



# MOTORES ELÉCTRICOS

## Motores de Inducción Trifásicos

1

# LEY DE INDUCCIÓN DE FARADAY (REPASO)

La Ley inducción electromagnética de Faraday. En 1831 Joseph Faraday hizo uno de los descubrimientos más importantes del electromagnetismo que actualmente se conoce como: *La ley inducción electromagnética de Faraday*, que relaciona fundamentalmente el voltaje y el flujo en el circuito. El enunciado de la ley es:

- Si se tiene un flujo magnético que eslabona a una espira y, además, varía con el tiempo, se induce un voltaje entre los terminales.
- El valor del voltaje inducido es proporcional al índice de cambio del flujo.

# LEY DE INDUCCIÓN DE FARADAY (REPASO)

Por definición y de acuerdo al Sistema Internacional de Unidades, cuando el flujo varía en 1 weber por segundo, se induce un voltaje de 1 volt entre sus terminales; en consecuencia si el flujo varía entre una bobina de  $N$  espiras, el voltaje inducido se da por la expresión:

$$E = N \Delta\Phi / \Delta T$$

Donde:

$E$  = Voltaje inducido en Volts

$N$  = Número de espiras de la bobina

$\Delta\Phi$  = Cambio de flujo dentro de la espira o bobina

$\Delta T$  = Intervalo de tiempo durante el cual el flujo cambia

La ley de Faraday, establece las bases para las aplicaciones prácticas en el estudio de transformadores, generadores y motores de corriente alterna.

# LEY DE INDUCCIÓN DE FARADAY (REPASO)

**Voltaje inducido en un conductor.** En algunos motores y generadores, los conductores o bobinas se mueven respecto a un flujo constante. El movimiento rotativo produce un cambio en el eslabonamiento de flujo de las bobinas y, en consecuencia un voltaje inducido de acuerdo con la Ley de Faraday de la siguiente manera:

$$E = B \cdot L \cdot V$$

Donde:

*E = Voltaje inducido en Volts*

*B = Densidad de flujo en Tesla*

*L = Longitud activa de los conductores en el campo magnético*

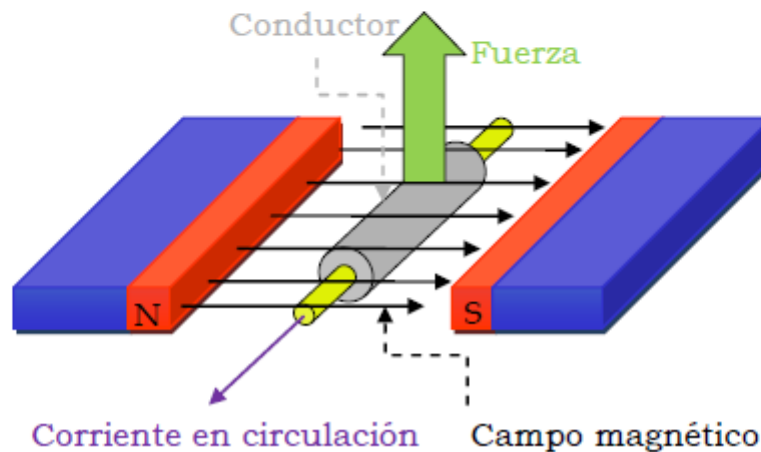
*V = Velocidad relativa del conductor  $\frac{m}{s}$*

# PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE UN MOTOR ELÉCTRICO

Los motores eléctricos operan bajo el principio de que un conductor colocado dentro de un campo magnético experimenta una fuerza cuando una corriente circula por el mismo como se ve en la figura

La magnitud de la fuerza varía directamente con la intensidad del campo magnético y la magnitud de la corriente que circula por el conductor, de acuerdo con la expresión:

**Fuerza magnética en un conductor debido a la circulación de corriente y campo magnético**



# PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE UN MOTOR ELÉCTRICO

$$F = I \cdot B \cdot L$$

Donde:

*F = Fuerza en Newtons*

*I = Corriente en circulación*

*B = Flujo magnético  $\frac{\text{weber}}{\text{m}^2}$  o Tesla*

*L = Longitud del conductor en metros*

# PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE UN MOTOR ELÉCTRICO

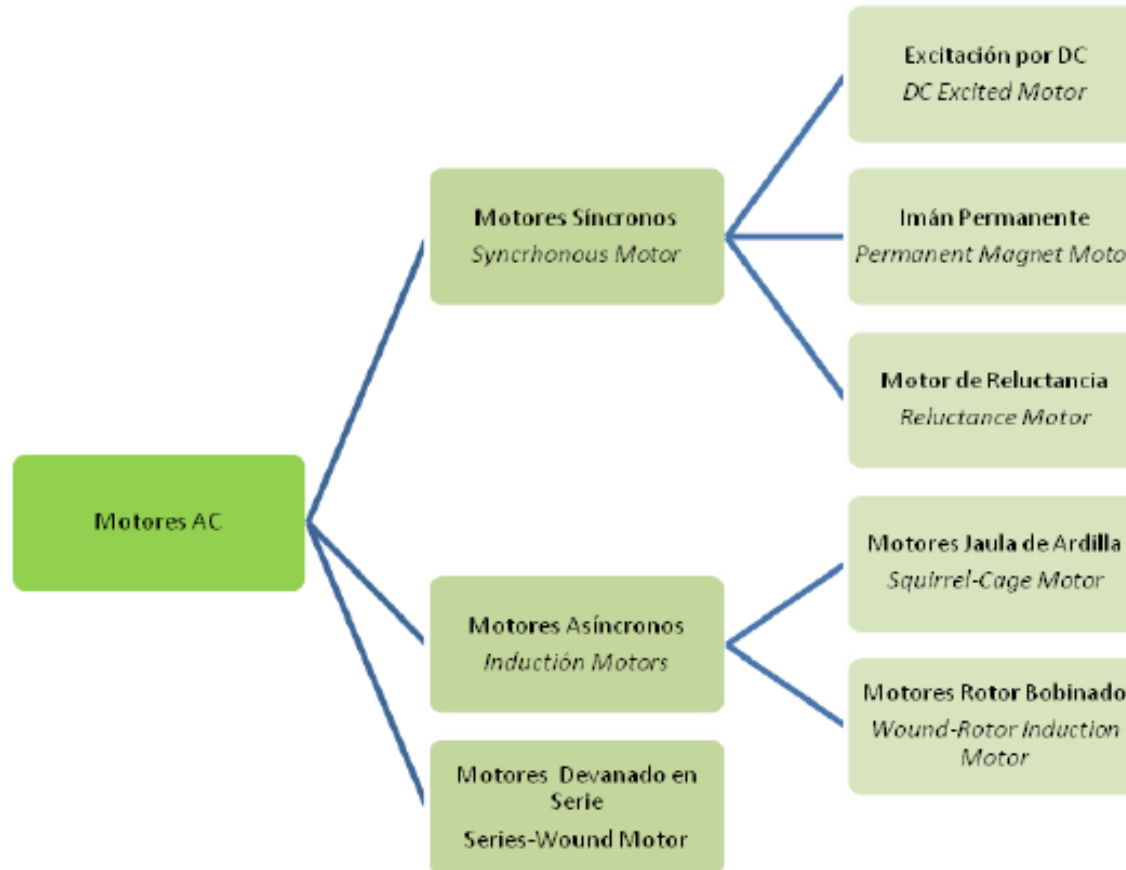
**Potencia y par de un motor eléctrico.** La potencia mecánica de los motores se expresa en caballos de fuerza (HP) o Kilowatts, medidas que cuantifican la cantidad de trabajo que un motor eléctrico es capaz de realizar en un periodo específico de tiempo. Dos factores importantes que determinan la potencia mecánica en los motores son: *el par y la velocidad de rotación.*

*El par* es una medida de la fuerza que tiende a producir la rotación, se mide el Libras-pie o Newton-metro. *La velocidad del motor* se establece comúnmente en revoluciones por minuto (RPM). La relación entre la potencia, el par y la velocidad se da por la siguiente expresión:

$$Potencia = Velocidad \times Par$$

# CLASIFICACIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS DE AC

## Clasificación de motores eléctricos AC según NEMA



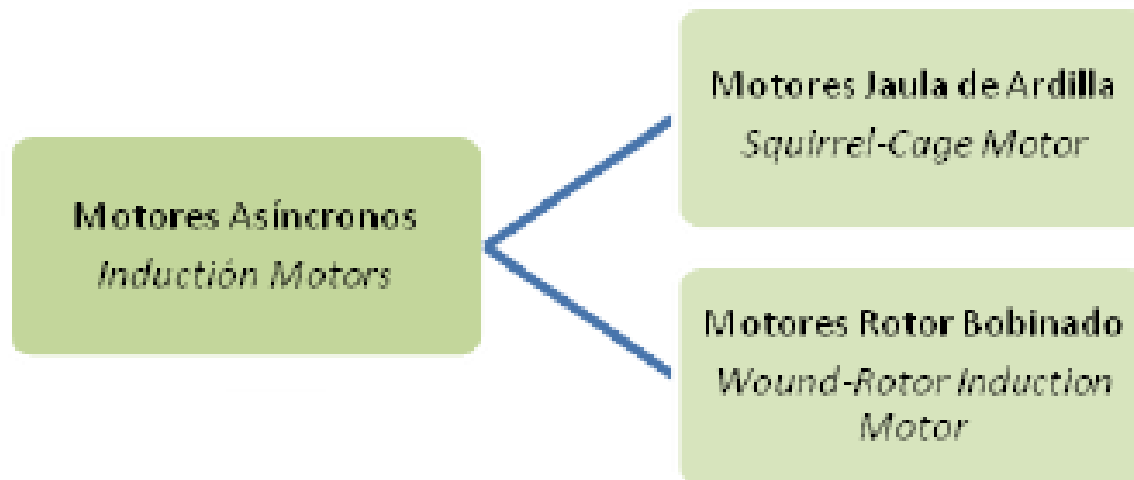


# DEFINICIONES DE MOTORES DE AC

## Definiciones de los tipos de motores AC

<b>Motor de Inducción</b> <i>Induction Motor</i>	<b>Motor Síncrono</b> <i>synchronous Motor</i>
Un motor de inducción es una máquina de inducción en la que un miembro (por lo general el estator) se conecta a la fuente de energía, y un devanado polifásico secundario o un devanado en jaula de Ardilla secundario en el otro miembro (usualmente el rotor) lleva corriente inducida <sup>[11]</sup> .	Son máquinas eléctricas cuya velocidad de rotación $n$ (RPM) está vinculada rígidamente con la frecuencia $f$ de la red de AC, con la cual trabaja, de acuerdo con la expresión <sup>12</sup> : $n = 60 f / p$ Donde $p$ es el número de pares de polos del motor. Es conocida como velocidad de sincronismo.

# CLASIFICACIÓN MOTORES ASÍNCRONOS



# DEFINICIÓN MOTORES ASÍNCRONOS

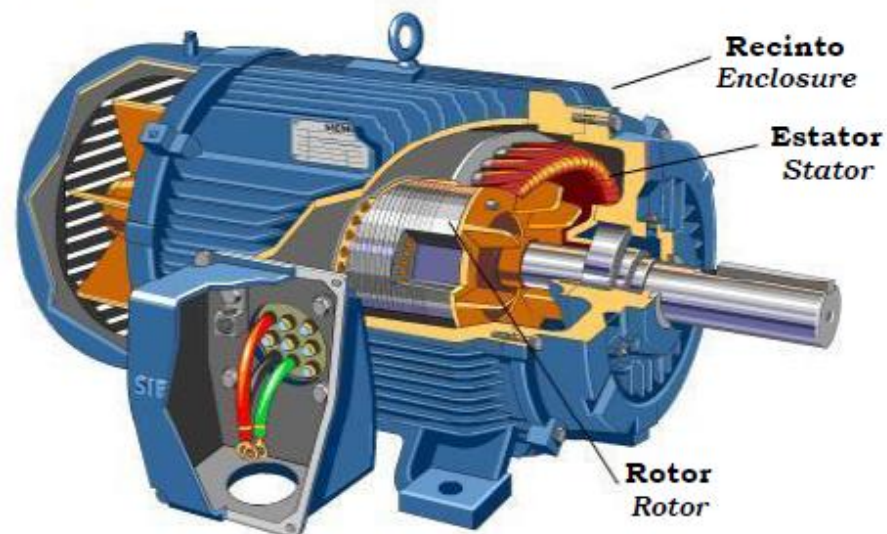
## Definiciones de motores AC de tipo inducción

<b>Motor Jaula de Ardilla</b> <i>Squirrel-Cage Induction Motor</i>	<b>Motor de Rotor Bobinado</b> <i>Wound-Rotor Induction Motor</i>
Es un motor de inducción donde el circuito secundario (jaula de Ardilla) consiste de un número de barras conductoras teniendo sus extremos conectados por anillos metálicos o platos en cada extremo .	Se llama así debido a que su bobinado está devanado en las ranuras. Está formado por paquetes de láminas troqueladas, montadas sobre el eje. Las bobinas se devanan sobre el eje y su arreglo depende del número de polos y de fases

# PARTES DE UN MOTOR DE AC, ASÍNCRONO

**Motores eléctricos AC.** De la clasificación mostrada el motor de uso más común en la industria es el motor de tres fases de inducción, este tipo de motor será el que se usará para describir las partes de un motor AC. Este tipo de motores posee tres partes principales: el rotor, el estator (*stator*) y el recinto (*enclosure*). Pueden verse las tres partes mencionadas en la figura

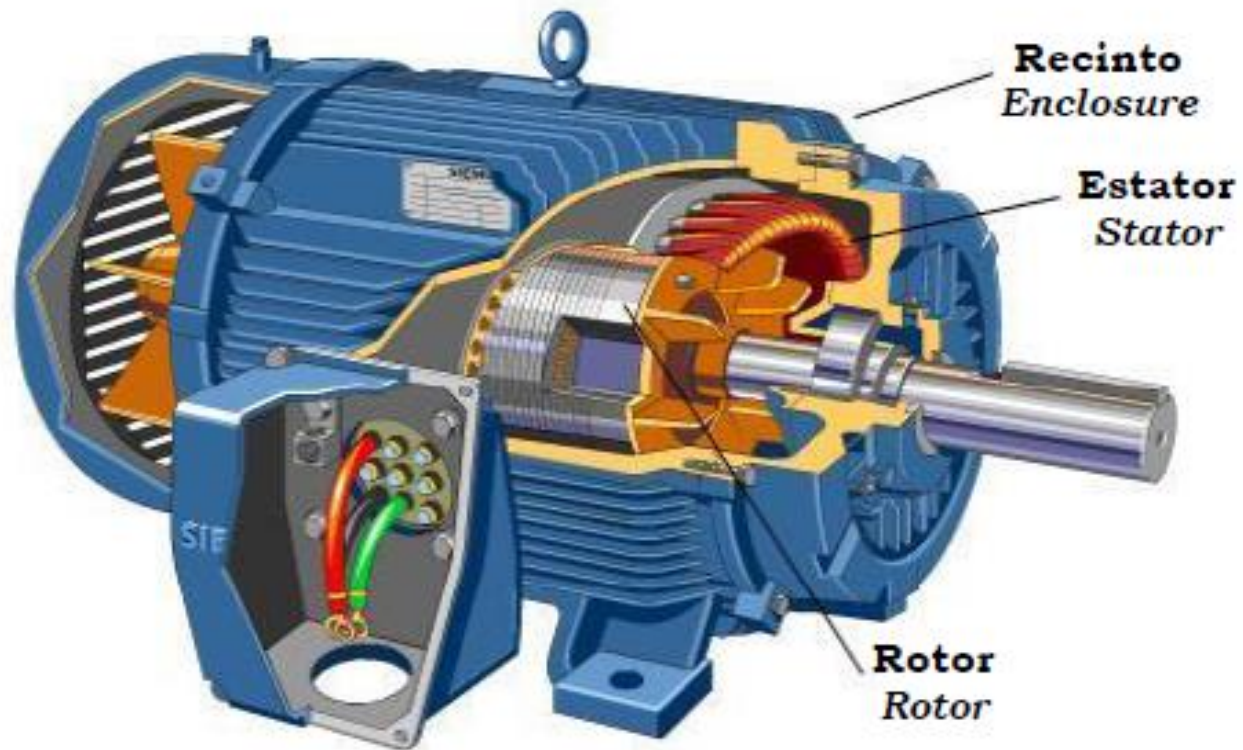
Partes principales de motor eléctrico AC trifásico de inducción



Fuente: SIEMENS. Electrical Training Courses – Power Distribution, Motors and Control: Basic of AC Motors. [online]. [cited 25 february 2010]. Available from internet: <http://www3.sea.siemens.com/step/flash/acmotors/index.htm>.

# INTRODUCCIÓN

Partes principales de motor eléctrico AC trifásico de inducción

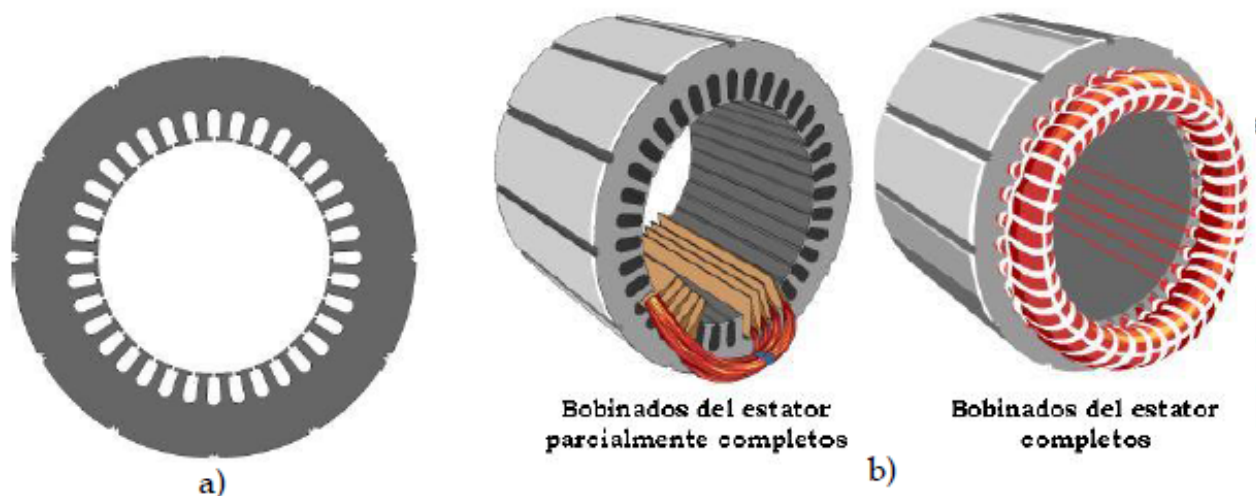


# ESTATOR

*El estator* es la parte estacionaria del circuito electromagnético del motor. El núcleo del estator (*stator core*) se compone de muchas hojas de metal delgado, llamadas láminas, que se utilizan para reducir las pérdidas de energía que se obtendrían si se utiliza un núcleo sólido.

# ESTATOR

Las láminas del estator se apilan formando un cilindro hueco. Bobinas de cable aislado se insertan en las ranuras del núcleo del estator. Cuando el motor está en operación, los bobinados del estator están conectados directamente a la fuente de alimentación. Cada grupo de bobinas, junto con el núcleo de acero que rodea, se convierte en un electroimán, cuando se aplica la corriente. El electromagnetismo es el principio básico de funcionamiento del motor.



Fuente: SIEMENS. Electrical Training Courses – Power Distribution, Motors and Control: Basic c AC Motors. [online]. [cited 25 february 2010]. Available from internet <http://www3.sea.siemens.com/step/flash/acmotors/index.htm>.

# ROTOR

*El rotor es la parte giratoria del circuito electromagnético del motor. El tipo más común de rotor utilizado en un motor de inducción de tres fases es un rotor de jaula de Ardilla. El rotor de jaula de ardilla se llama así porque su construcción es una reminiscencia de las ruedas de ejercicio de rotación se encuentran en las jaulas de los Hámster pero probablemente existen este mismo tipo de estructuras para ardillas domésticas. El núcleo de un rotor de jaula de ardilla se hace por apilamiento de finas láminas de acero para formar un cilindro.*



# ROTOR

## Construcción del rotor de un motor AC trifásico de inducción jaula de Ardilla



**Rotor**



**Láminas del Rotor**

Fuente: SIEMENS. Electrical Training Courses – Power Distribution, Motors and Control: Basic of AC Motors. [online]. [cited 25 february 2010]. Available from internet: <http://www3.sea.siemens.com/step/flash/acmotors/index.htm>.

En lugar de usar rollos de alambre como conductores, se usan barras conductoras en las ranuras equidistantes entre sí alrededor del cilindro. La mayoría de los rotores de jaula de ardilla son hechos en fundición de aluminio para formar las barras conductoras.

# ROTOR

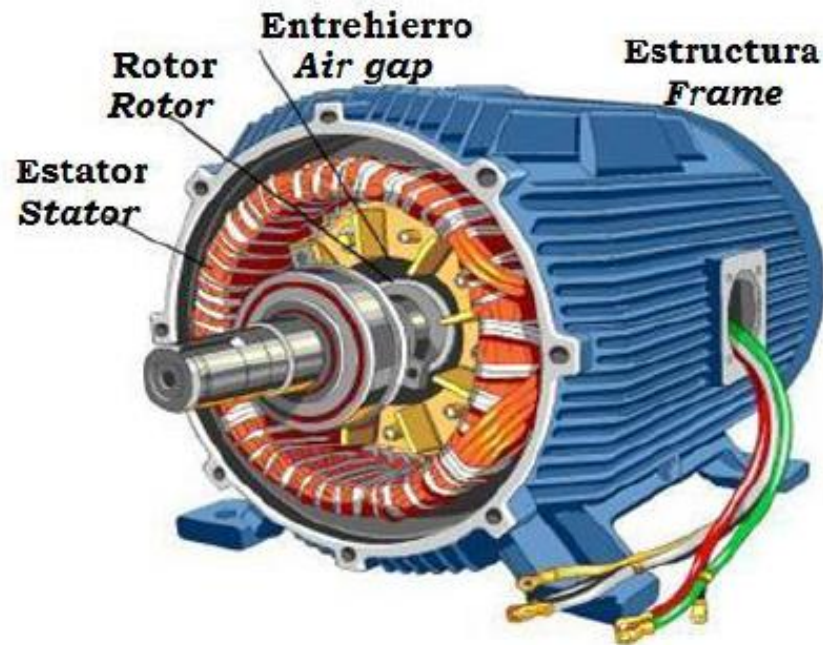
Montaje del rotor en un motor AC trifásico de inducción jaula de Ardilla



Fuente: SIEMENS. Electrical Training Courses – Power Distribution, Motors and Control: Basic of AC Motors. [online]. [cited 25 february 2010]. Available from internet: <http://www3.sea.siemens.com/step/flash/acmotors/index.htm>.

# MONTAJE FINAL

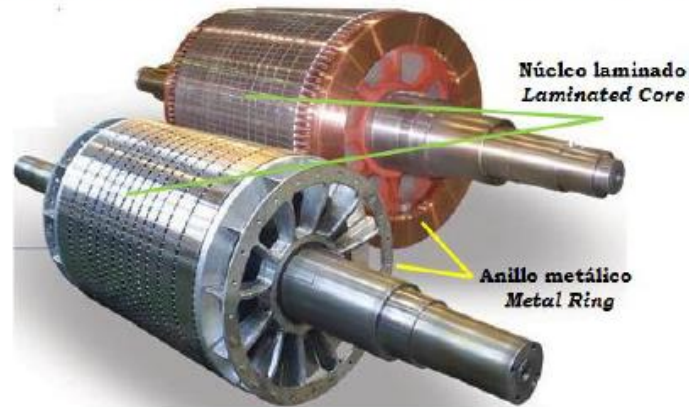
Recinto de motor AC trifásico de inducción



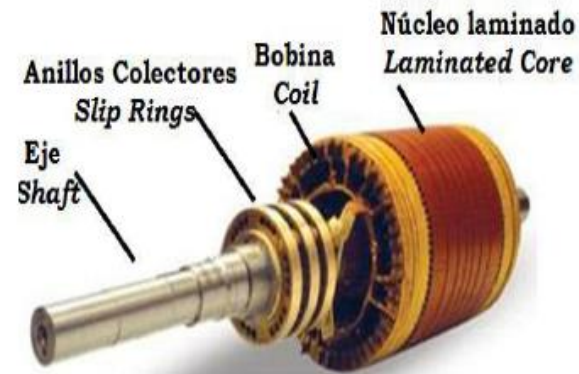
Fuente: SIEMENS. Electrical Training Courses – Power Distribution, Motors and Control: Basic of AC Motors. [online]. [cited 25 february 2010]. Available from internet: <http://www3.sea.siemens.com/step/flash/acmotors/index.htm>.

# TIPOS DE ROTORES DE MOTORES ASÍNCRONOS

Rotores de las dos clases tipos de motores AC de tipo inducción



a)



b)

Fuente: GENERAL ELECTRIC. Medium AC Motors. [online]. [cited 25 february 2010]. Available from internet: <http://www.gemotors.com.br/products/motors/wound/>.

# VELOCIDAD DE UN MOTOR

*El devanado del estator está constituido por tres arrollamientos desfasados  $120^\circ$  en el espacio y de  $p$  polos; al introducir por ellos corrientes de una red trifásica de frecuencia  $f$ , se produce *velocidad de sincronismo* que viene expresada por:*

$$n = 120 \frac{f}{p}$$

# VELOCIDAD DE UN MOTOR

El rotor de un motor de inducción no puede girar a la misma velocidad que el campo magnético giratorio. Si las velocidades fuesen las mismas, no existiría movimiento relativo entre los campos del estator y el rotor. Sin movimiento relativo no habría tensión inducida en el rotor. Para el movimiento relativo que existe entre los dos, el rotor debe girar a una velocidad más lenta que la del campo magnético giratorio. La diferencia entre la velocidad del campo giratorio del estator y la velocidad del rotor se denomina *deslizamiento*. Cuanto más pequeño es el deslizamiento, más cerca la velocidad del rotor se aproxima a la velocidad de campo del estator.

# VELOCIDAD DE UN MOTOR

Velocidades nominales de giro para motores de inducción

No. de Polos	Velocidad (RPM) a $f$ 60 Hz	Velocidad (RPM) a $f$ 50 Hz
2	3600	3000
4	1800	1500
6	1200	1000
8	900	750
10	720	600
12	600	500

*Debido al deslizamiento* la velocidad de rotación real del motor bajo carga es menor, por ejemplo normalmente cuando un rotor está diseñado para rotar a 1800 RPM, este gira a 1725 RPM debido al deslizamiento

# VELOCIDAD DE UN MOTOR



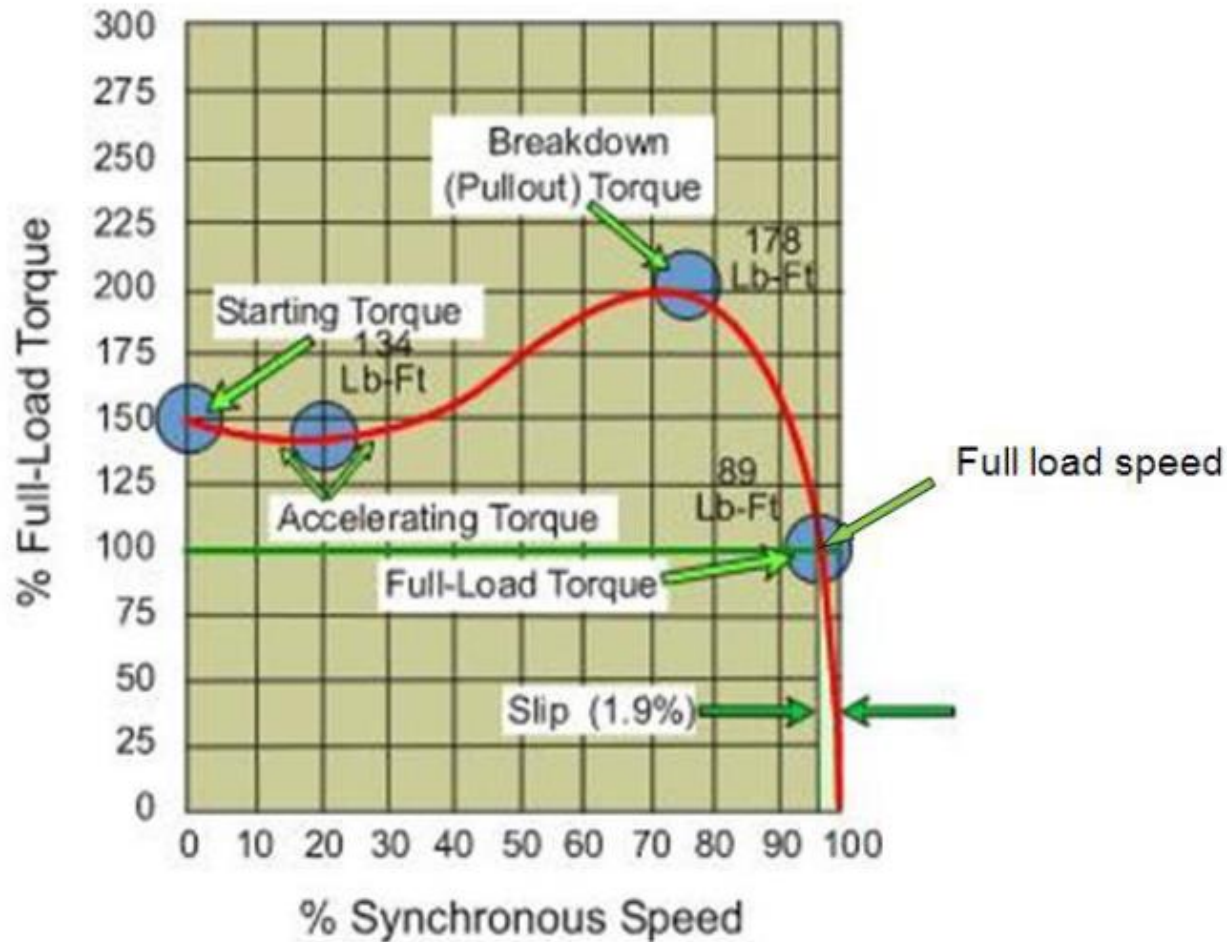
# TORQUE Y POTENCIA DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN

**Torque y potencia.** Estas dos características determinan en tamaño del motor para un trabajo particular.

En la figura se muestran las características de la curva de Torque contra velocidad de un motor NEMA clase B.

# TORQUE Y POTENCIA DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN

Curva representativa de velocidad-torque para motor NEMA B



# TORQUE Y POTENCIA DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN

*Full Load Torque*: torque a carga nominal, es el 100% (89 Lb-Ft) y es la referencia para los demás valores de torque.

*Starting Torque*: también conocido como *Locked Rotor Torque*. Un motor de inducción está hecho para desarrollar una cantidad extra de torque para arrancar la carga. En la figura es del 150 % del torque nominal (*full load torque*) de operación a carga plena 100%.

# TORQUE Y POTENCIA DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN

*Break Down Torque:* ocasionalmente ocurre que existe una sobrecarga en el motor, entonces el motor ofrece un valor de torque de operación alto, en el caso de la figura es del 200% del torque nominal (*full load torque*), pero el operar el motor en este punto por intervalos grandes de tiempo causa calentamiento excesivo del motor y puede dañarlo.

*Accelerating torque:* como el motor se acelera, disminuye ligeramente el par, pero este sigue en aumento hasta llegar al valor máximo de un 200% del torque nominal en este caso.

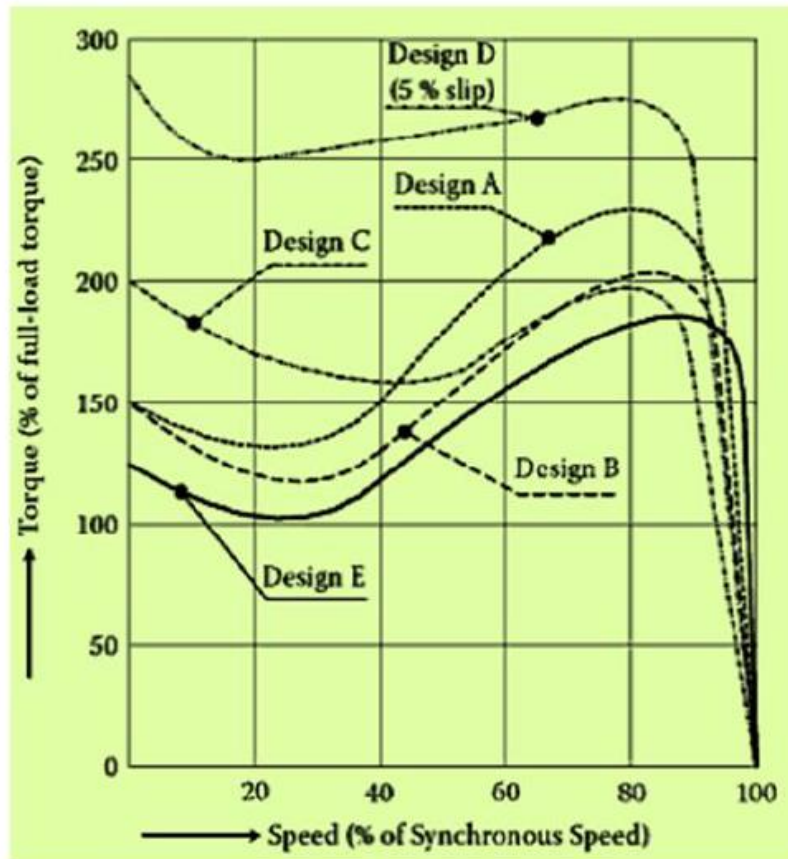
# TORQUE Y POTENCIA DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN

*Slip:* Deslizamiento debido a la carga externa al rotor del motor de inducción, este es la diferencia entre la velocidad de sincronismo del motor y la velocidad de operación a carga plena.

*Full Load Speed:* Es la velocidad de operación real del motor a carga plena y es menor que la velocidad de sincronismo.

# CURVAS CARACTERÍSTICAS TORQUE-VELOCIDAD PARA MOTORES DE INDUCCIÓN

Curvas características torque-velocidad para motores NEMA A, B, C, D y E



# CURVAS CARACTERÍSTICAS TORQUE-VELOCIDAD PARA MOTORES DE INDUCCIÓN

- Motor diseño A: Torque y corriente normales de arranque. Están saliendo de uso en la industria debido a que el diseño B usa menor cantidad de corriente en el arranque con valores de torque cercanos.
- Motor diseño B: Torque normal y baja corriente de arranque. Es usado de manera común, catalogado como de propósito general.
- Motor diseño C: Torque alto y baja corriente de arranque.
- Motor diseño D: Motor de alto deslizamiento.
- Motor diseño E: Diseño más eficiente que el diseño B. Diseño nuevo.

# CORRIENTE DE ARRANQUE DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN

**Corriente de arranque del motor de inducción.** Existe un código NEMA de letras para la corriente de arranque directa de un motor eléctrico AC, este código NEMA se conoce como *locked rotor code*, se da por letras y en cuanto esta letra avance más en el abecedario desde la A hacia la Z, el consumo de corriente es mayor. Es posible estimar la corriente de arranque en *Amperes* mediante el uso de la siguiente expresión:

$$\text{corriente de arranque} = \frac{1000 \times \text{HP} \times \text{KVA}/\text{HP}}{1.73 \times \text{Volts}}$$



# CORRIENTE DE ARRANQUE DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN

En la figura : se dan a conocer los valores de  $KVA/HP$ , dependiendo de la designación por código (*locked rotor code*) del motor. Entonces con el valor  $KVA/HP$ , el voltaje desde el que se alimenta al motor (ejemplo: 220 Volts) y la potencia del motor, es posible determinar la corriente que consumirá el motor mediante arranque directo.

# CORRIENTE DE ARRANQUE DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN

## Valores de KVA/HP

Cod*.	KVA/HP	Cod*.	KVA/HP	Cod*.	KVA/HP	Cod*.	KVA/HP
A	0-3.15	F	5.00-5.60	L	9.00-10.0	S	16.0-18.0
B	3.15-3.55	G	5.60-6.30	M	10.0-11.2	T	18.0-22.0
C	3.55-4.00	H	6.30-7.10	N	11.2-12.5	U	20.0-22.4
D	4.00-4.50	J	7.10-8.00	P	12.5-14.0	V	22.4- más
E	4.50-5.00	K	8.00-9.00	R	14.0-16.0		

\* Código para *locked rotor KVA/HP*.

Fuente: MILLER Rex; MILLER Mark R. Industrial Electricity and Motors Control. United States of America: McGraw-Hill, 2008. p. 151.

# TIPOS DE RECINTOS O CARCASAS DE MOTORES

## Tipo de Recinto

### Recinto Abierto a Prueba de Goteo (*Open Drip Proof (ODP)*)

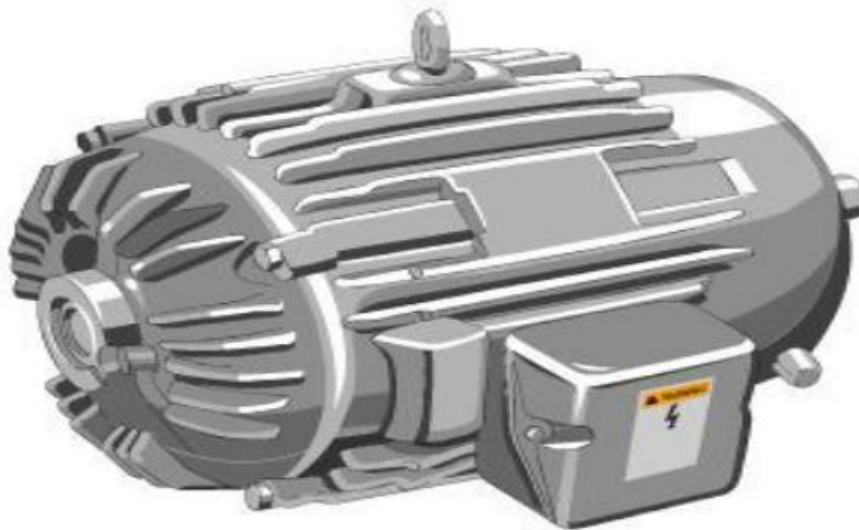
Este recinto tiene salidas de ventilación que permiten el flujo de aire. Las aspas del ventilador se mueven cuando el rotor está girando. Los respiraderos están colocados de modo que los líquidos y sólidos que caen desde arriba en ángulos de hasta  $15^\circ$  de la vertical no puede entrar en el interior del motor cuando el motor está montado sobre una superficie horizontal. Cuando el motor está montado sobre una superficie vertical, como una pared o panel, una cubierta especial puede ser necesaria.



# TIPOS DE RECINTOS O CARCASAS DE MOTORES

## Totalmente Cerrado No Ventilado (*Totally Enclosed Non-Ventilated (TENV)*)

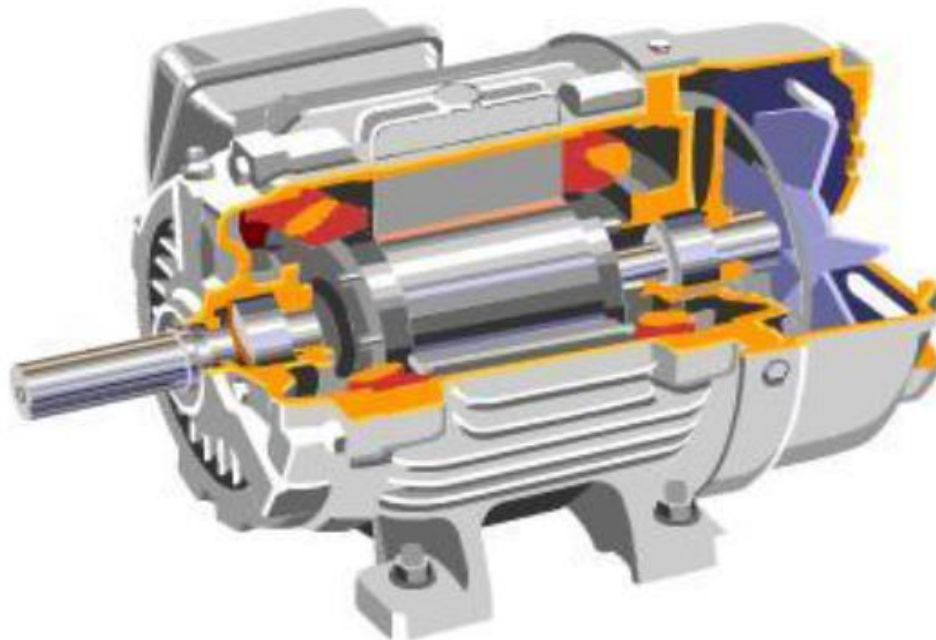
En algunas aplicaciones, el aire que rodea el motor contiene elementos corrosivos o dañinos que pueden dañar las partes internas de un motor. Este tipo de recinto limita el flujo de aire en el motor, pero no es hermético. Sin embargo, un sello impide que el agua, el polvo y otros elementos extraños entren en el motor a lo largo del eje. La ausencia de aberturas de ventilación significa que todo el calor desde el interior del motor debe disiparse a través de la caja por conducción.



# TIPOS DE RECINTOS O CARCASAS DE MOTORES

## Totalmente Cerrado Ventilado ( *Totally Enclosed Fan-Cooling(TEFC)* )

Es similar a un *TENV*, pero tiene un ventilador externo montado en el extremo opuesto de la unidad de motor. El aire del ventilador sopla sobre el exterior del motor para un enfriamiento adicional. El ventilador está cubierto por una tapa para evitar que alguien lo toque. *TEFC* puede ser utilizado en ambientes sucios, húmedos o ligeramente ambientes corrosivos.



# TIPOS DE RECINTOS O CARCASAS DE MOTORES

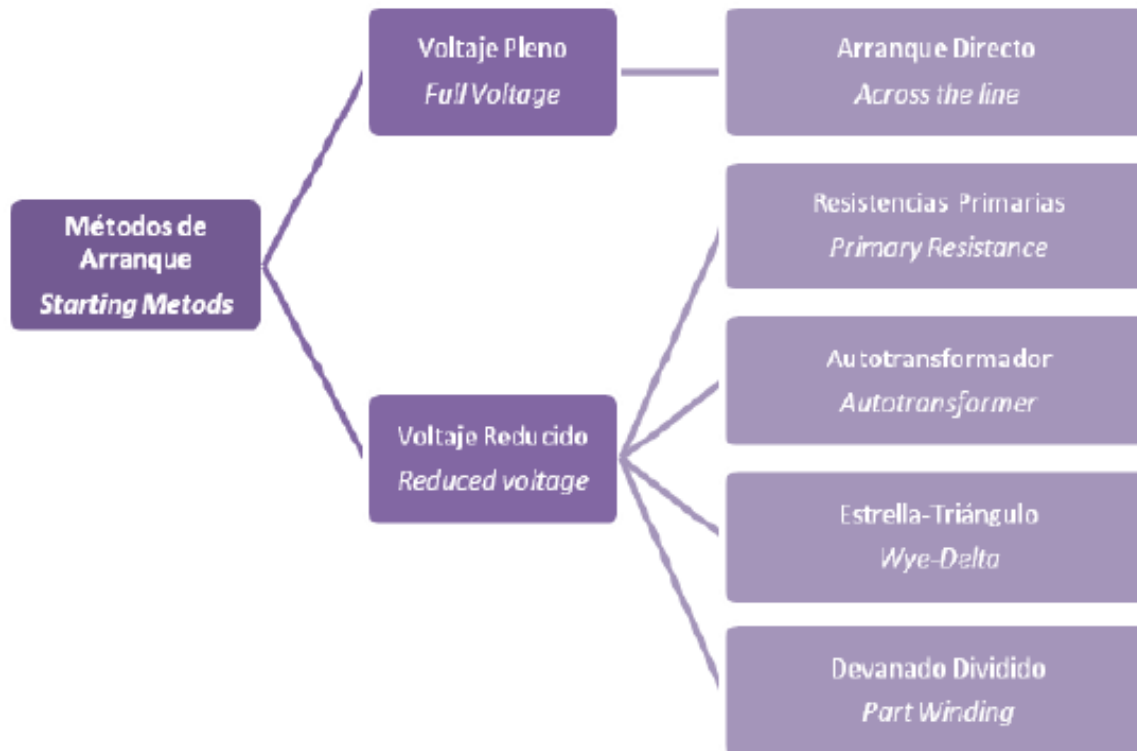
## A Prueba de Explosiones (*Explosion-Proof Enclosure (XP)* )

Trabajos peligrosos se encuentran comúnmente en los procesos químicos, minería, fundición, celulosa y papel, manejo de residuos, y las industrias petroquímicas. En estas aplicaciones, los motores tienen que cumplir con las más estrictas normas de seguridad para la protección de la vida, las máquinas y el medio ambiente. Esto a menudo requiere el uso del motor a prueba de explosión (*XP*). Un motor *XP* es similar en apariencia a un motor *TEFC*, sin embargo, la mayoría de los recintos de *XP* son de hierro fundido.

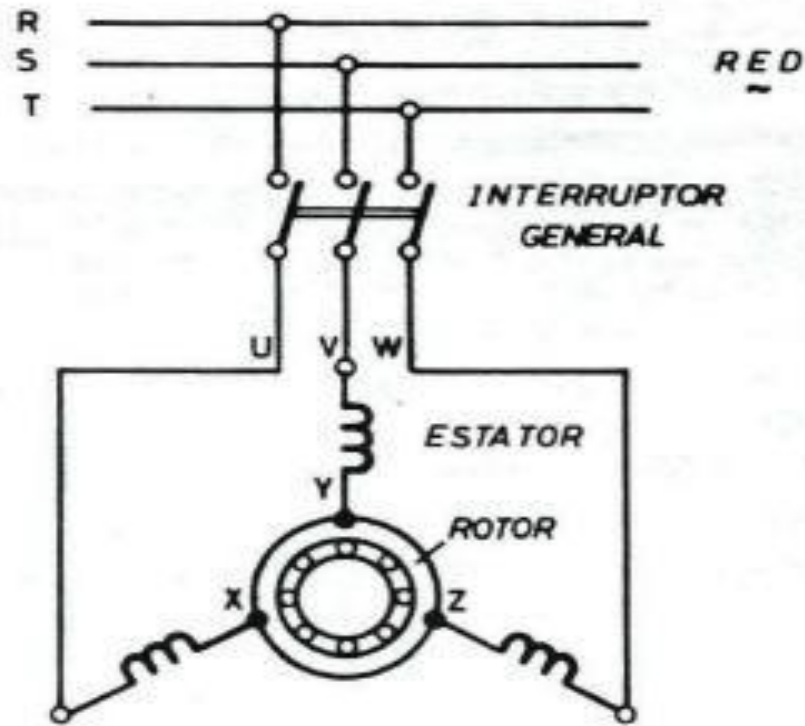


# MÉTODOS DE ARRANQUE

## Clasificación de los métodos de arranque de motores eléctricos



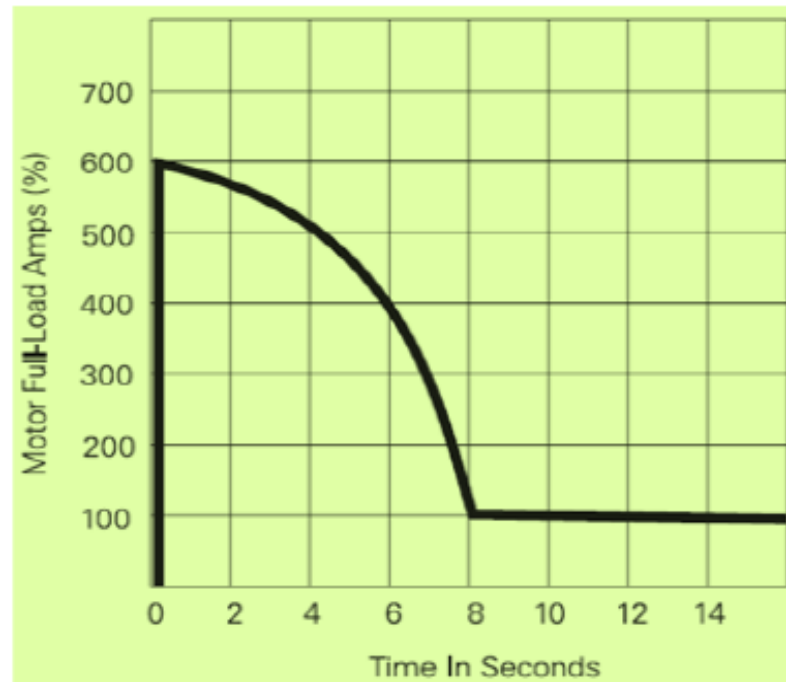
# MÉTODO DIRECTO





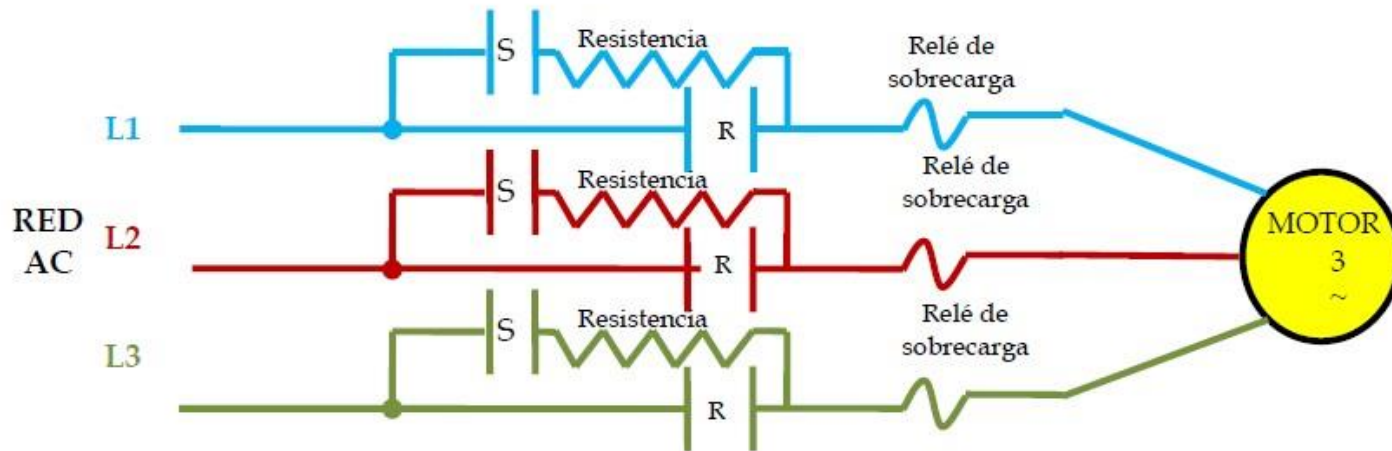
# MÉTODO DIRECTO

Curva de corriente de arranque contra tiempo de motor NEMA B



# MÉTODO CON RESISTENCIAS

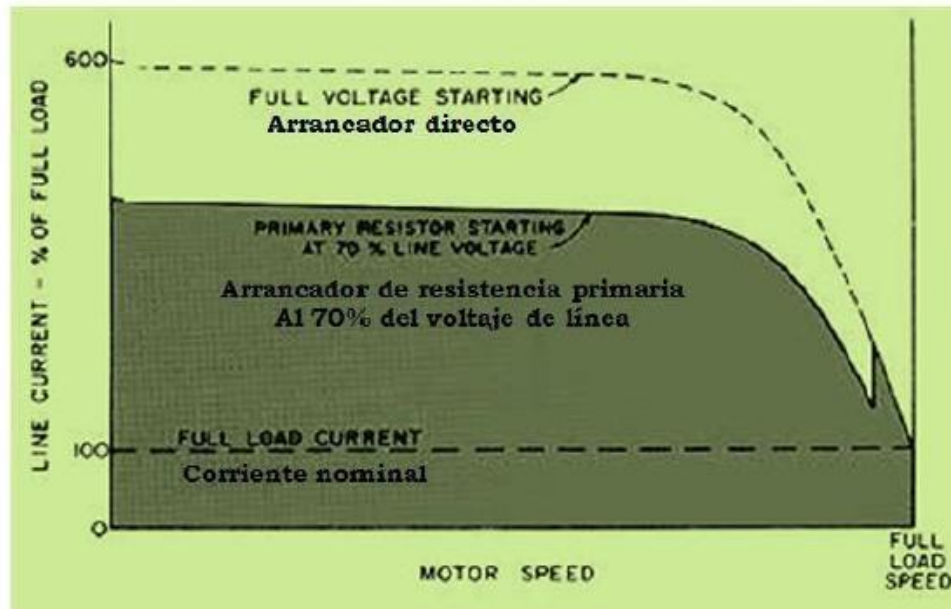
Esquema de arrancador con resistencias primarias de motor trifásico



Fuente: MILLER Rex; MILLER Mark R. Industrial Electricity and Motors Control. United States of America: McGraw-Hill, 2008. p. 209.

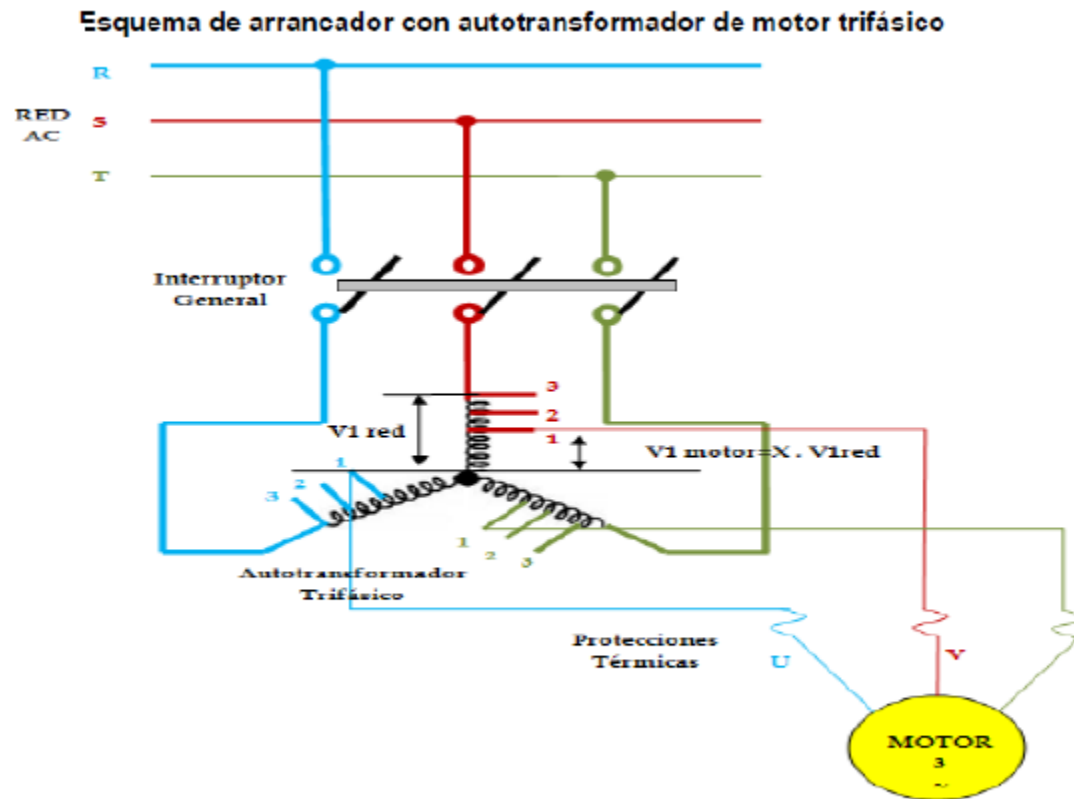
# MÉTODO CON RESISTENCIAS

- Curva característica durante arranque con arrancador por resistencias primarias



Fuente: GOSS POWER PRODUCTS. Frequently Asked Questions: FAQs. [online]. [cited 27, february, 2010]. Available from internet: <http://www.p3power.ca/faqs.html>.

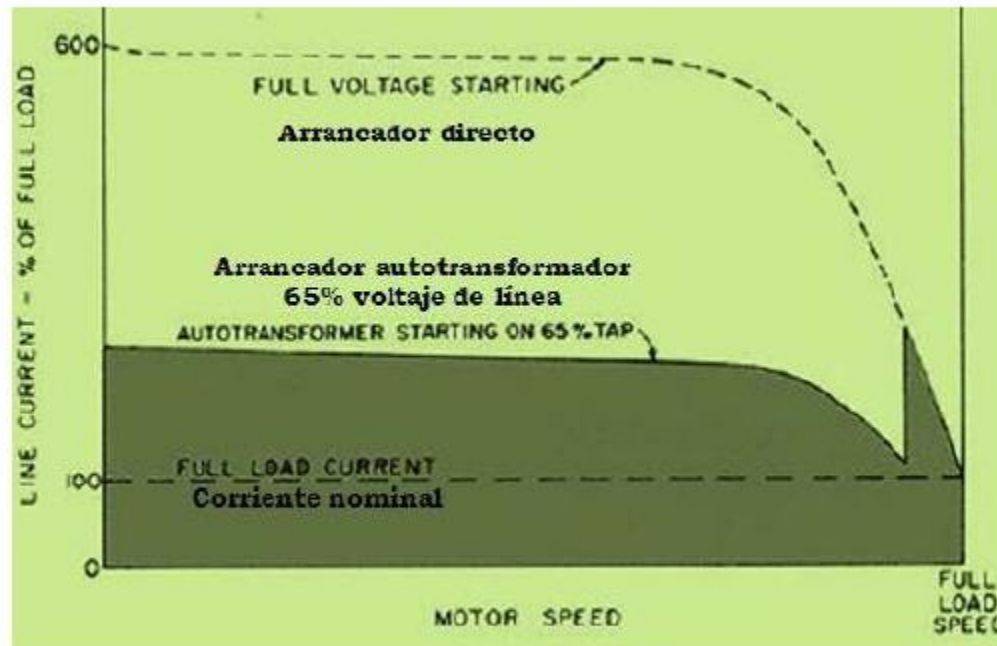
# MÉTODO CON AUTOTRANSFORMADOR



Fuente: FRAILE Mora, Jesús. Máquinas Eléctricas. 5 ed. España: McGraw-Hill, 2003. p. 318.

# MÉTODO CON AUTOTRANSFORMADOR

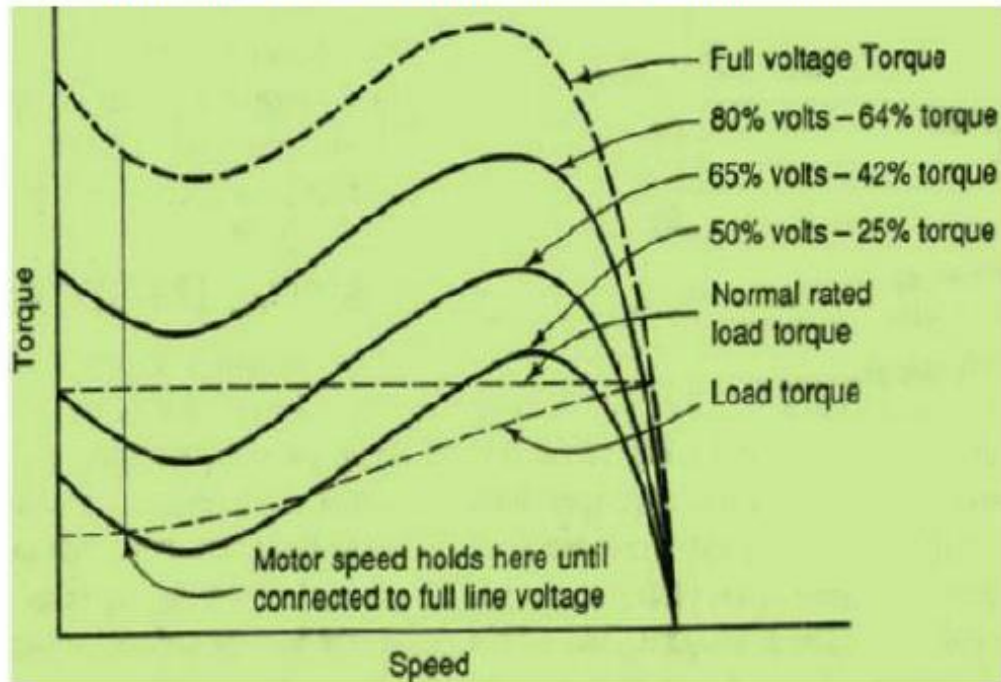
Curva de arranque de motor eléctrico usando autotransformador al 65% del voltaje



Fuente: GOSS POWER PRODUCTS. Frequently Asked Questions: FAQs. [online]. [cited 28, february, 2010]. Available from internet: <http://www.p3power.ca/faqs.html>.

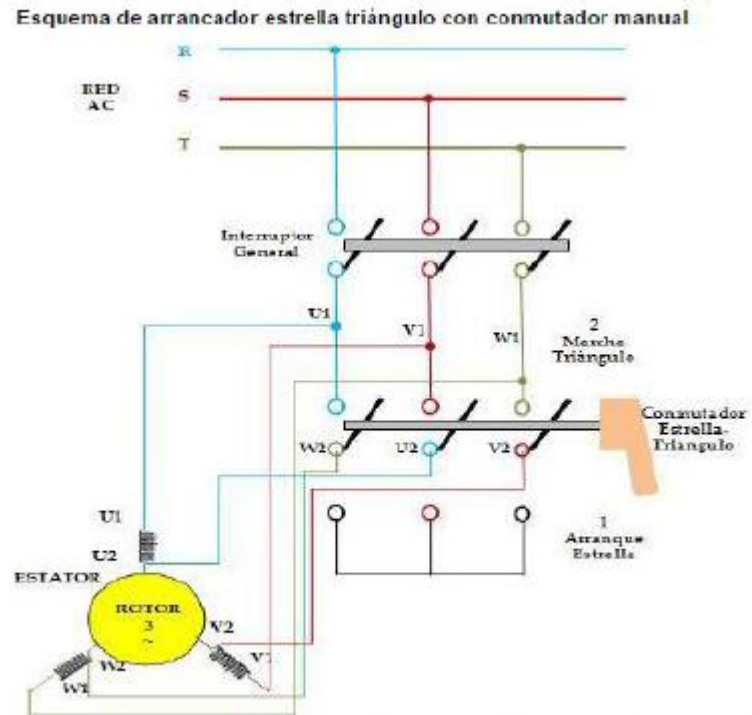
# MÉTODO CON AUTOTRANSFORMADOR

Curva de arranque de motor eléctrico usando autotransformador



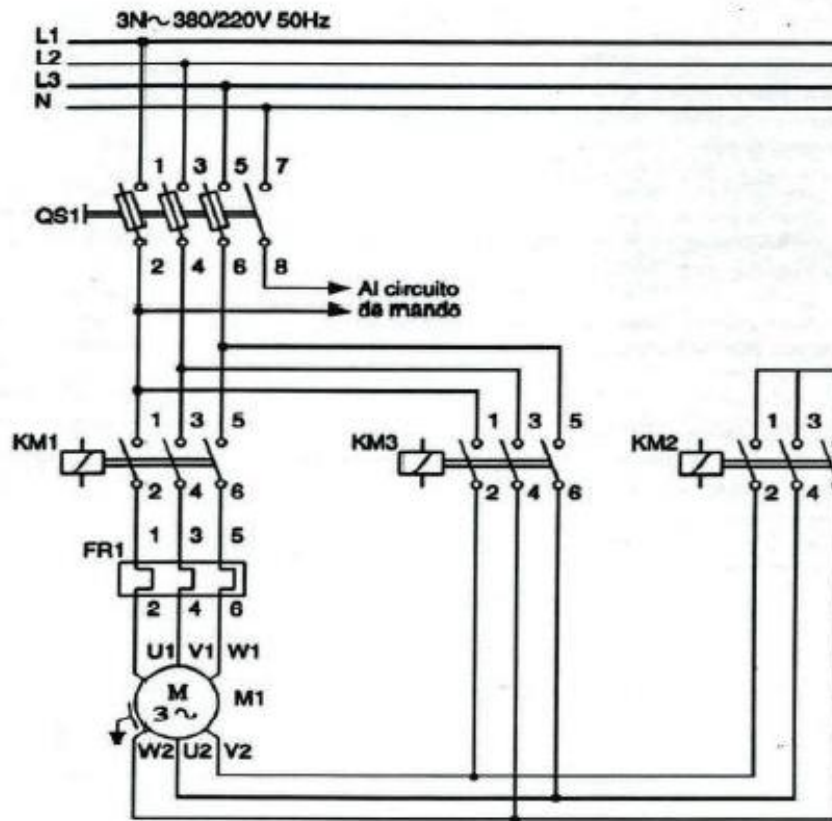
Fuente: MILLER Rex; MILLER Mark R. Industrial Electricity and Motors Control. United States of America: McGraw-Hill, 2008. p. 210.

# MÉTODO ESTRELLA - DELTA



Fuente: FRAILE Mora, Jesús. Máquinas Eléctricas. 5 ed. España: McGraw-Hill, 2003. p. 318

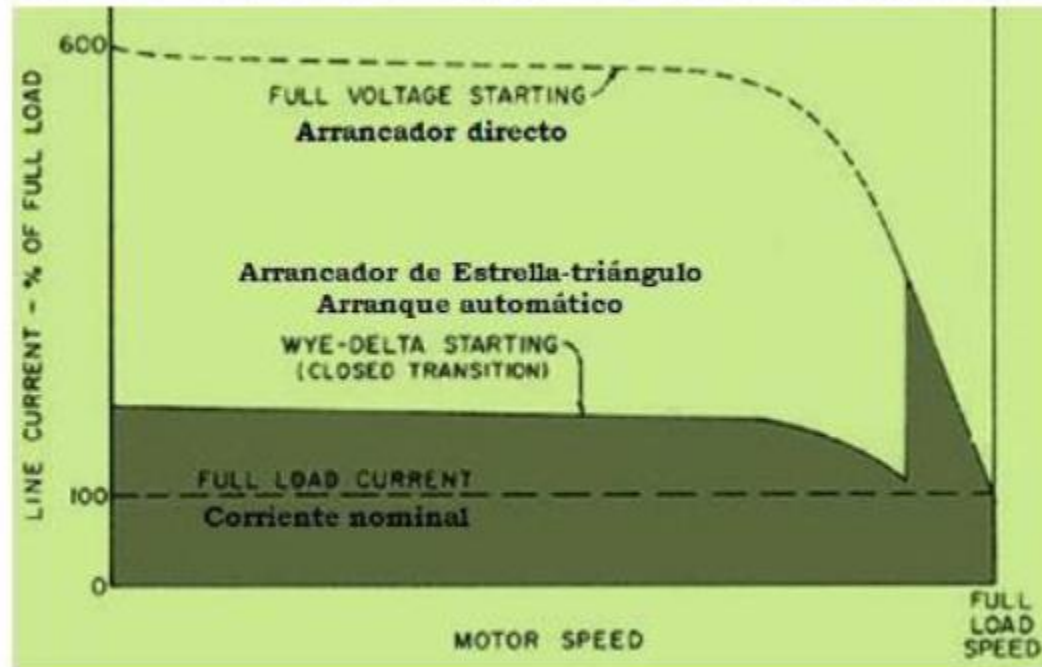
# MÉTODO ESTRELLA - DELTA





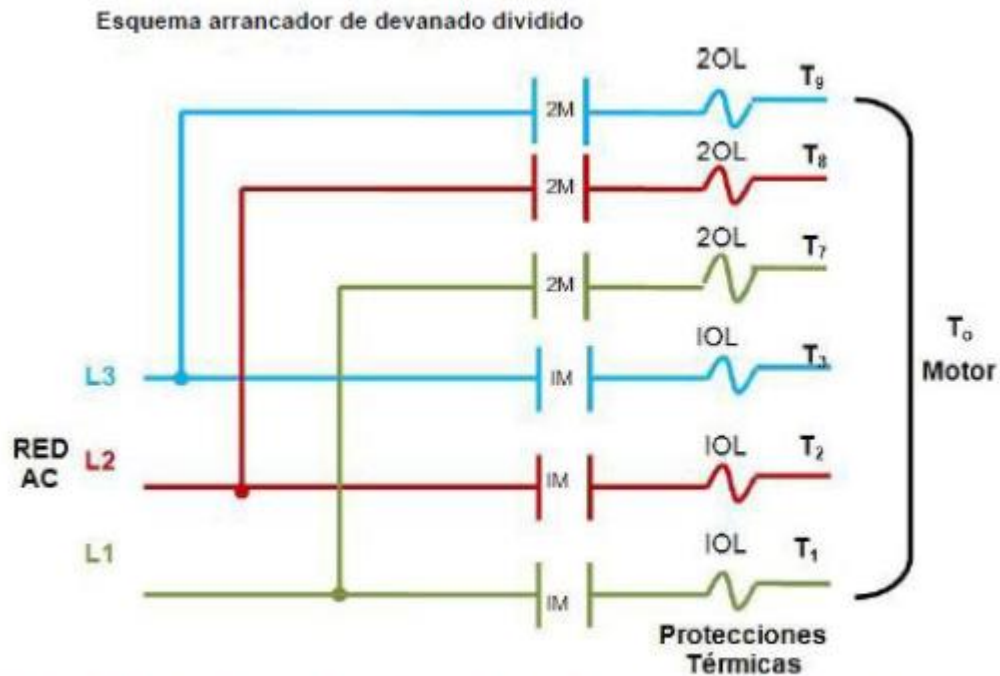
# MÉTODO ESTRELLA - DELTA

Curva característica durante arranque con arrancador estrella-triángulo



Fuente: GOSS POWER PRODUCTS. Frequently Asked Questions: FAQs. [online]. [cited 28, february, 2010]. Available from internet: <http://www.p3power.ca/faqs.html>.

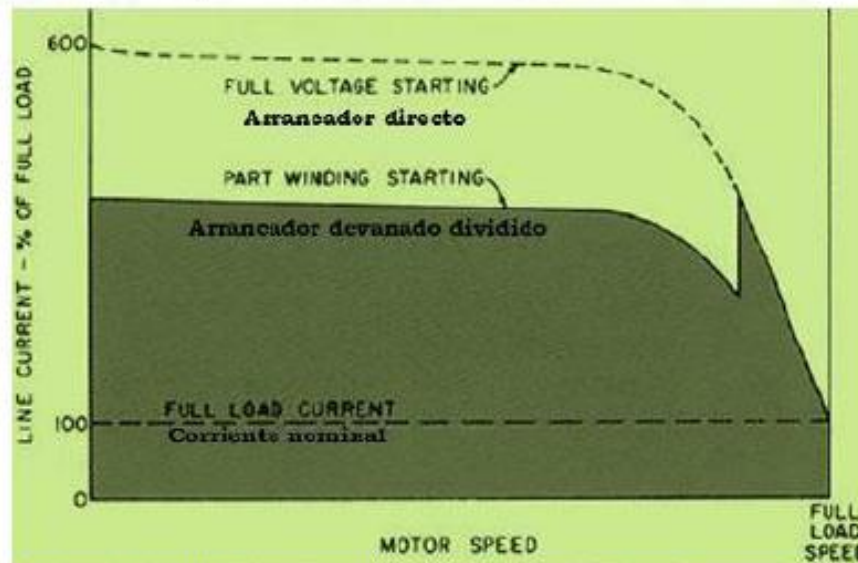
# MÉTODO DEVANADO DIVIDIDO



Fuente: MILLER Rex; MILLER Mark R. Industrial Electricity and Motors Control. United States of America: McGraw-Hill, 2008. p. 212.

# MÉTODO DEVANADO DIVIDIDO

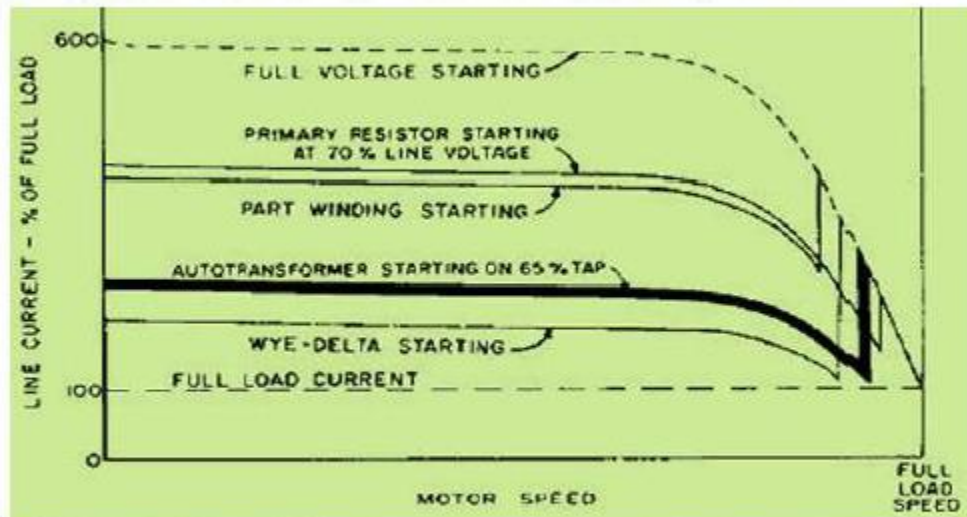
Curva durante arranque con arrancador devanado dividido



Fuente: GOSS POWER PRODUCTS. Frequently Asked Questions: FAQs. [online]. [cited 27, february, 2010]. Available from internet: <http://www.p3power.ca/faqs.html>.

# COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS

Comparación de métodos de arranque a tensión reducida



Fuente: GOSS POWER PRODUCTS. Frequently Asked Questions: FAQs. [online]. [cited 2 february, 2010]. Available from internet: <http://www.p3power.ca/faqs.html>.

# COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS

Método de Arranque	Operación	Corriente de arranque (% corriente de bloqueo del motor)		Torque de arranque (%Torque de bloqueo del motor)	Transición de abierto a cerrado	Características Básicas		
						Ventajas	Desventajas	
<b>Directo</b> <i>across the line full voltage</i>	Conexión directa del motor a la red eléctrica.	100%		100%	Ninguno	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Bajo costo</li> <li>2. Alto torque de arranque</li> <li>3. Usado en cualquier motor estándar</li> <li>4. Poco mantenimiento</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Alta corriente de arranque</li> <li>2. Alto torque de arranque</li> <li>3. Puede sacudir la máquina conducida</li> </ol>	
<b>Resistencias primarias</b> <i>Primary resistance</i>	Adicionando resistencias en serie durante el arranque.	50-80%		25-64%	Cerrado	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Arranque suave</li> <li>2. Sacudida suave a la máquina conducida</li> <li>3. Usado en cualquier motor estándar</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Alta pérdida debido al calentamiento de los resistores.</li> <li>2. El calentamiento debe ser disipado.</li> <li>3. Bajo torque</li> <li>4. Alto costo</li> </ol>	
<b>Autotransformador</b> <i>Autotransformer</i>	Usando autotransformador para reducir el voltaje aplicado al motor.	Voltaje Reducido		25%	Cerrado	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Altas cargas.</li> <li>2. Torque de arranque ajustable.</li> <li>3. Cualquier motor estándar.</li> <li>4. Menos tensión en el motor.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Puede sacudir la máquina conducida</li> <li>2. Alto costo</li> </ol>	
		1-50%	25%					25%
		2- 65%	42%					42%
		3- 80%	64%	64%				

# COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS

<b>Estrella-triángulo</b> <i>Wye-delta</i>	Iniciando el motor en conexión estrella y conmutando a conexión triángulo.	33%	33%	Abierto a Cerrado	1. Costo medio. 2. Baja corriente de arranque. 3. Menos tensión en el motor.	1. Bajo torque de arranque 2. Requiere motor que se pueda conectar en estrella.
<b>Devanado dividido</b> <i>Part winding</i>	Arrancando el motor con solo una parte del devanado y luego adicionando la otra parte para el funcionamiento.	70-80%	50-60%	Cerrado	1. Bajo costo. 2. Método de uso común para aplicaciones de nivel de torque medio. 3. Bajo mantenimiento.	1. No es bueno para arranques frecuentes. 2. Requiere motor de devanado dividido. 3. No puede cumplir la velocidad cuando arranca con carga.

\* Traducido por los autores desde su fuente original