

**PROPUESTA DE NUEVAS PRÁCTICAS PARA EL LABORATORIO DE
MÁQUINAS ELÉCTRICAS DEL PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA**

JUAN RAFAEL RESTREPO GIRALDO

CRISTINA CAÑAVERAL VARGAS

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
PEREIRA
2013**

**PROPUESTA DE NUEVAS PRÁCTICAS PARA EL LABORATORIO DE
MÁQUINAS ELÉCTRICAS DEL PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA**

JUAN RAFAEL RESTREPO GIRALDO

CRISTINA CAÑAVERAL VARGAS

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Tecnólogo en Electricidad**

Director

**M.Sc. Andrés Felipe Panesso Hernández
Profesor Auxiliar**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
PEREIRA
2013**

Nota de aceptación:

Director
Ingeniero Electricista M.Sc.
Andrés Felipe Panesso Hernández

Jurado
Ingeniero Electricista Ph.D.
Carlos Julio Zapata Grisales

Director del programa de
Tecnología Eléctrica
Ingeniero Electricista M.Sc.(c)
Santiago Gómez Estrada

Pereira, Octubre de 2013

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestras familias, compañeros y amigos por el apoyo brindado durante este tiempo.

Gracias al M.Sc. Andrés Felipe Panesso por su apoyo y colaboración incondicional al dirigir este proyecto, y a la escuela de tecnología eléctrica por brindarnos su saber y conocimiento.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
GLOSARIO	9
RESUMEN	13
1. INTRODUCCIÓN	14
1.1. Definición del problema	14
1.2. Motivación	14
1.3. Objetivos	15
1.3.1. Objetivo general	15
1.3.2. Objetivos específicos	15
1.4. Estructura del documento	15
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	16
2.1. Máquinas eléctricas	16
2.1.1. Transformador	16
2.1.2. Máquina asíncrona o de inducción	16
2.1.3. Máquina síncrona	17
2.1.4. Motor de corriente continua	17
2.2. Frenado en máquinas eléctricas	19
2.2.1. Frenado contracorriente	19
2.2.2. Frenado dinámico	21
2.2.3. Frenado regenerativo	23
2.3. Arranque de máquinas eléctricas	23
2.3.1. Arranque de motores de síncronos	24
2.3.2. Arranque de motores de inducción	25
2.3.3. Arranque a tensión reducida por autotransformador	26
2.3.4. Arranque a tensión reducida por resistencia o reactancia	27
2.3.5. Arranque estrella-triángulo	27
2.3.6. Arranque directo	28
2.4. Eficiencia de las máquinas eléctricas	29
2.4.1. Pérdidas mecánicas	30
2.4.2. Pérdidas eléctricas	30
2.4.2.1. Pérdidas en las escobillas	30
2.4.2.2. Pérdidas en el hierro	30
2.4.2.3. Pérdidas en los conductores	30
2.4.3. Pérdidas misceláneas	31
2.4.4. Eficiencia de la máquina de corriente alterna	31

2.4.5.	Eficiencia de la máquina de corriente continua.....	33
2.4.6.	Eficiencia en transformadores y autotransformadores.....	34
3.	PRUEBAS REALIZADAS EN EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS PARA LAS PRÁCTICAS PROPUESTAS	35
3.1.	Pruebas de frenado de motores eléctricos.....	35
3.1.1.	Frenado dinámico	35
3.2.	Pruebas arranque de motores eléctricos.....	36
3.2.1.	Arranque estrella - triángulo.....	36
3.2.2.	Arranque por autotransformador.....	37
3.2.3.	Arranque trifásico directo	38
3.2.4.	Arranque por resistencia variable	38
3.2.5.	Arranque por resistencia rotórica.....	39
3.3.	Pruebas eficiencia de máquinas eléctricas	40
3.3.1.	Eficiencia en motores eléctricos	40
3.3.2.	Motor de inducción trifásico jaula de ardilla	41
3.3.3.	Motor síncrono trifásico normalmente excitado	42
3.3.4.	Motor CD en derivación o shunt	43
3.3.5.	Transformador monofásico reductor (208/120).....	45
4.	CONCLUSIONES	47
5.	BIBLIOGRAFÍA.....	48
	ANEXO A.....	49
	ANEXO B.....	52
	ANEXO C.....	55

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquema completo del circuito de un generador shunt.	18
Figura 2. Circuito equivalente de un generador derivación.	18
Figura 3. Diagrama circuital para el frenado contracorriente (izq.) de un motor shunt y (der.) de un motor serie.	20
Figura 4. Diagrama circuital para el frenado dinámico (izq.) de un motor shunt y (der.) de un motor serie.	22
Figura 5. Arranque a tensión reducida con autotransformador para (izq.) tres compensadores conectados en estrella y (der.) dos compensadores conectados en triángulo abierto.	26
Figura 6. Esquema circuital del arranque estrella-triángulo.	27
Figura 7. Circuito equivalente por fase en un motor de inducción.	32
Figura 8. Diagrama de flujo de potencia de un motor de inducción trifásico.	32
Figura 9. Diagrama de flujo potencia de un generador de CA trifásico.	33
Figura 10. Diagrama de flujo de potencia de un motor de corriente continua.	33
Figura 11. Tiempo de frenado vs resistencia de carga.	36
Figura 12. Eficiencia del motor de inducción jaula de ardilla.	42
Figura 13. Eficiencia del motor síncrono trifásico normalmente excitado.	43
Figura 14. Eficiencia del motor CD en configuración shunt.	44
Figura 15. Eficiencia del transformador reductor monofásico (208/120).	46

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Letras de código NEMA según potencia nominal del motor.....	25
Tabla 2. Resultados de frenado dinámico.....	35
Tabla 3. Resultados prueba de arranque Y - Δ	36
Tabla 4. Resultados pruebas arranque por autotransformador.	37
Tabla 5. Resultados prueba de arranque trifásico directo.....	38
Tabla 6. Resultados pruebas arranque por resistencia variable.	39
Tabla 7. Resultados pruebas arranque por resistencia rotórica.....	40
Tabla 8. Resultados pruebas de eficiencia en motor de inducción trifásico jaula de ardilla.	41
Tabla 9. Resultados pruebas de eficiencia en motor síncrono normalmente excitado.	42
Tabla 10. Resultados pruebas de eficiencia motor CD en derivación o shunt.	44
Tabla 11. Resultados pruebas eficiencia transformador reductor monofásico (208/120).	45

GLOSARIO

Armónicos: En una onda periódica, cualquiera de sus componentes sinusoidales, cuya frecuencia sea un múltiplo entero de la frecuencia fundamental [1].

Autotransformador: Transformador con sus bobinados conectados en serie. Su conexión tiene efecto en la reducción de su tamaño [2].

Bornes: Cada uno de los botones de metal en que suelen terminar ciertas máquinas y aparatos eléctricos, y a los cuales se unen los hilos conductores [1].

Cabrias: Máquina para levantar pesos, cuya armazón consiste en dos vigas ensambladas en ángulo agudo, mantenidas por otra que forma trípode con ellas, o bien por una o varias amarras [1].

Caballos de fuerza: Del inglés *horse power*, es una unidad de potencia utilizada en el sistema inglés. Se denota en **hp** [1].

Contactor: Componente electromecánico que tiene por objetivo establecer o interrumpir el paso de corriente, ya sea en el circuito de potencia o en el circuito de mando, tan pronto se de tensión a la bobina [2].

Corriente eléctrica: También conocida como intensidad eléctrica, es el flujo de carga eléctrica por unidad de tiempo que recorre un material [1].

Corriente alterna (CA): Corriente eléctrica que invierte periódicamente el sentido de su movimiento con una determinada frecuencia [1].

Corriente directa (CD): Corriente eléctrica que fluye siempre en el mismo sentido [1].

Circuito Eléctrico: Interconexión de dos o más componentes [1].

Devanado: Bobina de un circuito eléctrico [1].

Eficiencia: También conocida como el rendimiento de un proceso o de un dispositivo, es la relación entre la energía útil y la energía invertida [2].

Electromagnético: Se dice de todo fenómeno en que los campos eléctricos y magnéticos están relacionados entre sí [1].

Electromotriz: Magnitud física que se mide por la diferencia de potencial originada entre los extremos de un circuito abierto o por la corriente que produce en un circuito cerrado [1].

Escobillas: Pequeños bloques de carbón destinados a mantener el contacto por frotación, entre dos partes de una máquina eléctrica, una de las cuales está fija mientras la otra se mueve [1].

Estator: Es la parte fija de una máquina rotativa y uno de los dos elementos fundamentales para la transmisión de potencia (siendo el otro su contraparte móvil, el rotor) [2].

Fase: Valor de la fuerza electromotriz o intensidad de una corriente eléctrica alterna en un momento determinado [1].

F.E.M.: Fuerza electromotriz [1].

Frecuencia: Número de veces que se repite un proceso periódico por unidad de tiempo [1].

Fricción: Roce de dos cuerpos en contacto [1].

Generador: En las máquinas, parte que produce la fuerza o energía [1].

Generación: Es la transferencia de cualquier forma de energía a energía eléctrica. Los generadores se encargan de transformar la energía mecánica en energía eléctrica y así producir electricidad [2].

Impedancia: Relación entre la tensión alterna aplicada a un circuito y la intensidad de la corriente producida. Se mide en ohmios [1].

Inducción: Producción de una fuerza electromotriz en un circuito por la variación de la corriente que circula por otro [1].

Inercia: Es la propiedad que tienen los cuerpos de permanecer en su estado de reposo o movimiento, mientras no se aplique sobre ellos alguna fuerza, o la resistencia que opone la materia al modificar su estado de reposo o movimiento [2].

Interruptor: Mecanismo destinado a interrumpir o establecer un circuito eléctrico [1].

Jaula de ardilla: Es la parte que rota usada comúnmente en un motor de inducción de corriente alterna [1].

Monofásico: Se dice de la corriente eléctrica alterna que circula por dos conductores, y también de los aparatos que se alimentan con esta clase de corriente [1].

Normalmente excitado: Es el punto de operación de la máquina síncrona operando como motor en el cual el campo debido a la excitación producida por el rotor permite que la máquina trabaje a factor de potencia unitario.

Par motor o torque: Es el momento de fuerza que ejerce un motor sobre el eje. La potencia desarrollada por el par motor es proporcional a la velocidad angular del eje de transmisión [2].

Periférico: Aparato auxiliar e independiente conectado a una unidad central. Éste término es utilizado sobre todo para computadoras [1].

Polos: Cada uno de los dos puntos opuestos de un cuerpo, en los cuales se acumula en mayor cantidad la energía de un agente físico; como el magnetismo en los extremos de un imán [1].

Potencia activa: Es la potencia capaz de transformar la energía eléctrica en trabajo. Esta potencia es, por lo tanto, la realmente consumida por los circuitos y, en consecuencia, cuando se habla de demanda eléctrica, es esta potencia la que se utiliza para determinar dicha demanda [2].

Potencia reactiva: Esta potencia no se consume ni se genera en el sentido estricto (el uso de los términos "potencia reactiva generada" y "potencia reactiva consumida" es una convención) y en circuitos lineales solo aparece cuando existen bobinas o condensadores [2].

Reactancia: Impedancia ofrecida por un circuito eléctrico en el que existe inducción o capacidad, sin resistencia. Se mide en ohmios [1].

Reóstato: Instrumento para variar la resistencia de un circuito eléctrico [1].

Resistencia: Dificultad que opone un circuito al paso de una corriente [1].

Rodamiento: Cojinete formado por dos cilindros concéntricos, entre los que se intercala una corona de bolas o rodillos que pueden girar libremente [1].

Rotor: Es el componente que gira en una máquina eléctrica, sea ésta un motor o un generador eléctrico. Junto con su contraparte fija, el estator, forma el conjunto fundamental para la transmisión de potencia en motores y máquinas eléctricas en general [2].

Software: Conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas para ejecutar ciertas tareas en una computadora [1].

Tensión: Diferencia de potencial con que se realiza una transmisión de energía eléctrica [1].

Transformador: Dispositivo que sirve para convertir el valor de un flujo eléctrico a un valor diferente. De acuerdo con su utilización se clasifica de diferentes maneras [2].

Trifásico: Se dice de un sistema de tres corrientes eléctricas alternas iguales, desfasadas entre sí en un tercio de período [1].

RESUMEN

El presente trabajo de grado desarrolla tres tipos de prácticas para ser realizadas en el laboratorio de máquinas eléctricas del curso TE5E2 con el fin de que sean involucradas como guías en el programa académico del curso. Las prácticas propuestas son: tipos de arranques, frenados y eficiencia de las máquinas eléctricas.

Para la realización de las guías de laboratorio se revisaron las guías actuales del Laboratorio de Máquinas eléctricas del programa de tecnología eléctrica y se realizó un inventario de los elementos disponibles para realizar un plan de trabajo consecuente con los objetivos del curso y aprovechando los materiales que actualmente existen en el almacén. También se realizó la búsqueda de toda la información necesaria para comenzar a realizar las pruebas, tal que se pudiera tener claro el tipo de conexión y análisis que se debía tener con cada una de las prácticas a ejecutar.

Además, todas las pruebas se realizaron en el laboratorio de máquinas eléctricas con el software de LabVolt, el cual permitió obtener la mayoría de datos, los cuales son mostrados en este documento. Por último, al final del documento se entregan como anexos, una propuesta de cómo deberían estar planteadas las guías en caso de ser anexadas al plan de estudios de la asignatura.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Definición del problema

El uso de máquinas eléctricas en la actualidad, exige estar a la vanguardia del conocimiento de estos elementos por la gran cantidad de dispositivos de control, accionamientos y protecciones que se encuentran hoy día. Debido al auge de las aplicaciones industriales y comerciales que ofrecen estas máquinas, es recomendable para cualquier profesional de la energía eléctrica tener claro no sólo el funcionamiento interno de los diferentes tipos de máquinas sino también de los dispositivos periféricos que se encuentran disponibles.

Las prácticas de Laboratorio, en el ámbito universitario deben estar acorde a las exigencias de la industria, de tal forma que garantice al futuro profesional herramientas sólidas a la hora de enfrentarse al campo laboral.

En este proyecto de grado se hace una propuesta de actualización de las guías de laboratorio de Máquinas Eléctricas del programa de Tecnología Eléctrica con el fin de involucrar aspectos teórico-prácticos de gran utilidad para el profesional que la industria moderna requiere.

1.2. Motivación

Las máquinas eléctricas son recursos indispensables en la industria, y por tal motivo el estudiante de Tecnología Eléctrica debe en su formación académica encontrar los recursos que garanticen un conocimiento sobre ellas, que abarque las necesidades actuales.

Por tanto, siendo la Universidad la institución educativa encargada de garantizar que la formación académica brindada a sus estudiantes siempre esté a la vanguardia en la tecnología. Se propone crear nuevas prácticas para la guía de laboratorio de máquinas que permita desarrollar aspectos que sean acordes a las nuevas tecnologías, con los equipos y suministros con los que cuenta el laboratorio de máquinas en el presente, y así brindar una formación global que certifique al estudiante de Tecnología Eléctrica como apto para la implementación de cualquier tipo de maquinaria eléctrica.

La modificación propuesta para la guía de laboratorio incluirá solamente tres nuevas prácticas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Proponer nuevas prácticas para el laboratorio de máquinas eléctricas del programa de Tecnología Eléctrica.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar un inventario de las máquinas eléctricas y de los elementos de medición disponibles en el laboratorio.
- Realizar un estudio sobre frenado y arranque de motores eléctricos, y también sobre la eficiencia de las máquinas eléctricas.
- Diseñar las prácticas del laboratorio de máquinas eléctricas, de acuerdo a los fundamentos teóricos del objetivo anterior.
- Realizar las pruebas de laboratorio aplicando los conceptos para la conexión de máquinas rotativas CD y CA, y máquinas estáticas CA.
- Unificar las nuevas guías de prácticas de laboratorio con las actuales.

1.4. Estructura del documento

El documento está dividido en cuatro capítulos que tienen como finalidad presentar de forma organizada la ejecución y análisis de cada una de las etapas del presente trabajo de grado. En el primer capítulo se presenta una introducción en la cual se realiza una presentación formal del presente documento.

En el segundo capítulo se realiza una conceptualización de los aspectos teóricos más importantes de las máquinas eléctricas y los métodos de arranque y frenado de los motores, y una fundamentación sobre la eficiencia en estas máquinas.

Luego, en el tercer capítulo, se presentan las pruebas de arranque, frenado y eficiencia de las máquinas eléctricas disponibles en el laboratorio de máquinas de la Universidad Tecnológica de Pereira, respectivamente. Además se presenta los resultados de las pruebas realizadas y el análisis de las mismas.

En el capítulo cuatro se presentan las conclusiones generales y recomendaciones acerca del trabajo realizado. Finalmente, se presenta como anexo tres guías de laboratorio de máquinas propuestas como resultado del trabajo de grado realizado.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Máquinas eléctricas

Una máquina eléctrica es un aparato que funciona con electricidad y que depende de la inducción electromagnética para su funcionamiento.

En general, los tipos de máquinas contempladas en los textos académicos son los que generalmente se hace referencia como motores, generadores y transformadores [3].

2.1.1. Transformador

Es un dispositivo estático de tipo electromagnético que tiene dos o más devanados acoplados por un campo magnético mutuo en el núcleo y se utiliza para convertir uno o varios sistemas de CA en otro u otros sistemas de CA de tensión diferente. La aplicación de los transformadores permite elevar o bajar la tensión, variar el número de fases, e incluso, en algunos casos variar la frecuencia de la señal.

Al alimentar uno de los devanados del transformador se genera una pequeña corriente de excitación, la cual genera un flujo alterno en el núcleo que acopla las espiras de todos los devanados en el núcleo del transformador. Como este flujo alterno acopla las espiras de todos los devanados, debe inducir la misma tensión en cada espira de cada devanado; esto es la causa de que la f.e.m. inducida total en cada devanado sea directamente proporcional al número de espiras o vueltas de cada uno [4].

2.1.2. Máquina asíncrona o de inducción

Un motor de inducción tiene físicamente el mismo estator que una máquina síncrona, pero la construcción del rotor es diferente. Hay dos tipos diferentes de rotores que pueden disponerse dentro del estator del motor de inducción. Uno de ellos se llama motor jaula de ardilla o simplemente rotor de jaula, mientras el otro es llamado rotor devanado.

El tipo jaula de ardilla consiste en una serie de barras conductoras dispuestas entre ranuras labradas en la cara del rotor y cortocircuitadas en cada extremo por anillos de cortocircuitado. Y un rotor devanado tiene un grupo completo de devanados trifásicos que son las imágenes especulares de los devanados del estator. Las fases de los devanados del estator están conectados usualmente en Y, y los extremos de los tres alambres del rotor están unidos a anillos rozantes

dispuestos sobre el eje del rotor. Los devanados del rotor están cortocircuitados a través de escobillas montadas en los anillos rozantes. En los motores de inducción de rotor devanado, sus corrientes rotóricas son accesibles en las escobillas del estator, donde pueden ser examinadas y donde se puede insertar resistencia extra al circuito del rotor. Es posible obtener ventaja de este hecho para modificar las características par-velocidad del motor [5].

2.1.3. Máquina síncrona.

La teoría elemental de las máquinas síncronas supone que los valores instantáneos sucesivos de la fuerza electromotriz y la corriente se suceden en forma estrictamente armónica, es decir en sincronía. Cuando dos máquinas síncronas están en funcionamiento como el generador y el motor, la cantidad de energía demandada del motor hace que se asuma una relación de fase definida para el generador, un tanto depende también de su excitación relativa y de la impedancia del circuito que incluye las dos máquinas.

Cuando este tipo de máquinas están operando en paralelo, teóricamente no hay energía para ser transferida, pero esta condición ideal sólo puede existir cuando la excitación y la relación de fase de las máquinas son idénticas, si son distintos, incluso en una pequeña cantidad, la transferencia de potencia se llevará a cabo entre el generador y el motor. La potencia requerida por el motor provoca una cierta diferencia vectorial. Por el contrario, la presencia de una diferencia vectorial apunta a una transferencia definitiva de potencia de una máquina a la otra [6].

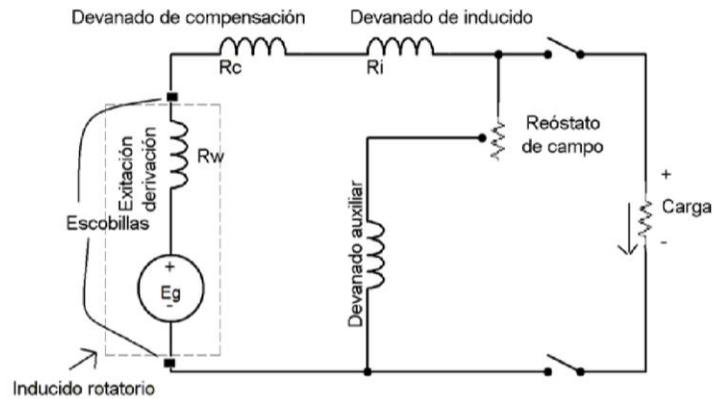
2.1.4. Motor de corriente continua

Una máquina de corriente continua (generador o motor) se compone principalmente de dos partes, un estator y un rotor. En el estator se encuentran los polos, los cuales pueden ser devanados con hilo de cobre sobre núcleo de hierro o de imanes permanentes, estos últimos se utilizan sobre todo en aplicaciones especiales. El rotor es generalmente de forma cilíndrica, también devanado y con núcleo, al que llega la corriente mediante dos escobillas [2].

La máquina CD se puede clasificar de acuerdo a la conexión entre sus devanados rotóricos y estatóricos en shunt o derivación, serie y compuesto como se muestra en las figuras 1 y 2.

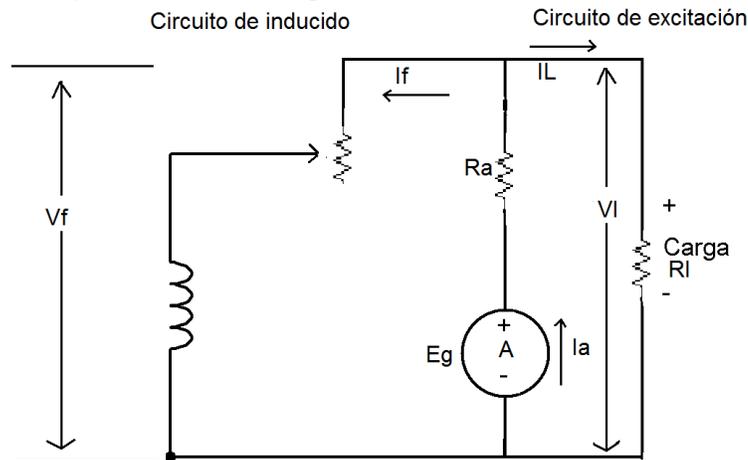
Cuando la excitación se produce mediante un devanado de excitación conectado a la plena tensión de la línea producida entre las escobillas del inducido, es decir que el devanado de campo en el estator y el inducido en el rotor están en paralelo, en cuyo caso la máquina CD se denomina en configuración shunt.

Figura 1. Esquema completo del circuito de un generador shunt.



Fuente: Irving L. Kosow. Máquinas Eléctricas y Transformadores [7].

Figura 2. Circuito equivalente de un generador derivación.



Fuente: Irving L. Kosow. Máquinas eléctricas y transformadores [7].

Para mayor simplicidad, todas las resistencias en serie en el circuito del inducido pueden sumarse y representarse conjuntamente como una sola resistencia R_a , denominada resistencia del circuito del inducido o armadura. El circuito de excitación de un generador shunt está en paralelo con el circuito del inducido, y consta del devanado de excitación en shunt arrollado sobre los polos de excitación fijos y reóstato de campo.

Cuando el motor shunt está conectado, se compone de tres circuitos en paralelo, los cuales son el circuito de inducción, el circuito de excitación y finalmente el circuito de alimentación. De este modo, de la alimentación se obtiene la corriente de línea que proporciona la relación de corriente que se presenta en (2.1).

$$I_L = I_a + I_f \quad (2.1)$$

Dónde:

I_a : Corriente del inducido.

I_f : Corriente de excitación.

I_l : Corriente de línea.

Por definición, al estar en paralelo existe la misma tensión en los circuitos del inducido, excitación y carga, como se muestra en la expresión (2.2).

$$V_a = V_f = V_l \quad (2.2)$$

V_a : tensión en los bornes del inducido.

V_a : tensión en los bornes del circuito de excitación.

V_l : tensión aplicada en la carga.

Otro motor de CD muy conocido es el motor serie, el cual tiene como principal característica que varía mucho su velocidad con la carga y tiende a asumir velocidades muy altas en vacío. Por otro lado, tiene un muy alto par de arranque y soporta mejor las sobrecargas [8]. Sin embargo, no se entra mucho en los detalles de esta máquina debido a los propósitos planteados en este trabajo.

El principal inconveniente de estas máquinas es el mantenimiento, el cual suele ser muy costoso y laborioso [2].

2.2. Frenado en máquinas eléctricas

En ciertas aplicaciones quizá sea necesario detener rápidamente el motor eléctrico o invertir su dirección de rotación, por lo que el motor puede detenerse por medio de un freno de fricción. Las principales desventajas del freno de fricción en la operación son:

- Difícil de controlar.
- Dependiente de la superficie de frenado.
- El frenado no es suave.

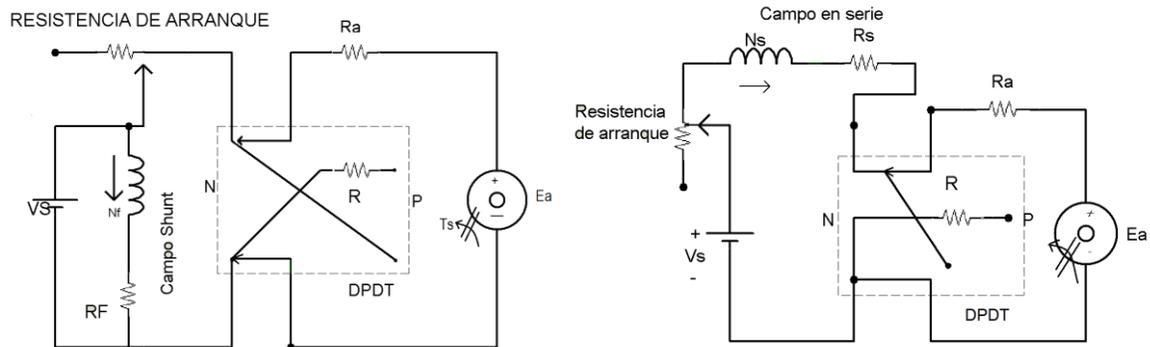
Por tanto, suele ser necesario utilizar otros medios como los que se presentan en esta sección, para frenar o invertir la dirección de rotación.

2.2.1. Frenado contracorriente

Detener o invertir la dirección de un motor de CD con la sencilla la inversión de las conexiones de suministro en las terminales de la armadura se conoce como bloqueo o frenado por contracorriente. Las conexiones del devanado del campo para los motores shunt permanecen sin alteración. Este método se emplea para controlar los motores de corriente continua.

Justo antes del bloqueo, la fuerza contra-electromotriz en el motor se opone a la tensión aplicada por la fuente. Puesto que la resistencia de la armadura generalmente es muy pequeña, la fuerza contra-electromotriz es casi igual y opuesta a la tensión aplicada. En el instante en que se bloquea el motor, la fuerza contra electromotriz y la tensión aplicada están en la misma dirección. Por tanto, la tensión total en el circuito de la armadura es casi el doble de la tensión aplicada. Para proteger el motor de aumento súbito en la corriente de armadura debe agregarse una resistencia externa en serie con el circuito de la armadura, como se muestra en la figura 3.

Figura 3. Diagrama circuital para el frenado contracorriente (izq.) de un motor shunt y (der.) de un motor serie.



Fuente: Guru & Hiziroglu. Máquinas Eléctricas y Transformadores [9].

A medida que la corriente en el devanado de la armadura invierte su dirección, produce una fuerza que tiende a hacer girar la armadura en dirección opuesta a su rotación inicial. Esto ocasiona que el motor disminuya su velocidad, se detenga y luego adquiera velocidad en la dirección opuesta. Por tanto, el bloqueo permite invertir la dirección de giro de un motor. Esta técnica también puede utilizarse para detener el motor con la simple desconexión de la energía que recibe el motor cuando alcanza el estado de reposo. Para mayor seguridad, puede aplicarse frenado mecánico cuando el motor se acerca al estado de reposo.

En cualquier momento durante la acción del bloqueo la corriente es la que se tiene en la ecuación (2.3).

$$I_a = \frac{V_s + E_a}{R + R_a} = \frac{V_s}{R + R_a} + \frac{E_a}{R + R_a} = \frac{V_s}{R + R_a} + \frac{K_a \times \Phi_p \times \omega_m}{R + R_a} \quad (2.3)$$

Por tanto, el par de frenado es el que se muestra en (2.4).

$$T_b = K_a \times \phi_p \times I_a = K_1 \times \phi_p + K_2 \times \phi_p^2 \times \omega_m \quad (2.4)$$

Dónde:

$$K_1 = \frac{K_a \times V_s}{R + R_a} \quad (2.5)$$

$$K_2 = \frac{K_a^2}{R + R_a} \quad (2.6)$$

Para el motor serie, el flujo también depende de la corriente de la armadura, la cual depende a su vez de la velocidad del motor. Puesto que el flujo en un motor shunt es constante, la ecuación (2.4) se convierte en la (2.7).

$$T_b = K_3 + K_4 \times \omega_m \quad (2.7)$$

Dónde:

$$K_3 = K_1 \times \phi_p \quad (2.8)$$

$$K_4 = K_2 \times \phi_p^2 \quad (2.9)$$

De la ecuación anterior, se evidencia que aun cuando un motor shunt se acerque a una velocidad de cero, existirá cierto par de frenado $T_b = K_3$. Si no se desconecta el suministro de tensión en el momento en que el motor alcanza velocidad cero, acelera en la dirección inversa [9].

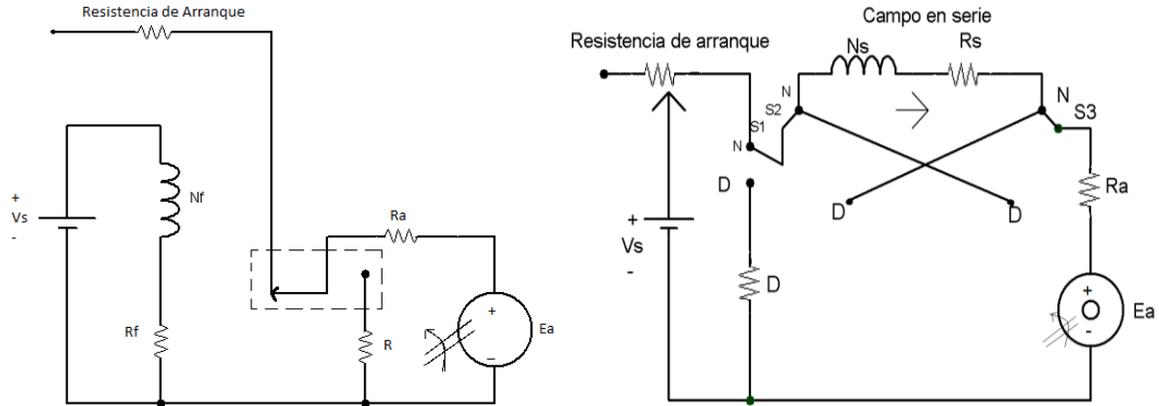
2.2.2. Frenado dinámico

Si el devanado de la armadura de un motor de CD se desconecta repentinamente de la fuente, continuará girando con libertad hasta detenerse. El tiempo que toma al motor quedar en reposo depende de la energía cinética almacenada en el sistema rotatorio.

El frenado dinámico emplea la fuerza contra-electromotriz en el motor con el objetivo de detenerlo con rapidez. Si después de haberse desconectado de la fuente, el devanado de la armadura es conectado a través de una resistencia variable R , la fuerza contra-electromotriz producirá una corriente en la dirección opuesta. Una corriente en dirección opuesta en el devanado de la armadura ocasiona un par que se opone a la rotación y obliga al motor a detenerse.

El efecto de frenado dinámico se controla variando la resistencia R (ver figura 4). Al aplicar este frenado, se selecciona R para limitar la entrada de corriente en la armadura al 150%, aproximadamente, de su valor especificado. Al tiempo que la velocidad del motor se reduce, también lo hace la f.e.m. inducida y la corriente a través de R . Así la acción de frenado dinámico es máxima al principio y disminuye hasta cero cuando el motor se detiene [9].

Figura 4. Diagrama circuital para el frenado dinámico (izq.) de un motor shunt y (der.) de un motor serie.



Fuente: Guru & Hiziroglu. Máquinas Eléctricas y Transformadores [9].

En cualquier momento del proceso de frenado dinámico la corriente de armadura es la que se muestra en la ecuación (2.10).

$$I_a = \frac{E_a}{R + R_a} = \frac{K_a \times \phi_p \times \omega_m}{R + R_a} \quad (2.10)$$

El par de frenado para un motor shunt se muestra en (2.11).

$$T_b = K_4 \times \omega_m \quad (2.11)$$

Mientras que el par de frenado para un motor serie es el que se presenta en (2.12).

$$T_b = K_a \times \phi_p \times I_a = \frac{K_a^2 \times \phi_p^2 \times \omega_m}{R + R_a} = K_2 \times \phi_p^2 \times \omega_m \quad (2.12)$$

Puesto que el flujo en un motor serie es proporcional a la corriente de la armadura ($\phi_p = K_f \times I_a$), el par de frenado para un motor de ese tipo se convierte en (2.13).

$$T_{tb} = K_2 \times K_f^2 \times I_a^2 \times \omega_m \quad (2.13)$$

A partir del par obtenido en las expresiones (2.11), (2.12) y (2.13), es posible determinar la curva de parada de la máquina y así evitar las paradas bruscas que deterioran la vida útil de los rodamientos en el motor. Además, puede notarse a partir de estas mismas ecuaciones que el par de frenado disminuye a medida que la velocidad del motor se aproxima a cero [9].

2.2.3. Frenado regenerativo

El frenado regenerativo se utiliza en aplicaciones donde es probable que la velocidad del motor se incremente a partir de su valor especificado. Como en ascensores, grúas y cabrias [9].

La conexión del frenado regenerativo suele ser igual a la empleada para el frenado dinámico, con la diferencia del aprovechamiento de la energía almacenada en los devanados del motor.

2.3. Arranque de máquinas eléctricas

Los motores eléctricos tanto de CA como CD son máquinas eléctricas que transforman en energía mecánica la energía eléctrica, ambos deben soportar corrientes altas durante el arranque las cuales pueden llegar a ser de 6 a 8 veces la corriente nominal, para esto se deben emplear o diseñar ciertos tipos de arrancadores suaves para proteger los equipos como a las redes donde se encuentran trabajando, se deben proteger para que la vida útil de los motores no se desgaste y tengan un buen desempeño.

Hay diversas clasificaciones de motores comerciales que necesitan normalmente seis veces el valor de su corriente nominal para arrancar cuando se aplica la tensión nominal a su estator. En el instante de arranque la corriente del rotor está determinada por la impedancia del rotor bloqueado ($R_r + jX_{lr}$). Así, la tensión del estator se reduce a la mitad de su valor nominal, la corriente de arranque se reduciría en esa proporción, es decir a unas tres veces la corriente nominal.

$$T_s = K_t' \times V_p^2 \quad (2.14)$$

Para motores de CA, la ecuación (2.14) indica que si la tensión de línea en el estator se reduce a la mitad de su valor, el par se reduce a la cuarta parte de su valor original. Por lo tanto se ha alcanzado la reducción deseable en la corriente de línea al motor al costo de una reducción indeseable y a un mayor par de arranque. Si el motor se arranca bajo carga grande, esto tiene cierta importancia y hay la probabilidad de que el motor pueda arrancar con dificultad o no arranque.

Por otro lado si el motor se arranca sin carga, la reducción en el par puede no ser importante para algunos casos, y es ventajosa la reducción de la corriente [7].

Las fluctuaciones frecuentes de la tensión pueden también afectar al equipo electrónico y a la iluminación al grado de que se necesite algún método alternativo para arrancar el motor de inducción, para limitar la corriente de arranque. Si las líneas que alimentan al motor de inducción de jaula de ardilla, tienen impedancias diferentes; las tensiones del estator pueden desbalancearse, desbalanceando severamente las corrientes en las líneas y originando que el equipo de protección deje al descubierto al motor. De hecho un desbalance de 1 o 2 % en las tensiones de la línea del estator pueden originar un desbalance del 20 % en las corrientes de línea, presentando calentamiento localizado del motor y fallas del devanado, es decir, durante la puesta en tensión de un motor la corriente solicitada es considerable y puede provocar una caída de tensión que afecte al funcionamiento de los receptores, especialmente en caso de insuficiencia de la sección de la línea de alimentación. En ocasiones, la caída puede llegar a ser perceptible en los aparatos de alumbrado [2].

Para poner remedio a estos inconvenientes, ciertos reglamentos sectoriales prohíben el uso de motores de arranque directo que superen cierta potencia. Otros se limitan a imponer la relación entre la corriente de arranque y la nominal en base a la potencia de los motores. Los motores de jaula son los únicos que pueden acoplarse directamente a la red por medio de un equipo simple.

Tan sólo las extremidades de los devanados del estator sobresalen de la placa de bornes. Dado que el fabricante determina de manera definitiva las características del rotor, los distintos procesos de arranque consisten principalmente en hacer variar la tensión en los bornes del estator. En este tipo de motores, cuya frecuencia es constante, la reducción de la punta de corriente conlleva de manera automática una fuerte reducción del torque [10].

2.3.1. Arranque de motores de síncronos

El motor síncrono es inherente, es decir, no puede arrancar por sí mismo sin un devanado amortiguador.

El motor síncrono debe llevarse a una velocidad suficientemente cercana a la velocidad síncrona, a fin de quedar en sincronismo con el campo giratorio. Los medios con los cuales se lleva hasta la velocidad correspondiente son: primero un motor de CD acoplado al eje del motor síncrono, segundo el uso de la excitatriz como motor de CD, tercero un pequeño motor de inducción de por lo menos un par de polos menos que el motor síncrono y cuarto el uso de devanados amortiguadores como motor de inducción jaula de ardilla.

2.3.2. Arranque de motores de inducción

Los motores de inducción no presentan los problemas de arranque que tienen los motores síncronos. En muchos casos, los motores de inducción pueden ser puestos en marcha conectándolos simplemente a la red; a veces, sin embargo, hay buenas razones para no hacerlo así. Por ejemplo, la corriente de arranque requerida puede causar una caída en la tensión del sistema de potencia tal que haga inaceptable el arranque a través de la línea. En el motor de inducción de rotor devanado, el arranque puede llevarse a cabo con corrientes relativamente pequeñas, insertando resistencias extras en el circuito del rotor durante el arranque. Esta resistencia extra no solo aumenta el par en el arranque sino que reduce su corriente.

En los motores de inducción de jaula de ardilla, la corriente de arranque puede variar con gran amplitud dependiendo, en principio, de la potencia nominal del motor y de la resistencia efectiva del rotor en las condiciones de arranque. Para estimar la corriente del rotor en condiciones de arranque, todos los motores de jaula de ardilla tiene ahora una letra código de arranque (no se debe confundir con la letra clase de diseño) en su placa de características. La letra código limita la cantidad de corriente que puede tomar en condición de arranque. Estos límites se expresan en términos de la potencia aparente de arranque como función de su potencia nominal en caballos de fuerza. La tabla 1 que contiene los kilovoltiamperios de arranque por caballo de fuerza para cada letra código. Entonces, en (2.15) se expresa la potencia aparente de arranque para el motor.

$$S_{start} = (\text{potencia nominal en Hp}) \times (\text{factor de letra código}) \quad (2.15)$$

La corriente de arranque se puede encontrar de la ecuación (2.16).

$$I_{start} = \frac{S_{start}}{\sqrt{3} \times V_t} \quad (2.16)$$

Tabla 1. Letras de código NEMA según potencia nominal del motor.

Letra código nominal	Rotor bloqueado KVA/HP	Letra código nominal	Rotor bloqueado KAV/HP
A	0 – 3.15	L	9.00 – 10.00
B	3.15 – 3.55	M	10.00 – 11.00
C	3.55 – 4.00	N	11.20 – 12.50
D	4.00 – 4.50	P	12.50 – 14.00
E	4.50 – 5.00	R	14.00 – 16.00
F	5.00 – 5.60	S	16.00 – 18.00
G	5.60 – 6.30	T	18.00 – 20.00
H	6.30 – 7.10	U	20.00 – 22.40
J	7.10 – 8.00	V	22.40 y superiores
K	8.00 – 9.00		

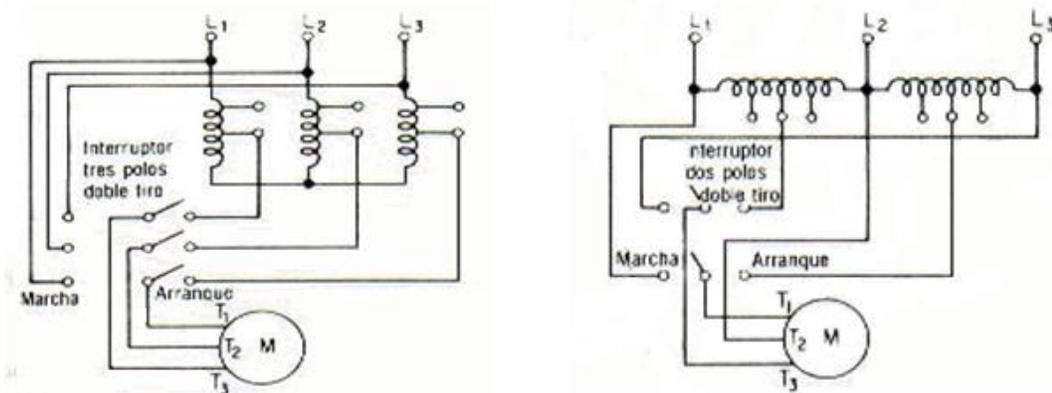
Fuente: ICONTEC. Código Eléctrico Colombiano NTC-2050 [11].

2.3.3. Arranque a tensión reducida por autotransformador

Los motores de inducción de jaula de ardilla (SCIM por sus siglas en inglés) trifásicos pueden ser arrancados a tensión reducida utilizando un autotransformador trifásico o tres autotransformadores monofásicos como se indica en la parte izquierda de la figura 5. Los taps en el transformador oscilan entre el 50 y el 80% de la tensión nominal. Si el motor no consigue acelerar la carga a la tensión más baja, pueden escogerse taps de tensión superior hasta que se obtenga el par de arranque apropiado y deseado. La figura 5 es una representación esquemática de un tipo comercial; el esquema no incluye los relés o los contactos ordinariamente asociados con los arrancadores de compensador manuales o automáticos.

El interruptor de tres polos y dos posiciones se desplaza hasta la posición de “arranque” y se deja en ella hasta que el motor ha acelerado la carga a casi la plena velocidad. Entonces es desplazado rápidamente a la posición “marcha,” en la que el motor se conecta directamente a la red.

Figura 5. Arranque a tensión reducida con autotransformador para (izq.) tres compensadores conectados en estrella y (der.) dos compensadores conectados en triángulo abierto.



Fuente: Irving L. Kosow. Máquinas Eléctricas y Transformadores [7].

El arrancador de compensador se utiliza únicamente durante el periodo de arranque y su corriente nominal es algo menor que la de un transformador comparable que podría utilizarse para alimentar un motor de inducción continuamente a partir de alguna fuente de tensión superior. El autotransformador actúa de dos formas para reducir la corriente absorbida de la red, primero reduce la corriente de arranque del motor reduciendo la tensión, y segundo mediante la relación de transformación del transformador por la que la corriente de línea del primario es menor que la corriente del motor del secundario.

Como el transformador compensador tan solo se utiliza intermitentemente, se puede utilizar dos transformadores (ahorrando uno) conectados en triángulo

abierto como se indica en la parte derecha de la figura 5. Esta configuración origina un ligero desequilibrio de corriente en el brazo central (L_2), de alrededor del 10 al 15% de la corriente de arranque, pero este desequilibrio no es excesivo y no afecta el comportamiento del motor.

2.3.4. Arranque a tensión reducida por resistencia o reactancia

Si en serie con cada una de las conexiones del estator o del primario se intercala una resistencia o una reactancia, la elevada corriente de arranque produce una inmediata reducción de la tensión en los terminales del estator.

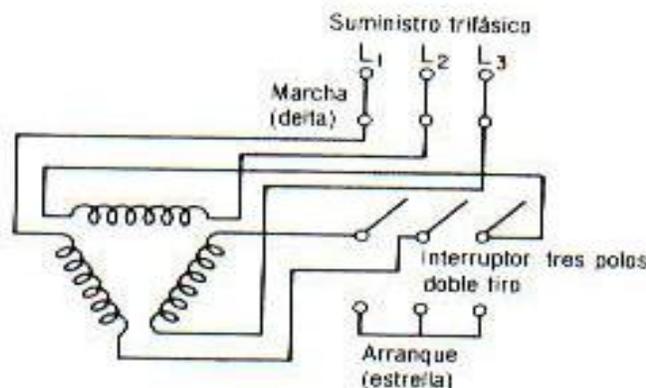
El par de motor disminuye proporcionalmente al cuadrado de la tensión aplicada a los terminales del estator, pero la corriente de línea disminuye solamente en proporción a la disminución de tensión.

Este tipo de arranque es apropiado para máquinas cuyo par resistente crece con la velocidad, por ejemplo en los ventiladores. Pero las ventajas del arranque por reactancia en la reducción de las pérdidas así como en el aumento del par máximo están algo contrarrestadas por el costo superior de las reactancias. Por esta razón el arranque por reactancia se reserva a los motores de inducción de gran potencia.

2.3.5. Arranque estrella-triángulo

Solo es posible utilizar este método de arranque en motores en los que las dos extremidades de cada uno de los tres devanados estáticos estén conectados en la placa de borneras. Por otra parte, el bobinado debe realizarse de manera que el acoplamiento en triángulo corresponda con la tensión de la red, para así evitar daños en los aislamientos de los devanados.

Figura 6. Esquema circuital del arranque estrella-triángulo.



Fuente: Irving L. Kosow. Máquinas Eléctricas y Transformadores [7].

La mayoría de motores de inducción de jaula de ardilla polifásicos se arrollan con sus devanados estáticos en triángulo. Varios fabricantes suministran motores de inducción con el principio y el final de cada fase sacados al exterior con la finalidad de conectarlas externamente.

Cuando los motores trifásicos se conectan en estrella, la tensión de fase aplicada al devanado es $1/\sqrt{3}$, o sea 57.8% de la tensión de línea. Por consiguiente, mediante una conmutación adecuada, como se indica en la figura 6, es posible arrancar un motor de inducción en estrella a una tensión algo superior a la mitad de la nominal y a continuación hacerlo funcionar en triángulo aplicando a cada fase la plena tensión de línea, puesto que el par varía según el cuadrado de la tensión aplicada al estator, como en la ecuación (2.14), la reducción de tensión cuando se conecta en estrella producirá aproximadamente un tercio del par de arranque normal a la plena tensión [7].

El motor de seis terminales estáticos es algo más caro que el motor de inducción clásico, pero su costo es inferior al de los compensadores o al de las impedancias en el estator y los arrancadores asociados.

2.3.6. Arranque directo

Se trata del modo de arranque más sencillo en el que el estator se acopla directamente a la red. El motor se basa en sus características naturales para arrancar. En el momento de la puesta bajo tensión, el motor actúa como un transformador cuyo secundario, formado por la jaula muy poco resistente del rotor, está en cortocircuito. La corriente inducida en el rotor es importante. La corriente primaria y la secundaria son prácticamente proporcionales. Por tanto, como se presenta en (2.17) se obtiene un pico de corriente importante en la red.

$$I_{start} = 5 \text{ a } 8 \text{ veces } I_{nom} \quad (2.17)$$

El par de arranque medio para esta corriente de arranque se muestra en (2.18).

$$T_{start} = 0,5 \text{ a } 1,5 \text{ veces } T_{nom} \quad (2.18)$$

A pesar de las ventajas que conlleva este arranque directo (sencillez del equipo, elevado par de arranque, arranque rápido, bajo costo), sólo es posible utilizar el arranque directo en el caso en que la potencia del motor es débil con respecto a la de la red, esto para limitar las perturbaciones que provoca la corriente solicitada, la máquina accionada no requiere un aumento progresivo de velocidad y dispone de un dispositivo mecánico, por ejemplo un reductor, el cual impide el arranque brusco y el par de arranque que debe ser elevado.

Por el contrario, siempre que la caída de tensión provocada por la corriente solicitada pueda perturbar el buen funcionamiento de otros aparatos conectados a la misma línea; por ejemplo en el caso de las escaleras eléctricas, el motor accionado no puede permitir sacudidas mecánicas, pues la seguridad o la comodidad de los usuarios se verían comprometidas. Es así, como para estos casos es imprescindible recurrir a otros medios o dispositivos para disminuir la corriente solicitada o el par de arranque. En estos casos, el medio más utilizado consiste en arrancar el motor bajo tensión reducida.

2.4. Eficiencia de las máquinas eléctricas

Cuando una máquina transforma energía de una forma a otra, siempre existe cierta pérdida de energía. La pérdida ocurre en la máquina misma y provoca un incremento de la temperatura y una reducción de la eficiencia. Desde el punto de vista de las pérdidas, las máquinas eléctricas pueden dividirse en dos grupos: aquellas que tienen partes giratorias (motores, generadores) y aquellas que no las tienen (transformadores, reactores). En las máquinas rotatorias se producen pérdidas eléctricas y mecánicas, mientras que en las máquinas estacionarias solo se producen pérdidas eléctricas.

La eficiencia de un motor eléctrico es la medida de la capacidad que tiene el motor de convertir la energía eléctrica en energía mecánica. La potencia eléctrica correspondiente medida en vatios (W) entra por los terminales del motor y la potencia mecánica medida en vatios o en caballos de fuerza (HP) entregados por el eje. La eficiencia del motor puede expresarse como en (2.19).

$$\eta\% = \frac{\text{Potencia mecánica de salida}}{\text{Potencia eléctrica de entrada}} * 100 \quad (2.19)$$

Como se tiene la relación entre potencia y las pérdidas (2.20).

$$\text{Potencia mecánica de salida} = \text{Potencia eléctrica de entrada} - \text{Pérdidas} \quad (2.20)$$

Se puede expresar (2.19) como se muestra en (2.21).

$$\eta\% = \left(1 - \frac{\text{Pérdidas}}{\text{Potencia eléctrica de entrada}}\right) * 100 \quad (2.21)$$

Donde η es la eficiencia de la máquina. De forma simplificada, (2.21) puede ser expresado como (2.22).

$$\eta\% = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.22)$$

Se tiene por pérdidas, la potencia eléctrica que se transforma y disipa en forma de calor en el proceso de conversión de la energía eléctrica en mecánica que ocurre en el motor. Las pérdidas se pueden clasificar en tres grandes áreas: pérdidas mecánicas, pérdidas eléctricas y pérdidas adicionales o misceláneas [12].

2.4.1. Pérdidas mecánicas

Las pérdidas mecánicas se deben a la fricción en los cojinetes o rodamientos, la fricción en las escobillas y la fricción del aire. Las pérdidas por fricción dependen de la velocidad de la máquina y del diseño de los cojinetes, las escobillas, el conmutador y los anillos colectores. Las pérdidas por fricción del aire dependen de la velocidad y el diseño del ventilador de enfriamiento y de la turbulencia producida por las partes rotatorias. Cuando no se tiene información previa normalmente se hacen pruebas en la máquina para determinar los valores de las pérdidas mecánicas [13].

2.4.2. Pérdidas eléctricas

2.4.2.1. Pérdidas en las escobillas

Las pérdidas en las escobillas son mínimas porque la densidad de la corriente es de aproximadamente, solo $0.1A/mm^2$ que es mucho menor a la del cobre. Sin embargo, la caída de tensión por contacto entre las escobillas y el conmutador puede producir pérdidas significativas. La caída varía de 0.8V a 1.3V según el tipo de escobilla [13].

2.4.2.2. Pérdidas en el hierro

Las pérdidas en el hierro se producen en la armadura de las máquinas eléctricas. Se deben a la histéresis o las corrientes parasitas. Las pérdidas en el hierro dependen de la densidad del flujo magnético, la velocidad de rotación, la calidad del acero y el tamaño de la armadura [13].

2.4.2.3. Pérdidas en los conductores

En general, las pérdidas en el conductor dependen de su resistencia y del cuadrado de la corriente que transporta. La resistencia, a su vez, depende de la longitud, la sección transversal, la resistividad y la temperatura del conductor, como se observa en las ecuaciones (2.23) a (2.25).

$$P = I^2 \times R \quad (2.23)$$

$$R = \rho \times \frac{L}{A} \quad (2.24)$$

$$\rho = \rho_0 \times (1 + \alpha t) \quad (2.25)$$

Dónde:

R = Resistencia del conductor [Ω].

L = Longitud del conductor [m].

A = Sección transversal del conductor [m^2].

ρ = Resistividad del conductor a la temperatura de operación [$\Omega \cdot m$].

ρ_0 = Resistividad del conductor a $0^\circ C$ [$\Omega \cdot m$].

α = Coeficiente de temperatura de la resistencia a $0^\circ C$ [$1/^\circ C$].

t = Temperatura del conductor [$^\circ C$].

En una máquina de CA trifásica, las pérdidas en el cobre del estator (SCL) y en el cobre del rotor (RCL) están dadas por las ecuaciones (2.26) y (2.27), respectivamente.

$$P_{SCL} = 3 \times I_s^2 \times R_s \quad (2.26)$$

$$P_{RCL} = 3 \times I_f^2 \times R_f \quad (2.27)$$

Dónde:

I_s : Corriente que fluye en el devanado del estator.

R_s : Resistencia de devanado del estator.

I_f : Corriente que fluye en el devanado del campo del rotor.

R_f : Resistencia de devanado o de la jaula en el rotor.

2.4.3. Pérdidas misceláneas

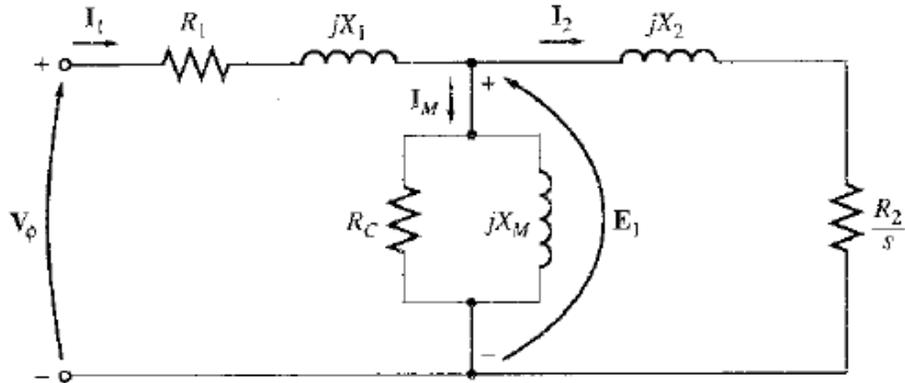
Son aquellas que no pueden situarse dentro de las categorías anteriores. Sin importar con qué cuidado se consideren las pérdidas, algunas siempre se escapan de las categorías y por eso se agrupan como pérdidas dispersas. En la mayoría de las máquinas, estas pérdidas se toman convencionalmente como el 1% de la potencia de plena carga.

2.4.4. Eficiencia de la máquina de corriente alterna

Las pérdidas que ocurren en las máquinas de CA se pueden dividir en las categorías básicas mencionadas anteriormente.

Para el caso de un motor de inducción, éste se puede describir como un transformador rotante y esta afirmación se puede verificar por medio de su circuito equivalente, el cual se muestra en la figura 7.

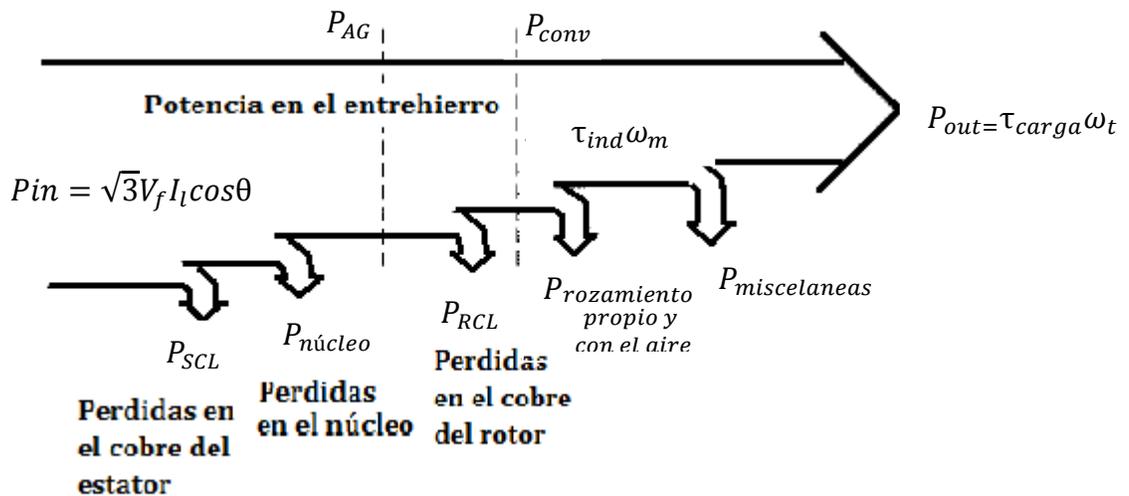
Figura 7. Circuito equivalente por fase en un motor de inducción.



Fuente: Stephen J. Chapman. Máquinas Eléctricas [5].

La entrada del motor de inducción es un sistema trifásico de tensiones y corrientes. En un transformador normal, la salida es potencia eléctrica desde los devanados secundarios. Los devanados secundarios de un motor de inducción (el rotor) están cortocircuitados de tal forma que no existe salida eléctrica de entrada y la potencia mecánica de salida de este motor se muestra en el diagrama de flujo de potencia de la figura 8 [5].

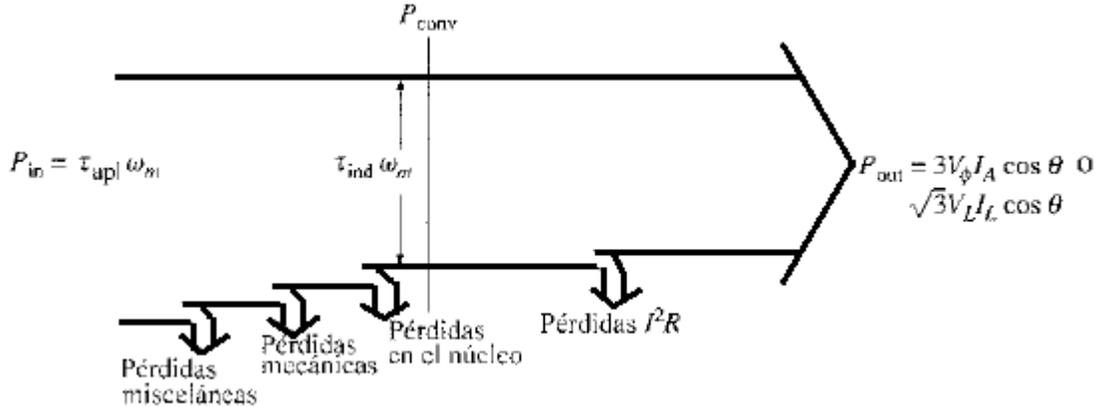
Figura 8. Diagrama de flujo de potencia de un motor de inducción trifásico.



Fuente: Stephen J. Chapman. Máquinas Eléctricas [5].

Por otro lado, para observar el comportamiento de la máquina de CA funcionando como generador se puede seguir el mismo diagrama de flujo de la figura 8, pero considerando que la entrada ahora es mecánica y la salida será expresada como potencia eléctrica, como se muestra en la figura 9.

Figura 9. Diagrama de flujo potencia de un generador de CA trifásico.



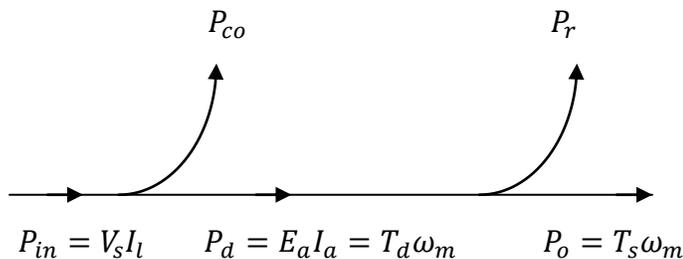
Fuente: Stephen J. Chapman. Máquinas Eléctricas [5].

2.4.5. Eficiencia de la máquina de corriente continua

La potencia de entrada de un motor de CD es eléctrica, y la salida es mecánica. La diferencia entre la potencia de entrada y la de salida es que la pérdida de potencia.

Cuando se suministra potencia a un motor, una parte significativa se disipa en las resistencias de la armadura y los devanados de campo como pérdidas en el cobre. En motor convierte la potencia restante (potencia desarrollada) en potencia mecánica. Una parte de la potencia desarrollada se consume por la pérdida por rotación. La diferencia es la potencia mecánica neta disponible en el eje del motor [9].

Figura 10. Diagrama de flujo de potencia de un motor de corriente continua.



Fuente: Guru & Hiziroglu. Máquinas Eléctricas y Transformadores [9].

2.4.6. Eficiencia en transformadores y autotransformadores

Como el transformador no tiene partes giratorias ni móviles que transmitan energía de un devanado a otro, no hay rozamientos entre sus partes, ni con el aire. Además, las pérdidas eléctricas son relativamente pequeñas, de manera que la eficiencia de un transformador es elevada. Las eficiencias típicas de los transformadores a plena carga están comprendidas entre el 96 y 97%, y en los transformadores de capacidad extremadamente grande las eficiencias son tan elevadas como el 99% [4].

Los transformadores usualmente son comparados y juzgados por su eficiencia. Además los circuitos equivalentes del transformador facilitan los cálculos de eficiencia, pues son similares a los presentados para el motor de inducción. Para los transformadores se tiene dos tipos de pérdidas, las cuales son:

- Pérdidas en el cobre ($I^2 \cdot R$): Estas pérdidas son causadas por la resistencia en serie del circuito equivalente.
- Pérdidas en el núcleo: Son causadas por la resistencia shunt del circuito equivalente.

Entonces, la potencia eléctrica de salida del transformador está dada por la ecuación (2.28).

$$P_{out} = V_s \times I_s \times \cos\theta_s \quad (2.28)$$

Y finalmente, la eficiencia del transformador puede ser expresada como se muestra en (2.29).

$$\eta = \frac{V_s \times I_s \times \cos\theta}{P_{cu} + P_{núcleo} + (V_s \times I_s \times \cos\theta)} * 100\% \quad (2.29)$$

3. PRUEBAS REALIZADAS EN EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS PARA LAS PRÁCTICAS PROPUESTAS

Todas las pruebas realizadas en este documento fueron implementadas en el laboratorio de máquinas eléctricas y montadas en su mayoría en los módulos de labVolt, de donde se obtuvieron los resultados que se mostrarán en los siguientes apartados de este documento. Todas las pruebas para motores de corriente alterna fueron realizadas en el motor de inducción trifásico en jaula de ardilla de 4 polos de LabVolt.

3.1. Pruebas de frenado de motores eléctricos

Para las pruebas implementadas se realizó un estudio sobre los diferentes tipos de frenados en las máquinas eléctricas, los cuales fueron presentados en la sección anterior. Debido a la disponibilidad de los materiales con que actualmente cuenta el laboratorio, sólo es posible implementar el ensayo de frenado dinámico sin realizar ningún tipo de modificación o diseño de algún dispositivo para el laboratorio que permita realizar los demás frenados.

3.1.1. Frenado dinámico

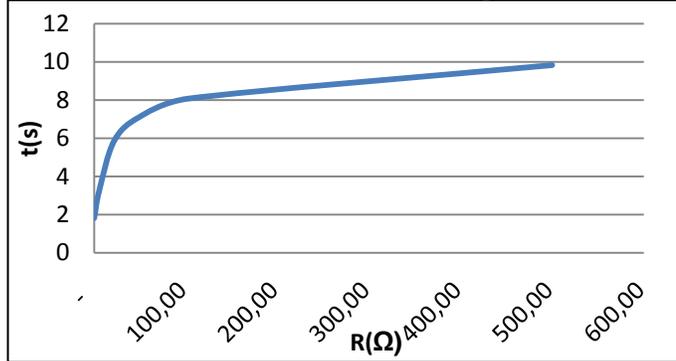
Para esta prueba, se hizo la conexión de la figura 4 para el motor shunt y se tomaron datos de su comportamiento según la resistencia de frenado R . En la tabla 2, se muestra los tiempos que tardó el motor CD del grupo 4 del laboratorio de máquinas en frenar según la resistencia de frenado a la que fue sometido.

Tabla 2. Resultados de frenado dinámico

Frenado dinámico	
R (Ω)	Tiempo (s)
abierto	9,83
103	8,08
49,5	7,12
21,7	5,86
5,5	3,26
cortocircuito	1,82

Se puede notar, que a menor resistencia menor es el tiempo de frenado y a mayor resistencia tarda más el frenado. Esto se debe a las razones expuestas en el segundo capítulo de este documento.

Figura 11. Tiempo de frenado vs resistencia de carga.



Fuente: Elaboración propia.

3.2. Pruebas arranque de motores eléctricos

3.2.1. Arranque estrella - triángulo

Tabla 3. Resultados prueba de arranque Y - Δ.

Tiempo (s)	Arrancador Y - Δ		
	Tensión (Vin)	Corriente (A)	Velocidad (rpm)
1	69,78	0	0
2	67,13	1,557	389
3	60,51	0,649	388
4	68,63	0,649	858
5	68,56	0,645	863
6	68,67	0,647	862
7	68,54	0,655	863
8	68,67	0,652	862
9	68,61	0,649	863
10	61,19	2,556	863
11	65,24	2,65	928
12	65,33	2,671	928
13	65,4	2,657	927
14	65,79	2,659	927
15	65,39	2,652	927
16	65,36	2,674	928
17	65,31	2,643	927
18	65,29	2,643	929
19	65,42	2,667	928
20	65,42	2,654	928
21	65,43	2,671	928
22	65,37	2,653	928
23	65,79	2,665	928
24	65,39	2,661	928
25	65,44	2,672	928
26	65,45	2,663	928
27	64,48	2,652	928

*

Como se dijo en la teoría de arranque de motores eléctricos, el motor pide más corriente de la nominal cuando arranca, para esto se utiliza arranques de este tipo, que permiten que la máquina tenga un arranque mucho más suave.

Se puede observar de los datos de la tabla 3, que la máquina arranca con corrientes bajas en conexión Y, y cuando hace el cambio (*) a conexión Δ la corriente aumenta considerablemente. Es decir, el arranque Y- Δ permite que las corrientes al inicio de marcha de la máquina no sean tan elevadas y al hacer el cambio la corriente y la velocidad hagan un aumento y se estabilicen en un intervalo de tiempo muy pequeño, esto permite que el motor al momento de arranque no tenga peligro de dañar el devanado de campo.

3.2.2. Arranque por autotransformador

Tabla 4. Resultados pruebas arranque por autotransformador.

Tiempo (s)	Arrancador por Autotransformador		
	Tensión (Vin)	Corriente (A)	Velocidad (rpm)
1	121,3	0,804	6
2	122,8	1,316	757
3	122	1,413	1348
4	122,8	1,341	1500
5	122,8	1,386	1517
6	122,7	1,385	1518
7	122,8	1,381	1519
8	122,9	1,3	1520
9	122,1	1,325	1521
10	122	1,313	1520
11	122,1	1,357	1521
12	122,7	1,368	1523
13	122,3	1,364	1524
14	122,7	1,362	1525
15	122	1,367	1526
16	122,6	1,357	1526
17	122,7	1,353	1526
18	122,7	1,353	1525
19	122,7	1,35	1526
20	122,1	1,35	1527
21	122,6	1,345	1547
22	121,2	0,845	1737
23	121,1	0,8	1736
24	121,2	0,81	1736
25	121,1	0,807	1736

*

El par de arranque disminuye en forma notable, lo que indica que la máquina debe hacer cierto esfuerzo para vencer el par de arranque al inicio de marcha.

Debido al alto par que tiene la máquina al momento de iniciar su marcha, la corriente de arranque es mayor a la nominal y se estabiliza con el tiempo, es decir, cuando la máquina arranca empieza con velocidades relativamente bajas y pide más corriente cuando la máquina logra llegar a su velocidad nominal y se mantiene estable en dicho punto, la corriente baja pues empieza a trabajar con valores nominales.

3.2.3. Arranque trifásico directo

Tabla 5. Resultados prueba de arranque trifásico directo.

Tiempo (s)	Arrancador trifásico directo		
	Tensión (Vin)	Corriente (A)	Velocidad (rpm)
1	121,3	0,11	1729
2	121,4	0,809	1729
3	121,4	0,811	1730
4	121,3	0,808	1731
5	121,4	0,809	1732
6	121,3	0,81	1732
7	121,3	0,81	1732
8	121,4	0,808	1732
9	121,4	0,807	1733
10	121,3	0,808	1732
11	121,4	0,804	1732
12	121,4	0,809	1732
13	121,4	0,809	1733
14	121,3	0,808	1733
15	121,4	0,809	1733
16	121,5	0,81	1733
17	121,9	0,807	1733
18	121,5	0,809	1733
19	121,4	0,807	1734
20	121,4	0,808	1734
21	121,4	0,809	1733
22	121,5	0,809	1734
23	121,5	0,81	1734

En el arranque directo no se tiene ningún cambio notable, se puede decir, que la máquina empieza trabajando en condiciones de tensión de placa. Este arranque es uno de los más bruscos para la máquina y para la red de alimentación.

3.2.4. Arranque por resistencia variable

Como se puede visualizar en los datos obtenidos en la tabla 6, la corriente tiene un aumento en el arranque, y esta cambia a partir de los cambios internos que

tiene de resistencia, por tal, se ve que cuando logra estabilizarse el sistema, la corriente tiene un leve aumento.

Tabla 6. Resultados pruebas arranque por resistencia variable.

Tiempo (s)	Arrancador por resistencia		
	Tensión (Vin)	Corriente (A)	Velocidad (rpm)
1	121,4	0,008	389
2	121,1	1,525	1157
3	121	1,457	1702
4	121,1	1,009	1709
5	121,4	0,652	1709
6	121,3	0,654	1711
7	121,3	0,653	1711
8	121,3	0,652	1711
9	121,3	0,652	1712
10	121,1	0,652	1712
11	121,2	0,652	1712
12	121,3	0,652	1712
13	121,3	0,653	1712
14	121,4	0,654	1712
15	121,3	0,652	1712
16	121,3	0,652	1713
17	121,2	0,653	1713
18	121,3	0,652	1713
19	121,3	0,653	1714
20	121,3	0,651	1713
21	121,3	0,652	1736
22	121,4	0,653	1736
23	121,4	0,797	1736
24	121,4	0,797	1737
25	121,2	0,797	1737
26	121,3	0,797	1738
27	121,2	0,796	1738
28	121,1	0,797	1738

*

Al momento del arranque la máquina pide un poco más de dos veces la corriente nominal para poder vencer el par de arranque, después de un tiempo (aproximadamente 3 segundos) la corriente disminuye haciendo cambios internos en su resistencia, empezando a estabilizar su velocidad y corriente.

3.2.5. Arranque por resistencia rotórica

Para este arranque se pueden apreciar corrientes más altas a la de los arranques ya estudiados en los ítems anteriores y mostrados en las tablas 4 a 6, para conexión en estrella.

Tabla 7. Resultados pruebas arranque por resistencia rotórica.

Arrancador por resistencia rotórica			
Tiempo (s)	Tensión (V)	Corriente (A)	Velocidad (rpm)
1	0	0	87
2	115	2,577	1407
3	120	2,522	1548
4	120	2,522	1557
5	120	2,52	1559
6	120	2,518	1559
7	120,1	2,52	1559
8	120	2,519	1561
9	120	2,516	1561
10	120,1	2,517	1562
11	120,1	2,516	1657
12	120,1	2,509	1689
13	120,1	2,509	1688
14	120	2,507	1688
15	120	2,507	1689
16	120,1	2,505	1690
17	120,1	2,507	1723
18	120,1	2,502	1724
19	120,1	2,503	1723
20	120,1	2,499	1722
21	120,1	2,498	1723
22	120,1	2,498	1724
23	119,9	2,497	1724
24	119,9	2,493	1729
25	120	2,294	1725

*

**

A medida que se reduce la resistencia en el rotor (* y **) los cambios en la corriente son despreciables, mientras que ocurre lo contrario con la velocidad puesto que a medida que se disminuye la resistencia la velocidad aumenta.

3.3. Pruebas eficiencia de máquinas eléctricas

3.3.1. Eficiencia en motores eléctricos

Las siguientes pruebas se hicieron con la máquina inicialmente en vacío y luego se va aumentando su carga hasta llegar a su punto de máxima corriente permitida. A medida que se vaya avanzando, el lector podrá observar el comportamiento de cada uno de los motores que se tomaron para realizar las pruebas.

3.3.2. Motor de inducción trifásico jaula de ardilla

La prueba de eficiencia se hizo inicialmente con la máquina en vacío, y se fue aumentando su carga observando su comportamiento al variar el par o torque. En la tabla 8 se muestran los resultados de la prueba hecha para el motor de inducción jaula de ardilla donde se muestran los cambios en la eficiencia de la máquina al aumentar la carga de entrada.

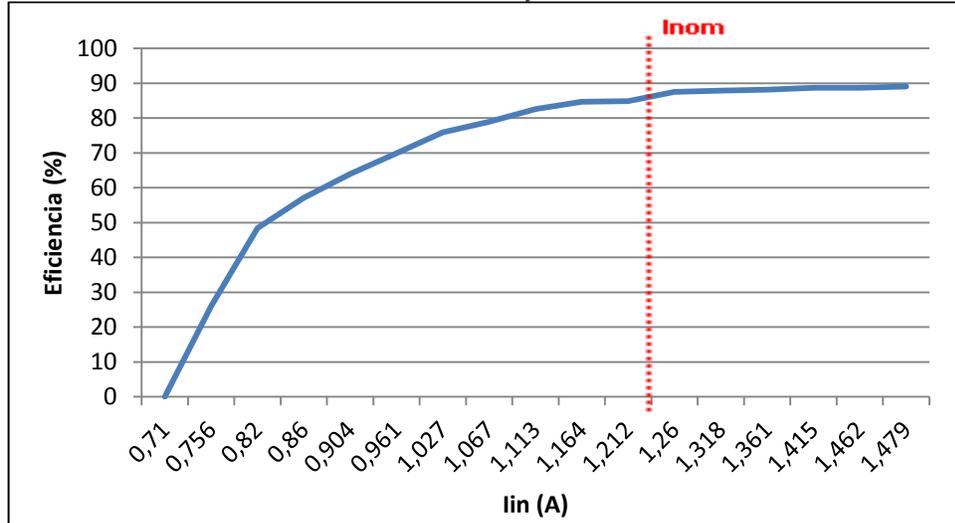
Tabla 8. Resultados pruebas de eficiencia en motor de inducción trifásico jaula de ardilla.

Motor de inducción trifásico jaula de ardilla (Y)							
Vfase (V)	Iin (A)	Pin (W)	Par (Nm)	Velocidad (rpm)	Velocidad (rad/s)	Pout (W)	Eficiencia (%)
119,4	0,71	108,2	0	1779	186,296	0	0
119,8	0,756	128	0,18	1763	184,621	33,232	25,962
119,6	0,82	150,9	0,4	1746	182,841	73,136	48,467
119,6	0,86	162,3	0,51	1734	181,584	92,608	57,060
119,4	0,904	174,9	0,62	1722	180,327	111,803	63,924
119,3	0,961	189,4	0,74	1709	178,966	132,435	69,923
119,1	1,027	205,5	0,88	1693	177,291	156,016	75,920
118,8	1,067	214,4	0,96	1683	176,243	169,194	78,915
118,5	1,113	224,5	1,06	1671	174,987	185,486	82,622
118,5	1,164	236	1,15	1660	173,835	199,910	84,708
118,7	1,212	247	1,21	1654	173,206	209,580	84,850
118,7	1,26	257,2	1,31	1641	171,845	225,117	87,526
118,7	1,318	269,5	1,39	1628	170,484	236,972	87,930
118,7	1,361	278,8	1,45	1618	169,437	245,683	88,122
118,4	1,415	289,4	1,53	1603	167,866	256,835	88,747
118,4	1,462	298,9	1,59	1592	166,714	265,075	88,684
118,4	1,479	302,5	1,62	1588	166,295	269,398	89,057

De la tabla 8, se puede observar que a medida que se aumenta la carga la velocidad empieza a disminuir, es decir no logra mantenerse en su velocidad nominal 1800rpm.

Además, la cuando la máquina alcanza sus valores nominales como se muestra en la figura 12, la eficiencia sigue aumentando después de sobrepasar dichos valores pero al estar pasando los valores de operación permitidos en la máquina, se le está sometiendo a esfuerzos que causan mayor desgaste y reducción de la vida útil de la misma.

Figura 12. Eficiencia del motor de inducción jaula de ardilla.



Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento de la eficiencia obtenida en las pruebas de laboratorio mostrada en la tabla 8 y figura 12 se puede verificar utilizando la ecuación (2.22).

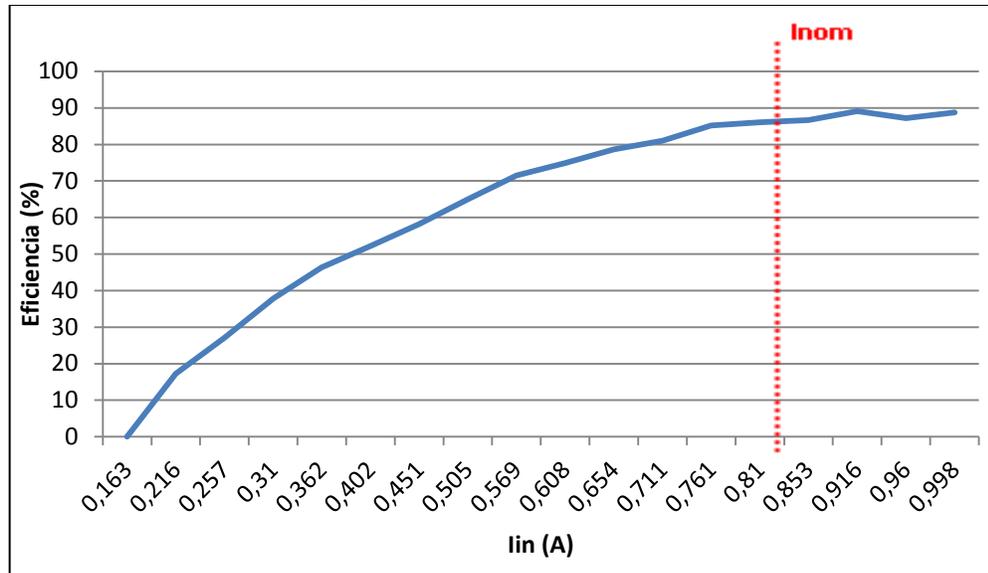
3.3.3. Motor síncrono trifásico normalmente excitado

Tabla 9. Resultados pruebas de eficiencia en motor síncrono normalmente excitado.

Motor síncrono trifásico normalmente excitado (Y)							
Vfase (V)	lin (A)	Pin (W)	Par (Nm)	Velocidad (rpm)	Velocidad (rad/s)	Pout (W)	Eficiencia (%)
119,2	0,163	21,74	0	1801	188,600	0	0
118,9	0,216	35,31	0,12	1799	188,391	22,607	17,216
119	0,257	43,32	0,2	1800	188,496	37,699	27,059
118,8	0,31	53,15	0,3	1797	188,181	56,454	37,851
118,7	0,362	62,55	0,39	1798	188,286	73,432	46,314
118,7	0,402	70,02	0,46	1798	188,286	86,612	52,169
118,5	0,451	79	0,54	1800	188,496	101,788	58,164
118,7	0,505	89,62	0,64	1799	188,391	120,570	64,955
118,7	0,569	101,7	0,75	1800	188,496	141,372	71,508
118,5	0,608	110,1	0,82	1799	188,391	154,480	74,954
118,5	0,654	119,4	0,9	1798	188,286	169,458	78,671
118,6	0,711	131,7	0,98	1798	188,286	184,520	81,037
118,1	0,761	142,5	1,08	1796	188,077	203,123	85,167
118,2	0,81	153,5	1,14	1798	188,286	214,646	86,031
118,2	0,853	163,4	1,2	1789	187,344	224,812	86,666
118,1	0,916	176,7	1,29	1798	188,286	242,889	89,068
118	0,96	186,6	1,31	1796	188,077	246,380	87,183
118	0,998	194,7	1,37	1798	188,286	257,952	88,735

De la tabla 9, se puede destacar el comportamiento de la corriente, al ir aumentando la carga esta tiene pequeños aumentos mientras la eficiencia de la máquina va mejorando, cuando la máquina llega a sus valores nominales y se encuentra en su punto de máxima eficiencia la corriente tiende a aumentar de forma más pronunciada. Este motor describe el mismo comportamiento visto en la prueba anterior, la máquina llega a sus valores nominales y la eficiencia sigue aumentando.

Figura 13. Eficiencia del motor síncrono trifásico normalmente excitado.



Fuente: Elaboración propia.

De la figura 13 se puede apreciar cuando la máquina llega a sus valores nominales y el fenómeno que ocurre después de llegar a dichos valores. No se debe seguir después de sus valores porque se ocasionan deterioros en el motor.

3.3.4. Motor CD en derivación o shunt

Al aumentar la carga se produce un aumento de corriente de forma notable ya que el motor tiene más esfuerzo para girar. A diferencia de la corriente la tensión tiende a caer puesto que al ser tensión tomada de la red y sin ayuda de reguladores de tensión es difícil mantenerla.

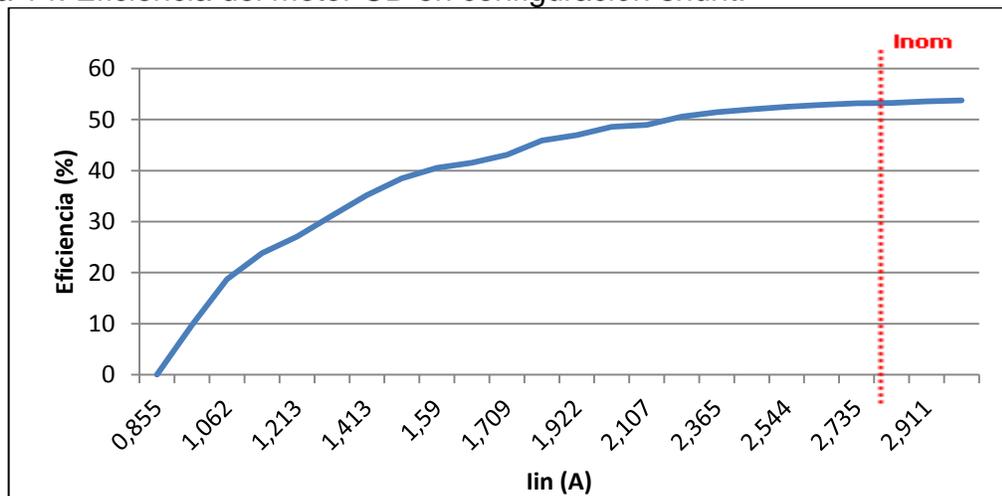
La velocidad no logra mantenerse constante y empieza a disminuir a medida que corriente aumenta sin lograr un equilibrio como se notó en el análisis del motor anterior.

Tabla 10. Resultados pruebas de eficiencia motor CD en derivación o shunt.

Motor CC (Derivación o Shunt)								
Vt (V)	lin (A)	If (A)	Par (Nm)	Velocidad (rpm)	Velocidad (rad/s)	Pin (W)	Pout (W)	Eficiencia (%)
120,1	0,855	0,181	0	1801	188,600	102,686	0	0
119,8	0,955	0,18	0,06	1773	185,668	114,409	11,140	9,737
119,4	1,062	0,179	0,13	1744	182,631	126,803	23,742	18,724
119,4	1,146	0,179	0,18	1730	181,165	136,832	32,610	23,832
119,3	1,213	0,181	0,22	1702	178,233	144,711	39,211	27,096
119,1	1,324	0,181	0,28	1678	175,720	157,688	49,202	31,202
119,1	1,413	0,18	0,34	1663	174,149	168,288	59,211	35,184
119	1,504	0,18	0,4	1645	172,264	178,976	68,906	38,500
118,7	1,59	0,181	0,45	1623	169,960	188,733	76,482	40,524
118,7	1,616	0,181	0,47	1618	169,437	191,819	79,635	41,516
118,4	1,709	0,18	0,52	1602	167,761	202,346	87,236	43,112
118,4	1,828	0,181	0,6	1582	165,667	216,435	99,400	45,926
118,2	1,922	0,18	0,65	1568	164,201	227,180	106,730	46,980
117,9	2,038	0,18	0,72	1549	162,211	240,280	116,792	48,607
117,7	2,107	0,18	0,75	1545	161,792	247,994	121,344	48,930
117,5	2,224	0,181	0,83	1520	159,174	261,320	132,114	50,557
116,7	2,365	0,18	0,9	1506	157,708	275,996	141,937	51,427
116,8	2,452	0,18	0,95	1498	156,870	286,394	149,027	52,036
116,7	2,544	0,18	1	1489	155,928	296,885	155,928	52,521
116,5	2,6	0,18	1,03	1485	155,509	302,900	160,174	52,880
116,5	2,735	0,182	1,1	1472	154,147	318,628	169,562	53,216
116,4	2,815	0,181	1,14	1462	153,100	327,666	174,534	53,266
116,3	2,911	0,181	1,19	1455	152,367	338,549	181,317	53,557
115,9	3,028	0,18	1,25	1442	151,006	350,945	188,757	53,785

Se puede apreciar que a diferencia de las dos máquinas estudiadas anteriormente la eficiencia en este motor es muy baja y al llevarla a sus valores nominales logra ser solo 53% eficiente.

Figura 14. Eficiencia del motor CD en configuración shunt.



Fuente: Elaboración propia.

Su poca eficiencia se ve reflejada en los comportamientos mencionados anteriormente y visibles en la tabla 10 y en la figura 14.

3.3.5. Transformador monofásico reductor (208/120)

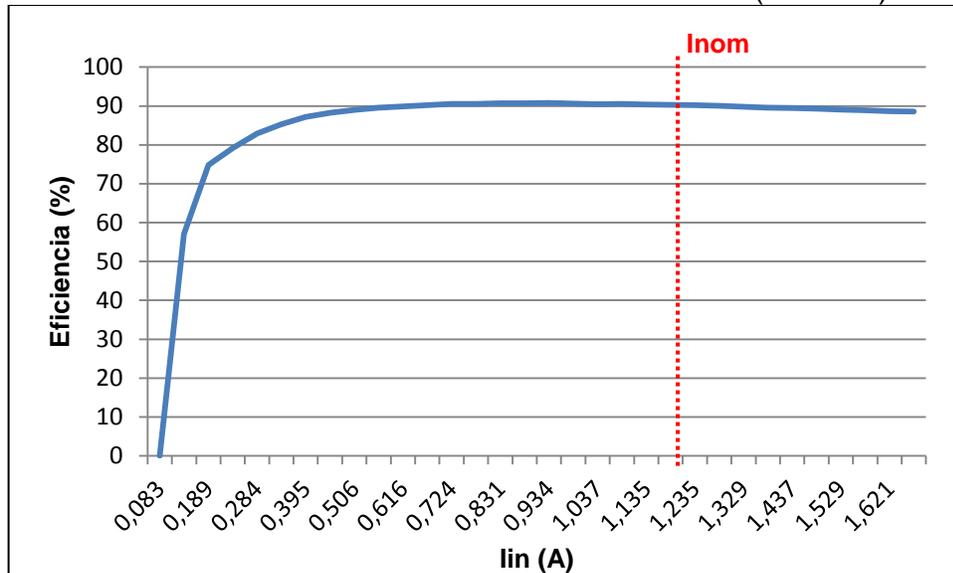
Tabla 11. Resultados pruebas eficiencia transformador reductor monofásico (208/120).

Transformador monofásico reductor (208/120)							
Vin (V)	Vout (V)	Iin (A)	Iout (A)	Pin (W)	Pout (W)	Eficiencia (%)	Vin/Vout
207,5	121,5	0,083	0,009	9,415	0	0	1,708
207,7	121	0,125	0,103	21,65	12,36	57,090	1,717
207,4	121,3	0,189	0,2	32,34	24,21	74,861	1,710
207,4	120,8	0,229	0,299	45,42	35,94	79,128	1,717
207,4	119,7	0,284	0,397	57,26	47,49	82,937	1,733
207,6	119,4	0,341	0,495	69,33	59,12	85,273	1,739
207,4	119,1	0,395	0,59	80,64	70,3	87,178	1,741
207,4	118,7	0,451	0,687	92,39	81,5	88,213	1,747
207,3	118,2	0,506	0,782	103,9	92,47	88,999	1,754
207,2	117,7	0,56	0,876	115,2	103,2	89,583	1,760
207,4	117,5	0,616	0,972	127	114,2	89,921	1,765
207,4	117,2	0,67	1,064	138,2	124,7	90,232	1,770
207,3	116,8	0,724	1,158	149,5	135,3	90,502	1,775
207,2	116,3	0,777	1,248	160,3	145,1	90,518	1,782
207,1	115,9	0,831	1,341	171,4	155,4	90,665	1,787
206,9	115,4	0,883	1,432	182,1	165,2	90,719	1,793
206,9	115,1	0,934	1,519	192,6	174,8	90,758	1,798
206,2	114,3	0,984	1,604	202,4	183,4	90,613	1,804
206,4	114,1	1,037	1,694	213,6	193,3	90,496	1,809
206,2	113,7	1,087	1,782	223,7	202,6	90,568	1,814
206	113,2	1,135	1,864	233,3	210,9	90,399	1,820
205,9	112,8	1,186	1,952	243,8	220,1	90,279	1,825
205,8	112,4	1,235	2,036	253,6	228,8	90,221	1,831
205,7	112	1,279	2,113	262,7	236,6	90,065	1,837
205,6	111,6	1,329	2,197	272,9	245,1	89,813	1,842
205,6	111,1	1,388	2,297	284,8	255,1	89,572	1,851
205,6	110,8	1,437	2,383	295,1	264,1	89,495	1,856
205,3	110,4	1,481	2,457	303,9	271,3	89,273	1,860
205,4	110,1	1,529	2,54	313,8	279,6	89,101	1,866
205,6	109,8	1,579	2,623	324,2	288,1	88,865	1,872
205,4	109,4	1,621	2,697	332,6	295	88,695	1,878
205,2	109,1	1,668	2,776	341,9	302,8	88,564	1,881

Según los datos mostrados en la tabla 11, la eficiencia en el transformador va aumentando a medida que se aumenta la carga, como va también aumentan las corrientes y relación de transformación en los devanados del mismo. Esto es, a medida que se aumenta la carga la tensión en el secundario tiende a disminuir y la tensión en el primario tiende a mantenerse lo que ocasiona que al ser la relación

de transformación la división de la tensión del primario sobre el secundario la relación aumenta.

Figura 15. Eficiencia del transformador reductor monofásico (208/120).



Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar de la figura 15, que a diferencia de las pruebas anteriores la eficiencia en el transformador reductor monofásico aumenta de forma más rápida, y se mantiene de forma lineal, después de alcanzar sus valores nominales y sobrepasarlos un poco, la eficiencia trata de mantenerse pero empieza a declinar.

4. CONCLUSIONES GENERALES

El frenado contracorriente detiene la máquina casi al instante, pero para el caso de la máquina de CD del laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad Tecnológica de Pereira, este frenado demanda demasiada corriente, lo que ocasiona una respuesta del sistema de protección (fusibles), motivo por el cual este método no se puede implementar en dicho laboratorio sin la ayuda de elementos adicionales como por ejemplo un relé.

En las pruebas realizadas a las máquinas de corriente continua se pudo detectar que una de las principales causas por la que las corrientes se elevaban durante algunos de los ensayos es la falta de contacto que tienen las escobillas con el motor, condición en la que se encuentra la mayoría de los motores en el laboratorio debido al desgaste mismo de las escobillas.

El mayor aporte de este proyecto se presenta en el Anexo B, el cual es una propuesta para utilizar los arrancadores disponibles en el laboratorio de máquinas eléctricas y que permitiría a los estudiantes del programa tener un mayor conocimiento de cómo funcionan estos dispositivos tan ampliamente utilizados en la industria además de observar su importancia para aplicaciones en los centros de control de motores.

Debido a que las guías de trabajo en el laboratorio actuales tienen prácticas muy similares en montaje y conexión de elementos a lo propuesto en el Anexo C, se recomienda incluir este anexo a las prácticas existentes como complemento a lo solicitado en las mismas. Además, el Anexo A, propone un montaje para el frenado dinámico que puede ser involucrado en alguna de las guías de la máquina de CD existentes, mientras que las pruebas de inversión del sentido de giro pueden incluirse fácilmente en las prácticas de cada tipo de motor.

Como recomendación adicional, se tiene que el buen funcionamiento de las máquinas eléctricas dependen de un buen mantenimiento, es decir hacer brigadas de mantenimiento preventivo y correctivo según el uso que tengan las máquinas eléctricas y como se presentó anteriormente, tener en cuenta el uso y desgaste de escobillas, rodamientos, fusibles y lubricación de cojinetes.

También, se debe tener en cuenta la ubicación de los motores de forma que tenga una ventilación adecuada y de fácil mantenimiento. Ya que hay diversos tipos de protección para motores eléctricos, hay de tipo abierto este tipo de motor tiene conmutadores o anillos colectores deben estar protegidos de manera que las chispas, agua, aceite o líquidos inflamables no los puedan alcanzar, con el fin de aumentar la vida útil de las máquinas.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] RAE, «Diccionario de la Lengua Española,» 2010. [En línea]. Available: <http://lema.rae.es/drae/?val>. [Último acceso: 21 7 2013].
- [2] Wikipedia, «The free Encyclopedia,» 28 10 2012. [En línea]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/>. [Último acceso: 3 12 2013].
- [3] N. E. M. Association, «Motors and Generators,» 1998.
- [4] J. R. Duff, Fundamentos de Corriente Alterna, Editorial Diana, 1972.
- [5] S. J. Shapman, Máquinas eléctricas, Tercera edición ed.
- [6] M. Brooks, «Interaction of synchronous machines a graphical solution by means of a new circle diagram,» CopyRight, Niagara Falls, 1907.
- [7] I. L. Kosow, Máquinas eléctricas y transformadores, p. 723.
- [8] A. G. Páucar, Teoría y Análisis de Máquinas Eléctricas, Lima: UNI-FIEE, 2000.
- [9] B. S. Guru y H. R. Hiziroglu, Máquinas eléctricas y transformadores, Tercera ed.
- [10] E. C. Plata, «Scribd,» Universidad del Valle de Mexico, 16 Noviembre 2010. [En línea]. Available: <http://es.scribd.com/doc/50086417/TIPOS-DE-ARRANCADORES-PARA-MOTORES-DE-CORRIENTE-ALTERNA>. [Último acceso: 01 05 2013].
- [11] ICONTEC, Código Eléctrico Colombiano. NTC-2050, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, ICONTEC, 2002.
- [12] E. Quispe O. y L. Mantilla P., «Motores eléctricos de alta eficiencia,» [En línea]. Available: <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/1417/1/Motores%20electricos%20de%20alta%20eficiencia.pdf>. [Último acceso: 15 4 2013].
- [13] T. Wildi, Máquinas eléctricas y sistemas de potencia, 6 ed., México: Pearson Educación , 2007, p. 960.

ANEXO A

INVERSIÓN DEL SENTIDO DE GIRO Y FRENADO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATORIAS.

1. OBJETIVOS

- Comprobar experimentalmente las formas de inversión de giro para máquinas de CD en configuración shunt y motores de CA monofásicos y trifásicos.
- Estudiar los métodos de frenado de la máquina rotatoria de CD y CA.

2. TEORIA

En algunas aplicaciones industriales es necesario invertir el sentido de rotación del motor encargado de proporcionar el movimiento. Es así como para aplicar una reversa en un motor existen diversos mecanismos de inversión de giro que intercambiando la conexión de los devanados cambian también la dirección del campo magnético giratorio al interior de la máquina, esto permite a su vez invertir la rotación del eje. Es necesario conocer con detalle como realizar la inversión del giro en las máquinas de CD y de CA monofásicas, pues contrario a lo que ocurre con la máquina de CA trifásica, un simple cambio en la secuencia de alimentación de los devanados del estator “no” es igual a un cambio en el giro del eje del motor.

Por otro lado, otra aplicación de igual importancia es el frenado de las máquinas rotatorias, en la actualidad se tienen automatismos capaces de reducir las pérdidas de energía ocasionadas por frenados totalmente mecánicos, los cuales detienen el eje del motor mediante la acción de un freno acoplado a la flecha de la máquina. Una tendencia es aprovechar la energía capaz de producir el motor mientras se detiene mediante el frenado regenerativo o simplemente controlar la parada mediante un frenado dinámico. Una de las formas más conocidas de frenado rápido de motores eléctricos es el “bloqueo” o “frenado por contracorriente”, en el cual se realiza una inyección de corriente en sentido contrario a la alimentación normal de la máquina que permite la generación de un campo giratorio inverso al

sentido de giro actual de la máquina hasta que ésta se detiene totalmente, luego se retira la alimentación para evitar que ésta comience a girar nuevamente en sentido contrario. Adicionalmente, existe un frenado que se utiliza exclusivamente en máquinas de CA trifásicas y es conocido como “frenado por inyección de corriente continua”, en el cual se apaga la máquina y se suministra corriente continua en dos de sus bornes hasta que el motor se detiene.

Frenado a contracorriente: Función de control que da frenado a un motor eléctrico invirtiendo la polaridad del voltaje de suministro de la máquina para que ésta desarrolle un par contrario y ejerza una fuerza de retardo. Este frenado permite eficazmente rápidas desaceleraciones por lo que es muy útil para aplicaciones de alta inercia, como las máquinas herramienta.

Frenado dinámico o reostático: Es un sistema de frenado eléctrico en el que la máquina excitada se desconecta de su sistema de suministro y se conecta como un generador cuya energía se disipa ya sea en su propio devanado o en una resistencia paralela. Es muy utilizado en algunos montacargas y trolebuses.

Frenado regenerativo: Forma de frenado dinámico en la cual la energía cinética del motor y su carga impulsada regresan al sistema de suministro de corriente. Hoy día es muy utilizado en los sistemas de frenado de los vehículos eléctricos para la recarga del banco de baterías.

3. PROCEDIMIENTO

INVERSIÓN DEL SENTIDO DE GIRO

Conecte un motor trifásico de CA en vacío (jaula de ardilla, rotor bobinado o sincrónico) como se muestra en la figura A.1.

Recomendación: mida la potencia en una sola fase y multiplíquela por tres para obtener la potencia trifásica absorbida por el motor.

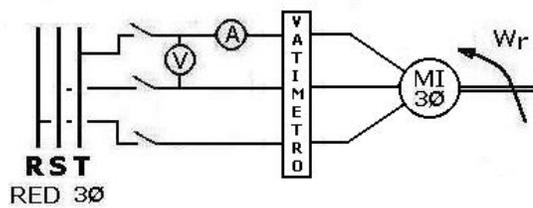


Figura A.1. Motor CA trifásico.

Incremente la tensión de alimentación desde cero hasta su valor nominal y nuevamente tome los valores de corriente, potencia y velocidad a tensión nominal. Luego cambie dos de las fases de la alimentación RST (las que no se encuentran conectadas al vatímetro), incremente la tensión de alimentación desde cero hasta su valor nominal y nuevamente tome los valores de corriente, potencia y velocidad a tensión nominal.

Después, conecte un motor monofásico de CA con devanado auxiliar (como el motor con condensador de arranque o de marcha) tal como se muestra en la figura A.2.

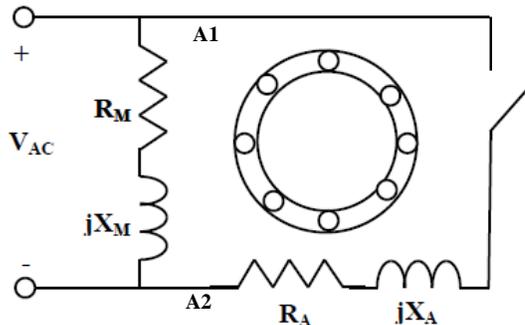


Figura A.2. Motor de inducción monofásico con devanado auxiliar.

Incremente la tensión de alimentación desde cero hasta su valor nominal y tome los valores de corriente, potencia y velocidad a tensión nominal. Luego cambie los bornes del devanado auxiliar (A1 y A2), nuevamente incremente la tensión de alimentación desde cero hasta su valor nominal y tome los valores de corriente, potencia y velocidad a tensión nominal.

Finalmente, para el circuito de la figura A.3 (motor CD en configuración shunt), incremente la tensión de alimentación desde cero hasta su valor nominal. Tome los valores de corriente y potencia a tensión y velocidad nominal. Luego invierta los bornes del devanado de campo (F1 y F2),

incremente la tensión de alimentación desde cero hasta su valor nominal y nuevamente tome los valores de las corrientes y potencia a tensión y velocidad nominal.

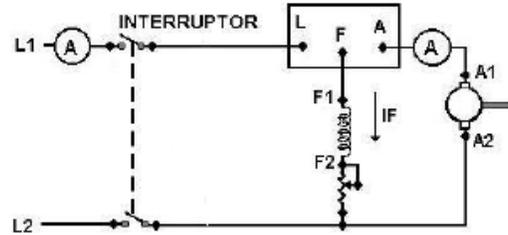


Figura A.3. Motor CD shunt.

PRUEBA DE FRENADO DINÁMICO

Solicite un interruptor monopolar de doble vía o SPDT (Single Pole Double Throw) en el almacén y conecte el circuito de la figura A.4. La resistencia de frenado R_f se puede cambiar por un banco de bombillas para visualizar mejor el comportamiento de la energía generada por la armadura a medida que se incrementa la carga.

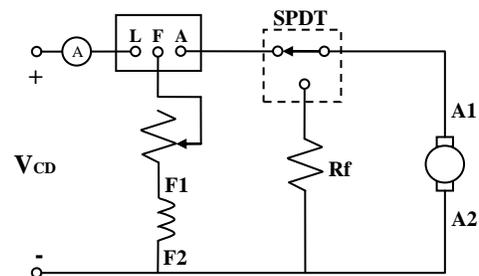


Figura A.4. Motor CD shunt con resistencia de frenado.

Suministre de la fuente de alimentación V_{CD} , tensión desde cero hasta el valor nominal del motor. Lleve el motor a su velocidad nominal utilizando la resistencia de campo.

Con R_f infinito (abierto), cambie de posición el SPDT y tome lecturas del tiempo que tarda el motor en detenerse.

Una vez se detenga el motor, apáguelo, cambie el interruptor SPDT a su posición original y encienda nuevamente. No olvide verificar que el motor alcance su velocidad nominal. Repita el procedimiento de frenado para diferentes valores de R_f y mida el tiempo de frenado en cada caso.

4. INFORME

Para todas las conexiones realizadas para la inversión de giro en la parte 3, conteste las siguientes preguntas:

- ¿Cambió el sentido de giro del motor?
- ¿Observó usted alguna modificación en los valores de la corriente en ambos casos? ¿Por qué?
- Considera que es posible la inversión de giro en otro tipo de conexiones de máquinas CD.
- Enuncie algunas aplicaciones reales para la inversión de giro en motores eléctricos.

Para el frenado realizado en la práctica, realice una gráfica de:

Resistencia (R_f) vs tiempo

- ¿Qué puede concluir de la gráfica?
- ¿Qué modificaciones considera sean necesarias para conseguir que el frenado sea clasificado como regenerativo?

Enumere algunas ventajas y desventajas de cada uno de los frenados descritos en la parte 2.

OBSERVACIONES

CONCLUSIONES

ANEXO B

MÉTODOS DE ARRANQUE DEL MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO.

1. OBJETIVOS

- Comprobar mediante los arrancadores disponibles en el laboratorio los métodos para vencer la inercia en el arranque para motores trifásicos de inducción.

2. TEORIA

Los arrancadores son dispositivos necesarios para limitar la corriente durante el arranque de un motor eléctrico. Estos son utilizados para lograr que el motor alcance su velocidad nominal sin deteriorar la vida útil de la máquina por sobrecorrientes transitorias y el sometimiento a grandes esfuerzos mecánicos en el eje.

Los arrancadores sirven tanto para motores de CD como de CA, y su función puede variar dependiendo de la aplicación de la máquina. Dichos dispositivos pueden ser manuales o automáticos, y su clasificación puede variar principalmente de acuerdo a su funcionamiento.

Arrancador directo o electromagnético: Es un método de arranque que consta de un electroimán que acciona una placa metálica que produce una unión entre los bornes del motor y la alimentación. Este arranque sólo se recomienda para máquinas menores a 3 hp, las cuales sólo producirían una pequeña caída de tensión en la fuente y un pequeño retardo para alcanzar la velocidad nominal de la máquina.

Arrancador de tensión reducida por resistencia: Este arranque reduce la tensión de alimentación en bornes de la máquina a partir de una resistencia conectada en serie entre los bornes de la máquina y la fuente de alimentación del motor. Una vez el motor alcanza su velocidad de régimen, las resistencias se reducen o retiran para su operación a tensión nominal.

Arrancador de tensión reducida por autotransformador: Al igual que el arranque por resistencia, se conecta un autotransformador en

serie entre los bornes de la máquina y la fuente de alimentación del motor. La principal ventaja es la posibilidad de regular la tensión de alimentación mediante la relación de transformación para obtener durante el arranque la velocidad y el par adecuado del motor.

Arrancador estrella/triángulo: Este arrancador, inicialmente conecta los devanados del estator del motor en una configuración en estrella entre la fase y el neutro de la red de alimentación, reduciendo así la tensión del motor según el factor $1/\sqrt{3}$, y por tanto la corriente en el mismo. En cuanto se supera el momento principal de inercia, los devanados del motor se conectan en una configuración de triángulo entre fases de la red con el fin de que el motor alcance su tensión y potencia máxima. Sin embargo, este arrancador no elimina los fenómenos transitorios mecánicos y eléctricos no deseados, ya que solo los reduce ligeramente y los distribuye entre puntos a lo largo del tiempo.

Arrancador por resistencia rotórica: Este arranque es utilizado de forma exclusiva para motores de rotor bobinado o de anillos rozantes. Este motor se pone en marcha mediante un reóstato de arranque conectado al circuito del rotor por medio de un dispositivo de anillos rozantes. De esta forma puede reducirse la corriente de arranque aunque el par del motor permanece en el nivel necesario para poner en marcha la carga.

Durante el progreso de la puesta en marcha, y a medida que el motor va ganando velocidad, la resistencia del rotor se reduce gradualmente. Cuando el reóstato se desconecta totalmente del circuito el motor puede girar a máxima velocidad. En ese momento se cortocircuitan los devanados del motor, de forma que el motor empieza a funcionar como un motor normal de jaula de ardilla.

Arrancador suave: Es un dispositivo electrónico basado en tiristores similar al convertidor de frecuencia. El arranque se realiza en forma de rampa, es decir que se parte de una tensión reducida y se incrementa gradualmente hasta alcanzar la velocidad y par nominal del motor, lo

cual limita notablemente la corriente de arranque. El motor se pone en marcha suavemente reduciendo los esfuerzos eléctricos y mecánicos que producen los demás arranques.

3. PROCEDIMIENTO

ARRANQUE DIRECTO

Conecte el circuito de la figura B.1 a la red de alimentación **variable** de LabVolt (con 120V línea-línea) y empleando como máquina el motor de inducción trifásico de rotor devanado con el estator conectado en triángulo y con el rotor cortocircuitado. Utilice como arrancador el módulo “arrancador directo”, figura B.2. Asegúrese de trabajar el motor en vacío.

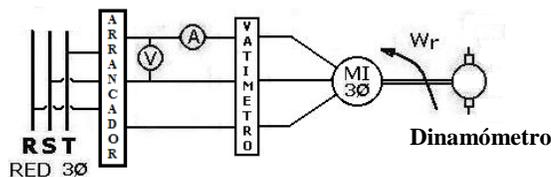


Figura B.1. Conexión del motor de inducción trifásico con arrancador.

Los terminales de línea 1, 2 y 3 de los arrancadores de las figuras B.2 a B.5, corresponden a las entradas de la fuente de alimentación R, S y T respectivamente. Los terminales de carga 4, 5 y 6 de estos arrancadores se conectan directamente a los bornes de la máquina.

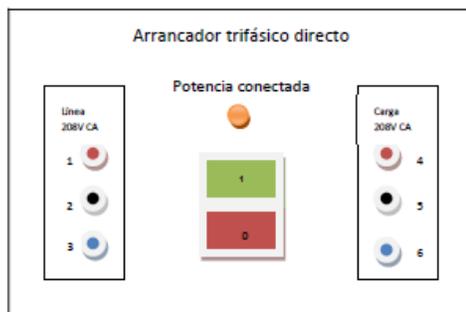


Figura B.2. Arrancador trifásico directo de LabVolt.

Para el circuito de la figura B.1 mida V, I, W, velocidad y el tiempo entre cambios de estado, con la tensión aplicada.

Cuando el motor alcance su velocidad de régimen permanente, apáguelo primero desde el arrancador y después desconecte la fuente de alimentación desde el interruptor principal de LabVolt.

Luego repita el mismo procedimiento, esta vez utilizando el “arrancador de tensión reducida por resistencia” (figura B.3) y finalmente el “arrancador de tensión reducida por autotransformador” (figura B.4).

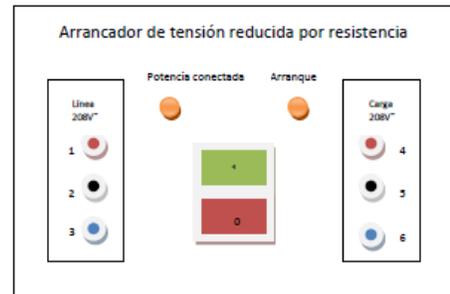


Figura B.3. Arrancador de tensión reducida por resistencia de LabVolt.

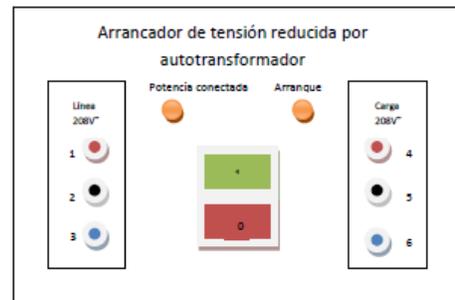


Figura B.4. Arrancador de tensión reducida por autotransformador de LabVolt.

ARRANQUE ESTRELLA/TRIÁNGULO

Conecte nuevamente el circuito de la figura B.1 a la red de alimentación **variable** de LabVolt asegurándose que la tensión de alimentación sea de 120V entre fases.

Utilizando como arrancador el módulo “arrancador estrella/triángulo” (figura B.5) y con el motor en vacío, mida V, I, W, velocidad y el tiempo entre cambios de estado, con la tensión aplicada.

Los terminales de carga 4 a 7 de este arrancador se conectan a los bornes de los devanados de la máquina como se especifica en el cuadro de la carga del mismo arrancador, es decir que el estator

del motor no debe presentar ninguna configuración al momento de la conexión del arrancador de la figura B.5.

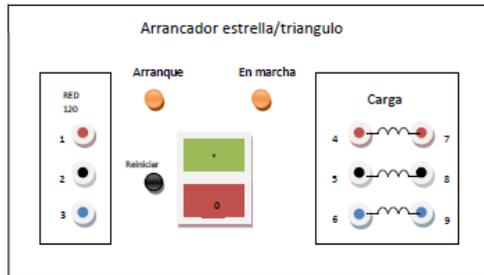


Figura B.5. Arrancador estrella/triángulo de LabVolt.

ARRANQUE POR RESISTENCIA ROTÓRICA

Por último, conecte el motor directamente a la red de alimentación **variable** de LabVolt (con 120V línea-línea) y conexión del devanado del estator en triángulo. Adicionalmente, conecte una resistencia variable trifásica directamente al rotor de la máquina y colóquela en su valor máximo.

Encienda la fuente de alimentación y deje que la máquina gire hasta que permanezca estable (aproximadamente el mismo tiempo que en las pruebas anteriores) y cambie la resistencia a su valor medio por el mismo tiempo, luego cuando alcance nuevamente la estabilidad, varíe la resistencia hasta el cortocircuito. Mida **V**, **I**, **W**, velocidad y el tiempo entre cambios de estado, con la tensión aplicada.

4. INFORME

a. Con los datos obtenidos en la parte 3 del procedimiento construya una tabla que contenga la siguiente información:

- **Tipo de arranque**
- **Tiempo total de arranque**
- **Tensión y corriente durante el arranque**
- **Energía disipada durante el arranque**

Nota: la energía disipada durante el arranque la puede calcular como el producto entre la potencia activa trifásica (**W**) y la duración del arranque en segundos, es decir.

$$\text{Edisipada} = \text{Pentrada} * \text{Tarranque} \text{ [Joules]}$$

b. Calcule el deslizamiento “s” para cada uno de los arranques realizados.

c. ¿Cómo considera usted que el tipo de arranque puede afectar el comportamiento del motor?

d. ¿Qué ventajas puede traer sobre la vida útil del motor el uso de arrancadores?

Observaciones

Conclusiones

ANEXO C

MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS Y LA EFICIENCIA EN MÁQUINAS ELÉCTRICAS A PARTIR DE ENSAYOS.

1. OBJETIVOS

- Conocer las formas de medición directa e indirecta de la eficiencia en máquinas eléctricas.
- Estudiar los métodos de determinación de la eficiencia para máquinas eléctricas estáticas y rotatorias de CD y CA.

2. TEORIA

Cuando una máquina transforma energía de una forma a otra, siempre existe cierta pérdida de energía. La pérdida ocurre en la máquina misma y provoca un incremento de la temperatura y una reducción de la eficiencia. Desde el punto de vista de las pérdidas, las máquinas eléctricas pueden dividirse en dos grupos: aquellas que tienen partes giratorias (motores, generadores) y aquellas que no las tienen (transformadores, reactores). En las máquinas rotatorias se producen pérdidas eléctricas y mecánicas, mientras que en las máquinas estacionarias solo se producen pérdidas eléctricas.

La eficiencia de un motor eléctrico es la medida de la capacidad que tiene el motor de convertir la energía eléctrica en energía mecánica. La potencia eléctrica correspondiente medida en vatios entra por los terminales del motor y la potencia mecánica medida en vatios entregados por el eje. La eficiencia del motor puede calcularse a través de la expresión:

$$\eta = P_{salida} / P_{entrada} * 100\%$$

Para el generador eléctrico el cálculo de la eficiencia se realiza de la misma manera, sólo que en este caso la potencia eléctrica medida en vatios es la que sale por los bornes de la máquina y la potencia mecánica en el eje es la potencia de entrada medida en vatios.

Para el transformador, aunque el cálculo de la eficiencia realmente no representa ninguna modificación de las ecuaciones mostradas, si requiere de una relación directa entre las potencias eléctricas de salida y entrada, ambas expresadas en vatios.

Dado que la potencia mecánica de una máquina rotativa es considerada como el producto entre el torque y la velocidad (donde la velocidad mecánica ω deberá estar en rad/s y el torque T_e en N*m, para determinar la potencia P_e en vatios), y en ocasiones existe dificultad para medir el torque, también es posible obtener la eficiencia de forma indirecta a través de un análisis del circuito equivalente de la máquina y utilizando los valores eléctricos medidos durante el ensayo de la máquina.

En el caso del motor, donde la potencia de entrada es eléctrica, se puede determinar fácilmente la eficiencia a través de la potencia de entrada y las pérdidas calculadas con el circuito equivalente de la máquina, así:

$$\eta = (P_{entrada} - P_{pérdidas}) / P_{entrada}$$

O también, para el caso del generador, se realiza un procedimiento similar pero utilizando esta vez la potencia eléctrica a la salida de la máquina:

$$\eta = P_{salida} / (P_{salida} + P_{pérdidas})$$

En Lab-Volt, la medición se puede realizar de forma directa utilizando un electrodinamómetro como carga del motor bajo estudio o como primo-motor del generador, y en el cual se puede medir directamente el torque.

3. PROCEDIMIENTO

EFICIENCIA DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

Para el circuito de la figura C.1 mida I_1 , V_1 , W_1 a la entrada del motor, también empleando el electrodinamómetro mida el torque y velocidad en el eje del motor.

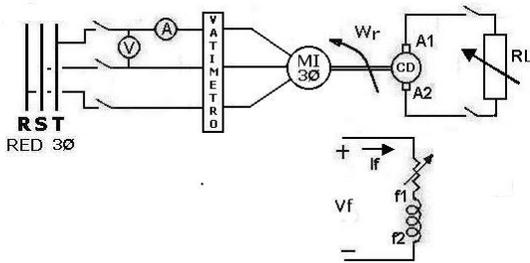


Figura C.1. Motor de inducción trifásico con carga.

1. No olvide tomar precauciones para proteger los instrumentos de medida en el momento de arranque.

2. Aplique tensión nominal en CA a la máquina.

3. Por medio de un electrodinamómetro o un generador CD acoplado a su eje, cárguelo hasta el 120% de su valor nominal. Tome la mayor cantidad de puntos de trabajo posibles procurando que la diferencia de corriente entre datos (el paso) sea igual. En cada caso tome todas las medidas.

NOTA: Durante la prueba tenga en cuenta que la tensión de alimentación debe permanecer constante durante todo el ensayo.

EFICIENCIA DEL ALTERNADOR

Para el circuito de la figura C.2 mida **I_l**, **V₁**, **W₁** a la salida del generador, también empleando el electrodinamómetro mida el torque y velocidad en el eje a la entrada del alternador.

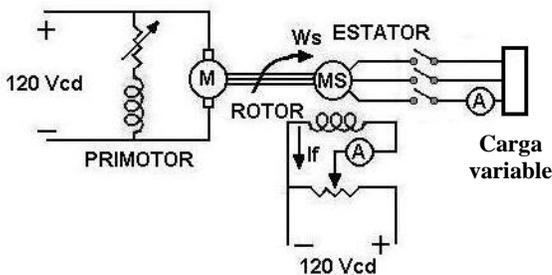


Figura C.2. Generador sincrónico trifásico con carga.

1. No olvide tomar precauciones para proteger los instrumentos de medida en el momento de arranque.

2. Lleve el alternador a su velocidad nominal y tensión nominal en bornes.

3. Por medio de un módulo de carga resistiva variable conectado a los bornes de la máquina, cárguela hasta el 120% de su valor nominal. Tome la mayor cantidad de puntos de trabajo posibles procurando que la diferencia de corriente entre datos (el paso) sea igual. En cada caso tome todas las medidas.

NOTA: Durante la prueba tenga en cuenta que la velocidad del eje y la corriente en el circuito de excitación deben permanecer constantes durante todo el ensayo.

EFICIENCIA DEL MOTOR CD SHUNT

Para el circuito de la figura C.3 mida **I_l**, **V₁**, **W₁** a la entrada del motor, también empleando el electrodinamómetro mida el torque y velocidad en el eje del motor.

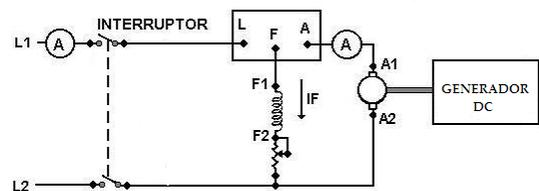


Figura C.3. Motor CD shunt con carga.

1. No olvide tomar precauciones para proteger los instrumentos de medida en el momento de arranque.

2. Aplique tensión nominal en CD a la máquina.

3. Por medio de un electrodinamómetro o un generador CD acoplado a su eje, cárguelo hasta el 120% de su valor nominal. Tome la mayor cantidad de puntos de trabajo posibles procurando que la diferencia de corriente entre datos (el paso) sea igual. En cada caso tome todas las medidas.

NOTA: Durante la prueba tenga en cuenta que la tensión de alimentación debe permanecer constante durante todo el ensayo.

EFICIENCIA DEL TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

Para el circuito de la figura C.4 mida **I_l**, **V₁**, **W₁** a la entrada y salida del transformador.

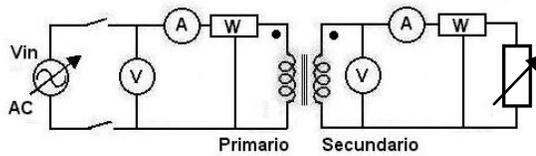


Figura C.3. Transformador monofásico con carga variable.

1. No olvide tomar precauciones para proteger los instrumentos de medida en el momento de arranque.
2. Aplique tensión nominal en CA a la entrada de la máquina.
3. Por medio de un módulo de carga resistiva variable conectado a los bornes de la máquina, cárguela hasta el 120% de su valor nominal. Tome la mayor cantidad de puntos de trabajo posibles procurando que la diferencia de corriente entre datos (el paso) sea igual. En cada caso tome todas las medidas.

NOTA: Durante la prueba tenga en cuenta que la tensión de alimentación debe permanecer constante durante todo el ensayo.

4. INFORME

- a. Con los datos obtenidos en la parte 3 del procedimiento construya en forma independiente, una tabla con todos sus datos y las curvas de:

Eficiencia vs Corriente

Para el caso del alternador y el transformador se utiliza la corriente de salida, para el motor de inducción y el CD se utiliza la corriente de entrada.

- b. Para cada una de las anteriores gráficas, señale el punto de corriente nominal.
- c. De acuerdo a las gráficas anteriores y los demás datos, ¿qué puede decirse de las relaciones?

Tensión vs Corriente

Velocidad vs Torque

Observaciones

Conclusiones