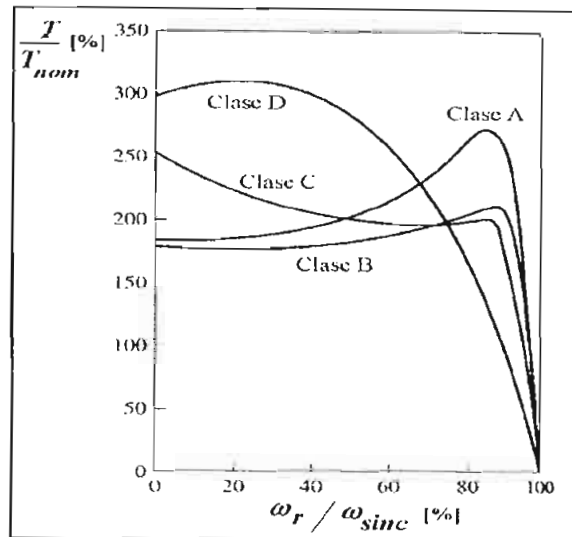
$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \left( b_n \operatorname{sen} \frac{n\pi x}{p} \right)$$

$$b_n = \frac{2}{p} \int_0^p f(x) \operatorname{sen} \left( \frac{n\pi x}{p} \right) dx$$

## ANEXO 4:

CLASES DE MOTORES ASINCRÓNICOS

NEMA en Estados Unidos y la International Electrotechnical Commission (IEC) tienen definidos, en toda la gama de caballos de fuerza, una serie de diseños normalizados con diferentes curvas de momento de torsión – velocidad. Estos diseños normalizados se conocen como *clases de diseño* y a un solo motor se le puede denominar como "motor de diseño de la clase X". En la siguiente figura pueden verse una serie de curvas de momento de torsión – velocidad para las cuatro clases de diseños normalizados de NEMA. Los rasgos característicos de cada clase de diseño normalizado se esbozan a continuación:



Curvas torque-velocidad típicas para las diferentes clases de motores.(A-B-C-D).

**DISEÑO CLASE "A":** Los motores de diseño clase A son los motores de diseños normales, con un momento de arranque normal y bajo deslizamiento. El deslizamiento de plena carga de los motores de diseño A debe ser menor del 5% y menor también que el de los motores de diseño B de condiciones equivalentes. El momento de torsión máximo está entre 200 y 300% del momento de torsión a plena carga y sucede a bajo deslizamiento (menos del 20%). El momento de torsión de arranque de este diseño es por lo menos el momento de torsión nominal, para los motores más grandes, y de 200% o más del momento de torsión nominal, para los motores más pequeños. El problema principal con esta clase de diseño es su extremadamente alto valor de la corriente durante el arranque. Los flujos de corriente en el arranque están, generalmente, entre 500% y 800% de la corriente nominal. Con estos motores, en tamaños por encima de unos 7.5 hp, se debe utilizar alguna forma de arranque de voltaje reducido para controlar los problemas de la caída de voltaje en el sistema de potencia al cual están conectados durante el arranque. En tiempos pasados, el diseño de motores clase A era el diseño común para la mayor parte de las aplicaciones entre 7.5 hp y 200 hp, pero durante los últimos años se han reemplazado profusamente por los motores de diseño clase B. Las aplicaciones típicas para estos motores son los ventiladores, abanicos, bombas, tornos y otras máquinas – herramientas.

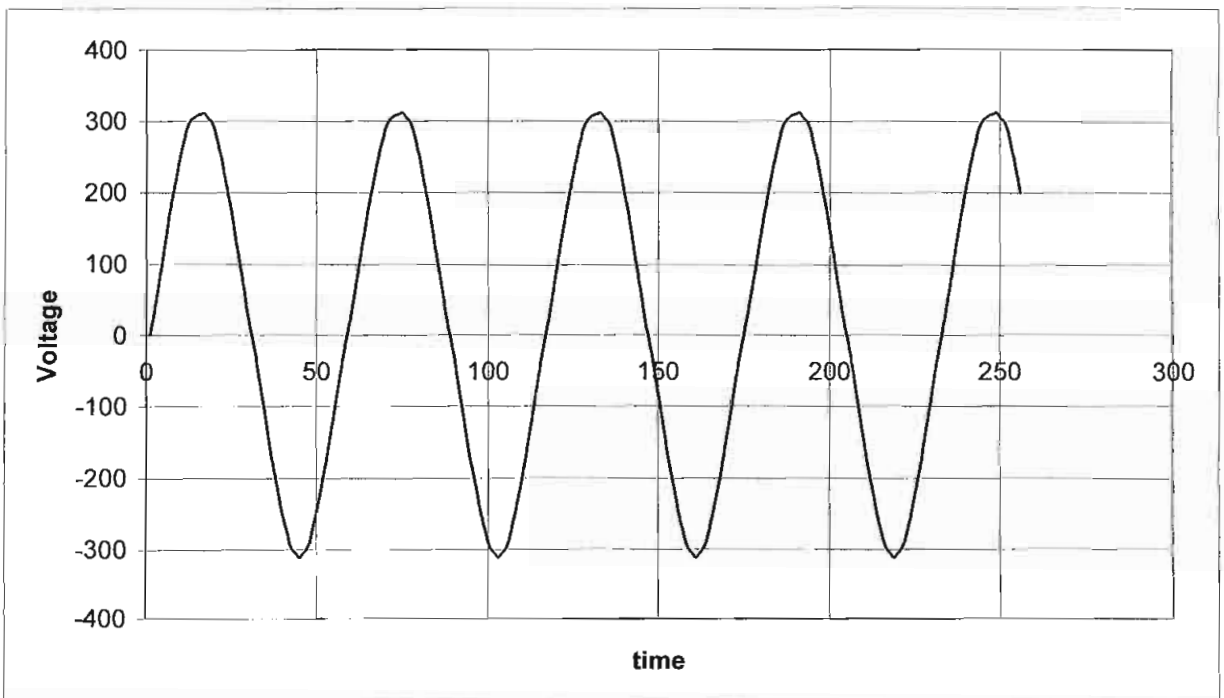
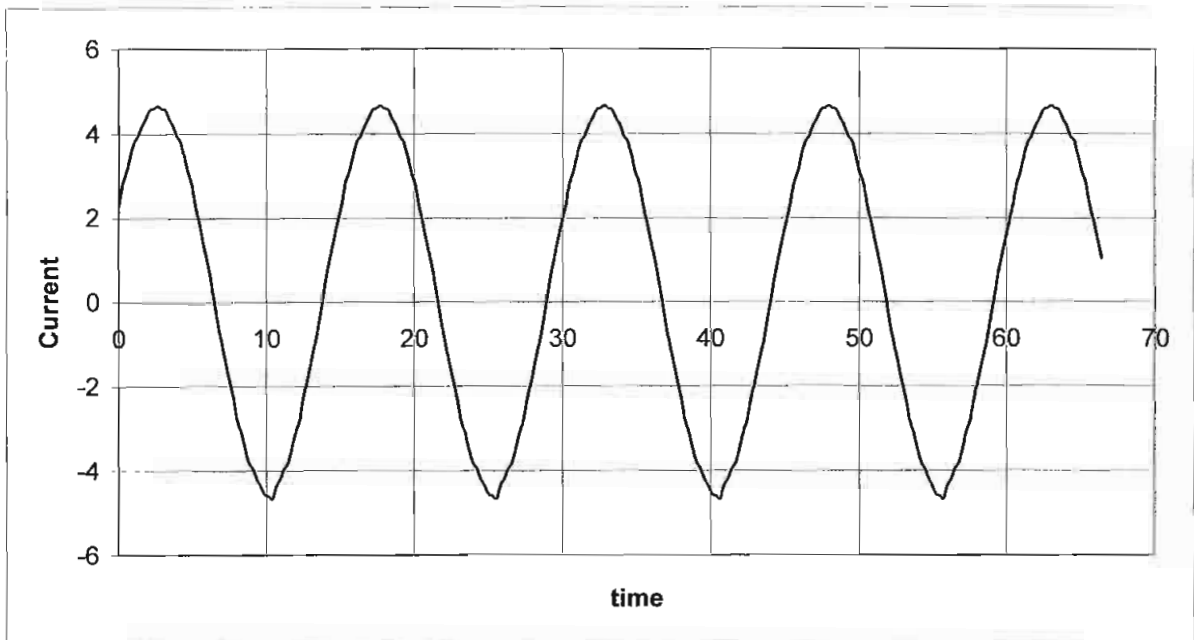
**DISEÑO CLASE "B":** Los motores de diseño clase B tienen un momento de torsión de arranque nominal, una corriente de arranque más baja y un deslizamiento bajo. Este motor produce, aproximadamente, el mismo momento de arranque de los motores clase A, con cerca de un 25% menos de corriente. El momento de torsión máximo es mayor o igual al 200% del momento de carga nominal, pero menor que el de diseño clase A, en razón del aumento de la reactancia del rotor. El deslizamiento del rotor es aún relativamente bajo (menos del 5%) a

plena carga. Las aplicaciones son similares a aquellas del diseño clase A, pero se prefiere el diseño clase B por razón de sus menores exigencias de corriente de arranque. Los motores de diseño clase B han reemplazado considerablemente los motores de diseño clase A en las instalaciones modernas.

**DISEÑO CLASE "C":** Los motores de diseño clase C tienen un momento de torsión de arranque alto, con corriente de arranque baja y bajo deslizamiento (menos del 5%) a plena carga. El momento de torsión máximo es ligeramente más bajo que el de los motores de clase A, mientras que el momento de torsión de arranque llega hasta un 250% del momento de plena carga. Estos motores se fabrican con rotores de doble jaula por lo que son más costosos que los motores de las clases anteriores. Se usan para cargas que requieren un alto momento de arranque, tales como bombas cargadas, compresores y bandas transportadoras.

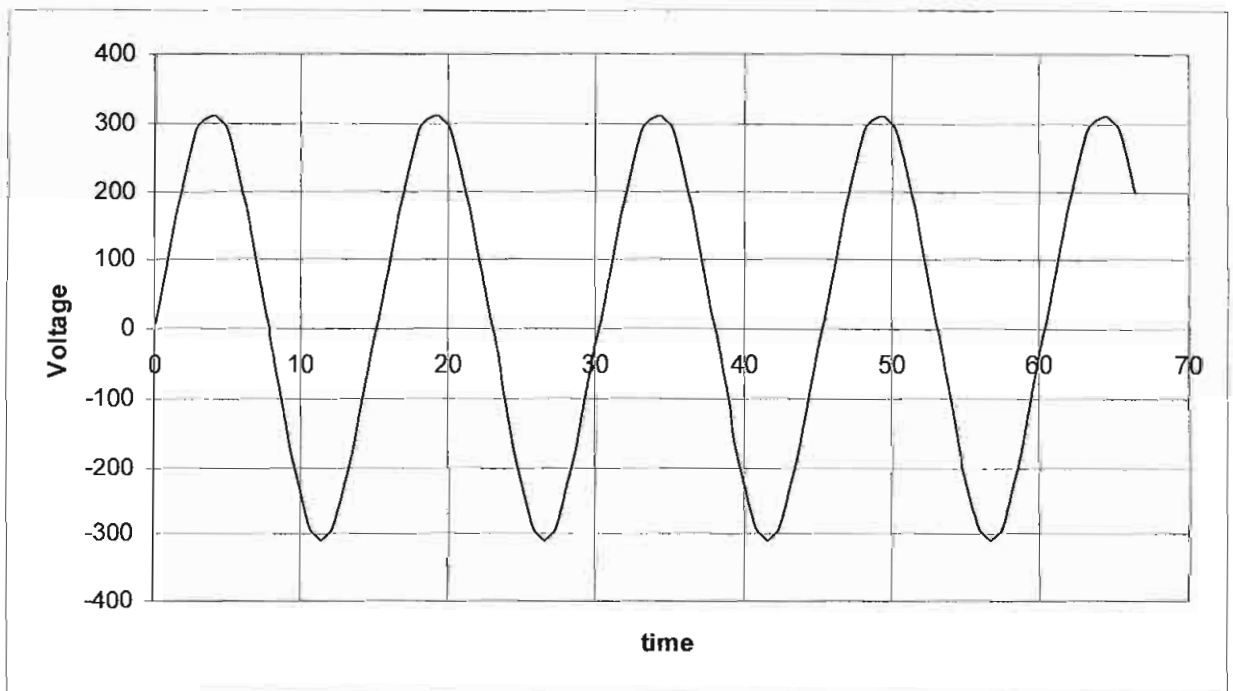
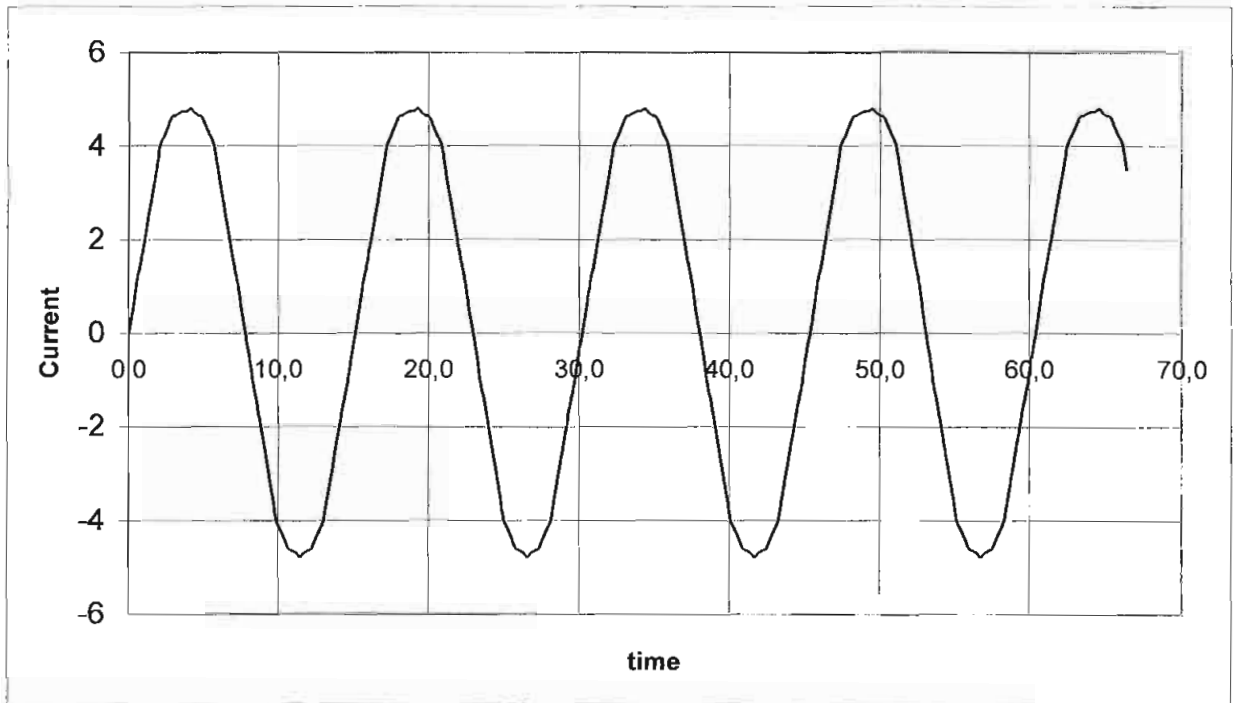
**DISEÑO CLASE "D":** Los motores de diseño clase D tienen un momento de torsión de arranque muy alto (275% o más del momento de torsión nominal) y una corriente de arranque baja, pero tienen también un deslizamiento alto a plena carga. Son, esencialmente, motores de inducción comunes, de clase A, pero con las barras del rotor más pequeñas y hechos de un material de más alta resistencia. La alta resistencia del rotor hace que el momento de torsión máximo se presente a muy baja velocidad. Incluso es posible que el momento de torsión más alto ocurra a velocidad cero (100% de deslizamiento). El deslizamiento a plena carga para estos motores es bastante alto en razón de la alta resistencia del rotor, la que por lo general tiende de un 7 a un 11%, pero puede llegar hasta al 17% o más. Estos motores se usan en aplicaciones que requieren la aceleración de cargas de tipo inercias extremadamente altas, especialmente grandes volantes usadas en prensas punzonadoras o grúas de tijera. En tales aplicaciones, estos motores aceleran un gran volante hasta su máxima velocidad, para luego impulsar la perforadora. Después de una operación de perforación, el motor reacelera el volante por un período de tiempo razonablemente largo para la siguiente operación. Además de estas cuatro clases de diseños, NEMA acostumbraba a reconocer las clases de diseño E y F, llamadas *arranque suave* de los motores de inducción. Estos diseños se distinguieron por tener muy bajas corrientes de arranque y se usaron para cargas de momento de arranque bajo, en situaciones donde las corrientes de arranque eran un problema. Estos diseños son obsoletos hoy en día.

## Ensayo en Vacío Acoplado



Potencia Activa = 262.2 W

## Ensayo en Vacío a la Tensión Nominal

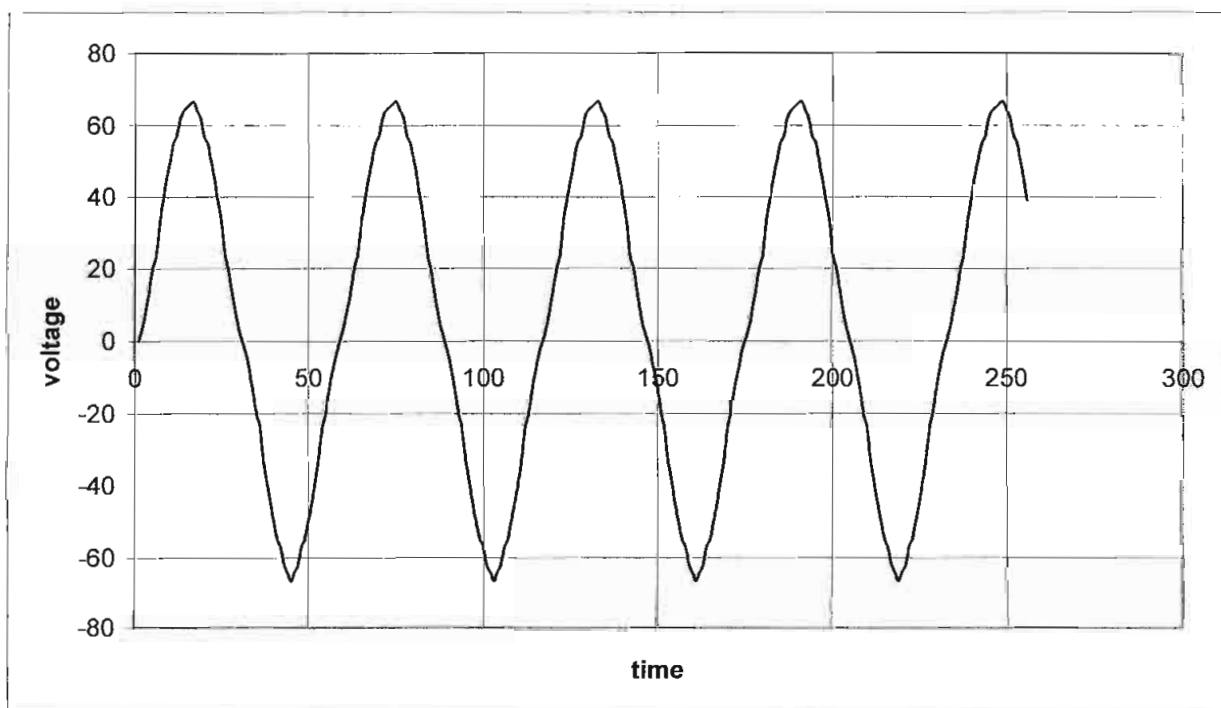
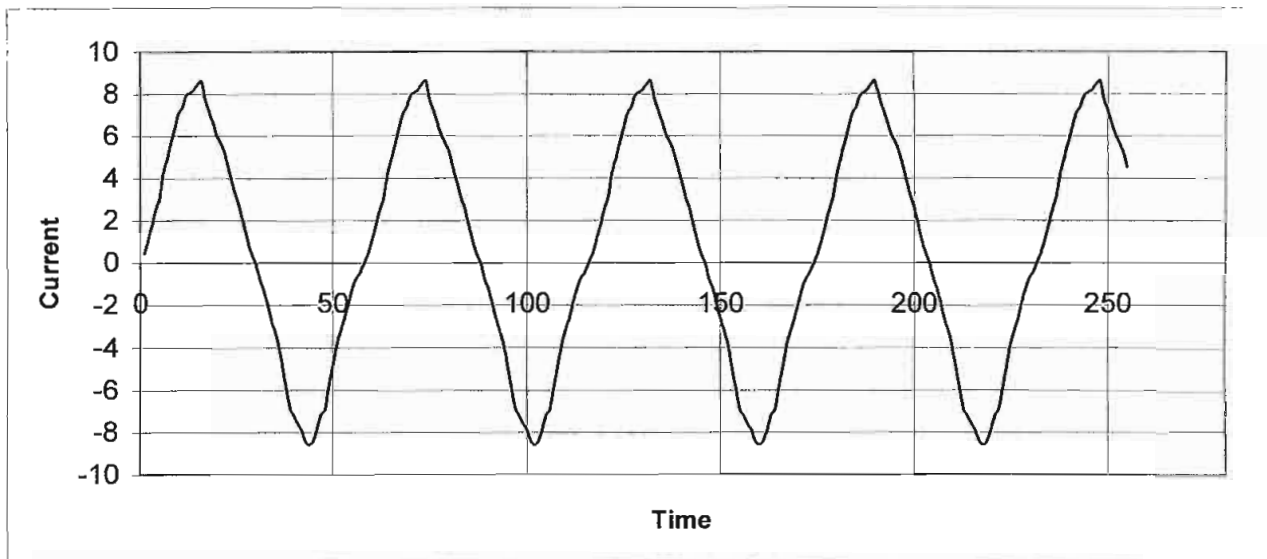


Potencia Activa = 421.78 W

**Ensayo en Vacío a la Tensión Variable**

<b>Date</b>	<b>Voltage</b>	<b>P.Act</b>	<b>Current</b>
203/06/14 08:45 a.m	50	175,104	1,05
203/06/14 08:46 a.m	60	178,818	1,09
203/06/14 08:47 a.m	80	197,168	1,24
203/06/14 08:48 a.m	100	220,314	1,44
203/06/14 08:49 a.m	120	245,178	1,49
203/06/14 08:50 a.m	140	285,133	1,95
203/06/14 08:51 a.m	160	315,018	2,25
203/06/14 08:52 a.m	180	352,422	2,57
203/06/14 08:53 a.m	200	388,469	3,04
203/06/14 08:54 a.m	220	427,392	3,37
203/06/14 08:55 a.m	230	442,832	3,4

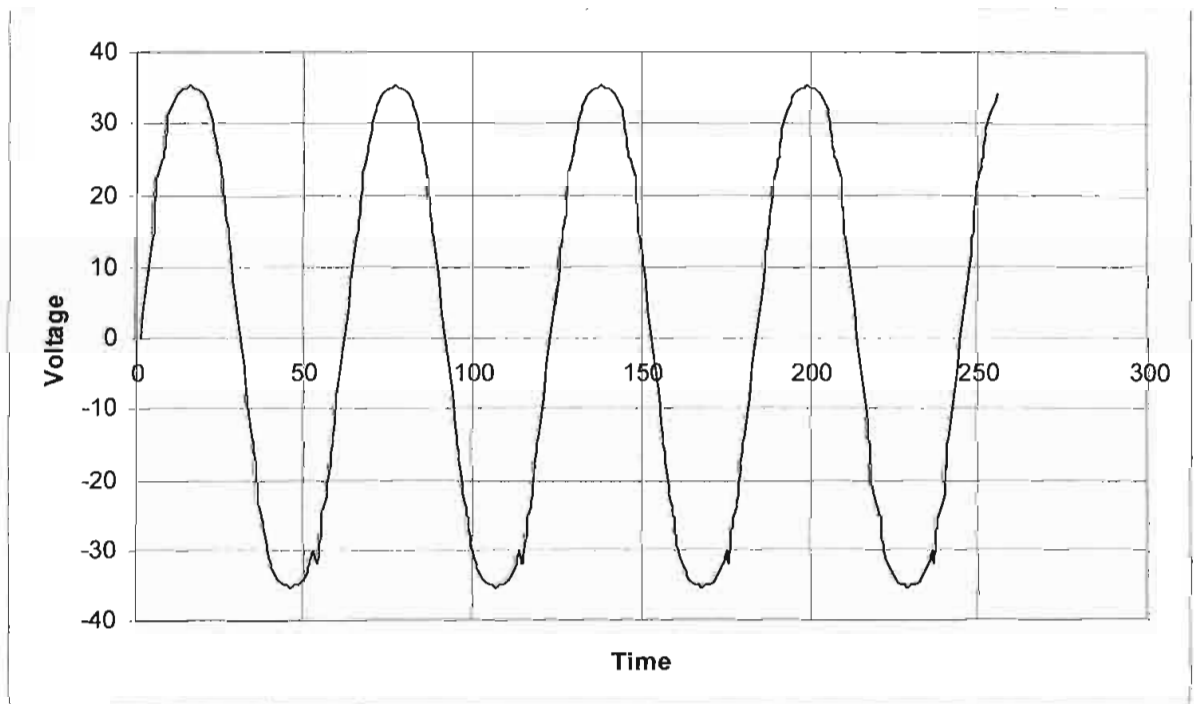
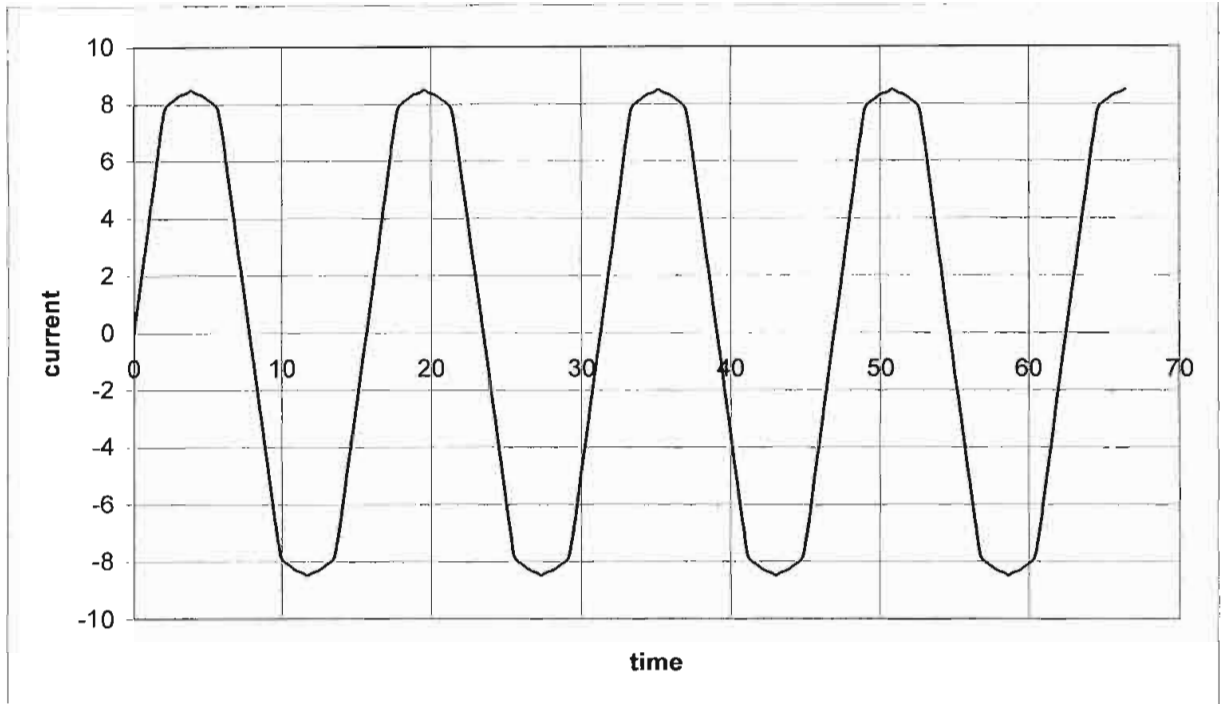
## Ensayo Rotación Inversa



Potencia Activa = 345.13 W

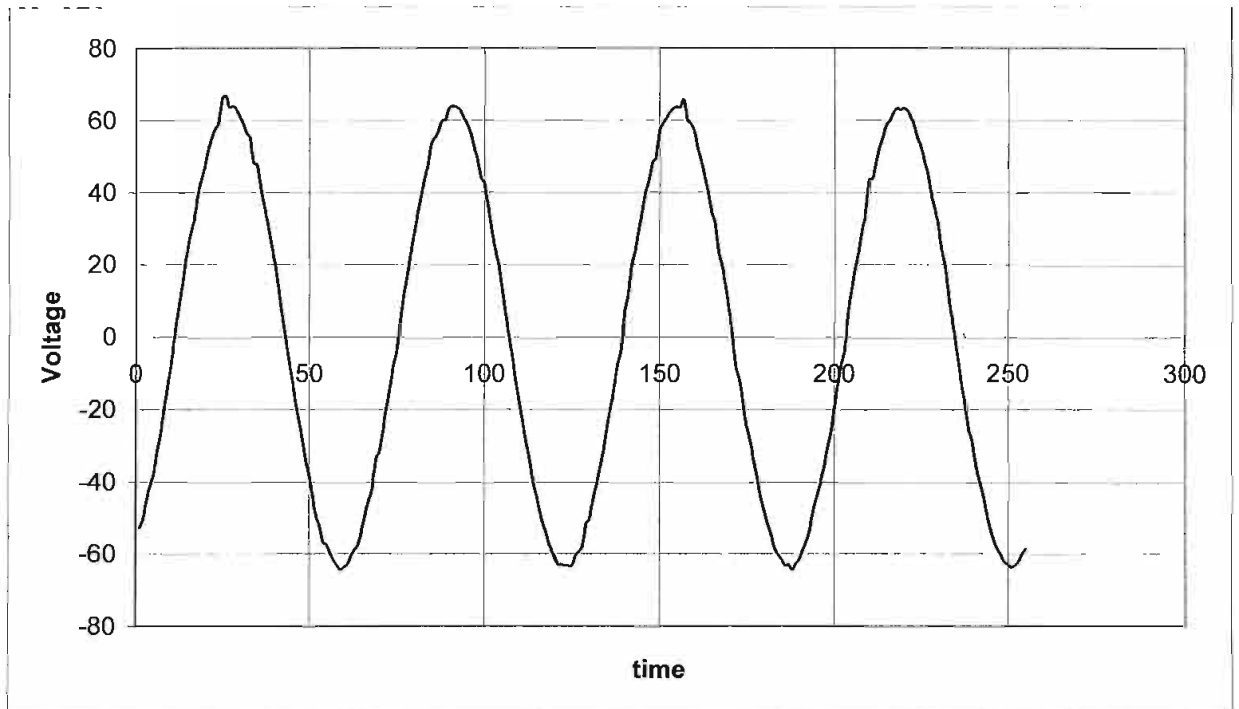
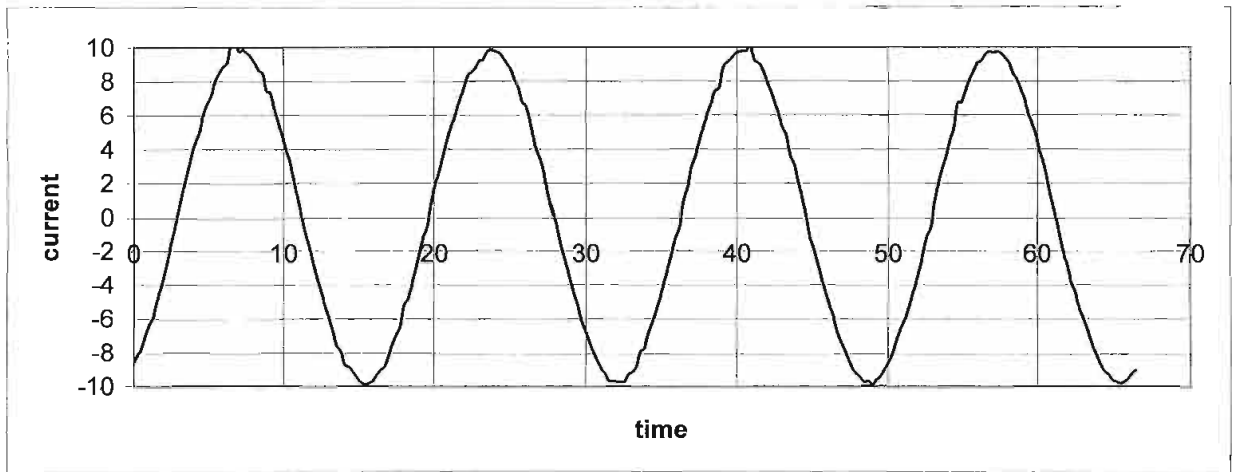


## Ensayo de Variación de Corriente



Potencia Activa = 236.32 W

## Ensayo a Rotor Bloqueado



Potencia Activa = 310.24 W



2. CARACTERISTIQUES DE LA MACHINE A COURANT ALTERNATIF 140100 CA

- type ouvert non ventilé
- stator bobiné 4 pôles
- 2 flasques à paliers lisses
- 5 rotors à 2 bouts d'arbre libres:
  - 1 rotor asynchrone bobiné à bagues
  - 1 rotor asynchrone en court-circuit simple cage
  - 1 rotor asynchrone en court-circuit double cage
  - 1 rotor asynchrone-synchronisé à reluctance
  - 1 roue polaire 4 pôles
- tension nominale 220/380 V
- nombre de phases: 3
- vitesse nominale 1500 tr/min.
- fréquence nominale 50 Hz
- excitation indépendante 110 V C.C.
- plan 141805A

Nous calculons le cos-phi d'après le rapport  $W1/W2$ , méthode des deux Wattmètres.

2.1. FONCTIONNEMENT EN ALTERNATEUR A POLES TOURNANTS.

- Equipement de la machine:
  - roue à 4 pôles tournants
- Puissance nominale: 2 kVA à 1500 tr/min.
- Câblage de la machine:
  - excitation indépendante 110 V C.C. en U' V'
  - débit: a) 3 x 220 V  
raccorder ZU, KV, YW  
débit en U V W
  - b) 3 x 380 V  
raccorder Z X Y  
débit en U V W

2.1.1 Courbe de magnétisation  $V = f(ix)$

plan 141805A A1

L'alternateur est entraîné à vitesse constante, 1500 t/min.  
La tension est relevée pour des ix croissants et décroissant

Courbe montante

Courbe descendante

<u>ix (Amp)</u>	<u>V (Volts)</u>	<u>ix (Amp)</u>	<u>V (Volts)</u>
0,05	51	0,6	294
0,1	85,5	0,5	282
0,2	155	0,4	264
0,3	216	0,3	228
0,4	256	0,2	176
0,5	275	0,1	97
0,6	292	0,05	55
0,7	305	0	3



BRUXELLES

2.2 FONCTIONNEMENT EN MOTEUR TRIPHASE ASYNCHRONE A BAGUES.

- Equipement de la machine
  - rotor bobiné à 3 bagues
- Puissance nominale: 2,1 ch.
- vitesse nominale: 1500 tr/min.
- Câblage de la machine
  - a) réseau 3 x 220 V
    - raccorder ZU, XV, YW
    - alimentation: réseau, via disjoncteur, en UVW
    - démarrateur rotorique: raccorder U à U' (mach)
    - ou démarrage direct V à V' (mach) et W à W' (mach)
  - b) réseau 3 x 380 V
    - raccorder ZXY
    - alimentation: réseau, via disjoncteur, en UVW
    - démarrateur rotorique: raccorder U à U' (mach)
    - ou démarrage direct. V à V' (mach) et W à W' (mach)

2.2.1 Caractéristiques à vide

I = f (U)      plan 141805 AM 1  
W = f (U)      plan 141805 AM 2

U (Volts)	100	150	200	220	240	260
I (Amp)	1,22	1,85	2,65	3,1	3,55	4,3
W1	90	175	312	395	485	630
W2	-35	-90	-200,8	-275	-350	-460
Wt (Watts)	55	85	111	120	135	170
cos-phi	0,245	0,182	0,124	0,102	0,093	0,090
N (tr/min)	1465	1480	1485	1495	1495	1495

2.2.2 Caractéristique en charge N = f (P)

plan 141805A M3

Moteur

U (Volts)	220	220	220	220	220
I (Amp)	3,45	3,85	4,5	5,25	6,1
W1	660	795	975	1146	1320
W2	-60	120	270	390	570
Wt	600	915	1245	1536	1890
cos-phi	0,435	0,617	0,717	0,762	0,825
N (tr/min)	1465	1440	1420	1400	1370
Rdt %	48,5	62,5	68,3	72,7	72

Dynamo-frein

Poids (kg)	0,4	0,8	1,2	1,6	2
ch	0,345	0,779	1,133	1,515	1,85
W. axe	291	572	850	1150	1360

(r/min)

$$N = f(P)$$

$$V = U^{\text{te}} = 220V$$

Caractéristique en charge du moteur asynchrone à bagues, type didactique

Belastingstroom van asynchrone motor met ringen didactisch type

140106 <sup>04</sup>/<sub>15</sub> 220/380V 50A 1500r/min  
 ch  
 P<sub>h</sub>

141805AM3

05

1

15

P(ch)  
P<sub>h</sub>

*INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION*

**ROTATING ELECTRICAL MACHINES PART 2**

**METHODS FOR DETERMINING LOSSES AND EFFICIENCY**

**OF**

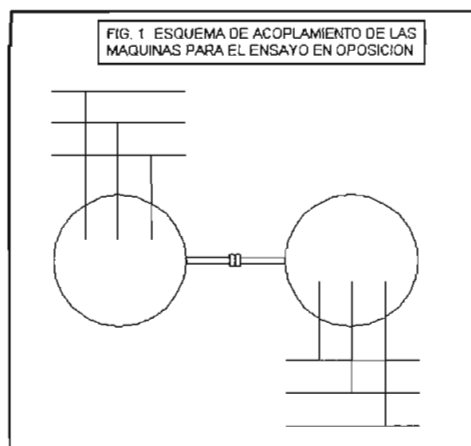
**ROTATING ELECTRICAL MACHINERY**

**IEC 34-2**

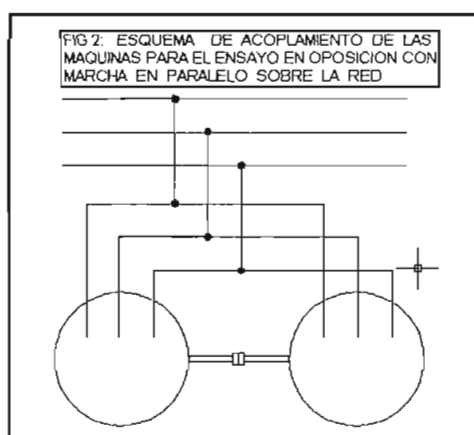
**1996**

TERMINOLOGÍA

- 4.1 RENDIMIENTO: Relación de la potencia útil a la potencia absorbida, expresadas en las mismas unidades, que se indican generalmente en forma porcentual.
- 4.2 PÉRDIDAS TOTALES: Diferencia entre la potencia absorbida y la potencia útil.
- 4.3 ENSAYO DE FRENADO: Ensayo en el cual la potencia mecánica de salida de una máquina que funciona como motor, se determina a partir de la medición del torque del eje, con un freno o dinamómetro y la medida simultánea de la velocidad de rotación. De igual manera, el ensayo se puede efectuar sobre una máquina que funcione como un generador, por medio de un dinamómetro, para determinar la potencia mecánica de entrada.
- 4.4 ENSAYO CON LA MÁQUINA AUXILIAR CALIBRADA: Ensayo en el cual la potencia mecánica absorbida o generada por una máquina eléctrica, se calcula a partir de la potencia eléctrica de entrada o de salida de una máquina auxiliar calibrada y aplicada mecánicamente a la máquina en ensayo.
- 4.5 ENSAYO EN OPOSICIÓN: Ensayo en el cual se acoplan mecánicamente dos máquinas idénticas calculándose las pérdidas totales por diferencias de las potencias eléctricas que una absorbe y la otra suministra. (Fig. 1)



- 4.6 ENSAYO EN OPOSICIÓN CON MARCHA EN PARALELO SOBRE LA RED: Ensayo en el cual dos máquinas idénticas se acoplan mecánicamente y se conectan ambas a la red, la cual suministra la energía eléctrica correspondiente a las pérdidas totales de ambas. (Fig. 2)



- 4.7 ENSAYO DE DESACELERACIÓN: Ensayo en el cual las pérdidas de una máquina se calculan de la fase de desaceleración de la máquina, cuando únicamente estas pérdidas están presente.
- 4.8 ENSAYO CALORIMÉTRICO: Ensayo en el cual se determinan las pérdidas de la máquina a partir de la cantidad de calor que producen. Las pérdidas se calculan a partir del producto de la cantidad de refrigerante por su calentamiento unitario, añadiendo dado el caso la cantidad de calor disipado al exterior.
- 4.9 ENSAYO EN VACÍO: Ensayo en el cual la máquina funciona como un motor si suministra potencia mecánica útil sobre el eje principal.
- 4.10 ENSAYO DE CIRCUITO ABIERTO: Ensayo en el cual la máquina funciona como un generador con sus terminales en circuito abierto.
- 4.11 ENSAYO DE CORTOCIRCUITO SOSTENIDO: Ensayo en el cual una máquina funciona como un generador con sus terminales en cortocircuito.
- 4.12 ENSAYO DE UN FACTOR DE POTENCIA CERO: Ensayo en vacio, efectuado sobre una máquina sincrónica sobreexcitada, que funciona con un factor de potencia cercana a cero.

## 5 TEMPERATURA DE REFERENCIA.

Las pérdidas  $I^2R$  se deben corregir temperaturas presentadas a continuación:

CLASE TÉRMICA DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO	TEMPERATURA DE REFERENCIA °C
A,E	75
B	95
F	115
H	130

## SECCIÓN TRES - MÁQUINAS DE INDUCCIÓN POLIFÁSICAS

### 8 PÉRDIDAS QUE SE DEBEN INCLUIR

Las pérdidas totales se pueden considerar como la suma de las pérdidas componentes:

#### 8.1 PÉRDIDAS CONSTANTE

a) Pérdidas en el hierro y pérdidas adicionales en vacío en otras partes metálicas  
 b) Pérdidas debidas a fricción (escobillas y cojinetes, si no son retirados durante la operación), sin incluir las pérdidas en un sistema de lubricación independiente.  
 Las pérdidas en los cojinetes comunes se deben indicar por separado, ya sea que estos cojinetes sean o no suministrados con la máquina.

c) Las pérdidas totales por ventilación en la máquina, incluyendo la potencia absorbida por los ventiladores y por las máquinas auxiliares que forman parte integral de la misma. Las pérdidas en las máquinas auxiliares como ventiladores externos, bombas de agua y de aceite que no forman parte integrante de la máquina pero que están destinados exclusivamente a la máquina en cuestión, se deben incluir únicamente si existe un acuerdo previo.

#### 8.2 PÉRDIDAS EN CARGA

- a) Pérdidas  $I^2R$  (por efecto Joule) en los devanados.
- b) pérdidas  $I^2R$  (por efecto Joule) en los devanados secundarios.
- c) Pérdidas eléctricas en las escobillas (si las hay)

#### 8.3 PÉRDIDAS ADICIONALES EN CARGA

- a) Pérdidas adicionales introducidas por la carga en el hierro y otras partes metálicas diferentes a los conductores.
- b) Pérdidas por corrientes de Foucault en los conductores de devanados primarios o secundarios debidas a la pulsación del flujo dependiente de la corriente

## 9. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA

### 9.1 TOTALIZACIÓN DE LAS PÉRDIDAS

Las eficiencias se pueden calcular a partir de las pérdidas totales, las cuales se consideran como la suma de las pérdidas determinadas en la forma siguientes:

#### 9.1.1 PÉRDIDAS CONSTANTE

9.1.1.1 Ensayo en vacío a la tensión nominal, La suma de las pérdidas constante, numerales 8.1 a), b) y c), se determinan por el método de funcionamiento como motor en vacío. La máquina se alimenta a su tensión y frecuencia nominales. La potencia absorbida, disminuida por las pérdidas  $I^2R$  (por efecto Joule) en el devanado primario generan el total de las pérdidas constantes. No es necesario tener en cuenta las pérdidas  $I^2R$  (por efecto Joule) en el devanado secundario.

#### 9.1.1.2 ENSAYO MEDIANTE LA MÁQUINA AUXILIAR CALIBRADA

Las pérdidas constantes se pueden determinar por separado haciendo funcionar la máquina desconectada de la red, a su velocidad nominal por medio de un motor calibrado (véase el numeral 13). Con las escobillas en su lugar, si es el caso, la potencia absorbida en el eje de la máquina, que se



deduce de la potencia eléctrica absorbida por el motor calibrado, genera el total de las pérdidas, numeral 8.1 b) y 8.1 c). Con las escobillas levantadas, si es el caso, se obtiene igualmente la suma de las pérdidas por fricción en los cojinetes y las pérdidas totales por ventilación. Las pérdidas mencionadas en el numeral 8.1 a) se deducen por situación, con base en el ensayo del numeral 9.1.1.1.

### 9.1.1.3 ENSAYO EN VACIO A LA TENSIÓN VARIABLE

Las pérdidas definidas en el numeral 8.1 a) y la suma de las pérdidas definidas en el numeral 8.1 b) y c), también se puede determinar por separado haciendo funcionar la máquina como un motor en vacío a su frecuencia nominal, pero a diferentes tensiones. La potencia absorbida, menos las pérdidas  $I^2R$  (pérdidas por efecto Joule) en el devanado primario se grafica sobre un diagrama en función del cuadrado de la tensión. Se obtiene así, a bajas saturaciones, una línea recta que se puede extrapolar hasta un valor nulo de la tensión para dar la suma de las pérdidas, numerales 8.1 b) y c). Se debe tener en cuenta que a tensión muy baja las pérdidas graficadas en el diagrama pueden ser altas debido al aumento de las pérdidas en el devanado secundario cuando el deslizamiento aumenta. Esta parte del diagrama no se debe tener en cuenta cuando se está trazando la línea recta.

Si el motor se hace arrancar con un devanado secundario en cortocircuito y con las escobillas levantadas (lo cual es posible si el generador que suministra la alimentación se pone en marcha al mismo tiempo que el motor), las pérdidas por fricción y las totales por ventilación se obtienen por extrapolación a un valor cero de la tensión como se indicó anteriormente.

### 9.1.2 Pérdidas de carga

9.1.2.1 Ensayo en carga. Las pérdidas definidas en el numeral 8.2 a) se calculan a partir de las resistencias de los devanados primarios, medidas con corriente continua y corregidas a la temperatura de referencia, de la corriente correspondiente a la carga a la cual se le han calculado las pérdidas.

Para determinar las pérdidas definidas en el numeral 8.2 b) cuando se realiza un ensayo en carga, las pérdidas en el devanado se consideran equivalentes al producto del deslizamiento por la potencia total transmitida al devanado secundario; es decir, la potencia absorbida menos las pérdidas en el hierro, numeral 8.1 a), y las pérdidas  $I^2R$  (por efecto Joule) en la armadura (numeral 8.2 a)). Este método suministra directamente la suma de las pérdidas, numerales 8.2 b) y 8.2 c) para las máquinas del rotor devanado, y de las pérdidas, numeral 8.2 b) para las máquinas tipo jaula de ardilla. Este es el único método que se puede aplicar a este último tipo de máquinas, pues no es posible medir directamente la resistencia y la corriente del devanado secundario. Cuando se emplea este método, el deslizamiento se puede medir por un método estroboscópico o contando las pulsaciones de un milivoltmetro de magnetismo permanente, conectado entre dos anillos (para motores con rotor devanado), o a las terminales de una bobina auxiliar (para los motores con rotor en cortocircuito) o entre los extremos del eje.

9.1.2.2 valores calculados. para los motores de rotor devanado, las pérdidas definidas en el numeral 8.2 b) se pueden calcular a partir de las resistencias, medidas con corriente continua y corregidas a la temperatura de referencia, y de la corriente secundaria deducida del diagrama circular o de un circuito equivalente, teniendo en cuenta la verdadera relación de transformación de la máquina. El tipo de diagrama circular que se debe utilizar debe ser establecido mediante un acuerdo entre el fabricante y el comprador. Para el ensayo en carga, las pérdidas en las escobillas, numeral 8.2 c), no pueden medirse directamente. Éstas se deben interpretar como el producto de la corriente que fluye en las escobillas por una caída de tensión determinada. La caída de tensión en todas las escobillas de una misma fase debe ser equivalente a 1 voltio para las escobillas de carbón o en grafito, y a 0.3 voltios para las escobillas de carbón metalizado.

9.1.2.3 Ensayo en carga a tensión reducida. este método se puede aplicar a las máquinas de rotor tipo jaula de ardilla. Cuando se reduce la tensión manteniendo la velocidad de rotación a un valor constante, las corrientes disminuyen aproximadamente en proporción a la tensión, y la potencia aproximadamente en proporción al cuadrado de la tensión. cuando la tensión se reduce a la mitad de su valor nominal, las corrientes se reducen más o menos en la mitad y la potencia cerca de un cuarto de su valor a la tensión nominal.

Cuando se aplica una carga a un motor de inducción a la tensión reducida  $U_r$ , se puede medir la potencia absorbida  $P_{1r}$ , la corriente principal primaria  $I_{1r}$  y el deslizamiento  $s$ , así como la corriente en vacío  $I_{0r}$  a la misma tensión reducida  $U_r$  y la corriente en vacío  $I_0$  a la tensión nominal  $U_n$ .

El vector de corriente  $I_1$  de la carga a la tensión nominal se obtiene mediante la construcción de un diagrama vectorial de la siguiente manera:

Al vector de corriente  $I_n$ , multiplicado por la relación:

$$\frac{\text{Tension...Nominal}}{\text{Tensión...reducida}} = \frac{U_n}{U_r}$$

El vector resultante representa la corriente que se establecería a la tensión nominal  $U_n$  para la siguiente potencia absorbida:

$$P_1 = P_{1r} \left( \frac{U_n}{U_r} \right)^2$$

Mediante los valores  $I_1$  y  $P_1$  determinados así, y el deslizamiento  $S$ , medido a tensión reducida es posible entonces calcular las pérdidas que dependen de la corriente, como se indica en el numeral 9.1.2.1

### 9.1.3 Pérdidas adicionales en carga

A menos que se especifique lo contrario, se asume que las pérdidas definidas en los numerales 8.3 a) y 8.3 b) varían como el cuadrado de la corriente primaria y que su valor total a plena carga, para los motores, es igual 0,5% de la potencia absorbida y al 0,5% de la potencia nominal útil para los generadores.

## 9.2 MEDICIÓN DE LAS PÉRDIDAS TOTALES

### 9.2.1 Ensayo eléctrico en oposición (véase el numeral 16)

Para máquinas idénticas que funcionen en condiciones nominales que sean prácticamente las mismas, se consideran que las pérdidas suministradas por la red se reparten igualmente, y la eficiencia se calcula a partir de la mitad de las pérdidas totales y de la potencia eléctrica absorbida por una de las máquinas.

El ensayo se debe efectuar a una temperatura lo mas cercana posible a la temperatura alcanzada en funcionamiento al final del tiempo especificado en el tipo de servicio.

No se debe efectuar ninguna corrección que considere la variación de la resistencia de los devanados con la temperatura.

## 9.3 MEDICIÓN DIRECTA DE LA EFICIENCIA

### 9.3.1 ensayo de frenado.

Cuando la maquina funciona en las condiciones nominales de velocidad, tensión y corriente, se considera que la eficiencia es igual a la relación entre las potencias activas de salida y de entrada.

El ensayo se debe efectuar a una temperatura lo mas cercana posible a la temperatura alcanzada en funcionamiento al final del tiempo especificado en el tipo de servicio. No se debe efectuar ninguna corrección que considere la variación de la resistencia de los devanados con la temperatura.

### 9.3.2 ensayo con la maquina auxiliar calibrada (véase numeral 13)

Cuando la maquina funciona en las condiciones nominales de velocidad, de tensión y de corriente, la eficiencia se considera igual a la relación entre las potencias activas de salida y de entrada.

El ensayo se debe efectuar a una temperatura tan próxima como sea posible a la temperatura alcanzada en funcionamiento al final del tiempo especificado en el tipo de servicio. No se debe

efectuar ninguna corrección que considere la variación de la resistencia de los devanados con la temperatura.

### 9.3.2 Ensayo mecánico en oposición.

Para las máquinas idénticas que funcionen en condiciones nominales que sean prácticamente las mismas, se consideran que las pérdidas se distribuyen igualmente y la eficiencia se calcula a partir de la mitad de las pérdidas totales y de la potencia eléctrica de entrada. La máquina accionada funciona como generador asincrónico si se dispone de una fuente de potencia reactiva magnetizante y si se conecta a sus bornes una carga apropiada. El ensayo se debe efectuar a una temperatura lo más cercana posible a la temperatura alcanzada en funcionamiento al final del tiempo especificado en el tipo de servicio. No se debe efectuar ninguna corrección que considere la variación de la resistencia de los devanados con la temperatura.

## 13. ENSAYO MEDIANTE MÁQUINA CALBRADA.

La máquina cuyas pérdidas se deben medir, se separa de la red desacoplándola del motor de impulsión, si es necesario se impulsa a su velocidad, nominal mediante un motor calibrado es decir por medio de un motor eléctrico cuyas pérdidas ha sido previamente determinadas con gran precisión, de manera que sea posible determinar la potencia mecánica que éste suministra en su eje, conociendo la potencia eléctrica que este absorbe lo mismo que su velocidad de rotación.

La potencia mecánica transmitida por el motor calibrado al eje de la máquina que esta siendo ensayada, mide las pérdidas de esta última para las condiciones de funcionamiento bajo las cuales se ha hecho en el ensayo en este método, la máquina ensayada puede estar en vacío, excitada o no, con o sin escobillas, en el cortocircuito, lo cual permite separar ciertas categorías de pérdidas.

Una alternativa es que, el motor calibrado se puede reemplazar por un motor dinamométrico o por cualquier motor que impulse la máquina de ensayo con un torcómetro apropiado que permita conocer el par transmitido a la máquina ensayada y, por consiguiente, la potencia mecánica absorbida por esta última.

Cuando nos valemos de esta variante, la velocidad de rotación que interviene directamente en el cálculo de la potencia se debe medir con extremo cuidado.

## 16.- ENSAYO ELÉCTRICO EN OPOSICIÓN

Este método se aplica cuando se dispone de dos máquinas idénticas. Las máquinas se acoplan mecánicamente y eléctricamente, de manera que funcionen a una velocidad nominal, la una como motor y la otra como generador. Las pérdidas de las máquinas acopladas son suministradas ya sean por la red a la cual están conectadas, por un motor de impulsión calibrado, por un "elevador de tensión", o por la combinación de estos medios. El valor promedio de las corrientes de la armadura se ajusta a su valor nominal; el promedio de la tensión de las dos armaduras es superior o inferior a la tensión nominal en un valor igual a la caída de tensión, dependiendo de que las máquinas de corriente continua estén destinadas para proporcionar como generador o como motor, correspondiente.

Cuando dos máquinas de inducción son acopladas eléctricamente, también se debe acoplar mecánicamente con la ayuda de un dispositivo para ajuste de la velocidad que asegure la transmisión correcta de la potencia, por ejemplo de una caja de engranajes. La magnitud de la potencia que circula depende de la diferencia de velocidades, el sistema eléctrico que suministra las pérdidas también suministra la potencia reactiva a las dos máquinas cuando dos máquinas sincrónicas son acopladas eléctricamente, estas deben ser acopladas mecánicamente con una correcta relación angular de fase. El valor de la potencia transmitida depende del desfase entre las dos máquinas.

An American National Standard

IEEE Standard Test Procedure for

Polyphase Induction Motors and Generators

## 1 ALCANCE

1.1 Estas normas dan instrucciones para conducir y reportar las pruebas aplicables para determinar las características de funcionamiento de los motores y generadores polifásicos de inducción.

## 2 PRUEBAS GENERALES

**2.1 Clases de Pruebas.** Normalmente se realizan pruebas de rutina a las máquinas polifásicas de inducción, pero se pueden realizarse pruebas adicionales.

Una forma típica por informar datos de la prueba de la rutina son muestran en Forma A-1. Una forma típica por informar datos de la prueba adicionales son muestran en la Forma A-2

**2.2 Selección de Pruebas.** Una lista completa de las pruebas cubiertas por este procedimiento se da en la tabla de contenidos

**2.3 Precaución durante las Prueba.** El funcionamiento de una máquina de inducción depende, no sólo en el valor del voltaje y la frecuencia, sino también de la forma de onda y el balance en magnitud y ángulo de fase de los voltajes, datos correctos pueden ser obtenidos solamente con mediciones cuidadosas y con el empleo de una fuente conveniente fuente de potencia

## 3. MEDIDAS ELÉCTRICAS

**3.1 (Todo).** Todas las cantidades son valores rms (raíz-media-cuadrada) a menos que se especifique otra cosa.

**3.1.1 (Todo) Suministro de Potencia.** La fuente de suministro deberá entregar formas de ondas que se acerquen estrechamente a la forma de onda senoidal. El factor de desviación de la formas de onda del voltaje no debe exceder el 10 %. La frecuencia debe mantenerse en un  $\pm 5\%$  del valor requerido para la prueba, a menos que se especifique de otra manera.

**3.1.2 (A-B-C).** Rápidos cambios en frecuencia no pueden ser tolerados en las mediciones de potencia de entrada y salida de las pruebas. Estas variaciones son transmitidas a los aparatos de medición

**3.2 (Todo) Selección del Instrumento.** Los instrumentos usados en mediciones eléctricas, se elegirán de forma que proporcionen lecturas en la parte útil de la escala, tales que se pueda fácilmente estimar una fracción de división que corresponda a una proporción de la lectura real.

**3.3 (Todo) Instrumentos Transformadores.** Cuando se usan transformadores de corriente y potencial, se harán correcciones para la relación

de errores en voltaje, corriente y fase-ángulo en mediciones de potencia.

**3.4 (Todo) Voltaje.** Las fases de voltajes deberán ser leídas a los terminales del motor. Las pruebas deberán ser realizadas para un desbalance de voltaje que no exceda el  $\pm 0.5\%$

**3.5 (Todo) Corriente.** Las corrientes de línea deberán ser medidas para cada fase del motor. Si las corrientes de línea son desiguales, el valor del promedio aritmético debe ser calculado para determinar el funcionamiento de la máquina.

**3.6 (Todo) Potencia.** La potencia de entrada a una máquina de tres fases puede ser medida con dos vatímetros monofásicos conectados en dos fases tal como en el método de los dos vatímetros. O con un vatímetro polifásico o con tres vatímetros monofásicos conectados en cada fase.

#### 4. Determinación del Funcionamiento

**4.1 (Toda) Medición de Resistencia.** Para obtener la medición de la resistencia de corriente directa de estator, el procedimiento indicado en la norma IEEE Sd 118 1978, puede ser usado

**4.12 Temperatura de Referencia.** Toda determinación de funcionamiento, se corregirá a una temperatura ambiente de  $25^{\circ}$  centígrados.

**4.13 Corrección a una Temperatura Específica** Cuando la resistencia  $R_t$  de un bobinado ha sido determinada a la temperatura  $t_t$ , la resistencia puede ser corregida a una temperatura específica  $t_s$ , a través de la siguiente ecuación:

$$R_s = R_t \left( \frac{t_s + k}{t_t + k} \right) \text{ ohmios}$$

Donde:

$R_s$  = resistencia del devanado, corregida a la temperatura  $t_s$ , en ohmios.

$t_s$  = Temperatura específica en grados Celsius

$R_t$  = valor de resistencia del devanado en ohmios

$t_t$  = temperatura del devanado cuando la resistencia fue medida, en grados Celsius.

$k = 234.5$  para cobre

**4.2 (Todo) Eficiencia.** La eficiencia es la relación de la potencia de salida a la potencia

de entrada. La potencia eléctrica es medida directamente; la potencia mecánica puede ser medida directamente u obtenida por restar las pérdidas de la potencia eléctrica por acción motor.

**4.2.1 (Todo) Mediciones de Potencia de Entrada y Salida.** Mediciones directas de potencia de entrada y salida son siempre hechas en máquinas de potencia fraccionarias o máquinas pequeñas, pero tales medidas se vuelven cada vez más difíciles con el equipo normalmente disponible cuando el tamaño de las máquinas se incrementa.

**4.2.1.1 En general,** el freno (método A) o el dinamómetro (método B) es usado en máquinas de potencia fraccionaria. El método del dinamómetro en máquinas sobre los 500 hp a 1800 rpm. Para máquinas grandes, el método pump-back (bomba-inversa) (método c) puede ser usado cada vez que se disponga de máquinas dobles. El método segregated-loss (pérdidas-separadas) (método E o método F) es también usado para máquinas grandes.

**4.2.1.2 (A-B) Pérdida de Estabilización de Cojinete.** Algunos motores pueden experimentar una variación en eficiencia hasta que los cojinetes alcancen una condición de estabilidad en la operación. Se puede considerar que ha ocurrido la estabilización, cada vez que potencia de entrada sin carga no varía por más de 3 por ciento bajo las condiciones siguientes:

- (1) Dos lecturas sucesivas en media hora de intervalo
- (2) Una lectura anterior a y una lectura siguiente de la prueba de eficiencia

**4.2.2 (A-B-C) Métodos de Medición Directa** En todos los métodos de medición directa de prueba la potencia eléctrica y mecánica son medidas directamente. La diferencia entre los varios métodos se encuentra en la manera de medir la potencia mecánica.

**4.2.2.1 (A-B) Medidas.** Las lecturas de potencia eléctrica, corriente, voltaje, frecuencia, deslizamiento, torque, temperatura ambiente, y temperatura en los bobinados de estator o la resistencia en los bobinados del estator, deben ser obtenidos para seis puntos de carga igualmente espaciados en el tiempo de un cuarto a uno y un medio.

**4.2.2.2 (A-B-C-E) Determinación de funcionamiento del motor** Se determinará el

funcionamiento del motor como se indica en la Forma B o en la Forma E.

**4.2.2.3 (A) Método A: El freno** El motor es cargado por medio de un freno mecánico el cual es capaz de ser ajustado para proporcionar el torque deseado de carga. Se empleará con preocupación en la construcción y uso del freno y la polea. El "objetivo", si presenta, debe ser cuidadosamente determinado y compensado. El funcionamiento de la máquina debe ser calculado como se indica en la forma B.

**4.2.2.4 (B) Método del Dinamómetro.** Otro método de medición para la potencia mecánica de una máquina de inducción es por la carga de la máquina con un dinamómetro. La potencia en vatios es obtenida de la siguiente ecuación.

$$\text{potencia.en.Watts} = knT$$

Donde.

n = velocidad rotacional en rpm.  
k = 0.1047 en N.m

**4.2.2.5 (C) Método C: Máquinas Dobles** Este método para determinar de la eficiencia puede ser usado cuando máquinas dobles están disponibles. Las dos máquinas son acopladas y eléctricamente conectadas a dos fuentes de potencia, la frecuencia de la una puede ser ajustable. Una de las máquinas es operada como un motor en relación de voltajes y frecuencia y la otra es manejada como un generador en relación de voltaje por Hertz, pero en baja frecuencia para producir la carga deseada.

4.2.2.5.1 Las lecturas deben ser tomadas de la potencia eléctrica de entrada y de salida, la temperatura de los bobinados del estator o de la resistencia de los bobinados del estator, y el deslizamiento de cada máquina. Las pruebas deben ser repetidas en la dirección del flujo de potencia invertido. La frecuencia de la primera máquina no debe cambiar mientras que de la segunda se puede modificar para producir la carga deseada. La ubicación de los instrumentos de y los instrumentos transformadores no debe ser cambiada.

4.2.2.5.2 Por esta inversión de flujo de la potencia se minimizan errores de la calibración ordinaria de todos los instrumentos. Errores de fase ángulo de los instrumentos transformadores son acumulativos para pruebas de motorización y de generación.

4.2.2.5.3 Se obtiene las Pérdidas Extrañas con Carga como sigue:

(1) Las pérdidas  $I^2 R$  del estator a la temperatura de prueba es calculada para cada máquina usando la corriente observada.

(2) Las pérdidas  $I^2 R$  del rotor como motor es: Deslizamiento del Motor x (potencia de entrada del motor- pérdidas  $I^2 R$  del stator- pérdidas del núcleo)

(3) la combinación de las pérdidas extrañas con carga es determinada por la sustracción del total de las pérdidas medidas (diferencia entre la potencia de entrada y salida) la suma de las pérdidas  $I^2 R$  del estator,  $I^2 R$  del rotor, las del núcleo, y las de fricción y ventilación de las dos máquinas.

(4) Las pérdidas extrañas con carga son asumidas que están presentes de forma proporcional al cuadrado de la corriente del rotor. Las pérdidas extrañas con carga son tomadas como:

Motor pérdidas extrañas con carga = ( $I^2 R$  del rotor como motor x combinación de pérdidas extrañas con carga) / ( $I^2 R$  del rotor como motor +  $I^2 R$  del rotor como generador)

El promedio de los resultados obtenidos con las dos direcciones de flujo de potencia deben ser tomados como los valores correctos de las pérdidas extrañas con carga.

4.2.2.5.4 La eficiencia es tomada como: Eficiencia del motor = (potencia eléctrica de entrada – pérdidas totales como motor)/ potencia eléctrica de entrada.

El total de pérdidas es igual a la sumatoria de las pérdidas  $I^2 R$  del estator y rotor corregido a una temperatura específica para la resistencia, perdidas del núcleo, perdidas por fricción y ventilación y pérdidas extrañas con carga.

Cuando la relación carga temperatura no ha sido medida, la resistencia de los bobinados debe ser corregida a la siguiente temperatura:

Clase del sistema de aislamiento	Temperatura grados Celsius
A, E	75
B	95
F	115
H	130

Estos valores de temperatura de referencia deben ser usados para determinar las pérdidas  $I^2 R$  de todos los puntos de carga.

4.2.3 (E, F) **Métodos de las pérdidas separadas.** Se medirá la potencia de entrada como se indicó en el método E o calculado como se describe en el método F. se determinara la potencia de salida por la sustracción de las pérdidas de la entrada. Las pérdidas en la máquina de inducción son:

Tipo de pérdidas	Descripción
(a) Fricción y ventilación	Pérdidas mecánicas debido a fricción de cojinetes y ventilación.
(b) núcleo	Pérdidas en el acero.
(c) $I^2 R$ del estator	$I^2 R$ de los bobinados del estator.
(d) $I^2 R$ del rotor	$I^2 R$ de los bobinados del rotor.
(e) pérdidas extrañas	Pérdidas en el accro y pérdidas por corrientes de Eddy en los conductores.

**4.2.3.1 (E) Método E: Medidas de Potencia de Entrada.** Para obtener los datos requeridos, es necesario acoplar con correas o engranajes la máquina con una carga variable. El mismo arreglo puede usarse para prueba de temperatura.

Los datos requeridos son:

Resistencia del estator, potencia de entrada, corriente de vacío, corriente de línea, pérdidas sin carga, voltaje terminal, deslizamiento del rotor, pérdidas extrañas con carga.

La Forma E es recomendable para los cálculos y tabulación del funcionamiento. La resistencia de la bobina del estator debe ser considerada para cada punto de carga.

**4.2.3.2 (F) Método F: cálculos del Circuito Equivalente** Cuando no se hacen pruebas bajo carga, las características de operación (eficiencia, factor de potencia, torque, etc.) son calculadas de la impedancia sin carga y de los datos del circuito equivalente. Ver figura 1. Las constantes requeridas se calculan usando las ecuaciones en la forma F-1 y se registran en la forma F-2. La Forma F-3 es una hoja de trabajo en la que se hacen los cálculos del circuito.

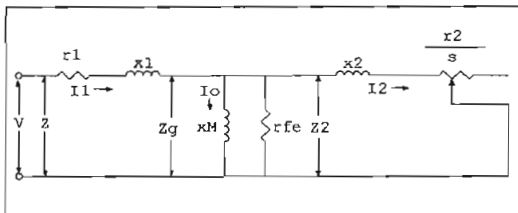


Fig. 1  
Circuito Equivalente

4.2.3.2.1 Los valores de las constantes determinadas de las ecuaciones anteriores y datos de pruebas se ingresan en la Forma F-2

4.2.3.2.2 Los resultados de cálculos de la forma F-3 se pueden trazar en forma de curva, del cual el resumen de características en la forma F-2 se puede determinar, o cálculos reiterados se puede hacer para determinar el deslizamiento correspondiente de los puntos de carga deseados para Forma F-2.

4.2.3.2.3 Predicción exacta de las características de la máquina por el circuito equivalente dependerá de la proximidad por el cual  $r_2$  representa la resistencia del rotor real a corrientes de baja frecuencia. Un procedimiento más cuidadoso durante la prueba de la impedancia de baja-frecuencia es imperativo. Un método alternativo para obtener  $r_2$  es descrito en 4.2.3.2.5

4.2.3.2.4 En la forma F-1 se indica la base de  $x_1$  y  $x_2$  las constante restante durante el rango de operación de la máquina.

Debe la curva de corriente contra la de voltaje partir de una línea recta en el rango de corrientes bajo consideración, cada columna de cálculos en la Forma F-3 usará valores de reactancia obtenidos en esta curva para los valores de  $I_1$  que se calculó en la columna.

4.2.3.2.5 Cuando un punto de corriente-deslizamiento bajo carga con temperatura del bobinado del estator de  $t_s$  está disponible, el método F puede ser usado para determinar las características de la máquina a otras cargas. En tales casos,  $r_2$  no es determinado de la prueba de impedancia de baja frecuencia. El siguiente procedimiento es utilizado.

Usar la Forma F-3 pero se inicia con la línea 2 con el valor asumido de  $r_2/s$  y valor de  $r_1$  fundamentado en la temperatura del bobinado del estator a  $t_s$ . Después de extender la línea 21, verificar el cálculo del valor en vatios de la entrada contra el valor medido en vatios de la entrada. Ajustar el valor asumido de  $r_2/s$  y repetir hasta que el cálculo del valor en vatios de la entrada está de acuerdo con valor medido en vatios de la entrada dentro de los límites de uno por ciento. Se obtiene  $r_2$  por multiplicación final del valor asumido de  $r_2/s$  por el valor medido al deslizamiento en por unidad de la velocidad sincrónica. El procedimiento establece el valor de  $r_2$  (sin corrección de la temperatura) se usa en el calculo de las características de funcionamiento de la carga. Rectificado  $r_1$  y  $r_2$  a

la temperatura especificada de  $t_s$  de acuerdo con 4.1.3

4.2.3.2.6 el Máximo torque como un motor se determina de la forma F-3 usando el valor del deslizamiento.

$$s = \frac{r_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2)^2}}$$

### 4.3 Pérdidas.

**4.3.1 (Todas) Pérdida del Estator  $I^2R$ .** En vatios son iguales a:

- 1.5  $I^2R$  para 3-fases
- 2.0  $I^2R$  para 2-fases

Donde  $I$  es la corriente rms medida o calculada por terminal a la carga especificada y  $R$  es la resistencia de corriente directa entre cualquiera de las dos líneas terminales corregida a una temperatura específica.

**4.3.2 (Todas) Pérdida del Rotor  $I^2R$ .** Las pérdidas  $I^2R$  del rotor incluidas las pérdidas de los contactos de las escobillas, para rotor devanado deben ser determinadas del deslizamiento utilizando cualquiera de las dos de las ecuaciones siguientes:

Pérdidas  $I^2R$  del rotor como motor = (mediciones de potencia de entrada del estator – pérdidas  $I^2R$  del estator – pérdidas del núcleo) x deslizamiento.

**4.3.3 (todas) Pérdidas del Núcleo y Fricción y por Ventilación.** Consulte en 4.6.2 para información en la determinación de pérdidas del núcleo, fricción y ventilación.

**4.3.4 (C-E-F) Pérdidas Extrañas con Carga** las pérdidas extrañas con carga es esa porción del total de las pérdidas en una máquina no explícitas por la suma de pérdidas: fricción, ventilación núcleo estator y rotor.

**4.3.4.1 (C-F) Mediciones indirectas.** El total de pérdidas extrañas con carga pueden ser determinadas por la medición del total de pérdidas y sustrayéndole de esta suma de pérdidas por fricción, ventilación, las del núcleo, las  $I^2R$  del estator y del rotor.

**4.3.4.2 (E-F) Mediciones directas.** Las pérdidas extrañas con carga ocurridas a frecuencia fundamental pueden ser determinadas por aplicar corrientes polifásicas balanceadas a los terminales del bobinado del estator con el rotor

removido. La entrada de potencia eléctrica menos las pérdidas  $I^2R$  del estator a la resistencia de prueba es igual a la frecuencia fundamental de las pérdidas extrañas con carga. Durante esta prueba los cojinetes y otras partes estructurales en los que se puede inducir corrientes deben estar en su lugar. La corriente usada para hacer esta prueba y que esta descrita en el numeral 4.3.4.2.1 se identificará como  $I_t$  cuyos rangos se definen en la ecuación del numeral 4.3.4.4.1

4.3.4.2.1 Las pérdidas extrañas con carga ocurridas a altas frecuencias pueden ser determinadas por una prueba de rotación-inversa. Con el motor completamente ensamblado, voltaje polifásico balanceado es aplicado a los terminales del estator. El rotor es manejado por medios externos a la velocidad sincrónica en la dirección opuesta a la rotación del campo del estator. La potencia eléctrica de entrada es medida.

4.3.4.2.2. La potencia mecánica requerida para manejar el rotor debe ser medida con y sin corriente aplicada a los terminales del bobinado del estator. Para motores de rotor devanado los terminales del rotor deben ser cortocircuitados.

4.3.4.2.3. Las pérdidas extrañas con carga deben ser calculadas como siguen:

$$s_{ll} = LL_s + LL_r$$

En esta ecuación los valores de  $LL_s$  y  $LL_r$  son para los mismos valores de corrientes  $I_t$  de los bobinados de estator.

Donde:

$LL_s = W_s$  – pérdidas  $I^2R$  de los bobinados del estator. Las pérdidas  $I^2R$  del devanado de estator deben ser el producto de el numero de fases,  $I_t^2$ , y  $r_1$  tomadas en cada punto de carga.

$LL_r = (Pr - Pf) - (W_r - LL_s -$  pérdidas  $I^2R$  de los bobinados del estator)

$LL_s$  = pérdidas extrañas con carga a frecuencia fundamental.

$LL_r$  = pérdidas extrañas con carga a altas frecuencias.

$r_1$  = resistencia de fase del estator. Para una máquina trifásica se toma como la mitad de la resistencia entre terminales.

$Pr$  = potencia mecánica requerida para manejar el rotor al aplicar voltajes en los bobinados del estator.



Pf = potencia mecánica requerida para manejar el rotor sin aplicar voltajes en los bobinados del estator.

Ws = potencia eléctrica de entrada en los bobinados del estator con el rotor removido

Wr = potencia eléctrica de entrada en los bobinados del estator durante la prueba de rotación inversa.

4.3.4.3 (E-E) *Método Directo Alternativo para Motores de Rotor Devanado*

En este método se excita el rotor con corriente directa, y los terminales del bobinado del estator están cortocircuitados con amperímetros incluidos para leer la corriente del estator.

El rotor es manejado por medios externos a velocidad sincrónica. La excitación del rotor se ajusta hasta que la circulación de corriente en el bobinado del estator tenga el valor para la cual se desea la determinación de las pérdidas extrañas con carga. La potencia mecánica requerida para manejar el rotor, ambos con (Pr) y sin (Pf) excitación del rotor es medida:

Pérdidas extrañas con carga = (Pr-Pf- pérdidas I<sup>2</sup>R de estator a temperatura durante la prueba)

4.3.4.4 (E-F) Valores de pérdidas extrañas con carga: el método para determinar las pérdidas extrañas con carga para varios puntos de carga es descrito en 4.3.4.4.1 y 4.3.4.4.2

4.3.4.4.1 (E) las pérdidas extrañas con carga de una máquina operando normalmente con corriente de línea del estator I se toma como el valor de pérdidas extrañas con carga como determinada en 4.3.4.2.3 o 4.3.4.3 para un valor de corriente igual a:

$$I_t = \sqrt{I^2 - I_o^2}$$

It = valor de corriente del bobinado de estator durante la prueba pérdidas extrañas con carga

Io = valor de corriente de vacío

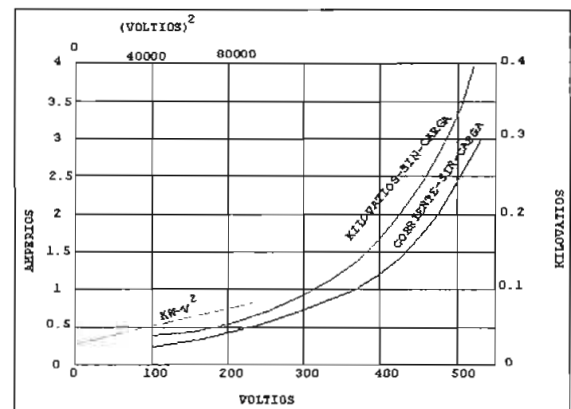
I = valor de operación de la corriente de línea del estator para el cual se determina pérdidas extrañas con carga.

El valor de pérdidas extrañas con carga en la forma F-2 corresponderá a un valor de It correspondiente al considerado como valor de corriente de línea del stator I.

4.3.4.4.2 (F) el valor de pérdidas extrañas con carga se asume para ser proporcional al cuadrado de la corriente secundaria. El valor de pérdidas

extrañas con carga en forma F-2 corresponderá a un valor equivalente de It igual al valor de corriente secundaria considerada como carga.

**4.6.2 Pérdidas.** La lectura de potencia de entrada es el total de las pérdidas en el motor sin carga. Sustrayendo las pérdidas I<sup>2</sup>R del estator de la potencia de entrada se obtiene la suma de las pérdidas del núcleo, fricción y ventilación. La separación de las pérdidas del núcleo de las pérdidas de fricción y ventilación se puede hacer por lecturas de voltaje, corriente, y potencia de entrada a valor de frecuencia y voltaje que oscila del 125 por ciento de valor de voltaje. Se traza una curva de potencia de entrada contra voltaje la curva así obtenida se extiende a cero voltaje. La intercepción en cero con el eje del voltaje son las pérdidas por fricción y ventilación. La intercepción se determina más con precisión si se traza la entrada de potencia en contra del cuadrado del voltaje para valores menores al rango de voltaje. Un ejemplo de estas curvas se muestra en la figura



## Forma F-1

Método F: Ecuaciones para Determinar las Constantes de la Máquina.

## Procedimiento

La relación entre  $x_1$  y  $x_2$  debe ser asumida. Se empelará la siguiente relación de la impedancia de dispersión:

$(x_1/x_2) = 1$  para motores clase A, D y motores de rotor devanado.

$(x_1/x_2) = 0.67$  para motores clase B.

$(x_1/x_2) = 0.43$  para motores clase C.

## Información.

$o$  = cantidades pertenecientes a la ensayo de vacío.

$b$  = cantidades pertenecientes a la ensayo de rotor bloqueado.

$$VAR = \sqrt{(mVI_L)^2 - W}$$

VAR = volt-amperios reactivos

$m$  = número de fases

$V$  = voltaje de fase.

$I_L$  = corriente de fase.

$W$  = potencia absorbida por el motor asincrónico.

$$x_{1b} = \left( \frac{VAR_b}{m.I_b^2 \cdot \left(1 + \frac{x_1}{x_2} + \frac{x_1}{xM}\right)} \right) \cdot \left( \frac{x_1}{x_2} + \frac{x_1}{xM} \right)$$

$x_{1b}$  = reactancia de dispersión de estator a rotor bloqueado a la frecuencia  $f_1$

$xM$  = reactancia de magnetización.

$x_1$  = reactancia de dispersión de estator a frecuencia nominal.

$x_2$  = reactancia de dispersión de estator a frecuencia nominal.

$$xM = \left( \frac{m.V_o^2}{VAR_o - m.I_o^2 \cdot x_1} \right) \times \left( \frac{1}{1 + \frac{x_1}{xM}} \right)^2$$

$$x_1 = \frac{f_{nominal}}{f_1} x_{1b}$$

Para realizar el cálculo se asume que  $x_1/xM = 0.1$

$$P_{núcleo} = P_{vacíoacoplado} - mI_o^2 r_1$$

$$gfe = \frac{P_{núcleo}}{mV_o^2} \left( 1 + \frac{x_1}{xM} \right)^2$$

$$rfe = \frac{1}{gfe}$$

$gfc$  = conductancia del núcleo.

$P$  núcleo = pérdidas en el núcleo.

$rfe$  = resistencia del núcleo.

$$r_2 = \frac{\frac{W_b}{m.I_b^2} - r_1}{\left( 1 + \frac{x_2}{x_2} \frac{x_1}{xM} \right)^2 - \left( \frac{x_2}{x_1} \right)^2 (x_1^2 \cdot gfe)}$$

$r_2$  = resistencia de estator referida al estator.

La eficiencia se determina para los valores nominales de la máquina, donde:

$$\eta = (1 - (Pérdidas / Potencia..de..Entrada)) * 100$$