



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN**

***“PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE ALTA EFICIENCIA”***

# **T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

AREA: ELECTRICA - ELECTRONICA

P R E S E N T A:

**CASIMIRO ZALETA LEONARDO**

**ASESOR: ING. ABEL VERDE CRUZ**

SAN JUAN DE ARAGÓN, MÉXICO 2012





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# Agradecimientos

A dios le doy gracias por darme el privilegio de tener vida, la cual aprovechare para poder explotar todos los conocimientos adquiridos en la universidad y seguir aprendiendo en el campo laboral.

Al ingeniero JOSE JUAN RAMÓN MEJÍA ROLDÁN le estaré agradecido por haberme apoyado en este proyecto el cual me instruyo y dirijo con gran paciencia al tener la astucia necesaria de haberme entendido la propuesta que tenia en mente y con su apoyo poder concluir mis estudios universitarios.

Al ingeniero ABEL VERDE CRUZ le agradezco su apoyo incondicional que me mostro para poder concluir mi proyecto de tesis.

A mis padres por haber tenido una gran paciencia y un amor muy profundo, gracias a su dedicación y gran entusiasmo por querer que yo tenga mejores oportunidades de crecimiento.

A mi única hermana le agradezco los moretones que me hizo en los brazos por que luego llegaba ebrio a mi casa y se enojaba por que decía que solo me iba hacer tonto a la escuela.

A mis amigos que de alguna manera me ayudaron y me animaron a seguir adelante en la universidad y compartieron su amistad.

A la máxima casa de estudios y ala FES Aragón, de la cual estoy orgulloso de pertenecer y por verme inculcado en las aulas y sus profesores los conocimientos y valores para mi desarrollo académico.

*Siempre estaré en deuda permanente.*

*Jamás voy a olvidaros*

**GRACIAS!!!!!!**



# Índice

Introducción	6
Capitulo 1: Tipos de motores y su clasificación	8
1.-Antecedentes históricos	8
1.1.-Clasificación de los motores	9
1.2.-Motor de corriente directa	10
1.2.1.-Motor serie	11
1.2.2.-Motor shunt	12
1.2.3.-Motor compound	13
1.3.-Motor de corriente alterna	13
1.3.1.-Motor síncrono	18
1.3.2.-Motor monofásico	22
1.3.3.-Motor trifásico	26
1.4.-Motores especiales	26
1.4.1.-Motores paso a paso	26
1.4.2.-Servomotores	30
1.4.3.-Motores sin escobillas	33



---

Capitulo 2: características y funcionamiento de los motores trifásicos	35
2.-Sistema trifásico	35
2.1.-Motor trifásico	37
2.2.-Motor de rotor devanado	39
2.3.-Motor jaula de ardilla	40
2.3.1.-Motor de inducción trifásico	42
2.4.-Motor con rotor de doble jaula de ardilla	44
2.5.-Circuito equivalente de un motor trifásico	45
2.6.-Características par-velocidad de un motor trifásico	51
2.7.-Pruebas de vacío	76
2.8.-Pruebas de rotor bloqueado	74
2.9.-Diseño de un motor trifásico	77
Capitulo 3: Motor de alta eficiencia	80
3.-Motores de inducción de alta eficiencia	80
3.1.-Diseño y fabricación	81
3.2.-menos temperatura mas fiabilidad	83
3.3.-Políticas energéticas	85
3.4.-Tipos y clasificación	88
3.4.1.-Principios de funcionamiento	89
3.4.2.-Diagrama energético del motor eléctrico	91
3.4.3.-Datos nominales de los motores eléctricos	93
3.4.4.-Sistema de fuerza	94



---

3.4.5.-Variadores de velocidad	95
3.4.6.-Metodo de ensayo en la terminación del rendimiento	96
3.5.-Selección del motor de alta eficiencia	96
3.6.- ¿Cómo se mide la eficiencia de un motor?	98
3.7.-La eficiencia determina los costos de operación del motor	100
3.8.-Tres bandas de eficiencia	101
3.8.1.-Norma anterior vs norma actual	102
3.8.2.-Perdidas del motor	102
3.8.3.-Nueva clasificación	104
Capitulo 4: Selección de motores de alta eficiencia	126
4.1.-Normas para motores comunes y normas para motores de alta eficiencia	127
4.2.- Medidas de eficiencia	131
Conclusiones	136
Bibliografía	138



# ***Introducción***

El motor eléctrico ha sido en invento más grande que puede existir algunos motores, un motor eléctrico es una máquina eléctrica que transforma energía eléctrica en energía mecánica por medio de interacciones electromagnéticas. Algunos de los motores eléctricos son reversibles, pueden transformar energía mecánica en energía eléctrica funcionando como generadores, los motores eléctricos de tracción usados en locomotoras realizan a menudo ambas tareas, si se los equipa con frenos regenerativos.

Los motores eléctricos son ampliamente utilizados en instalaciones industriales, comerciales y particulares. Pueden funcionar conectados a una red de suministro eléctrico o a baterías. Así, en automóviles se están empezando a utilizar en vehículos híbridos para aprovechar las ventajas de ambos.

El motor eléctrico también tiene infinidad de aplicaciones como por ejemplo, el motor de una batidora, el motor de una lavadora, el motor de un frigorífico, el motor de un ventilador, etc. También existe motores Trifásicos, de corriente continua, de alterna.

Si analizamos el perfil de los consumidores de energía a nivel nacional, aproximadamente el 70% de ellos son del tipo industrial; Mientras que en la industria, entre el 55 y 60% del consumo de energía, se debe a los motores eléctricos.

Los motores más comúnmente utilizados en la industria son del tipo inducción o rotor jaula de ardilla, debido a sus características tanto de operación, como estructurales.

Por lo tanto, estos motores son los mayores consumidores de energía, es necesario analizarlos más a fondo, para determinar las variadas oportunidades de ahorro de energía que en ellos se pueden aplicar.

Cuando se requiere un nuevo motor para llevar a cabo cualquier aplicación industrial, es habitual basar su selección principalmente según un criterio de costo de adquisición inicial. Sin embargo, la experiencia confirma que este criterio de elección repercute negativamente en los costos económicos futuros de su actividad mucho más pronto de lo que parece.

En el capítulo 1 se describen los antecedentes de los motores, así como su funcionamiento y sus características de cada uno de ellos y así entenderemos la importancia del uso de motores de alta eficiencia.



---

En el capítulo 2 veremos las características principales de los motores trifásicos, así como cálculos matemáticos que se les han hecho a cada uno de estos motores trifásicos que existe en el mercado, al ser utilizados en la industria y la mayoría de ellos son jaula de ardilla por lo que son baratos y de gran eficiencia.

En el capítulo 3 abordaremos un tema muy importante, las normas cuyas normas rigen a los motores y así poder identificar que clase de motor no conviene utilizar para el uso rudo que se le dará en la industria.

En este último capítulo el 4 veremos por qué la utilidad de los motores de alta eficiencia y como es que su utilidad beneficia a la industria a largo plazo comparando con un motor estándar y uno de alta eficiencia.

Por ello en este proyecto de investigación, el mencionar como funciona un motor eléctrico tendremos como fin mencionar las ventajas que nos ofrecen los motores eléctricos de alta eficiencia.



---

# Capítulo 1

## *Tipo de motores y clasificación.*

### **1.- Antecedentes históricos.**

El hombre en el transcurso del tiempo ha buscado la manera de sustituir su propia fuerza, al principio busco las formas de generar más fuerza utilizando la fuerza de los animales así obtuvo un sin fin de herramientas como las poleas y la creación de la rueda conforma transcurría el tiempo se requería de más potencia.

A principios del siglo XIX Alessandro volta (físico italiano) dio origen a la creación de la primera pila o célula electrolítica, con esto se llevo a una nueva forma de transformación de energía: la eléctrica, con esto se dio un gran paso importante para la creación del motor eléctrico.

Con el tiempo Hans Christian Oesterd (físico y químico danes) encontró la manera de producir movimiento (efecto Oesterd) cuando la corriente eléctrica cuando fluye através de un conductor produce un campo magnético Oesterd esto lo hizo cuando la aguja de una brújula cambiaba de posición al acercarla por un flujo de corriente eléctrica, con este descubrimiento se origino lo que hoy conocemos comúnmente como el electroimán.

Con los antecedentes ya descubiertos, Michael Faraday (científico británico) En 1831 trazó el campo magnético alrededor de un conductor por el que circula una corriente eléctrica (ya descubierto por Oersted), y ese mismo año descubrió la inducción electromagnética, demostró la inducción de una corriente eléctrica por otra, e introdujo el concepto de líneas de fuerza, para representar los campos magnéticos. Durante este mismo periodo, investigó sobre la electrólisis y descubrió las dos leyes fundamentales que llevan su nombre:

La masa de sustancia liberada en una electrólisis es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que ha pasado a través del electrólito  $m = c I t$

Las masas de distintas sustancias liberadas por la misma cantidad de electricidad son directamente proporcionales a sus pesos equivalentes.



Con sus investigaciones se dio un paso fundamental en el desarrollo de la electricidad al establecer que el magnetismo produce electricidad a través del movimiento.

Se denomina faradio (F), en honor a Michael Faraday, a la unidad de capacidad eléctrica del SI de unidades. Se define como la capacidad de un conductor tal que cargado con una carga de Coulomb, adquiere un potencial electrostático de un voltio. Su símbolo es F.

Ya teniendo las bases y todo lo que implicaba el manejo de la electricidad Faraday empezó su mayor invento el motor eléctrico, este prototipo de motor contaba con un eje impulsor encerrado y solo podía mantener un solo movimiento, el orbital interno por lo que no podía transferir energía mecánica al exterior y ni mucho menor poder hacer una fuerza externa; “por lo que aquel motor solo sirvió para demostrar como los campos magnéticos de un conductor y el imán interactúan para producir un movimiento continuo”.

Gracias a los descubrimientos de Faraday, al motor lo podemos ver de diferentes tamaños y con diferentes tipos de fuerza y con diferentes características tanto para crear electricidad como para crear fuerza.

## 1.1.- Clasificación de los motores

Existen varios tipos de motores y continuará proliferando nuevos tipos de motores según avance la tecnología. Pero antes de adentrarnos en la clasificación, vamos a definir los elementos que componen a los motores la estructura de una máquina eléctrica tiene dos componentes principales: el estator y el rotor que están separados por un entrehierro de cada motor.

1. La **carcasa** o caja que envuelve las partes eléctricas del motor, es la parte externa.
2. El **inductor**, llamado **estator** cuando se trata de motores de corriente alterna, consta de un apilado de chapas magnéticas y sobre ellas está enrollado el **bobinado estatórico**, que es una parte fija y unida a la carcasa.
3. El **inducido**, llamado **rotor** cuando se trata de motores de corriente alterna, consta de un apilado de chapas magnéticas y sobre ellas está enrollado el **bobinado rotórico**, que constituye la parte móvil del motor y resulta ser la salida o eje del motor. (Figura 1.)

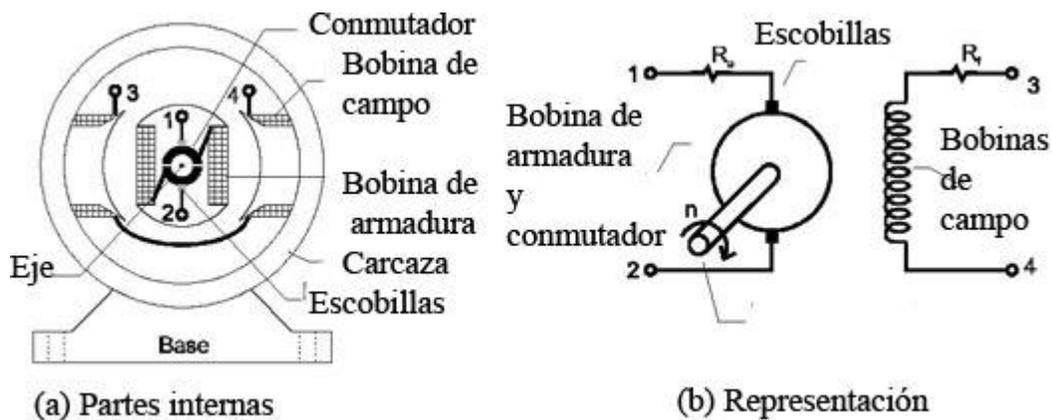


Figura 1: partes de un motor eléctrico

Otra forma en que se pueden clasificar los motores de corriente continua es por su forma de trabajar mecánicamente, existiendo dos tipos: esta se clasifica como la de tipo de cubierta que tiene y la llamada característica carga-velocidad.

- A) basados en el tipo de cubierta encontraremos el siguiente tipo de motores: el de tipo abierto, semicerrado a prueba de goteo, a prueba de agua, sumergible y a prueba de explosión.
- B) Con respecto a los motores con características carga-velocidad, pueden ser: de velocidad constante, de velocidades múltiples, velocidad ajustable, velocidad variable y de velocidad variable ajustable.

## 1.2.- Motor de corriente directa

Motores de corriente directa, suelen utilizarse cuando se necesita precisión en la velocidad, montacargas, locomoción, etc. Una máquina de corriente continua (generador o motor) se compone principalmente de dos partes, un estator que da soporte mecánico al aparato y tiene un hueco en el centro generalmente de forma cilíndrica. En el estator además se encuentran los polos, que pueden ser de imanes permanentes o devanados con hilo de cobre sobre núcleo de hierro. El rotor es generalmente de forma cilíndrica, también devanado y con núcleo, al que llega la corriente mediante dos escobillas. Figura 2





### **1.2.1.- Motor serie**

El motor serie o motor de excitación en serie, es un tipo de motor eléctrico de corriente continua en el cual el inducido y el devanado inductor o de excitación van conectados en serie. Por lo tanto, la corriente de excitación o del inductor es también la corriente del inducido absorbida por el motor.

Por esta razón, un motor serie tiene un par bastante elevado con velocidad angular baja y una velocidad sumamente levada cuando el motor esta en vacío por lo que no tiene carga.

Las principales características de este motor son:

- Se embala cuando funciona en vacío, debido a que la velocidad de un motor de corriente continua aumenta al disminuir el flujo inductor y, en el motor serie, este disminuye al aumentar la velocidad, puesto que la intensidad en el inductor es la misma que en el inducido.
- La potencia es casi constante a cualquier velocidad.
- Le afectan poco la variaciones bruscas de la tensión de alimentación, ya que un aumento de esta provoca un aumento de la intensidad y, por lo tanto, del flujo y de la fuerza contra electromotriz, estabilizándose la intensidad absorbida.

### **1.2.2.- Motor shunt**

El motor shunt o motor de excitación en paralelo es un motor eléctrico de corriente continua cuyo bobinado inductor principal está conectado en derivación o paralelo con el circuito formado por los bobinados inducido e inductor auxiliar.

Al igual que en los dinamos shunt, las bobinas principales están constituidas por muchas espiras y con hilo de poca sección, por lo que la resistencia del bobinado inductor principal es muy grande.

En el instante del arranque, el par motor que se desarrolla es menor que el motor serie, (también uno de los componentes del motor de corriente continua). Al disminuir la intensidad absorbida, el régimen de giro apenas sufre variación.

Es el tipo de motor de corriente continua cuya velocidad no disminuye más que ligeramente cuando el par aumenta. Los motores de corriente continua en derivación son adecuados para aplicaciones en donde se necesita velocidad constante a cualquier ajuste del control o en los casos en que es necesario un rango apreciable de velocidades (por



medio del control del campo). El motor en derivación se utiliza en aplicaciones de velocidad constante, como en los accionamientos para los generadores de corriente continua en los grupos motorgeneradores de corriente continua.

### **1.2.3.- Motor Compound**

Un motor compound (o motor de excitación compuesta) es un Motor eléctrico de corriente continua cuya excitación es originada por dos bobinados inductores independientes; uno dispuesto en serie con el bobinado inducido y otro conectado en derivación con el circuito formado por los bobinados: inducido, inductor serie e inductor auxiliar.

Los motores compuestos tienen un campo serie sobre el tope del bobinado del campo shunt. Este campo serie, el cual consiste de pocas vueltas de un alambre grueso, es conectado en serie con la armadura y lleva la corriente de armadura.

El flujo del campo serie varía directamente a medida que la corriente de armadura varía, y es directamente proporcional a la carga. El campo serie se conecta de manera tal que su flujo se añade al flujo del campo principal shunt. Los motores compound se conectan normalmente de esta manera y se denominan como compound acumulativo.

Esto provee una característica de velocidad que no es tan “dura” o plana como la del motor shunt, ni tan “suave” como la de un motor serie. Un motor compound tiene un limitado rango de debilitamiento de campo; la debilitación del campo puede resultar en exceder la máxima velocidad segura del motor sin carga. Los motores de corriente continua compound son algunas veces utilizados donde se requiera una respuesta estable de par constante para un rango de velocidades amplio.

El motor compound es un motor de excitación o campo independiente con propiedades de motor serie. El motor da un par constante por medio del campo independiente al que se suma el campo serie con un valor de carga igual que el del inducido. Cuantos más amperios pasan por el inducido mas campo serie se origina claro está siempre sin pasar del consumo nominal.



### 1.3.-Motor de corriente alterna

Se denomina motor de corriente alterna a aquellos motores eléctricos que funcionan con corriente alterna. Un motor es una máquina motriz, esto es, un aparato que convierte una forma determinada de energía en energía mecánica de rotación o par. Un motor eléctrico convierte la energía eléctrica en fuerzas de giro por medio de la acción mutua de los campos magnéticos.

En la actualidad, el motor de corriente alterna es el que más se utiliza para la mayor parte de las aplicaciones, debido fundamentalmente a que consiguen un buen rendimiento, bajo mantenimiento y sencillez, en su construcción, sobre todo en los motores asíncronos.

Partes básicas de un motor de corriente alterna

1. Carcasa: caja que envuelve las partes eléctricas del motor, es la parte externa.
2. Estator: consta de un apilado de chapas magnéticas y sobre ellas está enrollado el bobinado estatórico, que es una parte fija y unida a la carcasa.
3. Rotor: consta de un apilado de chapas magnéticas y sobre ellas está enrollado el bobinado rotórico, que constituye la parte móvil del motor y resulta ser la salida o eje del motor.

Los parámetros de operación de una máquina designan sus características, es importante determinarlas, ya que con ellas conoceremos los parámetros determinantes para la operación de la máquina. Las principales características de los motores de C.A. son:

1. Potencia: Es la rapidez con la que se realiza un trabajo; en física la Potencia = Trabajo/tiempo, la unidad del Sistema Internacional para la potencia es el joule por segundo, y se denomina watt (W). Sin embargo estas unidades tienen el inconveniente de ser demasiado pequeñas para propósitos industriales. Por lo tanto, se usan el kilowatt (kW) y el caballo de fuerza (HP) que se definen como:



1 kW	=	1000 W
1 HP	=	747 W = 0.746 kW
1 kW	=	1.34 HP

2. Voltaje: También llamada tensión eléctrica o diferencia de potencial, existe entre dos puntos, y es el trabajo necesario para desplazar una carga positiva de un punto a otro:

<i>Donde:</i>	E	=	Voltaje o Tensión
	$V_A$	=	Potencial del punto A
	$V_B$	=	Potencial del punto B

La diferencia de tensión es importante en la operación de una máquina, ya que de esto dependerá la obtención de un mejor aprovechamiento de la operación. Los voltajes empleados más comúnmente son: 127 V, 220 V, 380 V, 440 V, 2300 V y 6000 V.

3. Corriente: La corriente eléctrica [I], es la rapidez del flujo de carga [Q] que pasa por un punto dado [P] en un conductor eléctrico en un tiempo [t] determinado.

<i>Donde:</i>	I	=	Corriente eléctrica
	Q	=	Flujo de carga que pasa por el punto P
	t	=	Tiempo

La unidad de corriente eléctrica es el ampere. Un ampere [A] representa un flujo de carga con la rapidez de un coulomb por segundo, al pasar por cualquier punto.

Las máquinas eléctricas esgrimen distintos tipos de corriente, que fundamentalmente son: corriente nominal, corriente de vacío, corriente de arranque y corriente a rotor bloqueado.



4. Corriente nominal: En una máquina, el valor de la corriente nominal es la cantidad de corriente que consumirá en condiciones normales de operación.
5. Corriente de vacío: Es la corriente que consumirá la máquina cuando no se encuentre operando con carga y es aproximadamente del 20% al 30% de su corriente nominal.
6. Corriente de arranque: Todos los motores eléctricos para operar consumen un excedente de corriente, mayor que su corriente nominal, que es aproximadamente de dos a ocho veces superior.
7. Corriente a rotor bloqueado: Es la corriente máxima que soportara la máquina cuando su rotor esté totalmente detenido.
8. Revoluciones por minuto (R.P.M.) o velocidad angular: Se define como la cantidad de vueltas completas que da el rotor en el lapso de un minuto; el símbolo de la velocidad angular es omega [ $\omega$ ], no obstante, en la industria se utilizan también para referirse, la letras: "N" o simplemente las siglas R.P.M.

<i>Donde:</i>	W=N	=	Revoluciones por minuto o velocidad angular
		=	Constante [3.14]
	F	=	Frecuencia
	t	=	Tiempo

Las unidades de la velocidad son los radianes por segundo (rad/s), sin embargo la velocidad también se mide en metros por segundo (m/s) y en revoluciones por minuto [R.P.M.]. Para calcular las R.P.M. de un motor se utiliza la ecuación:

<i>Donde:</i>	R.P.M.	=	Revoluciones por minuto o velocidad angular
	F	=	Frecuencia

9. Factor de potencia: El factor de potencia [ $\cos \Phi$ ] se define como la razón que existe entre Potencia Real [P] y Potencia Aparente [S], siendo la potencia aparente el producto de los valores eficaces de la tensión y de la corriente:



<i>Donde:</i>	P	=	Potencia real
	S	=	Potencia aparente

El factor de potencia nunca puede ser mayor que la unidad, regularmente oscila entre 0.8 y 0.85. En la práctica el factor de potencia se expresa, generalmente, en tanto por ciento, siendo el 100% el factor máximo de potencia posible. Un factor de potencia bajo es una característica desfavorable de cualquier carga.

10. Factor de servicio: El factor de servicio de un motor se obtiene considerando la aplicación del motor, para demandarle más, o menos potencia, y depende directamente del tipo de maquinaria impulsada:

<i>Donde:</i>	P	=	Potencia	$\eta$	=	Eficiencia
	#F	=	Número de fases	F.P.	=	Factor de potencia
	E	=	Tensión	Pr	=	Potencia real
	I	=	Corriente	F.S.	=	Factor de servicio

Un generador eléctrico, por otra parte, transforma energía mecánica de rotación en energía eléctrica y se le puede llamar una máquina generatriz de fem. Las dos formas básicas son el generador de corriente continua y el generador de corriente alterna, este último más correctamente llamado alternador. (Figura 3)

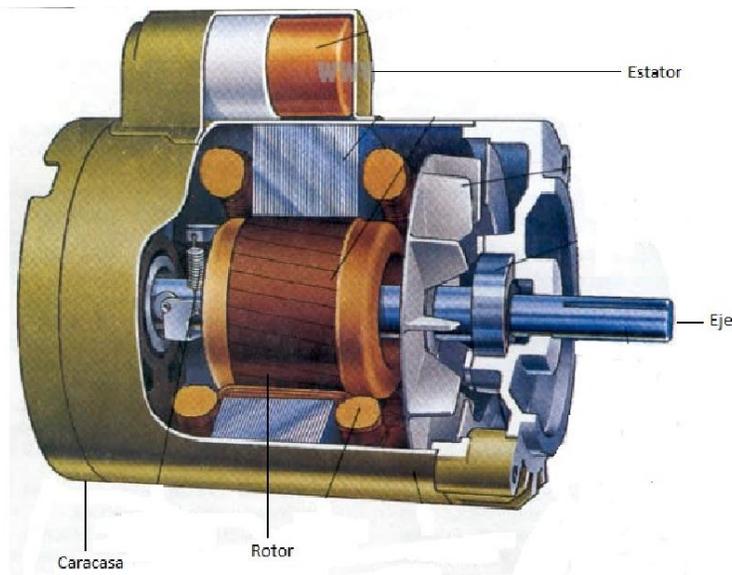


Figura 3: Generador Eléctrico

Todos los generadores necesitan una máquina motriz (motor) de algún tipo para producir la fuerza de rotación, por medio de la cual un conductor puede cortar las líneas de fuerza magnéticas y producir una fem. La máquina más simple de los motores y generadores es el alternador.

Básicamente su estructura es similar a los de corriente directa, con pequeñas diferencias en la fabricación de bobinas y del conmutador del rotor, el devanado del estator está alimentado por la corriente alterna, el devanado de este tipo de motor es alimentado por la corriente alterna por lo que el campo generado entre los polos alterna con la potencia alterna aplicada.

Un motor de corriente alterna tiene la desventaja de que en algún instante por sí mismo no puede arrancar o ponerse en marcha, porque si el rotor estuviese exactamente en una posición paralela a la del campo y la rotación no se podría efectuar debido a que la repulsión magnética sería igual en ambas direcciones de rotación y si lo hiciera tal vez no sería en la dirección correcta estos fenómenos dependen mucho de la posición que tome el rotor cuando se le aplica una potencia y para serlo es necesario impulsarlo con la mano de la dirección en la que funcione hasta llegar a que por sí solo comience a agarrar velocidad .



Para tener mayor ventaja es necesario que el campo magnético del estator gire en vez de alternar de esta manera los polos giratorios atraerían a los polos opuestos del rotor y el rotor quedaría sujeta a una posición por la atracción magnética y giraría con el campo.

### **1.3.1-Motor síncrono**

Los motores síncronos son un tipo de motor eléctrico de corriente alterna. Su velocidad de giro es constante y depende de la frecuencia de la tensión de la red eléctrica a la que esté conectada y por el número de pares de polos del motor, siendo conocida esa velocidad como "velocidad de sincronismo".

La armadura del motor síncrono es idéntica a la del generador síncrono. La alta velocidad con la que gira el campo magnético giratorio en el entrehierro, no le permite al rotor alcanzarlo desde el reposo, por eso se dice que el motor síncrono tiene un par promedio igual a cero en el arranque, por tal motivo el motor síncrono no puede arrancar por sí mismo. En consecuencia para que un motor síncrono arranque es necesario dotarlo de ciertos medios, que le permitan desarrollar un par de arranque o impulsar al rotor a una velocidad muy próxima a la síncrona mediante un impulsor (maquina primaria) y enseguida sincronizarlo, excitando el devanado de campo con corriente continua.

Tipos de adelantamientos para el arranque del motor síncrono.

- Devanado amortiguador o devanado de inducción, se coloca en las caras polares, por su forma se conoce como jaula de ardilla, y está en corto circuito.
- Devanado amortiguador tipo rotor devanado, se usa cuando se desea:

a) Controlar la velocidad del motor

b) Desarrollar un par de arranque elevado

Se coloca en la ranura del rotor, con la misma cantidad de polos que la armadura y se conecta a unos anillos rozantes, y con una resistencia externa en serie con cada devanado amortiguador se controla el par.

Los devanados amortiguadores, tanto el de inducción como el de rotor devanado evitan la oscilación (variación de velocidad) debido al aumento o disminución de la carga.



La capacidad de la mayoría de los motores síncronos oscila entre 150 Kw (200 hp) y 15 MW (20,000 hp) y giran a velocidades que van de 150 a 1800 r/min. (Figura 4)

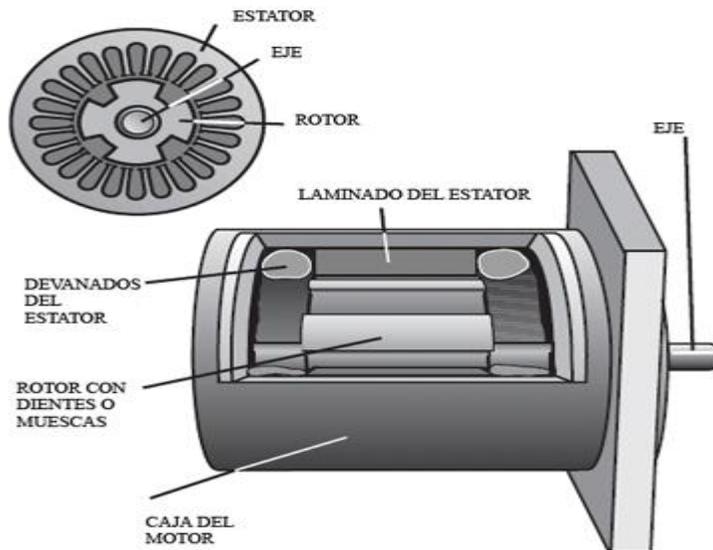


Figura 4: Motor síncrono

Como la mayoría de los motores, en especial el motor síncrono esta constituido por dos partes importantes es estator y el rotor.

El campo magnético de un motor es calculado de la misma manera que uno de inducción utilizando la siguiente ecuación:

$$n = \frac{60 \cdot f}{P} = \frac{120 \cdot f}{p}$$

Donde:

- f: Frecuencia de la red a la que está conectada el motor(Hz)
- P: Número de pares de polos que tiene el motor
- p: Número de polos que tiene el motor
- n: Velocidad de sincronismo del motor (revoluciones por minuto)



## Efecto del campo giratorio. (Figura 5)

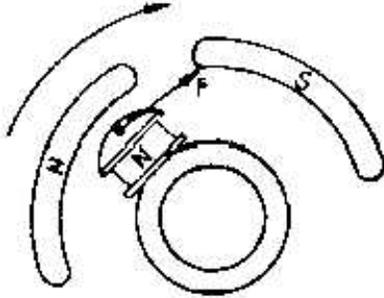


Figura 5: Efecto campo giratorio

Volvamos ahora a nuestro motor sincrónico, y vemos que debemos colocar una rueda polar que tenga tantos polos como el bobinado del estator, para que a cada norte del estator corresponda uno en el rotor, y así sucesivamente. Si hacemos girar el rotor hasta que coincida con la velocidad de sincronismo se producirán los siguientes efectos: en el momento que un polo norte de la rueda polar esta frente a un polo del devanado del estator que en ese momento tenga ni cara norte hacia adentro, se produce un rechazo entre los dos polos nortes y la masa polar del rotor será atraída por la sección de bobinado estático que está colocado inmediatamente próximo a la periferia.

Como debe haber igual cantidad de polos en el estator como en el rotor, esto mismo está sucediendo con todos los demás polos, uno de los cuales se ve en la figura 4 y como el campo giratorio gira en el sentido indicado por la flecha, el rotor girara en el mismo sentido. La fuerza que impulsa a girar al rotor está dada por la ley de atracción y repulsión de masas magnéticas, de modo que dependerá de la intensidad de los campos magnéticos de la rueda polar y del estator o lo que es lo mismo, del flujo magnético del rotor y de la intensidad de corriente en el estator. Al eje del motor se aplica el mecanismo que este debe mover, y que por lo tanto opondrá cierta resistencia al giro. Si el torque que suministra el motor es mayor que la opuesta por la resistencia mecánica, el rotor girara con velocidad constante cualquiera que sea esa resistencia puesto que la velocidad sincrónica depende de la frecuencia y número de polos, que son invariables y no de la carga.

Si el par electromagnético resistente supera ala de par electromagnético motora el movimiento se frena, deteniéndose el rotor lo que se llama *desenganche*.



Resumiendo, para poner en funcionamiento un motor sincrónico hay que provocar que la rueda polar enganche con el campo giratorio, para lo cual hay que hacerlo girar hasta alcanzar o sobrepasar la velocidad de sincronismo, dejándolo entonces libre. En esas condiciones el motor engancha y mantiene una velocidad constante, igual a la sincrónica, mientras la resistencia opuesta al movimiento no sea tan grande que provoque él desenganche. Si esto sucediera hay que volver a realizar la maniobra de puesta en marcha. De estas consideraciones se deduce que los motores sincrónicos serán aplicables en aquellos casos en que se requiera una velocidad absolutamente constante, pues su mayor costo con respecto a otros motores de corriente alternada y el inconveniente de necesitar corriente continua para los campos restringe su margen de aplicación. Posteriormente veremos que a veces se lo utiliza por su cualidad de compensador del desfase de la red.

Para las redes de 50 ciclos por segundo de frecuencia se construyen motores sincrónicos cuyo número de polos debe estar de acuerdo con la velocidad sincrónica deseada. La tabla adjunta da las velocidades respectivas:

Velocidades síncronas a 60 Hz.

Nº de Pares de Polos $p$	Velocidad sincrónica $n_s$ rev / min.	Nº de Pares de Polos $p$	Velocidad sincrónica $n_s$ rev / min.
1	3000	7	429
2	1500	8	375
3	1000	9	333
4	750	10	300
5	600	12	250
6	500	15	200

Tabla de polos y velocidades síncronas



### 1.3.2.- Motor monofásico

Un motor monofásico es que se construye en un parámetro de potencia fraccionaria (esto es menos de un caballo de fuerza), este tipo de motor solo requiere de un devanado monofásico para estar en movimiento. Un motor con este tipo de características no arranca por si solo depende básicamente de un medio que lo haga dependiendo del método o sistema empleado para la marcha de estos tipos de motores.

Para producir un campo rotatorio y un par de arranque, se debe tener un devanado auxiliar defasado  $90^\circ$  con respecto al devanado principal. Una vez que el motor ha arrancado, el devanado auxiliar se desconecta del circuito.

Debido a que un motor de corriente alterna (C.A.) monofásico tiene dificultades para arrancar, está constituido de dos grupos de devanados: El primer grupo se conoce como el devanado principal o de trabajo, y el segundo, se le conoce como devanado auxiliar o de arranque. Los devanados difieren entre sí, física y eléctricamente. El devanado de trabajo está formado de conductor grueso y tiene más espiras que el devanado de arranque.

Por lo que este tipo de motores es utilizado en electrodomésticos porque pueden funcionar con redes monofásicas algo que ocurre con nuestras viviendas.

En los motores monofásicos no resulta sencillo iniciar el campo giratorio, por lo cual, se tiene que usar algún elemento auxiliar. Dependiendo del método empleado en el arranque, podemos distinguir dos grandes grupos de motores monofásicos:

#### A) Motor monofásico de inducción:

Este tipo de motores experimenta una gran desventaja por que suele contar con una sola fase en el devanado del estator porque en este tipo de motor el campo magnético no rota por si solo en su lugar primero pulsa con gran intensidad y luego con menor intensidad pero permanece en la misma dirección pero como no existe un campo rotacional en el estator por lo que un motor monofásico de inducción no tiene par de arranque por lo que se emplea diversos métodos para iniciar el giro del rotor.

#### B) Motor de fase partida:

Este tipo de motores de inducción es mas utilizando para aplicaciones mecánicas que dependen de potencias en fracciones de caballos de fuerza tiene dos devanados bien diferenciados, un devanado principal y otro devanado auxiliar. El devanado auxiliar es el que provoca el arranque del motor, gracias a que desfasa un flujo magnético respecto al



flujo del devanado principal, de esta manera, logra tener dos fases en el momento del arranque.

Al tener el devanado auxiliar la corriente desfasada respecto a la corriente principal, se genera un campo magnético que facilita el giro del rotor. Cuando la velocidad del giro del rotor acelera el par de motor aumenta. Cuando dicha velocidad está próxima al sincronismo, se logran alcanzar un par de motor tan elevado como en un motor trifásico, o casi. Cuando la velocidad alcanza un 75 % de sincronismo, el devanado auxiliar se desconecta gracias a un interruptor centrífugo que llevan incorporados estos motores de serie, lo cual hace que el motor solo funcione con el devanado principal. (Figura 6)

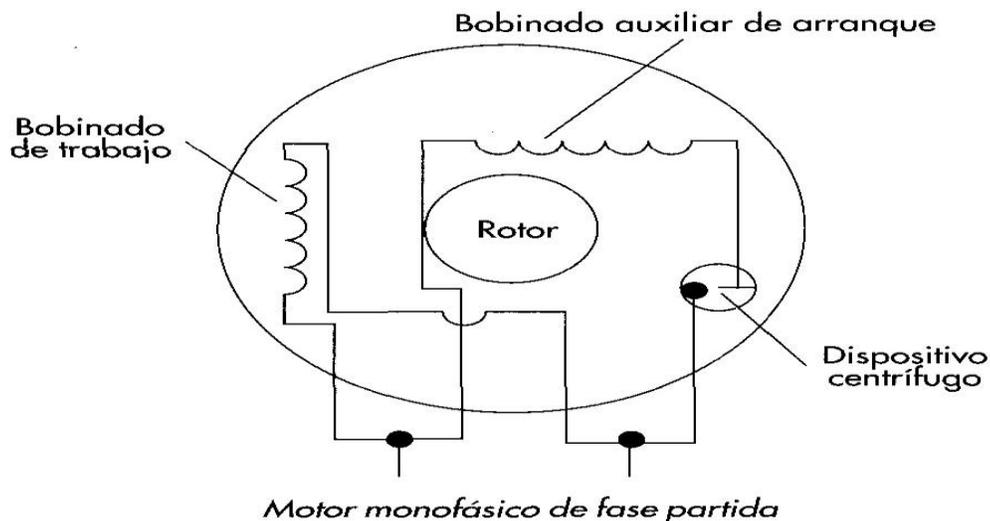


Figura 6: Motor monofásico de fase partida

En este tipo de motor podemos ver que los devanados de fase están arrollados con espaciamiento en cuadratura y conduce corrientes fuera de fase, estableciendo un campo rotatorio no equilibrado por lo que le permite que el motor arranque.

El par de arranque de este tipo de motor de fase dividida es por lo general de 150% a 200% del par a plena carga.



---

El par de motor de éstos motores oscila entre 1500 y 3000 r.p.m., dependiendo si el motor es de 2 ó 4 polos, teniendo unas tensiones de 125 y 220 V. La velocidad es prácticamente constante. Para invertir el giro del motor se intercambian los cables de uno solo de los devanados (principal o auxiliar), algo que se puede realizar fácilmente en la caja de conexiones o bornes que viene de serie con el motor.

### C) Motor de arranque por capacitor

Este tipo de motor es similar en su construcción al de fase partida, excepto que se conecta un capacitor en serie con el devanado de arranque para tener un mayor par de arranque. Su rango de operación va desde fracciones de HP hasta 15 HP. Es utilizado ampliamente en muchas aplicaciones de tipo monofásico, tales como accionamiento de máquinas herramientas (taladros, pulidoras, etcétera), compresores de aire, refrigeradores etc.

### D) Motores con permanente:

Utilizan un capacitor conectado en serie con los devanados de arranque y de trabajo. El crea un retraso en el devanado de arranque, el cual es necesario para arrancar el motor y para accionar la carga. La principal diferencia entre un motor con permanente y un motor de arranque con capacitor, es que no se requiere switch centrífugo. Éstos motores no pueden arrancar y accionar cargas que requieren un alto par de arranque.

### E) Motores de inducción-repulsión:

Los motores de inducción-repulsión se aplican donde se requiere arrancar cargas pesadas sin demandar demasiada corriente. Se fabrican de 1/2 HP hasta 20 HP, y se aplican con cargas típicas como: compresores de aire grandes, equipo de refrigeración, etc.

### F) Motores de polos sombreados:

Este tipo de motores es usado en casos específicos, que tienen requerimientos de potencia muy bajos. Su rango de potencia está comprendido en valores desde 0.0007 HP hasta 1/4 HP, y la mayoría se fabrica en el rango de 1/100 a 1/20 de HP. La principal ventaja de estos motores es su simplicidad de construcción, su confiabilidad y su robustez, además, tienen un bajo costo. A diferencia de otros motores monofásicos de C.A., los motores de fase partida no requieren de partes auxiliares (capacitores, escobillas,



conmutadores, etc.) o partes móviles (switches centrífugos). Esto hace que su mantenimiento sea mínimo y relativamente sencillo.

#### G) Motores universales:

Este tipo de motores son creados para funcionar con corriente alterna y corriente continua estos motores tiene la mismas características en cuanto a velocidad y par cuando funcionan en corriente alterna o en corriente continua los motores pequeños no requieren devanados compensadores debido al que el numero de espiras de su armadura es reducido y por lo tanto también será su reactancia de armadura.

Los motores universales grandes tienen un tipo de compensación por lo que utiliza un devanado compensador del motor u otro devanado de campo distribuido especialmente para contrarrestar los problemas de la reacción de armadura cuando este motor se conecta a una fuente de corriente continua es unidireccional en ambos devanados, del campo y de la armadura. Por lo que este tipo de motor tiene un flujo producido por cada polo que tiene y la dirección de la corriente permanece siempre en la misma dirección.

### **1.3.3.-Motor trifásico**

Los motores trifásicos usualmente son más utilizados en la industria, ya que en el sistema trifásico se genera un campo magnético rotatorio en tres fases, además de que el sentido de la rotación del campo en un motor trifásico puede cambiarse invirtiendo dos puntas cualesquiera del estator, lo cual desplaza las fases, de manera que el campo magnético gira en dirección opuesta.

### **1.4.-Motores especiales**

Este tipo de motores son especiales por que su uso o funcionamiento es diferente al de uno de uso normal ya que estos tipos de motores son construidos con especificaciones diferentes a los de un motor normal, ya que estos motores desarrollan un trabajo más específico, pero su construcción es la misma que la de unos de características grandes.

#### **1.4.1.-Motores pasó a paso**

Este tipo de motores un que su principio es el de un motor síncrono, diseñado para girar a un determinado número de grados dependiendo de cada pulso eléctrico recibido por su unidad de control este control define el numero de vueltas que puede dar el motor, estos motores son ideales para movimientos muy precisos.



La característica principal de estos motores es el hecho de poder moverlos un paso a la vez por cada pulso que se le aplique. Este paso puede variar desde  $90^\circ$  hasta pequeños movimientos de tan solo  $1.8^\circ$ , es decir, que se necesitarán 4 pasos en el primer caso ( $90^\circ$ ) y 200 para el segundo caso ( $1.8^\circ$ ), para completar un giro completo de  $360^\circ$ .

Estos motores poseen la habilidad de poder quedar enclavados en una posición o bien totalmente libres. Si una o más de sus bobinas están energizadas, el motor estará enclavado en la posición correspondiente y por el contrario quedará completamente libre si no circula corriente por ninguna de sus bobinas.

#### Principio de funcionamiento

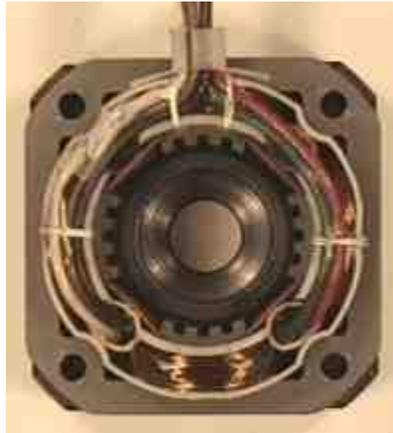
Básicamente estos motores están constituidos normalmente por un rotor sobre el que van aplicados distintos imanes permanentes y por un cierto número de bobinas excitadoras bobinadas en su estator.

Las bobinas son parte del estator y el rotor es un imán permanente. Toda la conmutación (o excitación de las bobinas) deber ser externamente manejada por un controlador. (Figura 7)



*Imagen del rotor*

Figura 7(a): Rotor de un motor pasó a paso



**Imagen de un estator de 4 bobinas**

Figura 7 (b): Estator de 4 bobinas de un motor pasó a paso

Existen dos tipos de motores paso a paso de imán permanente:

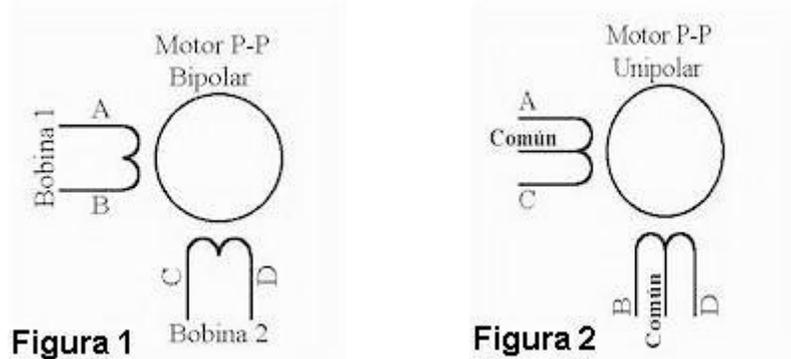


Figura 8: circuito de un motor pasó a paso bipolar y unipolar

- **Bipolar:** Estos tiene generalmente cuatro cables de salida (ver figura 1). Necesitan ciertos trucos para ser controlados, debido a que requieren del cambio de dirección del flujo de corriente a través de las bobinas en la secuencia apropiada para realizar un movimiento.

En la figura 9 podemos apreciar un ejemplo de control de estos motores mediante el uso de un puente en H (H-Bridge). Como se aprecia, será necesario un H-Bridge por cada bobina del motor, es decir que para controlar un motor Pasó a Pasó de 4 cables (dos bobinas), necesitaremos usar dos H-Bridges iguales al de la figura 9. El circuito de la figura 9 es a modo ilustrativo y no corresponde con exactitud a un H-Bridge. En general es recomendable el uso de H-Bridge integrados como son los casos del L293 (figura 9).

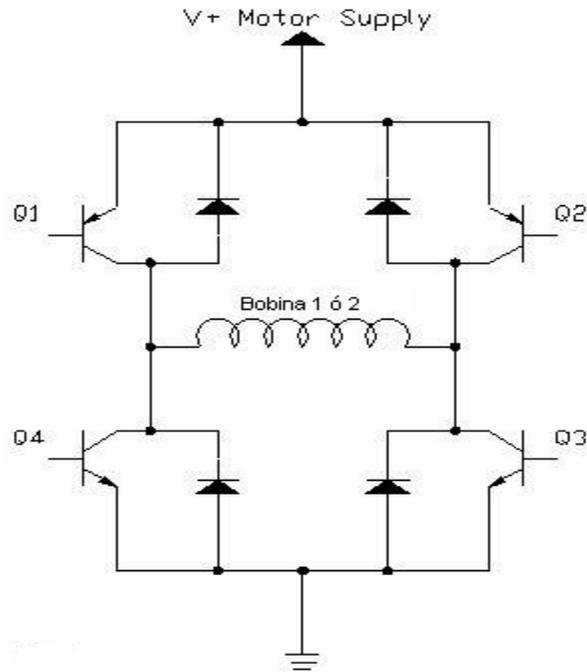


Figura 9: Circuito de un motor pasó a paso con 1 o 2 bobinas

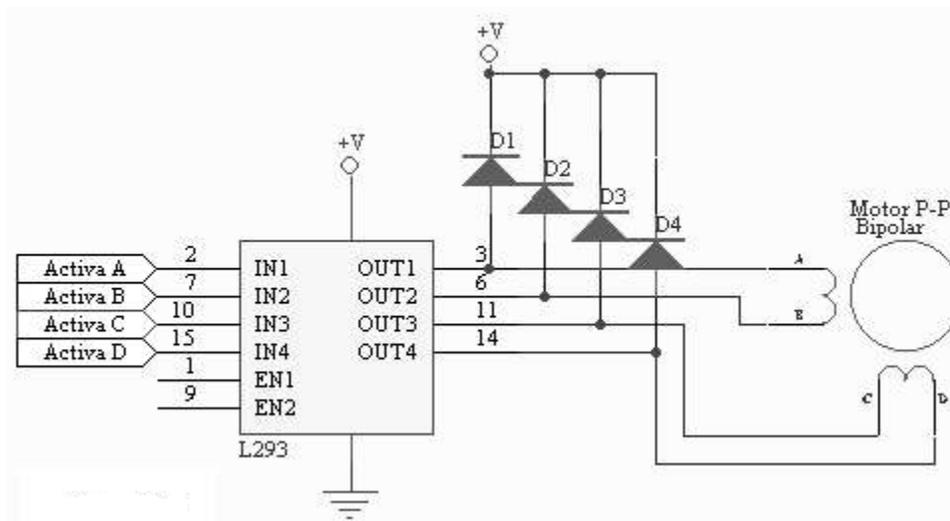


Figura 10: motor pasó a paso con el integrado L293

- **Unipolar:** Estos motores suelen tener 6 o 5 cables de salida, dependiendo de su conexionado interno (ver figura 2). Este tipo se caracteriza por ser más simple de controlar. En la figura 10 podemos apreciar un ejemplo de conexionado para controlar un motor paso a paso unipolar mediante el uso de un ULN2803, el cual



es una relay de 8 transistores tipo Darlington capaces de manejar cargas de hasta 500mA. Las entradas de activación (Activa A, B , C y D) pueden ser directamente activadas por un micro controlador. (figura 9)

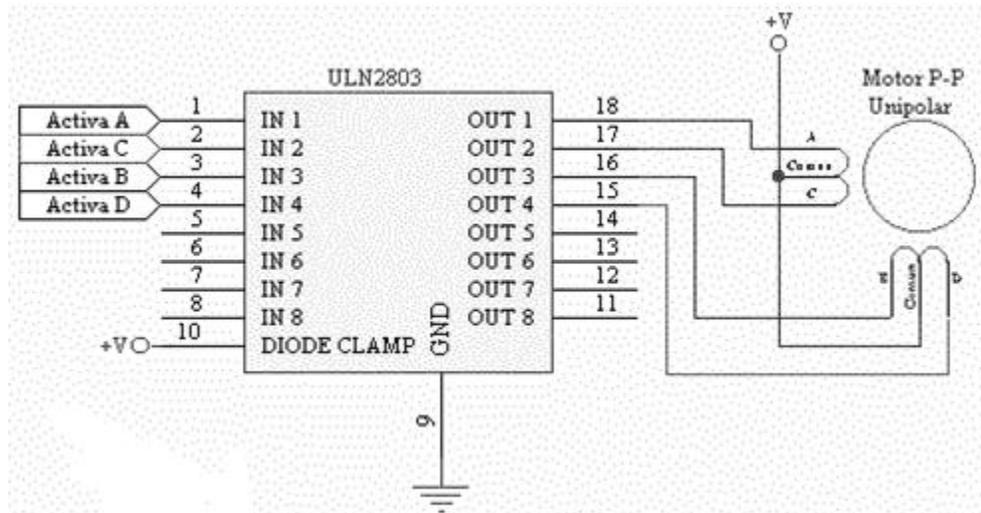


Figura 11: Motor pasó a paso con el integrado ULN2803

## 1.4.2.- Servomotores

Un servomotor (también llamado Servo) es un dispositivo similar a un motor de corriente continua, que tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación, y mantenerse estable en dicha posición. Está conformado por un motor, una caja reductora y un circuito de control. Los servos se utilizan frecuentemente en sistemas de radio control y en robótica, pero su uso no está limitado a estos. Es posible modificar un servomotor para obtener un motor de corriente continua que, si bien ya no tiene la capacidad de control del servo, conserva la fuerza, velocidad y baja inercia que caracteriza a estos dispositivos.(Figura 10)

### TIPOS DE SERVOMOTORES

Hay tres tipos de servomotores:

- Servomotores de CC
- Servomotores de AC
- Servomotores de imanes permanentes

### PARTES DE UN SERVOMOTOR

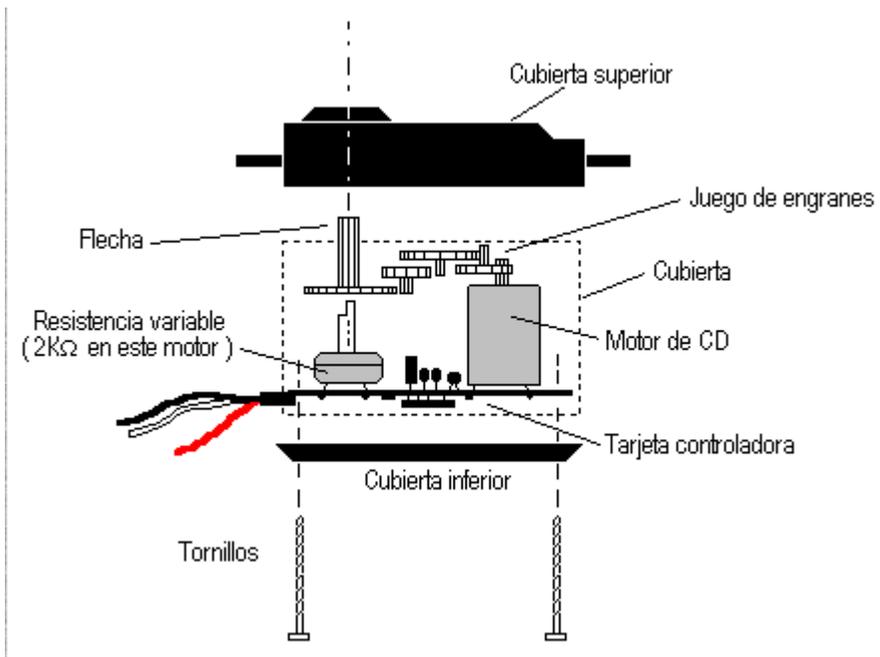


Figura 12: "Estructura típica"

- Motor de corriente continua

Es el elemento que le brinda movilidad al servo. Cuando se aplica un potencial a sus dos terminales, este motor gira en un sentido a su velocidad máxima. Si el voltaje aplicado sus dos terminales es inverso, el sentido de giro también se invierte.

- Engranajes reductores

Se encargan de convertir gran parte de la velocidad de giro del motor de corriente continua en torque.

- Circuito de control

Este circuito es el encargado del control de la posición del motor. Recibe los pulsos de entrada y ubica al motor en su nueva posición dependiendo de los pulsos recibidos. (Figura 13)



Figura 13: "Circuito de control"

Tiene además de los circuitos de control un potenciómetro conectado al eje central del motor. Este potenciómetro permite a la circuitería de control, supervisar el ángulo actual del servo motor. Si el eje está en el ángulo correcto, entonces el motor está apagado. Si el circuito chequea que el ángulo no es correcto, el motor volverá a la dirección correcta, hasta llegar al ángulo que es correcto. El eje del servo es capaz de llegar alrededor de los 180 grados. Normalmente, en algunos llega a los 210 grados, pero varía según el fabricante.

Un servo normal se usa para controlar un movimiento angular de entre 0 y 180 grados. Un servo normal no es mecánicamente capaz de retornar a su lugar, si hay un mayor peso que el sugerido por las especificaciones del fabricante.

Los servomotores tienen 3 terminales:

- Terminal positivo: Recibe la alimentación del motor (4 a 8 voltios)
- Terminal negativo: Referencia tierra del motor (0 voltios)
- Entrada de señal: Recibe la señal de control del motor

Los colores del cable de cada terminal varían con cada fabricante: el cable del terminal positivo siempre es rojo; el del terminal negativo puede ser marrón o negro; y el del terminal de entrada de señal suele ser de color blanco, naranja o amarillo. (Figura 12)

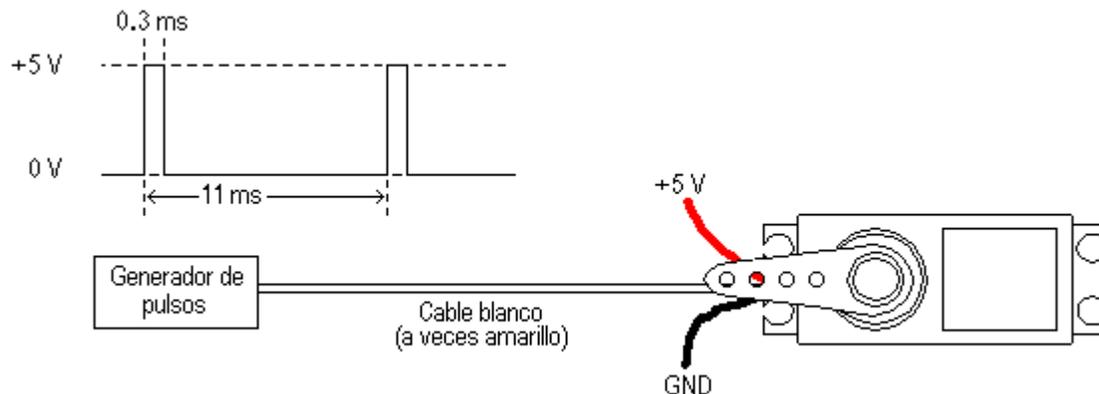


Figura 14: "Conexión externa del servo"

### 1.4.3.-Motores sin escobillas

Un motor eléctrico sin escobillas o motor *brushless* es un motor eléctrico que no emplea escobillas para realizar el cambio de polaridad en el rotor.

Los motores eléctricos solían tener un colector de delgas o un par de anillos rozantes. Estos sistemas, que producen rozamiento, disminuyen el rendimiento, desprenden calor y ruido, requieren mucho mantenimiento y pueden producir partículas de carbón que manchan el motor de un polvo que, además, puede ser conductor.

Los primeros motores sin escobillas fueron los motores de corriente alterna asíncronos. Hoy en día, gracias a la electrónica, se muestran muy ventajosos, ya que son más baratos de fabricar, pesan menos y requieren menos mantenimiento, pero su control era mucho más complejo. Esta complejidad prácticamente se ha eliminado con los controles electrónicos.

El inversor debe convertir la corriente alterna en corriente continua, y otra vez en alterna de otra frecuencia. Otras veces se puede alimentar directamente con corriente continua, eliminado el primer paso. Por este motivo, estos motores de corriente alterna se pueden usar en aplicaciones de corriente continua, con un rendimiento mucho mayor que un motor de corriente continua con escobillas. Algunas aplicaciones serían los coches y aviones con radiocontrol, que funcionan con pilas.

Otros motores sin escobillas, que sólo funcionan con corriente continua son los que se usan en pequeños aparatos eléctricos de baja potencia, como lectores de CD-ROM, ventiladores de ordenador, cassetes, etc. Su mecanismo se basa en sustituir la



conmutación (cambio de polaridad) mecánica por otra electrónica sin contacto. En este caso, la espira sólo es impulsada cuando el polo es el correcto, y cuando no lo es, el sistema electrónico corta el suministro de corriente. Para detectar la posición de la espira del rotor se utiliza la detección de un campo magnético. Este sistema electrónico, además, puede informar de la velocidad de giro, o si está parado, e incluso cortar la corriente si se detiene para que no se queme. Tienen la desventaja de que no giran al revés al cambiarles la polaridad (+ y -). Para hacer el cambio se deberían cruzar dos conductores del sistema electrónico.

Un sistema algo parecido, para evitar este rozamiento en los anillos, se usa en los alternadores. En este caso no se evita el uso de anillos rozantes, sino que se evita usar uno más robusto y que frenaría mucho el motor. Actualmente, los alternadores tienen el campo magnético inductor en el rotor, que induce el campo magnético al estator, que a la vez es inducido. Como el campo magnético del inductor necesita mucha menos corriente que la que se va generar en el inducido, se necesitan unos anillos con un rozamiento menor. Esta configuración la usan desde pequeños alternadores de coche hasta los generadores de centrales con potencias del orden del megavatio.



## Capítulo 2

### Características y funcionamiento de los motores trifásicos

#### 2.- Sistema trifásico

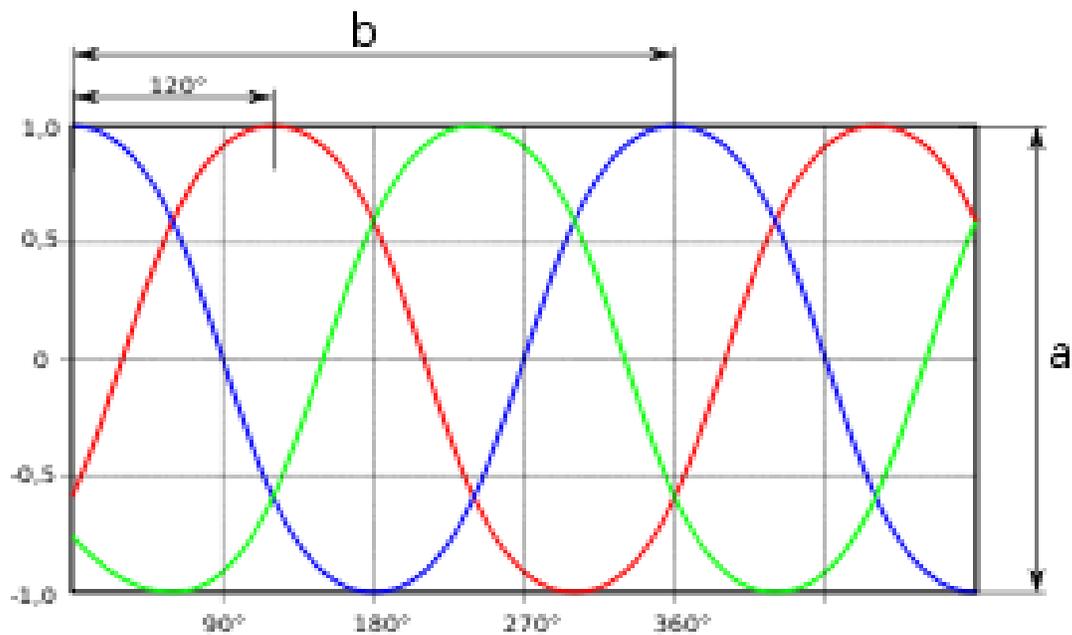


Figura 15: Voltaje de las fases de un sistema trifásico. Entre cada una de las fases hay un desfase de  $120^\circ$

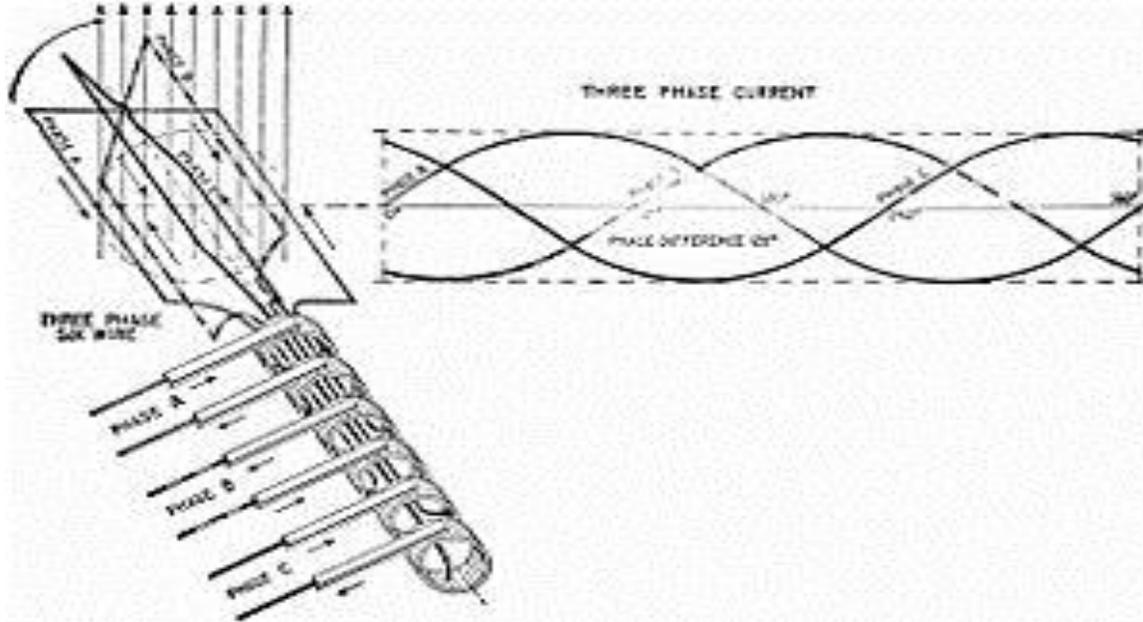


Figura 16: Alternador elemental de seis-hilos tres-fases, donde cada fase usa un par separado de hilos de transmisión.

En ingeniería eléctrica un sistema trifásico es un sistema de producción, distribución y consumo de energía eléctrica formado por tres corrientes alternas monofásicas de igual frecuencia y amplitud (y por consiguiente, valor eficaz) que presentan una cierta diferencia de fase entre ellas, en torno a  $120^\circ$ , y están dadas en un orden determinado. Cada una de las corrientes monofásicas que forman el sistema se designa con el nombre de fase.

Un sistema trifásico de tensiones se dice que es *equilibrado* cuando sus corrientes son iguales y están desfasados simétricamente.

Cuando alguna de las condiciones anteriores no se cumple (tensiones diferentes o distintos desfases entre ellas), el sistema de tensiones es un desequilibrado o más comúnmente llamado un *sistema desbalanceado*.

Recibe el nombre de sistema de cargas desequilibradas el conjunto de impedancias distintas que dan lugar a que por el receptor circulen corrientes de amplitudes diferentes o con diferencias de fase entre ellas distintas a  $120^\circ$ , aunque las tensiones del sistema o de la línea sean equilibradas o balanceadas.



El sistema trifásico presenta una serie de ventajas como son la economía de sus líneas de transporte de energía (hilos más finos que en una línea monofásica equivalente) y de los transformadores utilizados, así como su elevado rendimiento de los receptores, especialmente motores, a los que la línea trifásica alimenta con potencia constante y no pulsada, como en el caso de la línea monofásica.

Los generadores utilizados en centrales eléctricas son trifásicos, dado que la conexión a la red eléctrica debe ser trifásica (salvo para centrales de poca potencia). La trifásica se usa mucho en industrias, donde las máquinas funcionan con motores para esta tensión.

Existen dos tipos de conexión; en *triángulo* y en *estrella*. En estrella, el neutro es el punto de unión de las fases. Figura15

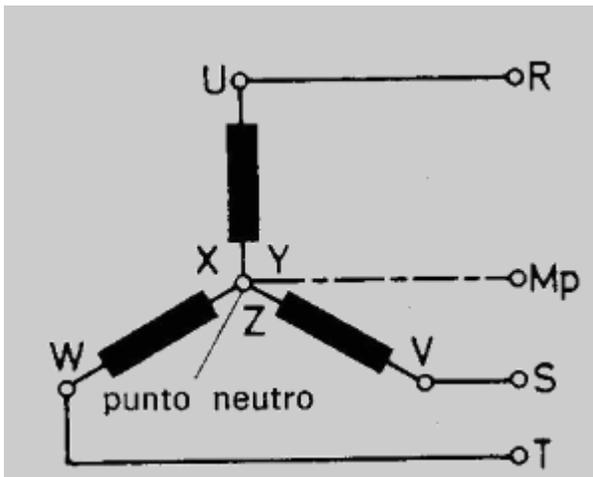


Figura 17: diagrama de conexión estrella

## 2.1.- Motor trifásico

Dentro de los motores trifásicos, nos encontramos la clasificación de los motores asíncronos y síncronos.

No hay que olvidar que los motores bifásicos y monofásicos, también son de corriente alterna.

Los motores trifásicos tienen ciertas características comunes:

**En relación con su tensión**, estos motores cuando su utilidad es industrial suelen ser de 230 V y 400 V, para máquinas de pequeña y mediana potencia, siendo considerados de baja tensión. No sobrepasan los 600 KW a 1500 r.p.m.

Los motores de mayor tensión, de 500, 3000, 5000, 10000 y 15000 V son dedicados para



grandes potencias y los consideramos como motores de alta tensión.

Los motores que admiten las conexiones estrella y triángulo, son alimentados por dos tensiones diferentes, 230 V y 400 V, siendo especificado en su placa de características.

**Respecto a su frecuencia** tenemos que decir que en Europa se utilizan los 50 Hz, mientras que en América se utilizan los 60 Hz.

Aunque la frecuencia de red tenga fluctuaciones, siempre que no superen el 1%, el motor rendirá perfectamente. Mayores fluctuaciones afectará directamente sobre el rendimiento de su potencia. De hecho, para variar la velocidad de esta clase de motores se manipula la frecuencia.

**Con respecto a la velocidad** los motores trifásicos son construidos para velocidades determinadas que corresponden directamente con las polaridades del bobinado y la frecuencia de la red.

**Respecto a la intensidad**, el motor trifásico absorbe de la red la intensidad que necesita, dependiendo siempre de la fase en que se encuentre. Por ésta razón existen diferentes modos de arranques, para ahorrar energía y preservar el motor.

**En sobrecarga** pueden asumir un incremento de la intensidad de hasta 1.5 la intensidad nominal sin sufrir ningún daño durante dos minutos.

También se tienen que tener en cuenta las pérdidas que tienen los motores trifásicos, sus causas son varias. El rendimiento de los motores se calculan en sus valores nominales, que son los indicados en las placas de características. Presentan pérdidas de entrehierro, por rozamiento, por temperatura y en el circuito magnético.

Los rotores de jaula de ardilla (con rotor en cortocircuito) son los más usados por su precio y su arranque. En cambio, los motores de rotor bobinado o también llamados de anillos rozantes necesitan ser arrancados con resistencias rotóricas, lo que incrementa su precio y su complejidad.

Los motores de rotor cortocircuitado no llevan escobillas, pero si las llevan los que son de colector y de rotor devanado.



## 2.2.-Motor de rotor devanado

El rotor devanado o bobinado, como su nombre lo indica, lleva unas bobinas que se conectan a unos anillos deslizantes colocados en el eje; por medio de unas escobillas se conecta el rotor a unas resistencias que se pueden variar hasta poner el rotor en corto circuito al igual que el eje de jaula de ardilla. Figura 18

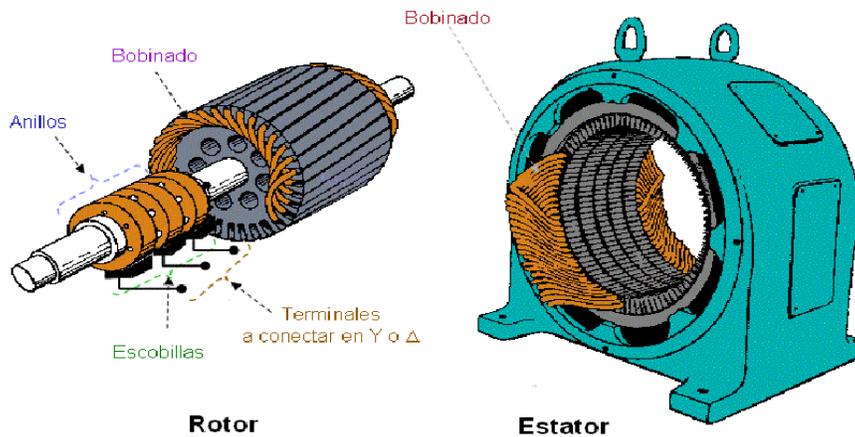


Figura 18: rotor devanado o bobinado

Este tipo de motor es necesario utilizarlo cuando la carga requiere un par de arranque alto, en caso de estos motores deben tener tantos polos y fases como el estator en realidad la colocación de las bobinas en un rotor devanado no es diferente de la de un estator, los devanados de un rotor están conectados internamente para formar una conexión neutral así los extremos están conectados a los anillos rozantes, en donde al deslizarse las escobillas es posible agregar resistencias externas en el circuito del rotor al hacerlo realmente esta controlándose el par que desarrolla el motor.

La velocidad que logra desarrollar un motor depende de la resistencia del rotor al desarrollar el par máximo conforme se va aumentando la resistencia del rotor, la velocidad crítica disminuye. Para poder obtener el par máximo del motor es poniendo la cantidad exacta de resistencia en el circuito del rotor, la desventaja de este tipo de motor es que es muy caro y menos eficiente que uno que de jaula de ardilla con las mismas



características, por lo que este tipo de motores solo es utilizado para que el motor jaula de ardilla obtenga su mayor par de arranque alto.

Cuando el devanado del estator de un motor de inducción se conecta a una fuente de potencia, este produce un campo magnético que es de magnitud constante y gira alrededor de la periferia del rotor a la velocidad síncrona.

Este campo rotatorio induce fuerza electromotriz en el devanado del rotor, como el devanado forma un lazo cerrado, la fem inducida en cada una de las bobinas da a origen a una corriente inducida en ellas. Cuando la bobina conductora de corriente se le introduce un campo magnético el rotor empieza a girar y empieza a tener una fuerza muy grande a esto se le llama par de arranque, si el par de la carga es menor que el par de arranque empezara a girar, y la rotación del rotor está en la misma dirección que el campo rotatorio.

Sin carga, el rotor alcanza pronto la velocidad casi igual a la síncrona, pero las bobinas no podrán girar por se quedarían de manera estacionaras con respecto al campo y por lo que no habría una fem inducida. Con la ausencia de la fem las bobinas no se podrán mover con facilidad por lo que no alcanzaría a tener una fuerza fuerte sino una débil por lo que tendría que disminuir su velocidad, pero en cuanto el rotor empieza a reducir la velocidad el proceso de inducción se presenta de nuevo.

El rotor gira a una velocidad menor que la síncrona del campo rotatorio, un motor de inducción también se le denomina motor asíncrono.

### **2.3.- Motor jaula de ardilla**

Este tipo de motor ha sido muy relevante dentro de la industria por su simplicidad, constitución robusta y bajo costo de fabricación, así mismo como la incorporación de componentes electrónicos para su mejor funcionamiento y a su vez le brinda mejores ajustes de frecuencia específicos por lo que estos motores se les brinda mejores ventajas por lo que estos motores son los que se mantienen en el liderazgo.

El rotor de este tipo de motores esta hecho principalmente por barras conductoras que están en paralelo con el eje y en corto circuito, por medio de los anillos en los extremos, lo que le ayuda a tener un mejor soporte físico. Figura 19

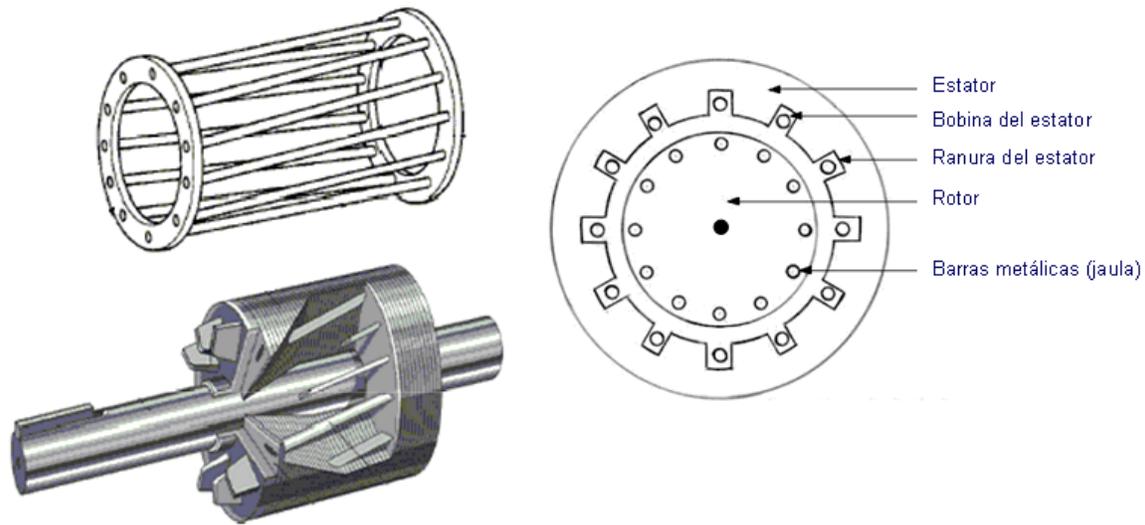


Figura 19: Motor jaula de ardilla

Cuando se empezó a hacer este tipo de motores el rotor de doble jaula de ardilla se creó una gran variedad y adaptabilidad en el diseño de los rotores para motores de inducción que ha llevado a diversas características de curva deslizamiento – par. Al dar la proporción correcta al devanado de doble jaula de ardilla, los fabricantes han desarrollado numerosas variaciones del diseño del rotor de vaciado o normal único. Estas variaciones tienen por consecuencia pares de arranque mayores a menores que el diseño normal y también menores de arranque.

El rotor jaula de ardilla es empleado tanto en los motores de inducción trifásicos, estos motores emplea un ingenioso esquema en la colocación de tres devanados de fase idénticos, espaciados en  $120^\circ$  eléctricos entre si excitados por medio de un suministro trifásico equilibrado, así como en los motores de inducción monofásico.



### **2.3.1.-Motor de inducción trifásico**

Para poder distinguir entre diversos tipos de motores de inducción trifásicos, la NEMA (National Electrical Manufacturers Association) a desarrollado un sistema para identificar cada tipo de motores con letras en las cuales se manifiesta el tipo de motor comercial de inducción jaula de ardilla que ahí , esta asociación determina la norma y el diseño y para poder identificar qué tipo de motor es se le ponen letras del alfabeto empezando desde la A asta la F así se clasifica y obtenemos las características de los motores para sus aplicaciones.

#### **Motor clase A**

Un motor clase A se considera estándar y es apropiado para aplicaciones de velocidad constante .El motor puede arrancar aplicando voltaje especificado. Desarrolla un par de arranque de 125 a 175 % del par a plena carga. La corriente de arranque al voltaje especificado es de  $n_5$  a 7 veces la corriente especificada .El deslizamiento de la carga es siempre menor que 5% devanado que la resistencia del rotor es relativamente baja, la regulación de la velocidad es de 2 a 4%.

Las barras del rotor están colocadas cerca de la superficie de las laminaciones del rotor con objeto de reducir la reactancia de dispersión .Estos motores impulsan carga de inercia baja y poseen aceleraciones altas. Se emplean en aplicaciones como ventilado, sopladores, bombas centrifugas y maquinas-herramientas.

#### **Motor clase B**

Un motor clase B se considera de propósito general y puede arrancar aplicando el voltaje especificado. La resistencia del rotor para un motor clase B es un tanto más elevada que la de una clase A. Los conductores del rotor están colocados con mayor profundidad en las ranuras que los de un motor clase A, por tanto la reactancia del rotor de un motor clase B es mayor que la de la clase A.

Cabe mencionar que el incremento en la reactancia del rotor reduce el par de arranque, en tanto que un incremento de la resistencia del rotor, aumenta el par de arranque. Por ende el rango del par de arranque para un motor clase B es casi el mismo para uno de clase A, debido al aumento de reactancia la corriente de arranque es aproximadamente 4.5 a 5.5 veces la corriente a plena carga.



La baja corriente de arranque y el par de arranque casi igual a los de los motores clase B sean apropiados para aplicaciones de clase A , en consecuencia los motores clase B pueden sustituir a los de clase 4 a en todas las aplicaciones .La regulación de la velocidad para los motores clase B es de 3 a 5%.

### **Motores clase C**

Generalmente un motor clase c tiene un rotor de doble jaula y está diseñado para arrancar con voltaje pleno .La resistencia elevada del rotor limita la corriente de arranque entre 3.5 y 5 veces la corriente a plena carga. El par de arranque es de 200 a 275% del par a plena carga. La regulación de velocidad es de 4 a 5 %.Los motores clase c se emplean en aplicaciones que requieren pares de arranque elevados, como bombas de compresión, trituradoras, bandas transportadoras maquinaria textil y equipo para manejar madera.

### **Motor clase D**

Uno motor clase d se caracteriza por su alta resistencia, capaz de desarrollar un par de arranque de 250 a 300% del par especificado la alta resistencia del rotor se crea utilizando aleaciones de alta resistencia para construir las barras del rotor y reduciendo el área transversal de la barra, según el diseño, la corriente de arranque puede ser de 3 a 8 veces la corriente especificada .La eficiencia de un motor clase D es menor que la eficiencia de los motores clase A , B y C la regulación de la velocidad puede ser tan alta como 10% , estos motores se usan en aplicaciones como excavadoras, maquinas cizalladoras, troqueladoras ,estampadoras equipo de lavandería y montacargas.

### **Motor clase E**

En general, los motores clase E tienen un par de arranque bajo y operan con bajo deslizamiento con la carga específica. La corriente de arranque es relativamente baja para motores de menos 7.5 caballos de fuerza .Estos motores pueden arrancar con el voltaje nominal (o especificado). Sin embargo para motores de mas de 7.5 caballos de fuerza , la corriente de arranque puede ser suficientemente alta para exigir un circuito de arranque a voltaje reducido .



## Motores clase F

Un motor clase F generalmente es de doble jaula. Es un motor de par bajo y de todos los motores es el que necesita la corriente de arranque mas baja. El par de arranque suele ser 1.25 veces el par especificado en tanto que la corriente de arranque es de 2 a 4 veces la corriente nominal. La regulación de la velocidad es superior a 5%. Estos motores se pueden arrancar aplicando el voltaje especificado, están diseñados para remplazar a los motores clase B y se construyen en tamaños mayores de 25 caballos de fuerza.

### 2.4.-Motor con rotor en doble jaula de ardilla

El rotor de estos motores está constituido por dos jaulas, una externa de menor sección y material de alta resistividad y otra interna de sección mayor y material de baja resistividad, ambas jaulas están separadas entre sí en cada ranura por medio de una rejilla que aumenta el flujo de dispersión en la jaula inferior, de este modo se consigue una jaula exterior de alta resistencia y baja reactancia y una jaula interior de baja resistencia y alta reactancia.

En el arranque (la reactancia predomina sobre la resistencia, pues  $f$  es más grande) la corriente fluye en su mayor parte por la jaula exterior (menor reactancia).

A la velocidad nominal (las resistencias predominan sobre la reactancia,  $f$  es muy pequeña) la corriente fluye en su mayor parte por la jaula interior (menor resistencia).

Con todo esto se consigue que en el arranque la resistencia sea alta, lo que implica un par de arranque muy alto y baja intensidad y a la velocidad nominal, como la resistencia es baja se tiene un buen rendimiento. Figura 20

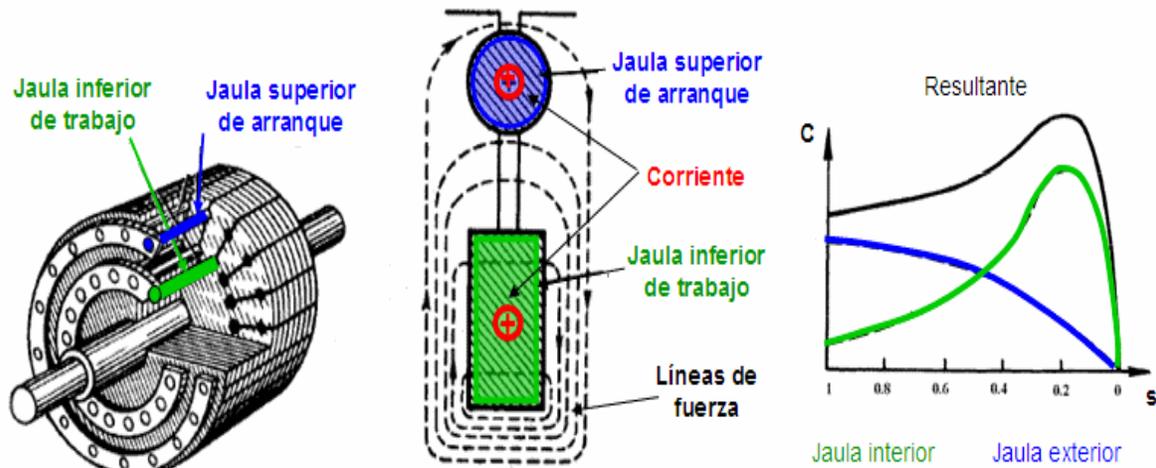


Figura 20: Motor con rotor en doble jaula de ardilla

## 2.5.-Circuito equivalente de un motor trifásico

Para poder operar un motor trifásico depende de la inducción de voltaje y corrientes en su circuito rotor desde el circuito del estator, debido a que la inducción de los voltajes y la corriente en el circuito del rotor de un motor de inducción se produce de forma muy similar al circuito equivalente de un transformador. Un motor de inducción es también llamado máquina de excitación única (a diferencia de la máquina síncrona de excitación doble) puesto que la potencia es suministrada solo al circuito del estator, dado que un motor de inducción no tiene circuito de campo independiente, su modelo no contendrá una fuente de voltaje interno como el voltaje interno generado en una máquina síncrona.

Para poder deducir el circuito equivalente de un motor a partir de cómo funciona un transformador y saber sobre la variación de la frecuencia del rotor con la velocidad en los motores de inducción, el modelo del motor de inducción es analizado a partir de la frecuencia variable del rotor y otros efectos similares en los motores de inducción.

Figura 21

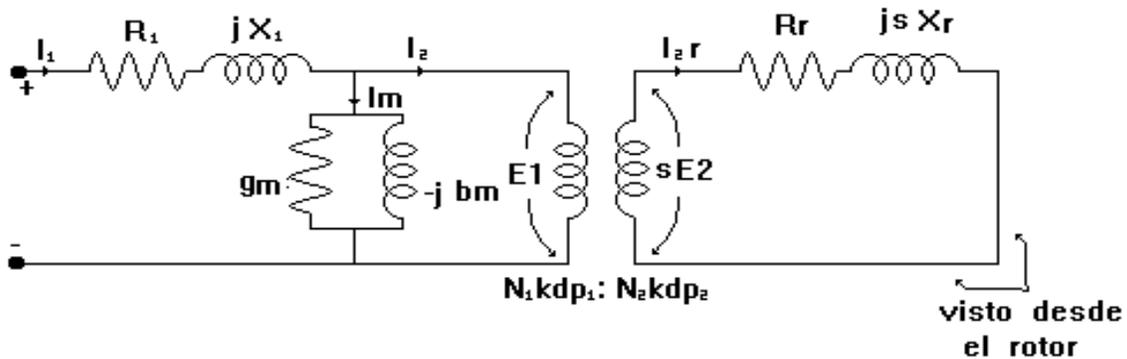


Figura 21: Circuito equivalente con transformador ideal.

Como cualquier transformador existe cierta resistencia y autoinductancia en los devanados primarios (el estator) las cuales deben ser representadas en un circuito equivalente de la maquina, la resistencia del estator se llamara  $R_1$  y la reactancia de dispersión será llamada  $X_1$  estos dos componentes aparecen justo en la entrada en el modelo de la maquina.

También como cualquier transformador con un núcleo de hierro, el flujo en la máquina está relacionado con la tensión aplicada  $E_1$ . En la figura a) - 4 la fuerza magnetomotriz - versus - la curva de flujo (curva de magnetización) de la máquina se coteja con una curva similar de un transformador de potencia. Observe que la pendiente de la curva del flujo versus fuerza magnetomotriz del motor de inducción es mucho menos pronunciada que la curva de un buen transformador. Esto sucede, porque existe un entrehierro en el motor de inducción, que aumenta enormemente la reluctancia de la trayectoria del flujo y por tanto debilita el acoplamiento entre los embobinados primario y secundario. Cuanta más alta es la reluctancia causada por el entrehierro, se necesita una corriente de magnetización más alta para lograr un nivel de flujo determinado. Por tanto, la reactancia de magnetización en el circuito equivalente  $X_m$  tendrá un valor mucho menor (o la susceptancia  $B_m$  tendrá un valor mucho mayor que el que correspondería a un transformador corriente.

La tensión primaria interna del estator  $E_1$  se acopla con el secundario  $E_r$  por medio de un transformador ideal con una relación de espiras  $A_{eff}$ . La relación de espiras efectiva  $A_{eff}$  es bastante fácil de determinar para un motor de rotor devanado; es básicamente la relación del número de conductores por fase del estator, con el número de conductores por fase en el rotor, modificada por cualesquiera diferencias de factores de paso y de distribución.

En cambio, es un poco difícil definir exactamente  $A_{eff}$ , en el caso de un motor de rotor de jaula de ardilla, porque no hay embobinados diferentes en el rotor de jaula de ardilla.



En ambos casos, hay una relación de espiras efectivas para el motor. La tensión  $E_r$  producido en el rotor produce, a su vez, un flujo de corriente en el circuito del rotor de la máquina (o secundario), puesto en cortocircuito. Figura 20

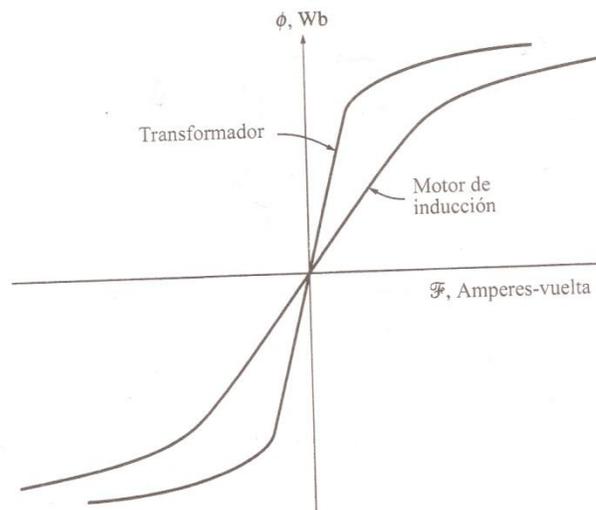


Figura 22.-Muestra la curva de magnetización de un motor de inducción igualada con la de un transformador.

Las impedancias del primario y la corriente de magnetización del motor de inducción son muy parecidas a los componentes correspondientes del circuito equivalente de un transformador. El circuito equivalente de un motor de inducción se diferencia del circuito equivalente de un transformador, primera, en los efectos que tiene la frecuencia variable del rotor sobre la tensión  $E_r$  y las impedancias  $R_r$  y  $jX_r$  del mismo.

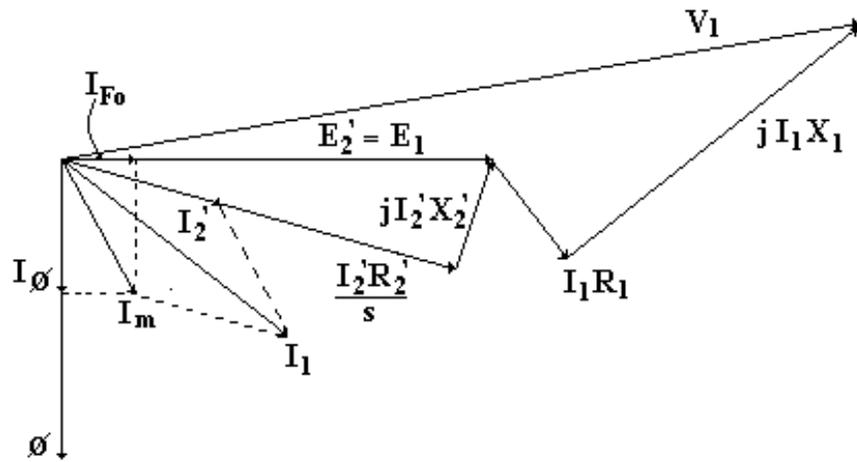


Figura 23. Diagrama fasorial.

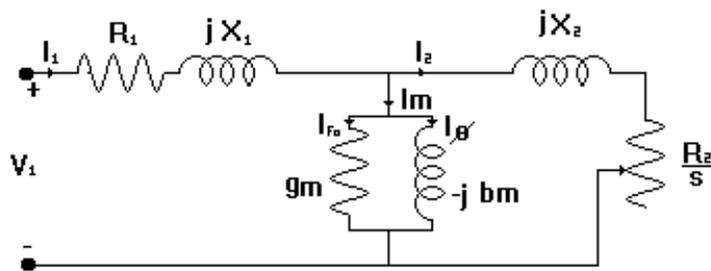


Figura 24.- Circuito equivalente final.



### Circuito equivalente final

Para producir el circuito equivalente por fase final de un motor de inducción, es necesario referir al lado del estator la parte del modelo correspondiente al rotor. El circuito modelo del rotor figura 25

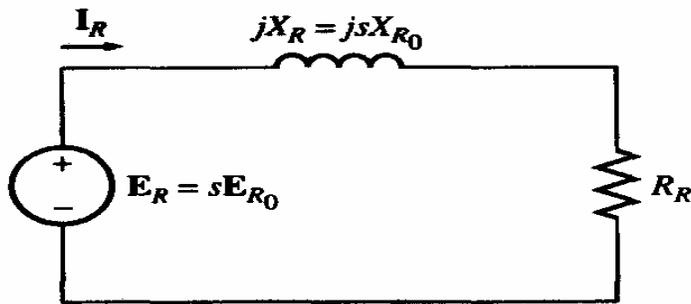


Figura 25: circuito modelo de un rotor

Este circuito tiene los efectos de la variación de la velocidad concentrados en el término de impedancia, en el transformador normal los voltajes las corrientes y las impedancias del lado secundario del aparato pueden estar referidas al lado primario mediante la relación de vueltas del transformador:

$$V_p = V'_s = aV_s$$

$$I_p = I''_s = \frac{I_s}{a}$$

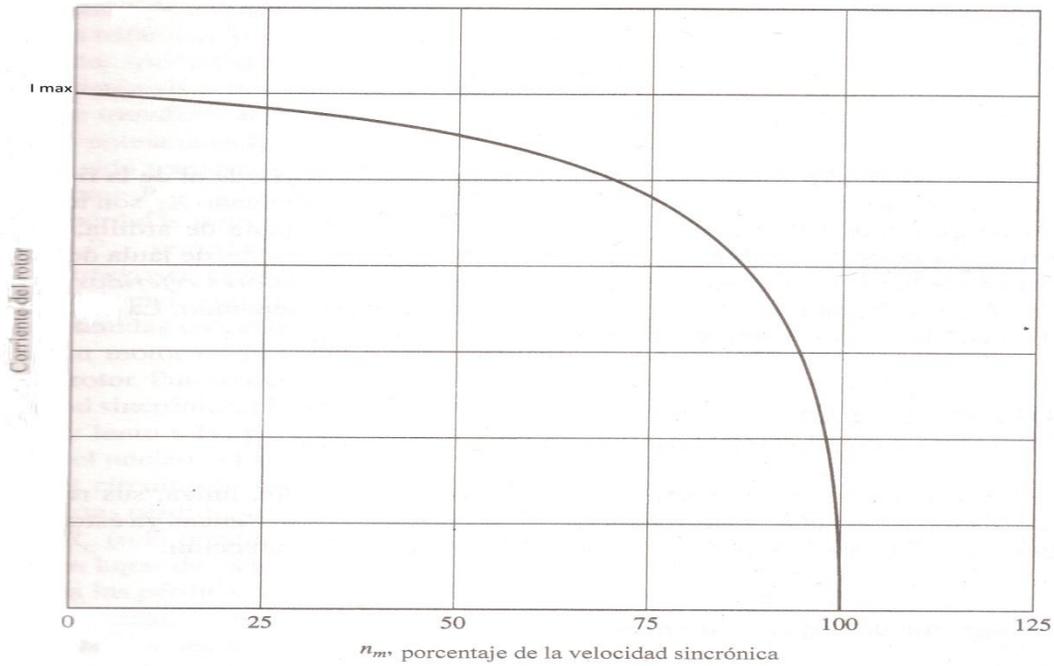


Figura 26: Corriente rotorica en la velocidad del rotor

$$Y \quad Z'_s = A^2 Z_s$$

Donde el superíndice prima se aplica a los valores de voltaje, corriente e impedancia referidos.

Se puede hacer la misma clase de transformación para el circuito del rotor del motor de inducción, si la relación efectiva de vueltas de un motor de inducción es  $a_{eff}$  el voltaje transformado del rotor es

$$E_1 = E'_R = a_{eff} E_{R0}$$

La corriente rotorica es

$$I_2 = \frac{I_R}{a_{eff}}$$

Y la impedancia rotorica es



$$Z_2 = a_{eff}^2 \left( \frac{R_R}{S} + jX_{R0} \right)$$

Si lo definimos

$$R_2 = a_{eff}^2 R_R$$

$$X_2 = a_{eff}^2 X_{R0}$$

El circuito equivalente final por

Las resistencias rotorica  $R_R$  y la reactancia del rotor en estado bloqueado  $X_{R0}$  son muy difíciles o imposibles de determinar de manera directa en los rotores de jaula de ardilla así como también es difícil obtener la relación de vueltas efectiva  $a_{eff}$  en los rotores de jaula de ardilla, sin embargo es posible hacer mediciones que darán directamente los valores referidos de resistencia  $R_2$  y de reactancia  $X_2$  aunque  $R_R, X_{R0}$  y  $a_{eff}$  no se conozcan por separado.

## 2.6.-Características par - velocidad de un motor trifásico

En este capítulo veremos el funcionamiento correcto de un motor mediante par-velocidad, un rotor jaula de ardilla que opera inicialmente en vacío y por lo tanto se llega a la velocidad síncrona, en este tipo de motores el campo magnético neto es  $B_{net}$  es producido por la corriente de magnetización  $I_M$  que fluye en el circuito equivalente, por lo que la magnitud de la corriente de magnetización por lo que  $B_{net}$  es directamente proporcional al voltaje  $E_1$ , si  $E_1$  es constante el campo magnético neto en el motor es constante. En una maquina real  $E_1$  esta carga va a variar puesto que las impedancias del estator  $R_1$  y  $X_1$  ocasionan caídas variables de voltaje cuando varia la carga, sin embargo estas caídas en los devanados del estator son relativamente pequeñas de modo que  $E_1$  es aproximadamente constante frente a los cambios de carga.

**En la figura 25** se muestra al motor de inducción en vacío, en este estado el deslizamiento del rotor es muy pequeño y por lo tanto es muy pequeño el movimiento relativo entre el rotor y los campos magnéticos así como la frecuencia del rotor también es muy pequeña, puesto que el movimiento relativo es muy pequeño y también el voltaje inducido en las barras del rotor  $E_R$  es muy pequeño así como el flujo de corriente resultante  $I_R$  debido a que la frecuencia del rotor es tan pequeña, su reactancia es aproximadamente cero y la corriente máxima del rotor  $I_R$  esta casi en fase con el voltaje del rotor  $E_R$ , la corriente del rotor produce entonces un campo magnético  $B_R$  pequeño a un ángulo un poco mayor



que  $90^\circ$  detrás del campo magnético  $B_{net}$  obsérvese que la corriente del estator debe ser muy grande aun en vacío puesto que debe suministrar la mayor parte de  $B_{net}$  por esta razón los motores de inducción tienen grandes corrientes en vacío, comparados con otro tipo de motores.

El par inducido, que mantiene al rotor girando está dada por la ecuación

$$T_{ind} = k B_R \times B_{net}$$

Y su magnitud está dada por

$$T_{ind} = k B_R B_{net} \text{sen} \delta$$

Puesto que el campo magnético del rotor es muy pequeña, el par inducido también es muy pequeña, pero suficientemente grande para contrarrestar las pérdidas de rotacionales de rotor.

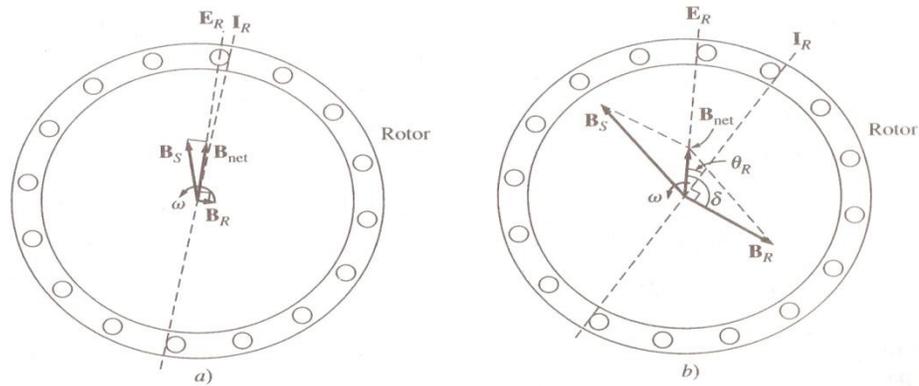
Cuando se aumenta la carga al motor, su deslizamiento aumenta y baja la velocidad de rotor, dado que la velocidad del rotor es menor, existe más movimiento relativo entre los campos magnéticos y el rotor en la máquina, el mayor movimiento relativo produce un voltaje más grande en el rotor  $E_R$  y por lo que se produce una corriente  $I_R$  mayor, si la corriente del rotor es mayor, este aumenta su propio campo magnético  $B_R$  por lo que el ángulo de corriente del rotor y  $B_R$  cambia en la misma forma, puesto que el deslizamiento del rotor es mayor aumenta la frecuencia ( $f_r = s f_e$ ) y aumenta la reactancia la reactancia del rotor ( $\omega L_R$ ), entonces la corriente del rotor se atrasa aun más del voltaje del rotor y el campo magnético del rotor se defasa con la corriente.

Al observar el motor que trabaja mediante una carga medianamente alta observamos que la corriente en el rotor aumentó y que el ángulo de  $\delta$  también aumentó, por lo que este incremento en  $B_R$  tiende a aumentar el par, mientras que el aumento en el ángulo  $\delta$  tiende a disminuir el par ( $T_{ind}$  es directamente proporcional a  $\text{sen} \delta$  y  $\delta > 90^\circ$ ), puesto que el primer efecto es mayor que el segundo, el par inducido total aumenta para alimentar el incremento de carga del motor.

Cuando un motor alcanza su par máximo, llega a un punto donde el aumentar la carga al eje, el término  $\text{sen} \delta$  disminuya más que lo que se incremente el término  $B_R$  en este punto, un aumento mayor en la carga disminuye  $T_{ind}$  y el motor se frena.



Para poder entender cómo es que el par de un motor disminuye es necesario entender cómo funcionan los campos magnéticos y así podremos deducir el par de salida contra velocidad de un motor de inducción al observar la fórmula para un motor de par inducido.



a) Campos magnéticos en un motor de inducción con cargas ligeras. b) Campos magnéticos en un motor de inducción con cargas pesadas.

Figura 27: a) Campo magnético en un motor de inducción con cargas ligeras

b) Campo magnético en un motor de inducción con cargas pesadas

$$T_{ind} = k B_R B_{net} \text{sen} \delta$$

En esta expresión, podemos que ver que cada término se puede considerar por separado para deducir el comportamiento del motor, los términos individuales son:

1.-  $B_R$  el campo magnético del rotor es directamente proporcional a la corriente que fluye en el rotor, mientras no haya saturación en el rotor, el flujo de corriente en el rotor aumenta con el incremento del deslizamiento (velocidad decreciente), este flujo de corriente representada en la figura 22.

2.-  $B_{net}$  el campo magnético neto en el motor es proporcional a  $E_1$  y por lo tanto es aproximadamente constante ( $E_1$  decrece con el flujo de corriente creciente, pero este efecto es pequeño comparado con los otros dos y será ignorado en este desarrollo grafico) la curva de  $B_{net}$  contra la velocidad mostrada en la figura siguiente.



3.-  $\text{sen} \delta$  el ángulo  $\delta$  entre los campos magnéticos neto y del rotor puede ser expresado en una forma muy útil en la figura mostrada vemos como el ángulo  $\delta$  es justamente igual al ángulo del factor de potencia del rotor más  $90^\circ$ .

$$\delta = \theta_R + 90^\circ$$

Entonces  $\text{sen} \delta = \text{sen} (\theta_R + 90^\circ) = \cos \theta_R$  este término es el factor de potencia del rotor el ángulo del factor de potencia del rotor se puede calcular de la ecuación

$$\theta_R = \tan^{-1} \frac{X_R}{R_R} = \tan^{-1} \frac{sX_{R0}}{R_R}$$

El factor de potencia resultante del rotor está dado por

$$PF_R = \cos \theta_R$$

$$PF_R = \cos \left( \tan^{-1} \frac{X_R}{R_R} \right)$$

La figura 28-c muestra el factor de potencia del rotor contra la velocidad, puesto que el par inducido es proporcional al producto de esos tres términos, las características par-velocidad de un motor de inducción se puede construir a partir de multiplicación gráfica de los tres dibujos previos, las características par-velocidad de un motor de inducción deducida de esta forma se muestra en la figura 26-d.

Este tipo de curva se puede dividir en tres regiones, la primera región es la bajo deslizamiento de la curva, en la cual el deslizamiento se incrementa casi linealmente con el aumento de la carga y al velocidad mecánica del rotor decrece casi linealmente con la carga, dada que la reactancia del rotor es despreciable en esta región de operación, el factor de potencia del rotor está cercano a 1 mientras que la corriente del rotor aumenta linealmente con el deslizamiento, el rango normal completo de operación en estado estacionario de un motor de inducción está incluido en esta región lineal de bajo deslizamiento, por lo que en operación normal la caída de velocidad de un motor de inducción es lineal.

La segunda región de la curva del motor de inducción se puede llamar región de deslizamiento moderno, en la cual la frecuencia del rotor es mayor que antes y la reactancia del rotor es del mismo orden de magnitud que la resistencia del rotor, en esta región la corriente del rotor no se incrementa con tanta rapidez como antes, y el factor de potencia empieza caer, el par pico (el par máximo) del motor ocurre en el punto donde



por incremento gradual de carga ,el aumento de la corriente del rotor esta balanceado exactamente con la disminución del factor de potencia del rotor.

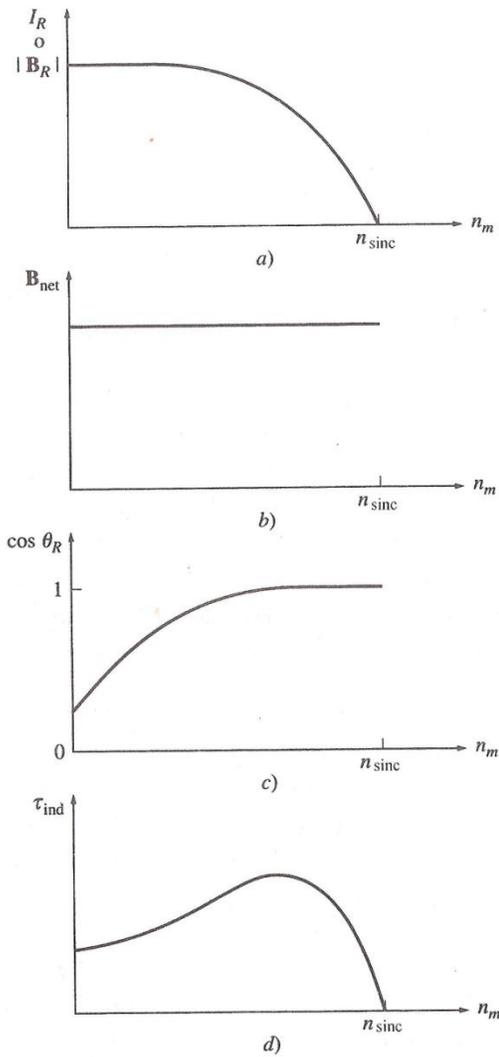
La tercera región de la curva del motor de inducción se llama “región de alto deslizamiento “en el cual el par inducido disminuye realmente con el incremento de la carga por que el aumento en al corriente del rotor no se percibe debido a la disminución en el factor de potencia del rotor.

En un motor de inducción típico, el par máximo sobre la curva es de 200 a 250% del par de plena carga nominal de el motor, y el par de arranque (el par a velocidad cero) será 150% o un valor similar del par de plena carga, a diferencia de un motor síncrono el motor de inducción puede arrancar con plena carga adherida a su eje.

### **Ecuación del par inducido en el motor de inducción**

Para poder observar esta ecuación es posible utilizar el circuito equivalente del motor y el diagrama de flujo de potencia para deducir una expresión general de par inducido como funciona de la velocidad. En un motor de inducción, el par esta dado por la ecuación 1 y 2

$$T_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \text{ Ecuacion 1}$$



Desarrollo gráfico de la característica par-velocidad de un motor de inducción. *a)* Dibujo de la corriente del rotor (y por tanto de  $|B_R|$ ) contra la velocidad, en un motor de inducción; *b)* dibujo del campo magnético contra la velocidad del motor; *c)* dibujo del factor de potencia del rotor contra la velocidad del rotor; *d)* característica resultante par-velocidad.

Figura 28: desarrollo de la característica par-velocidad de un motor de inducción

- a) Dibujo de la corriente del rotor (y por lo tanto de  $|B_R|$ ) contra la velocidad, en un motor de inducción.
- b) Dibujo del campo magnético contra la velocidad del motor.
- c) Dibujo del factor de potencia del rotor contra la velocidad del rotor
- d) Características resultante par-velocidad



$$T_{ind} = \frac{P_{AG}}{w_{sinc}} \text{ Ecuacion 2}$$

La última ecuación es muy útil puesto que la velocidad síncrona es constante para la frecuencia y un número de polos dados, puesto que  $w_{sinc}$  es constante, el conocimiento de la potencia en el entrehierro permite hallar el par inducido del motor.

La potencia en el entrehierro es la potencia que cruza el espacio desde el circuito del estator hasta el circuito del rotor y es igual a la potencia absorbida en la resistencia  $R_2/s$  y para poder encontrar esta potencia es necesario observar que la potencia en el entrehierro suministrada a una fase del motor es:

$$P_{AG,1\phi} = I_2^2 \frac{R_2}{s}$$

Entonces, la potencia total en el entrehierro es:

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s}$$

Si  $I_2$  puede ser determinada, se podrá saber la potencia en el entrehierro y el par inducido.

Anqué ay varias formas de resolver el circuito de la figura 24, para la corriente  $I_2$  sea más fácil usar el equivalente de Thevenin de la porción del circuito ala izquierda de las X de la figura, para poder entenderlo mejor veamos que dice el teorema de Thevenin, este establece que cualquier circuito lineal que pueda separarse del resto del sistema mediante dos terminales puede remplazarse por una sola fuente de voltaje en serie con una impedancia equivalente. Si se aplica esto al circuito equivalente del motor de inducción, el circuito resultante sería una simple combinación de elementos en serie.

Para calcular el equivalente de Thevenin del lado de entrada del circuito equivalente del motor de inducción, primero se abren las terminales del circuito en las X y se halla el voltaje del circuito abierto resultante, para poder encontrar la impedancia de Thevenin se cortocircuita la fuente de voltaje de fase y se encuentra en  $Z_{eq}$  vista mirando hacia adentro de las terminales.

$$V_{TH} = V_{\phi} \frac{Z_M}{Z_M + Z_1} = V_{\phi} \frac{jX_M}{R_1 + jX_1 + jX_M}$$



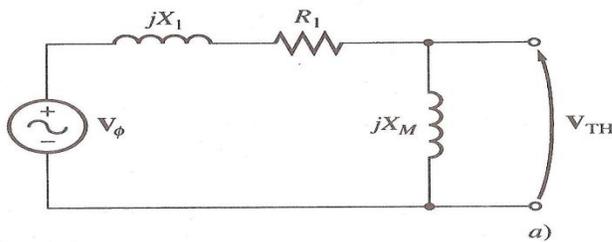
La magnitud del voltaje de Thevenin  $V_{TH}$  es:

$$V_{TH} = V_{\phi} \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}}$$

Puesto que la reactancia de magnetización  $X_M \gg X_1$  y  $X_M \gg R_1$ , la magnitud de voltaje de Thevenin es aproximadamente:

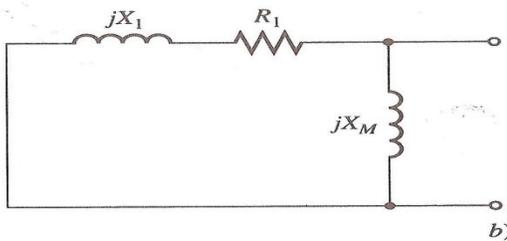
$$V_{TH} \approx V_{\phi} \frac{X_M}{X_1 + X_M}$$

Para una muy buena exactitud.



$$V_{TH} = \frac{jX_M}{R_1 + jX_1 + jX_M} V_{\phi}$$

$$V_{TH} = \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} V_{\phi}$$



$$Z_{TH} = \frac{jX_M (R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)}$$

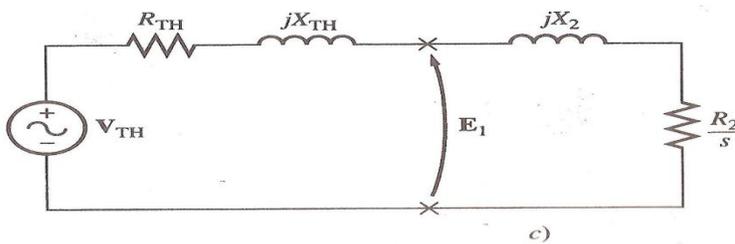


Figura 29: a) El voltaje equivalente de Thevenin en el circuito de entrada en un motor de inducción

b) Impedancia equivalente de Thevenin en el circuito de entrada.

c) Circuito equivalente resultante simplificado en un motor de inducción.



La figura 29 (b) muestra el circuito de entrada cuando el voltaje de la fuente de entrada esta cortocircuitada, por lo que las dos impedancias están en paralelo y la impedancia de Thevenin está dada por:

$$Z_{TH} = \frac{Z_1 Z_M}{Z_1 + Z_M}$$

La impedancia se reduce a:

$$Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH} = \frac{jX_M(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)}$$

Debido a que  $X_M \gg X_1$  y  $X_M + X_1 \gg R_1$ , la resistencia y al reactancia de Thevenin están dadas aproximadamente por:

$$R_{TH} \approx R_1 \left( \frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2 \quad X_{TH} \approx X_1$$

El circuito equivalente resultante se muestra en la figura 24 c, en el circuito, la corriente  $I_2$  esta dada por:

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{Z_{TH} + Z_2} = \frac{V_{TH}}{R_{TH} + \frac{R_2}{s} + jX_{TH} + jX_2}$$

La magnitud de esta corriente es:

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{\sqrt{(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}}$$

La potencia en el entrehierro está dada entonces por:

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} = \frac{\frac{3V_{TH}^2 R_2}{s}}{(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}$$

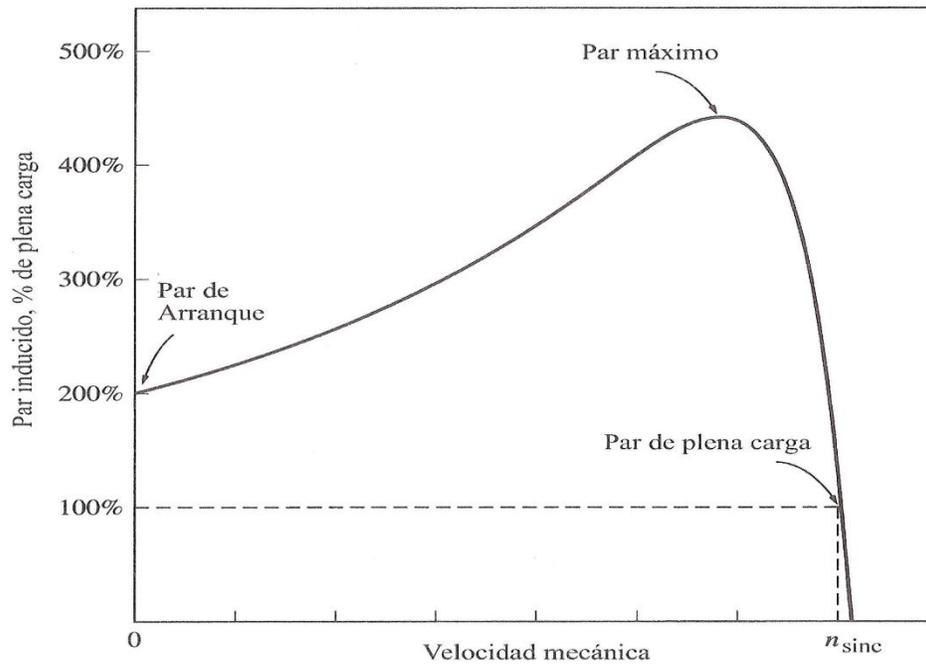
Y el par inducido al rotor esta dado por:

$$T_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sinc}}$$

$$T_{sinc} = \frac{3V_{TH}^2 R_2/s}{[(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2]}$$



En las siguientes figuras se muestra el par del motor de inducción como función de la velocidad (y el deslizamiento) en la siguiente figura vemos como la velocidades está por encima y por debajo del rango normal en el motor. Figura 30



Figura

30: Curva característica típica par-velocidad de un motor de inducción.

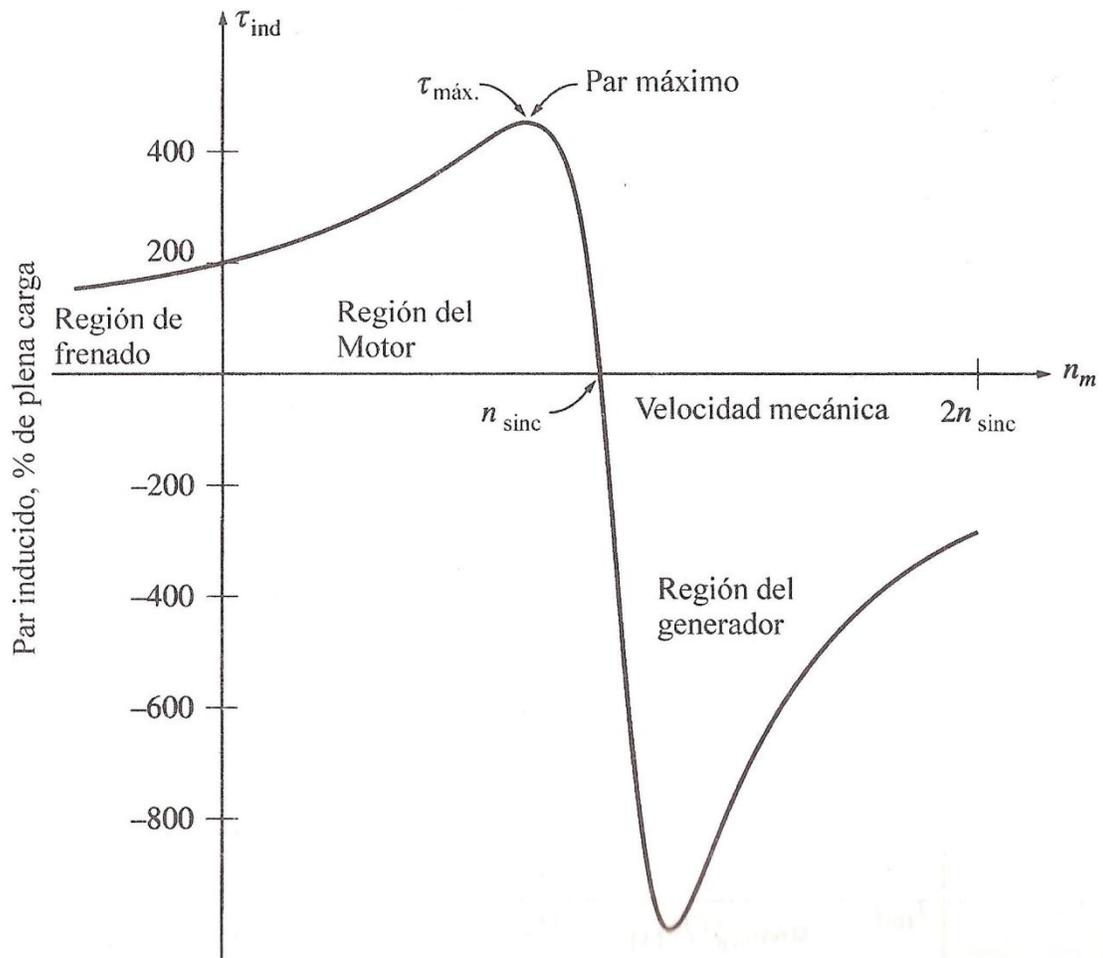


Figura 31: Curva característica par-velocidad de un motor donde se ven los rangos extendidos de operación (región de frenado y región de regeneración)



## Observaciones sobre la curva par-velocidad del motor de inducción

La curva característica par –velocidad mostrada anteriormente se ve como es la operación de los motores de inducción, esta información se resumen en 7 puntos los cuales son:

- 1.-El par inducido del motor es cero a la velocidad síncrona, este hecho se analizo con anterioridad.
- 2.-la curva par-velocidad es aproximadamente lineal entre vacio y plena carga. En este rango, la resistencia del rotor es mucho mayor que su reactancia; por lo tanto la corriente rotorica, el campo magnético del rotor y el par inducido crecen linealmente cuando el crece el deslizamiento.
- 3.-Existe un par máximo posible que no puede ser excedido, este par llamado par máximo o par de desviación, equivale a 2 o 3 veces el par nominal de plena carga del motor, la próxima sección de este capítulo contiene un método para calcular el par máximo.
- 4.-El par de arranque del motor es un poco mayor que el par de plena carga, de modo que el motor arranca portando cualquier carga que puede alimentar a la potencia.
- 5.-notese que el par inducido en el motor, para un deslizamiento dado, varia con el cuadrado del voltaje aplicado, este hecho es de utilidad para el control de la velocidad de los motores de inducción.
- 6.-Si la velocidad del rotor del motor de inducción es mayor que la síncrona, la dirección del par inducido en la maquina se interviene y la maquina opera como generador, convirtiendo esto en potencia mecánica en potencia eléctrica.
- 7.-Si el motor gira el sentido contrario a la dirección de los campos magnéticos, el par inducido en la maquina la detendrá muy rápidamente y tratara de girarla en la dirección opuesta, puesto que al invertir la dirección de rotación del campo magnético es solo conmutador cualquiera de las dos fases del estator , este hecho puede ser utilizado para frenar con rapidez un motor de inducción, el conmutador de dos fases puede detener al motor con rapidez y a esto se la llama frenado por contracorriente.

### Par máximo (par de desviación) en un motor de inducción

El par inducido es igual a  $P_{AG}/w_{sinc}$ , el máximo par posible ocurre cuando la potencia en el entrehierro es máxima y esto es porque el entrehierro es igual a la potencia consumida



en la resistencia  $R_2/s$ , el par máximo inducido ocurrirá cuando la potencia consumida por esa resistencia es máxima.

Cuando es máxima la potencia suministrada en  $R_2/s$  el ángulo de la impedancia de carga es fijo, el teorema de máxima transferencia de potencia establece que la máxima transferencia de potencia a la resistencia de carga  $R_2/s$  ocurrirá cuando la magnitud de esta impedancia sea igual a la magnitud de la impedancia de la fuente, la impedancia de la fuente en el circuito es:

$$Z_{source} = R_{TH} + jX_{TH} + jX_2$$

Por lo que, la máxima transferencia de potencia ocurre cuando:

$$\frac{R_2}{s} = \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}$$

Reduciendo la ecuación anterior obtenemos la siguiente fórmula:

$$S_{max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}}$$

Observemos que la resistencia referida del rotor  $R_2$  aparece únicamente en el numerador, de modo que el deslizamiento del rotor al par máximo es directamente proporcional a la resistencia del rotor.

El valor del par máximo se puede encontrar insertado en la ecuación del par en la expresión para el deslizamiento a par máximo y la ecuación se muestra a continuación:

$$T_{max} = \frac{3V_{TH}^2}{2\omega_{sinc} [R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}]}$$

Este par es proporcional al cuadrado del voltaje de alimentación y está en relación inversa con el tamaño de las impedancias del estator y la reactancia del rotor, cuanto menos sean las reactancias de una máquina, mayor es el par máximo que puede desarrollar, el deslizamiento al que ocurre el par máximo es directamente proporcional a la resistencia del rotor, pero el valor del par máximo es independiente del valor de la resistencia del rotor.



En la figura 32 se muestra la característica par-velocidad de un motor de inducción de un rotor devanado, por lo que es posible introducir una resistencia en el circuito de un rotor devanado debido a que las terminales de este se sacan del estator a través de anillos rozantes, veamos en la figura como al aumentar la resistencia del rotor, decrece la velocidad correspondiente al par máximo pero permanece constante, por lo que se hace posible sacar ventaja de esta característica de los motores de inducción del rotor devanado para arrancar cargas muy pesadas, si se inserta una resistencia en el circuito del rotor se puede ajustar al par máximo para que pueda ocurrir en las condiciones de arranque, entonces el par máximo posible estaría disponible para arrancar cargas pesadas, por otro lado cuando la carga esta en movimiento se puede quitar la resistencia extra del circuito y el par máximo llegara cerca de la velocidad síncrona de operación normal.

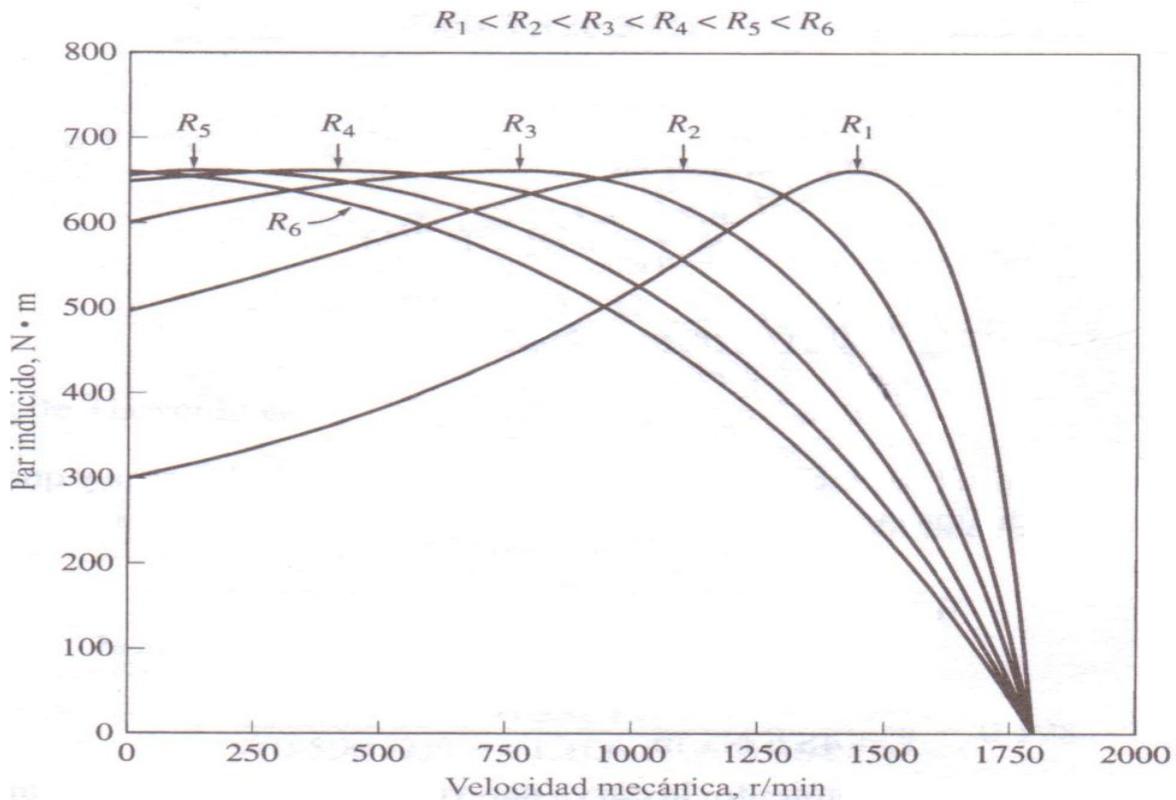


Figura 32: Efecto de variación de la resistencia del rotor sobre la característica par-velocidad de un motor de inducción de rotor devanado.



## Control de velocidad en motores de inducción

A la llegada de motores modernos controlados por controladores de estado sólido, los motores de inducción no eran motores adecuados para aplicaciones que requerían de un control de velocidad, los rangos normales de operación de un motor de inducción típicos de clase A, B Y C esta por lo menos al 5% de deslizamiento y la variación de velocidad de este rango es más o menos directamente proporcional a la carga sobre el eje del motor, aun si el deslizamiento fuera mayor, la eficiencia del motor sería muy pobre puesto que las perdidas en el cobre del rotor son directamente proporcional al deslizamiento del motor .

Existen dos tipos de técnicas para controlar al velocidad del motor, una de ellas consiste en variar la velocidad síncrona (velocidad en los campos de magnetización del rotor y el estator) puesto que la velocidad del rotor siempre permanece cerca de  $n_{sinc}$  y la otra forma es variar el deslizamiento del motor para una carga dada, por lo que la velocidad síncrona de un motor de inducción está dada por:

$$n_{sinc} = \frac{120f_e}{P}$$

Las únicas formas en que se puede variar la velocidad síncrona de un motor son: cambiando la frecuencia eléctrica y cambiando el numero de polos del motor, el control de velocidad del deslizamiento puede ser llevado a cabo bien sea variando la resistencia del rotor o variando el voltaje en las terminales del motor.

## Control de velocidad por cambio de polos

Ay dos métodos importantes para cambiar el numero de polos en un motor de inducción, uno de ellos consiste en el método de polos consecuentes, y el otro es devanado de estator múltiples veamos cada uno de estos métodos para ver el funcionamiento de los motores con estas características.

Este método de polos consecuentes es bastante antiguo desarrollado allá por los años 1897 y se basa en que el numero de polos en los devanados estatoricos de un motor de inducción se puede cambiar con facilidad en una relación 2:1 con solo hacer unos cambios de conexión en las bobinas del motor.



En la siguiente figura veremos como el motor de dos polos adecuado para el cambio de polos, las bobinas presentan un corto paso de  $60^\circ$  a  $90^\circ$  figura 33

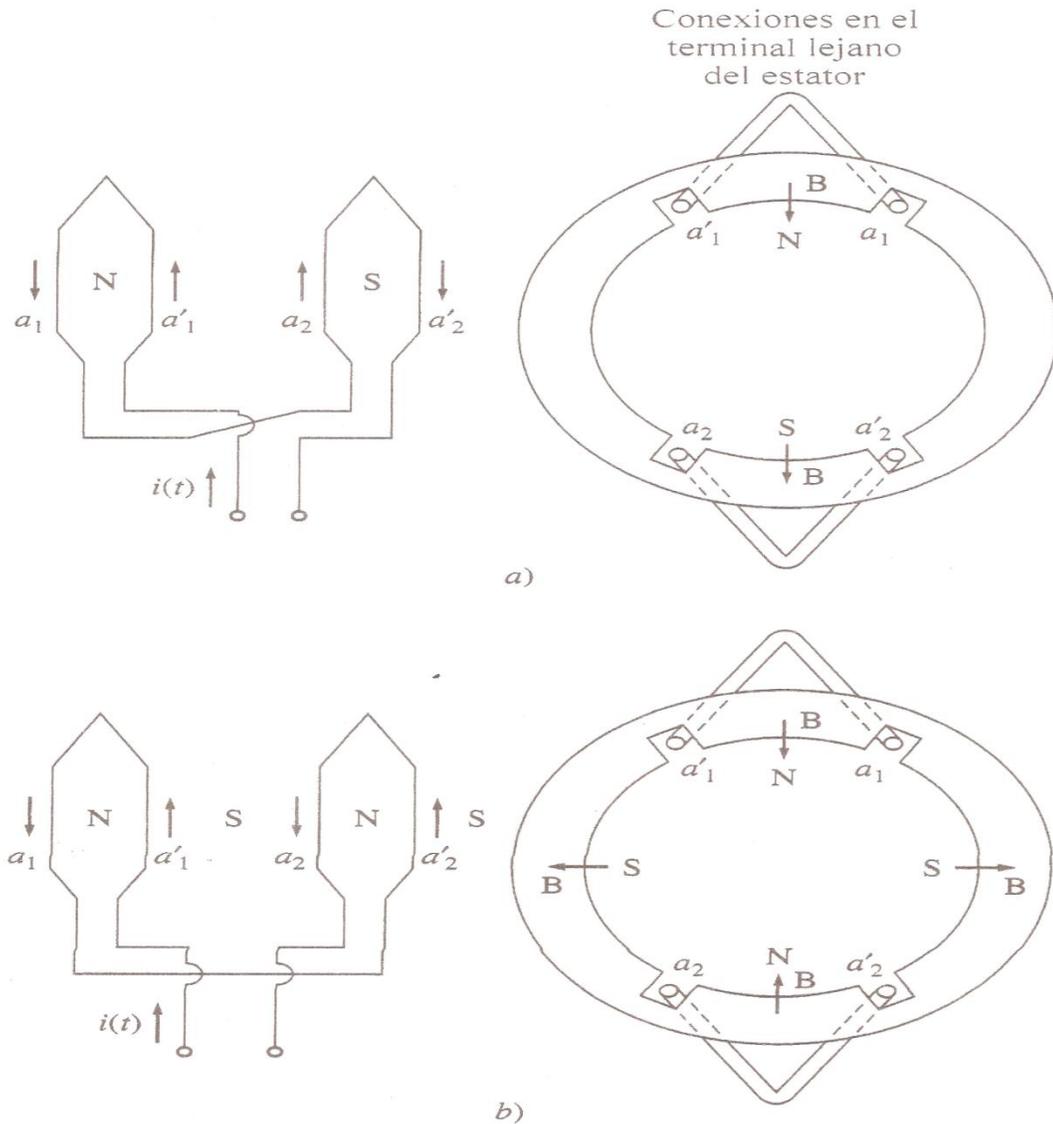


Figura 33: vista de detalle de una fase de un devanado de polos cambiantes

a) En la configuración de dos polos, una bobina es un polo norte y la otra, un polo sur.

b) Cuando la conexión en un  $a$  de las dos bobinas se invierte, los dos polos norte y el flujo magnético retorna al estator en puntos intermedios entre las dos bobinas. Los polos sur son llamados polos consecuentes y el devanado es ahora de cuatro polos.



Por otra parte en otro figura vemos como el flujo de corriente en la fase A de los devanados del estator en un instante de tiempo durante la operación normal, vemos como el campo magnético sale del estator en el grupo de fase superior (polo norte) y entra el otro grupo del estator inferior (polo sur) en los devanados se está produciendo dos polos magnéticos estatoricos.

Al invertir la dirección del flujo de corriente en el grupo de la fase inferior del estator, por lo que el campo magnético sale del estator tanto en el grupo de la fase inferior como en el de la fase superior (esto será el polo norte del motor) el flujo magnético en este motor debe regresar al estator entre los dos grupos de fase produciendo un par de polos sur magnéticos constantes, ahora el estator tiene 4 polos magnéticos el doble que antes.

En algunos motores se utiliza al jaula de ardilla y como hemos visto el rotor jaula de ardilla siempre tiene muchos polos inducidos en el como los que ay en el estator, se puede adaptar cuando cambia el numero de polos en el motor.

Cuando el motor de dos polos se reconecta para trabajar con cuatro polos, el par máximo resultante del motor puede ser igual al de antes (conexión que se sigue en la ley de los cuadrados utilizado para ventiladores) o dos veces su valor previo (conexión de salida de potencia constante) dependiendo de cómo se reordenen los devanados del estator.

La mayor desventaja del método de polos consecuentes para cambiar la velocidad es que las velocidades deben estar en relación 2:1, para poder superar esta limitación, se emplean estatores de devanados múltiples con diferente numero de polos, de los cuales solo se energiza uno en cada oportunidad, un ejemplo muy claro para entender esto es que el motor tendría que tener devanados en grupos de cuatro y seis polos de devanados estatoricos con una frecuencia de 60Hz, su velocidad síncrona podría cambiarse de 1800 a 1200 r /min suministrando potencia al otro grupo de devanados ,el único inconveniente de los estatores estatoricos múltiples es que aumenta el costo del motor y su empleo es cuando es absolutamente necesario.

Cambiando el método de polos consecuentes con el de devanados estatoricos múltiples es posible construir un motor de inducción de cuatro velocidades, un ejemplo claro de esto es cuando tenemos un motor con devanados separados de cuatro o seis polos es posible producir un motor de 60Hz capaz de girar a 600, 900,1200 y 1800r/min.

## **Control de velocidad mediante el cambio de frecuencia de línea**



Si se cambia la frecuencia eléctrica al estator de un motor de inducción, la velocidad de rotación de sus campos magnéticos  $n_{sinc}$  cambiara en proporción directa al cambio de frecuencia eléctrica, y el punto de vacío sobre la curva característica par-velocidad cambiara, la velocidad síncrona del motor en condiciones nominales se le conoce como velocidad base, utilizando el control de frecuencia variable, es posible ajustar la velocidad del motor por encima o por debajo de la velocidad base. Un controlador de frecuencia variable para un motor de inducción, diseñado adecuadamente, puede ser muy flexible y se puede controlar la velocidad del motor sobre un rango de velocidad que va desde un tamaño pequeño de 5% promedio de la velocidad base hasta cerca del doble de esta, por otro lado es importante mencionar que hay que mantener ciertos límites en el voltaje y par sobre el motor cuando varia la frecuencia para asegurar un operación confiable.

Cuando hacemos funcionar un motor con poca velocidad a la normal del motor, es necesario reducir el voltaje aplicado a las terminales del estator para poder obtener una operación adecuada, el voltaje aplicado a las terminales del estator debería disminuir linealmente con la disminución de la frecuencia en el , a esto se le llama degradación, y si no logra hacer esto se saturara el núcleo del motor y fluirán corrientes de magnetización excesivas en el motor.

Para poder ver la necesidad de reducción de un motor es necesario entender que un motor trifásico es un transformador pero rodante y como cualquier transformador el flujo de corriente en el núcleo de un motor de inducción se puede encontrar mediante la ley de Faraday:

$$v(t) = -N \frac{d\phi}{dt}$$

Si se aplica un voltaje  $v(t) = V_M \text{sen } \omega t$  al núcleo, el flujo  $\phi$  resultante es:

$$\phi(t) = \frac{1}{N_p} \int v(t) dt$$

$$= \frac{1}{N_p} \int V_M \text{sen } \omega t dt$$

$$\phi(t) = -\frac{V_M}{\omega N_p} \cos \omega t$$



Al ver que la frecuencia aparece en el denominador de esta expresión, entonces si la frecuencia eléctrica aplicada al estator disminuye en 10%, mientras que la magnitud del voltaje aplicado al estator permanece constante, el flujo en el núcleo del motor se incrementa al 10% y la corriente de magnetización se incrementa también, en un motor la región de no saturación de la curva de magnetización en el motor.

Para poder evitar las corrientes de magnetización excesivas, es necesario disminuir el voltaje aplicado al estator en proporción directa a la disminución de la frecuencia siempre que la frecuencia este por debajo de la nominal del motor, puesto que el voltaje aplicado  $v$  aparece en el numerador de la ecuación y al frecuencia  $w$  en el denominador, por lo que los efectos se contrarrestan entre si y la corriente de magnetización no se afecta.

Cuando el voltaje aplicado a un motor de inducción varia linealmente con la frecuencia por debajo de la velocidad base, el flujo en el motor permanece constante y el par máximo del motor permanece alto, sin embargo la potencia máxima nominal del motor debe ser disminuida linealmente con la reducción de frecuencia para evitar el sobrecalentamiento en el estator.

La potencia suministrada al motor es:

$$P = \sqrt{3V_L I_L \cos \theta}$$

Si al disminuir el voltaje  $V_L$  la potencia máxima  $P$  también deberá disminuir o la corriente que fluye en el motor llegara a ser excesiva y el motor se sobrecalentara.

En la siguiente figura se muestra con claridad una serie de curvas donde podemos observar las características par-velocidad de un motor en donde podemos ver que las velocidades mostradas son menores alas de base suponiendo que la magnitud del voltaje del estator varía linealmente con la frecuencia.

Cuando la frecuencia eléctrica aplicada al motor excede la frecuencia nominal del motor, el voltaje del estator es mantenido constante en el valor nominal, considerando la saturación permitirá elevar el voltaje por encima del valor nominal bajo estas circunstancias, por lo que está limitado el voltaje nominal para proteger el aislamiento del devanado del motor, cuanto mayor sea la frecuencia eléctrica sobre la velocidad base , mayor será el denominador de la ecuación , puesto que el termino del numerador se



mantiene constante cuando se opera se opera sobre la frecuencia nominal, disminuye el flujo resultante en el motor y el par máximo.

Si el voltaje varia linealmente con la frecuencia por debajo de la velocidad base y su valor nominal se mantiene constante a velocidades por encima de la velocidad base, la familia resultante de características par-velocidad, la principal desventaja del control de frecuencia eléctrica como método de cambio de velocidad es que se requiere un generador o un cambiador mecánico de frecuencias exclusivo para hacerlo operativo.

El problema desapareció con el diseño de modernos controladores de frecuencia variable y de estado sólido, el cambio de frecuencia en al línea con los controladores ha llegado a hacer un método preferido para el control de velocidad de los motores, este tipo de métodos es utilizado para cualquier tipo de motores, a diferencia de la técnica de cambio de polos que se requiere para un motor con devanados especiales.

### **Control de velocidad mediante cambio de voltaje de línea:**

El par desarrollado por un motor es proporcional al cuadrado del voltaje aplicado, si el motor llega a tener una característica par-velocidad con la carga que se suministra la velocidad del motor puede ser controlada con un rango limitado, variando el voltaje de línea, este tipo de método se utiliza para controlar la velocidad en pequeños motores donde no se utiliza este tipo de controles y básicamente son usados pocas veces sobre todo en los ventiladores.

### **Control de velocidad por medio de cambio de resistencia del rotor**

Para poder controlar al velocidad del motor es poniéndole resistencias extras al circuito del rotor del motor, y por lo que veremos las curvas características par-velocidad resultantes, si la curva del motor característica de su par-velocidad se parece como la siguiente al cambiar la resistencia extras en el circuito del rotor del motor reduce la eficiencia del motor, este método de control de velocidad se utiliza solo para periodos cortos debido a los problemas de eficiencia en el motor.

### **Controladores de estado sólido para motores trifásicos.**

Los controladores de estado sólido son muy flexibles su entrada de potencia puede ser monofásica o trifásica 50 o 60 Hz y puede tener un voltaje de entre 208 y 230 V, la salida



de este dispositivo es un conjunto trifásico de voltajes cuya frecuencia puede ser variada desde 0 hasta 120hz y cuyo voltaje puede ser variado desde 0V hasta el voltaje nominal del motor.

El control de voltaje y la frecuencia de salida se lleva a cabo utilizando la técnica de modulación de ancho de pulso (PWM), tanto la frecuencia como el voltaje de salida pueden ser controlados por separado mediante modulación de ancho de pulso.

## **Ajuste de la frecuencia (velocidad de un motor)**

La frecuencia de salida del controlador puede manejarse manualmente desde un gabinete mediante una señal de voltaje o corriente externa, la capacidad para poder ajustar la frecuencia del controlador en respuesta a una señal externa es muy importante puesto que permite que un controlador de proceso controle la velocidad del motor de acuerdo con las necesidades totales de la planta en la cual se ha instalado.

## **Tipos de frecuencia y voltaje**

Las cargas aplicadas a los motores podrían variar mucho, algunas cargas, como los ventiladores requieren de un par pequeño en el arranque, y que tienden a aumentar con el cuadrado de la velocidad, otras cargas pueden exigir más al motor en el arranque y se necesita más par nominal de plena carga del motor para poder ponerlas en movimiento, este tipo de controlador suministra una variedad de voltajes contra frecuencias que se pueden seleccionar para que el par del motor coincida con el requerido para su carga.

En este modelo el voltaje de salida cambia linealmente con los cambios de frecuencia de salida para velocidades inferiores a la velocidad base y mantiene constante el voltaje de salida para velocidades superiores a la velocidad base (la pequeña región de voltaje constante a muy bajas frecuencias es necesario para asegurar que se tendrá algún par de arranque a las más bajas velocidades).

El modelo de voltaje con frecuencia utilizado para cargas que tienen pares de arranque altos, nos sirve porque cambia el voltaje de salida linealmente con los cambios en la frecuencia de salida para velocidades inferiores a la velocidad base, pero tiene una pendiente de poca pronunciación para las frecuencias por debajo de 30Hz, para cualquier frecuencia por debajo de los 30Hz, el voltaje de salida sea mayor que el del modelo anterior, este voltaje es más alto producirá un par más alto, pero al aumentar la



saturación magnética y de mayores corrientes de magnetización el aumento de saturación y las altas corrientes mencionadas son aceptadas con frecuencia durante los cortos periodos requeridos para arrancar cargas pesadas.

Otro modelo con estas características es el que cambia parabólicamente el voltaje de salida con los cambios en la frecuencia de salida para velocidades por debajo de la velocidad base, para cualquier frecuencia dada a 60Hz, el voltaje de salida será menor que el modelo estándar, este voltaje producirá un par menor y originara un arranque lento y suave para cargas de bajo par.

## **Aceleradores y desaceleradores ajustables independientes**

Cuando varia la velocidad de operación deseada del motor, el controlador cambiara la frecuencia para llevar al motor a la nueva velocidad, si el cambio de velocidad es repentino(que el motor cambie de velocidad de 900 a 1200r/min) el controlador no intenta que el motor salte instantáneamente de la velocidad controlada a otra velocidad nueva, ay circuitos especiales involucrados dentro de la electrónica donde el control limita a un nivel seguro para el motor la tasa de aceleración o desaceleración del motor, todo esto se puede ajustar por separado para las aceleraciones y desaceleraciones.

## **Protección del motor**

Los controladores para motores de inducción tiene incorporado elementos diseñados para la protección del motor, el controlador puede detectar corrientes excesivas de estado estacionario(condición de sobre carga) corrientes excesivas , en condiciones de sobre voltaje o condiciones de bajo voltaje ,dándose estas condiciones el motor tendría que parar, los controladores actuales como los antes descritos son tan flexibles y confiables que los motores que los incorpora han desplegado a los motores de corriente continua en muchas aplicaciones en las que se requiere un rango amplio de variación de velocidad.



## 2.7.-pruebas de vacío

En un rotor de un motor de inducción, esta prueba de vacío se mide las pérdidas rotacionales del motor y suministra información sobre la corriente de magnetización. Los varímetros y voltímetros y tres amperímetros se conectan al motor de inducción al cual se le permite girar libremente, la única carga puesta sobre el motor es su rozamiento propio y el rozamiento con el aire de modo que  $P_{conv}$  es consumida por el motor por las pérdidas mecánicas y el deslizamiento del motor es muy pequeño, con este pequeño deslizamiento la resistencia correspondiente a su potencia convertida  $R_2(1-s)/s$  es mucho mayor que la resistencia correspondientes a las pérdidas en el cobre del rotor  $R_2$  y mucho mayor que la reactancia del rotor  $X_2$ .

En este motor, en condiciones de vacío la potencia de entrada medida por los vatímetros debe ser igual a las pérdidas en el motor, las pérdidas en el cobre del rotor son despreciables debido a que la corriente  $I_2$  es demasiado pequeña debido a que la gran resistencia de la carga en  $R_2(1-s)/s$  por lo tanto se puede despreciar. Las pérdidas en el cobre del estator están dadas por la siguiente fórmula:

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1$$

Por consiguiente, la potencia de entrada debe ser igual a

$$P_{in} = P_{SCL} + P_{nucleo} + P_{F\&W} + P_{misc} = 3I_1^2 R_1 + P_{rot}$$

Donde  $P_{rot}$  son las pérdidas rotacionales del rotor:

$$P_{rot} = P_{nucleo} + P_{F\&W} + P_{misc}$$

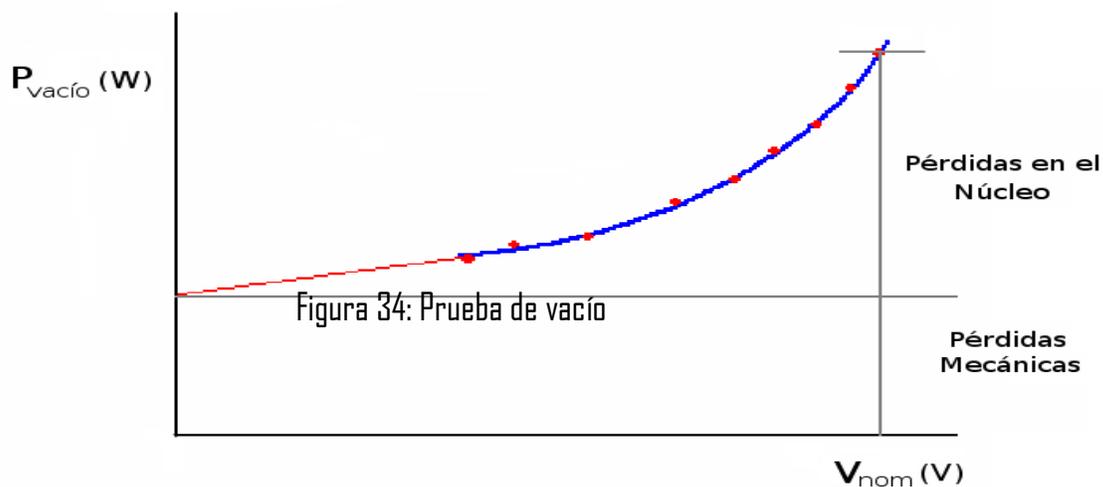
Por lo que dada la potencia de entrada al motor, se puede determinar las pérdidas rotacionales de la máquina.

El circuito equivalente que describe la operación del motor en esta condición contiene las resistencias  $R_c$  y  $R_2(1-s)/s$  en paralelo con la reactancia de magnetización  $X_M$ , la corriente necesaria para establecer el campo magnético es muy grande en un motor de inducción debido a la alta reluctancia de un entrehierro, de modo que la reactancia  $X_M$  será mucho menor que las resistencias en paralelo con ella, y por lo que el factor de potencia total de entrada será muy pequeña, con esa gran corriente en atraso, la mayoría de la caída de voltaje se producirá a través de las componentes inductivas del circuito, la impedancia de entrada equivalente es entonces aproximadamente



$$|Z_{eq}| = \frac{V_{\theta}}{I_{1,nl}} \approx X_1 + X_M$$

Y si  $X_1$  se puede encontrar de alguna otra forma, la impedancia de magnetización  $X_M$  sera conocida para el motor. Figura 34



## 2.8.-pruebas de rotor bloqueado

Una de las pruebas que se puede realizar en un motor de inducción para determinar los parámetros del circuito se llaman pruebas de rotor bloqueado algunas veces se le puede llamar pruebas de rotor enclavado en esta prueba corresponde a la de cortocircuito de un transformador, se bloquea el rotor de tal forma que no se pueda mover se aplica voltaje al motor y se mide el voltaje, la corriente y la potencia resultante.

Para llevar a cabo esta prueba es necesario, se aplica cierto voltaje de corriente alterna al estator y se ajusta el flujo de corriente se ajusta el flujo de corriente al valor aproximado de plena carga, cuando la corriente está en su valor de plena carga se mide la corriente y el voltaje t la potencia resultante que fluye hacia el motor. Figura 24



Para poder visualizar esta prueba es necesario ver el diagrama de su circuito equivalente donde vemos como el rotor está quieto el deslizamiento es  $S=1$  y por lo tanto la resistencia del rotor  $R/s$  es justamente es igual a  $R_2$  (un valor muy pequeño) son tan pequeños que  $R_2$  y  $X_2$  que toda la corriente de entrada fluirá a través de ellas en lugar de la reactancia de magnetización  $X_m$  es mucho mayor en estas condiciones el circuito parece la combinación de una serie de  $X_1, R_1, X_2$  y  $R_2$ .

Con el tiempo se ha podido observar que esta prueba presenta un inconveniente, la frecuencia del estator es la frecuencia de la línea del sistema de potencia en condiciones de arranque el rotor esta en frecuencia de línea sin embargo en condiciones de operación normal el deslizamiento de la mayoría de los motores es tan solo de 2 a 4 % de la frecuencia resultante en el rotor de rango de 1 a 3 Hz por lo que se crea un problema en cuanto a la frecuencia de línea no presentas las condiciones de operación normal del rotor puesto que la resistencia efectiva del rotor es una función de la frecuencia para motores de tipo B y C la frecuencia incorrecta del rotor puede llevar obtener resultados falsos en las pruebas por lo que en una situación típica se utiliza una frecuencia de 25% o menos de la frecuencia nominal aunque esta aproximación es aceptable para rotores de resistencia constantes , (diseño de motores tipo A y D) no es aplicable cuando se trata de encontrar la resistencia normal del rotor en un rotor de resistencia variable, debido a estos y otros problemas similares se debe tener en cuantas las recomendaciones y las tablas para realizar las pruebas.

Después de que se afijado el voltaje y la frecuencia para la pruebas de flujo de corriente en el motor se ajusta con rapidez cerca del valor nominal y se mide la potencia, el voltaje y la corriente de entrada, antes que el rotor se caliente demasiado, la potencia de entrada al rotor está dada por :

$$P = \sqrt{3}V_T I_L \cos \theta$$

En donde el modo del factor de potencia del rotor bloqueado se puede encontrar como

$$PF = \cos \theta \frac{P_{in}}{\sqrt{3} V_T I_L}$$

y el ángulo de impedancia  $\theta$  es justamente igual al coseno inverso de PF.

La magnitud de la impedancia total en el circuito del motor es



$$|Z_{LR}| = \frac{V_{\theta}}{I_1} = \frac{V_T}{\sqrt{3}I_L}$$

y el ángulo de la impedancia total es  $\theta$ , en consecuencia,

$$Z_{LR} = R_{LR} + jX'_{LR}$$

La resistencia de rotor bloqueado  $R_{LR}$  es igual a:

$$R_{LR} = R_1 + R_2$$

Mientras que la reactancia del rotor bloqueado

$$X'_{LR} = X'_1 + X'_2$$

Donde  $X'_1$  y  $X'_2$  son las reactancias del estator y del rotor a la frecuencia de prueba respectivamente.

La resistencia del rotor  $R_2$  se puede encontrar a partir de

$$R_2 = R_{LR} - R_1$$

Donde  $R_1$  se determino como la prueba de DC. La reactancia total del rotor referida al estator también se puede encontrar, puesto que la reactancia es directamente proporcional a la frecuencia, la reactancia equivalente total a la frecuencia de operación normal se puede encontrar como:

$$X_{LR} = \frac{f_{nominal}}{f_{test}} X'_{LR} = X_1 + X_2$$

Por desgracia no ay una forma sencilla de separar las contribuciones de las reactancias reciprocas del rotor y estator, durante años la experiencia a demostrado que las reactancias del rotor y estator proporcionales en motores de cierto tipos de diseño. En la figura se muestra cómo es que al analizar  $X_{LR}$  puesto que la reactancia es la suma de  $X_1 + X_2$  en todas las ecuaciones de par.



	$X_1 + X_2$ como función de $X_{LR}$	
Diseño del rotor	$X_1$	$X_2$
Rotor devanado	$0.5X_{LR}$	$0.5 X_{LR}$
Diseño A	$0.5X_{LR}$	$0.5 X_{LR}$
Diseño B	$0.4X_{LR}$	$0.6 X_{LR}$
Diseño C	$0.3X_{LR}$	$0.7 X_{LR}$
Diseño D	$0.5X_{LR}$	$0.5 X_{LR}$

Figura 35: tabla de contribuciones de las reactancias reciprocas del rotor y estator

## 2.9.-Diseño de un motor trifásico

La idea fundamental sobre los motores de inducción fueron desarrolladas a finales de la década de 1880 por Nicolás tesla, que hizo la patente de su idea en 1888. En ese entonces tesla presento el articulo ante el American Institute of Electrical Engineers (AIEE) antes de la actual institución Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) en el cual se describen los principio básicos del motor de inducción del rotor devanado ,junto con otros dos proyectos importantes como los motores de corriente alterna :el motores síncrono y el motor de reluctancia.

Aunque la idea básica del motor de inducción fue escrita en 1888, el motor para entonces todavía no estaba concluido. Hubo un periodo inicial de rápido desarrollo seguido de un lento mejoramiento que hasta el día de hoy todavía se continúa con desarrollos para el mejoramiento de los motores.

Los motores se inducción modernos se construyeron entre 1888 y 1895, durante ese periodo se desarrollaron motores con potencia para dos y tres fases para producir campos magnéticos rotacionales dentro del motor, devanados estatoricos distribuidos y se introdujo el rotor de jaula de ardilla. Así 1896 estuvieron en el comercio motores de inducción trifásicos plenamente reconocidos y funcionando.



En aquella época y comienzos de los años 1970 siguieron los progresos en la calidad de los aceros utilizados tanto en las técnicas de fundición, los aislamientos y otros elementos utilizados en los motores de inducción. Estas tendencias dieron como resultado que un motor pequeño con una potencia de salida definida, y esto dio como resultado que la construcción de los motores fuera mucho menor en costos, esto es que un motor de moderno de 100hp es igual de tamaño físico que de un de 7.5 hp de 1897. Sin embargo estos procesos en el diseño del motor de inducción no necesariamente llevaron al mejorar la eficiencia del motor, el diseño de los motores era reducir los costos de material que ocupaban las maquinas el propósito no era aumentar su eficiencia, esto se debió a que la electricidad no representaba un costo muy elevado en consecuencia, el costo directo del motor era el criterio principal utilizado por los compradores para elegir.

En 1973, el costo del combustible ascenso, por lo que la vida útil de una maquina a llegado hacer cada vez mas importante, mientras que el costo de instalación a dejado de tener una importancia relativamente, dando como resultado que las tendencias para los motores es la eficiencia de esta, así que tanto como diseñadores como usuarios de maquinas es la eficiencia del motor.

En la actualidad los mayores fabricantes de motores están produciendo nuevas líneas de motores de inducción de alta eficiencia y están logrando una importante participación creciente en el mercado de los motores de alta eficiencia, para darnos cuenta cómo es que las empresas constructoras de motores utilizan varias técnicas a diferencia de los motores con diseños tradicionales: estas técnicas son:

- 1.-Se utiliza mas cobre en los devanados del estator, para reducir las pérdidas en el cobre
- 2.-Las longitudes de los núcleos del rotor y del estator se incrementan para reducir la densidad de flujo magnético en el entrehierro de la maquina, esto reduce la saturación magnética de la maquina y disminuye las perdidas en el núcleo.
- 3.-Se utiliza mas acero en el estator de la maquina, lo cual permite transferir mayor cantidad de calor hacia afuera del motor y reducir su temperatura de operación. El ventilador del rotor se rediseña para reducir las pérdidas por rozamiento con el aire.
- 4.-En el estator se utiliza acero especial de alto grado eléctrico y bajas perdidas por histéresis.



5.-El acero es de muy alta resistividad interna, se lamina con calibres especiales muy delgados (esto significa que las laminas están muy juntas una de otra) ambos efectos tienden a reducir las corrientes parasitas en el motor.

6.-El rotor es maquinado cuidadosamente para producir un entrehierro uniforme que reduce las perdidas dispersas en el motor.

Por lo que cada fabricante tiene sus técnicas descritas para mejorar la eficiencia de sus motores.

Para comparar la eficiencia de los motores NEMA a adaptado una técnica estándar para medir la eficiencia del motor basada en el método B de la norma IEEE 112 en los procedimientos de prueba para motores y generadores de inducción polifásicos NEMA a introducido una clasificación llamada eficiencia nominal NEMA que aparece en las placas de características de los motores de clasificación A, B y C la eficiencia nominal hace identificar al motor la eficiencia que mantiene tanto en condiciones de máximo trabajo como de mínimo trabajo.

Existen otras organizaciones donde han establecido normas para los motores de inducción una de ellas es la british (BS-269) IEC (IEC 34-2) la japonesa (JEC-37) sin embargo las normas escritas para los motores de inducción son diferentes en cada norma y son diferentes resultados para cada máquina un ejemplo de esto es que si dos motores son analizados y muestran la misma eficiencia de un 82.5.% medida de acuerdo con diferente norma, podría no tener la misma eficiencia, cuando se requiera analizar los motores es importante realizarlo con una sola norma.



---

## Capítulo 3

### *Motor de alta eficiencia*

#### *3.-Motores de inducción de alta eficiencia*

Los motores de alta eficiencia pueden proporcionar importantes ventajas, como ayudar a reducir los costos energéticos y la eficiencia energética, un programa clasifica los motores en niveles de eficiencia EFF1 a EFF3, donde EFF3 es el nivel más alto, este programa ha tenido mucho éxito ya que ha reducido el número de motores comerciales de baja eficiencia: muchos consideran la clasificación EFF1 no solo como una señal de eficiencia, sino también como un dispositivo general de calidad.

Actualmente se está perfeccionando el programa para armonizar los métodos de verificación de eficiencia, de modo que sea más fácil comparar los motores de distintos fabricantes.

ABB defiende desde hace mucho tiempo la necesidad de que los motores sean eficientes, desde siempre, su política ha consistido en ofrecer motores de alta eficiencia como norma, es decir, desde el almacén y sin sobrepago alguno. Lógicamente cuando se introdujo el programa UE, todos los motores ABB quedaron clasificados en las dos categorías superiores de eficiencia los motores EFF1 estaban de forma estándar en el programa de productos ABB.

Diseñar y fabricar motores fiables con buenas prestaciones de arranque y funcionamiento, implica conseguir un delicado equilibrio entre diversos factores: no solo la eficiencia y los costos, sino también el diseño de los cojinetes, ranuras y ventiladores, la temperatura, la vibración y el ruido, solo un equilibrio adecuado dará como resultado motores de alta calidad, eficientes y fiables, con peso óptimo y una larga vida útil, en lugar de centrarse solo en la eficiencia ABB prefiere un enfoque que comprende toda la vida útil de los productos e intenta maximizar los beneficios y minimizar los costos asociados a los productos durante toda su vida útil, el enfoque de ciclo de vida se ocupa de la eficiencia y resalta la importancia de la fiabilidad y de la disponibilidad.



Figura 36: Diferentes tipos de motor de inducción de alta eficiencia

### 3.1.-Diseño y fabricación

Las pérdidas en el entrehierro del núcleo se deben a la energía requerida para vencer la oposición del material del núcleo a la variación de los campos magnéticos. Los diseñadores pueden reducir estas pérdidas usando acero de mejor calidad y aumentando la longitud del núcleo, lo que reduce la densidad de flujo magnético.

Las pérdidas por resistencia aerodinámica y por fricción son causadas por la resistencia del aire y por el rozamiento de los cojinetes, en los motores de alta calidad, estas pérdidas se reducen seleccionando mejor los cojinetes por lo que se mejorando el diseño del flujo de aire y de ventilación, este debe ser suficientemente grande para proporcionar una adecuada refrigeración, pero no demasiado grande, ya que podría reducirse la eficiencia y aumenta el ruido.

Características de un buen devanado



Capacidad, con un buen índice de relleno de ranuras.

Pequeña proyección saliente.

Hilo de cobre de alta calidad

Sistema de devanado de alta calidad

Aislamiento de ranuras, sistema de impregnación y sistema de aislamiento de fases, de alta calidad.

En los motores el tamaño de las paletas y el paso entre ellas varían según los modelos para obtener resultados óptimos.

De las pérdidas que varían con la carga, las pérdidas en el cobre desde el estator (conocidas como pérdidas  $I^2R$ ) son causadas por el calentamiento provocado por la circulación de corriente a través de la resistencia del devanado del estator, entre las técnicas empleadas para reducir estas pérdidas está la optimización del diseño.

De las ranuras del estator, las laminaciones del estator deben ser de acero de baja pérdida, lo más uniforme y delgadas posible, para maximizar la intensidad de los campos magnéticos, estas deben estar alineadas cuidadosamente para garantizar que los canales sean rectos, naturalmente cuando más delgadas sean las laminaciones, más caras serán reproducidas por lo que la precisión de alineación necesita mucha especialización.

Las pérdidas en el rotor son causadas por las corrientes en el mismo y por las pérdidas en el hierro, en los motores de alta eficiencia, estas pérdidas se reducen aumentando el tamaño de la barras conductoras y los anillos terminales para reducir la resistencia, las cargas por dispersión son el resultado del flujo de fugas inducidas por las corrientes de carga y se pueden reducir mejorando la forma geométrica de las ranuras.



Figura 37: Rotor formado por altos materiales de resistividad

### **3.2.-Menos temperatura más fiabilidad**

Los motores que solo funcionan ocasionalmente, o en aplicaciones no críticas que ser extraordinariamente fiables , evidentemente, una avería siempre es una perturbación, pero eso no implica que las consecuencias sean muy graves.

Las dos causas más frecuentes de avería en los motores son los cojinetes y los devanados debido a que estos componentes son esencialmente para determinar la fiabilidad en caso de los cojinetes y devanados la temperatura de operación en el interior del motor es el factor más importante sobre la vida útil de los componentes, un motor eficiente y de alta calidad, funcionando a plena carga puede experimentar un aumento normal de temperatura de 60-80 grados , pero esta cifra puede llegar a ser hasta los 100 grados en los motores de baja calidad, el aumento de la temperatura, sin provocar problemas solo en los motores diseñados especialmente para ellos, que disponen de un sistema de aislante apropiado que resiste la altas temperaturas, para poder conseguir fiabilidad máxima es importante utilizar cojinetes de alta calidad.

Control de cojinetes



---

Condiciones de los cojinetes para una fiabilidad optima del motor

Suministrados por un fabricante fiable

Dimensiones adecuadas para la carga y velocidad

Grasa adecuada para la temperatura de operación

Molduras internas adecuadas para la temperatura de operación

Los diseñadores han de seleccionar el tipo de cojinete adecuado para la aplicación y las cargas completas y a continuación elaborar un régimen de engrase apropiado para la aplicación en la condiciones de operación, dado que la grasa se degrada con las altas temperaturas, es importante limitar el aumento de temperatura, una reducción de 15 a 10 grados la temperatura de operación debe duplicar la vida útil de la grasa del cojinete.

La temperatura interna de motor también afecta la vida útil de los devanados, en este caso el que se empieza a degradar es el aislamiento de los hilos de cobre por efecto de las altas temperaturas, un aumento de 10 grados en condiciones de operación puede reducir la vida útil de los devanados, por esta razón la mayoría de los motores se fabrican con aislamiento de clase F (155 grados Celsius) pero se diseñan para funcionar a temperaturas no superiores al as de clase B (130 grados Celsius).

Otro factor de fiabilidad del devanado es la tensión soportada, que mide la integridad del devanado, los devanados suelen soportar una tensión en torno a 1,200v, aunque ay motores que pueden soportar hasta 1,400v o mas di el devanado ha de resistir mayores picos de tensión, hay que tener presente que la fiabilidad también puede presentar aspectos distintos en diferentes entornos , en aplicaciones de motores en la industria del petróleo y gas, por ejemplo la seguridad es fundamental para el propietario del proceso.

Los motores funcionan generalmente en entornos muy duros y tiene que soportar condiciones extremas de calor o frio o ambientes polvorientos o húmedos, las experiencias obtenidas se aprovechan para el desarrollo y fabricación de motores de alta calidad que no solo cumplen las normas oficiales y las especificaciones de seguridad sino que además funcionan con gran eficiencia y fiabilidad durante toda su vida útil.



### **3.3.- Políticas Energéticas**

Bajo este potencial de ahorro y mejora del medio ambiente los diferentes países del mundo han desarrollado políticas energéticas para incentivar el uso de motores eléctricos de elevado rendimiento. Con intención de poder entender su evolución y ayudar al consumidor o al fabricante de maquinaria, se presenta a continuación el modelo Europeo y, comparativamente también, el modelo americano que fue uno de los pioneros.

#### **EEUU**

En los Estados Unidos de Norte América el DOE "Department of Energy" promulga la Ley EAct (Energy Policy Act 1992) que obliga a partir del 24 de Octubre del 1997 que los motores (1-200hp) que se comercialicen en este país sean según NEMA o Métricos, cumplan con un rendimiento mínimo dependiendo de la potencia, la polaridad y el tipo de protección (IP).

Los motores eléctricos están normalizados en América según la Norma NEMA

MG1 (National Electrical Manufacturers Association).

#### **Canadá**

En Canadá también se promulga una ley similar a los EEUU, llamada EEAct (Energy Efficiency Act 1992)

Los motores eléctricos (1-200hp) que se comercializan en Canadá habrán de cumplir con la CSA 390-93, y los valores de rendimiento mínimo que han de cumplir dependerán, al igual que en el caso anterior, de la potencia, la polaridad y el grado de protección.

#### **Comunidad Europea**

En la comunidad Europea los fabricantes de motores, conjuntamente con la Dirección General de la Energía DGXVII, firman un acuerdo voluntario donde se comprometen a fabricar solamente motores de rendimiento mejorado y alto rendimiento. Este acuerdo voluntario entró en vigor en el año 2000 y su ámbito de aplicación será el de motores normalizados IEC 60034, con potencias comprendidas entre 1,1-90kW para 2 y 4 polos con tensión asignada 400V 50Hz. En este acuerdo se clasifican los motores en tres categorías de rendimiento eff1 (Alto Rendimiento), eff2 (Rendimiento Mejorado) y eff3 (Bajo Rendimiento) y dentro de estas categorías se indican de forma tabulada los valores nominales de rendimiento que en



función de la polaridad y del tamaño IEC del motor han de cumplir (figura 4, tabla 2). El rendimiento de estos motores se verificará según la Norma EN-IEC 60034-2 vigente. Los fabricantes de motores que han firmado el acuerdo, marcan sus motores en la placa característica con el logotipo registrado mostrado en la figura 3. Estos fabricantes aportan con su experiencia, sistema de calidad e instalaciones de ensayo una seguridad en el cumplimiento de los valores de rendimiento declarados. Esta fórmula permite distinguir los motores de alto rendimiento de los del resto de los motores sin clasificar.

Los valores presentados en la tabla 1 resultaron de la puesta en común de los rendimientos que podrían ofrecer los fabricantes en el estado actual de la técnica y sin encarecer excesivamente el producto.

kW	4 polos			2 polos		
	eff3 < $\eta_N$	eff2 $\geq\eta_N$	eff1 $\geq\eta_N$	eff3 < $\eta_N$	eff2 $\geq\eta_N$	eff1 $\geq\eta_N$
1,1	76,2	76,2	83,8	76,2	76,2	82,8
1,5	78,5	78,5	85	78,5	78,5	84,1
2,2	81	81	86,4	81	81	85,6
3	82,6	82,6	87,4	82,6	82,6	86,7
4	84,2	84,2	88,3	84,2	84,2	87,6
5,5	85,7	85,7	89,2	85,7	85,7	88,6
7,5	87	87	90,1	87	87	89,5
11	88,4	88,4	91	88,4	88,4	90,5
15	89,4	89,4	91,8	89,4	89,4	91,3
18,5	90	90	92,2	90	90	91,8
22	90,5	90,5	92,6	90,5	90,5	92,2
30	91,4	91,4	93,2	91,4	91,4	92,9
37	92	92	93,6	92	92	93,3
45	92,5	92,5	93,9	92,5	92,5	93,7
55	93	93	94,2	93	93	94
75	93,6	93,6	94,7	93,6	93,6	94,6
90	93,9	93,9	95	93,9	93,9	95

Figura 38: tabla de eficiencia de motores con 4 y 2 polos y diferentes hp

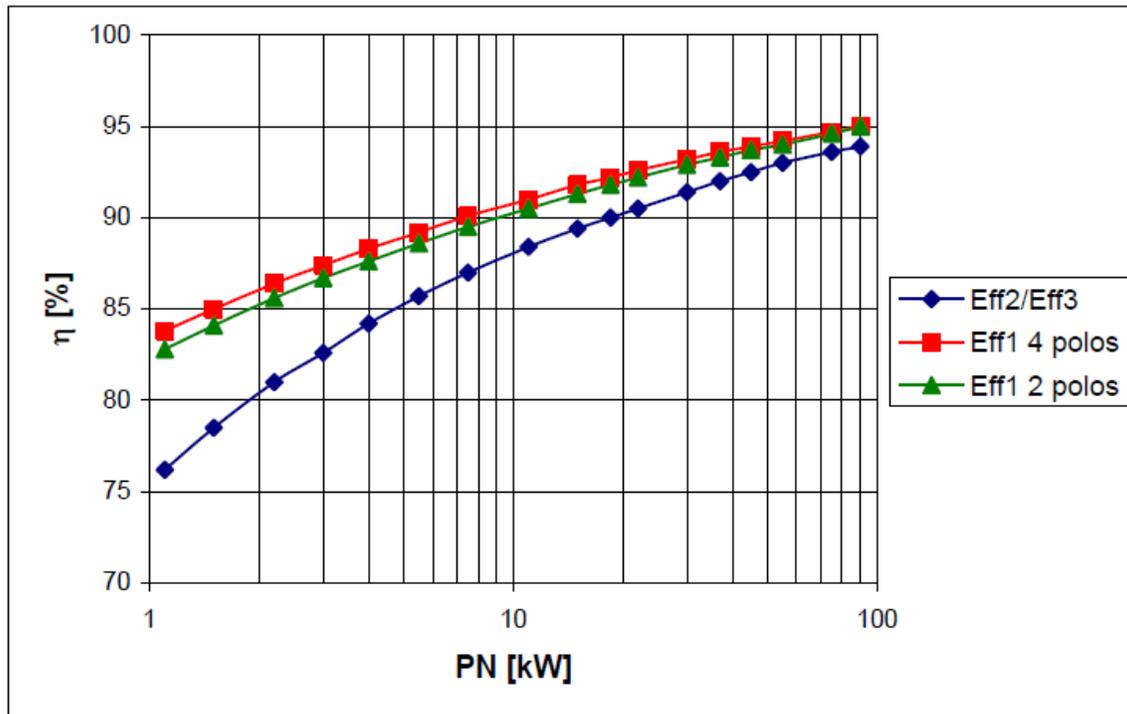


Figura 39: grafica de eficiencia con diferentes

### 3.4.-Tipos y clasificación

Los motores son maquinas eléctricas, las cuales han tenido mayor aplicación en la industria y en artículos electrodomésticos. Este tipo de motores son los principales convertidores de energía eléctrica en mecánica, su uso es principalmente en calidad de mando eléctrico en la mayoría de los mecanismos, por ello se justifica por la sencillez de su fabricación, su alta confiabilidad y un alto valor de eficiencia.



Figura 40: rotor jaula de ardilla

### 3.4.1-Principio de funcionamiento

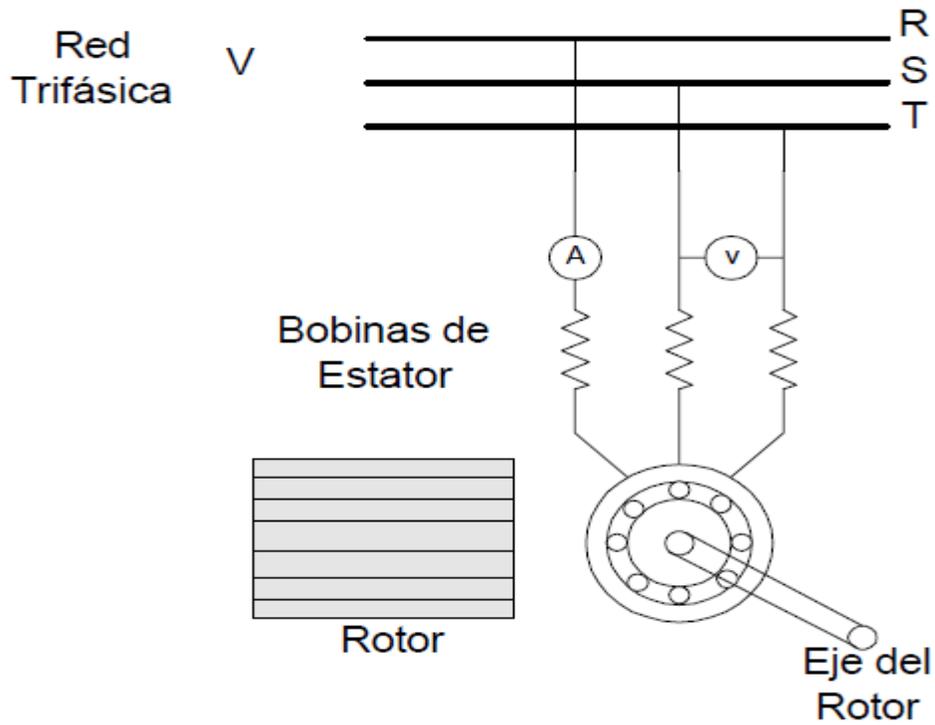


Figura 41: conexión a una red trifásica de un motor



En algunos tipos de motores se tienen 2 devanados, uno se coloca en el estator y el otro en el rotor, entre el estator y rotor se tiene un entrehierro, cuya longitud se trata de ( $s = 0.1 - 0.3\text{mm}$ ) con lo que logra mejorar el acople magnético entre los devanados.

El devanado del estator puede ser monofásico o trifásicos, por lo que los motores trifásicos, cuyas bobinas se colocan en las ranuras interiores del estator, las fases del devanado del estator AX, BY CZ se conectan en tipo estrella Y o triángulo  $\Delta$  cuyos bornes son conectados a la red.

El devanado del rotor también es trifásico y se coloca en la superficie del cilindro, en el caso simple se une en corto circuito.

Cuando el devanado del estator es alimentado por una corriente trifásica, se induce un campo magnético giratorio, cuya velocidad es:

$$n_i \frac{60f_i}{p}$$

Si el rotor está en reposo o su velocidad  $n < n_{sinc}$ , entonces el campo magnético giratorio traspasa los conductores del devanado rotórico e induce en ellos la F.E.M, en los siguientes gráficos se muestra la regla de la mano derecha la dirección de la F.E.M inducida en los conductores del rotor cuando el flujo magnético gira en sentido contrario, la componente activa de la corriente  $I_{rot}$  se encuentra en fase con la F.E.M inducida.

Sobre los conductores con corriente, empleados en el campo magnético, actúan fuerzas electromagnéticas cuya dirección se determina por la regla de la mano izquierda estas fuerzas crean un  $M_{elmagn}$  que arrastra al rotor tras el campo magnético este  $M_{elmagn}$  es lo suficiente grande entonces el rotor va a girar y su velocidad  $n_2$  va a corresponder a la igualdad.

$$M_{elmagn\ esc} = M_{freno\ rot}$$

Este es el funcionamiento de la máquina en régimen de motor y es evidente en este caso.

$$0 \leq n_2 \leq n_1$$

A la diferencia de velocidades entre el campo magnético y el rotor se le llama deslizamiento y se representa por el símbolo  $s$ .

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$



De donde se deduce que el régimen de motor

$$0 < s \leq 1$$

En generador:  $s > 0$

En frenado electromagnético  $s > 1$

La principal característica es la presencia del deslizamiento  $s$  ósea la desigualdad de velocidades entre el campo del estator y la velocidad del rotor  $n_2 \neq n_1$ .

### 3.4.2-Diagrama energético del motor eléctrico

Cuando el motor está en funcionamiento, el estator se alimenta de la red y absorbe una potencia:

$$P_1 = m_1 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1$$

Parte de la  $P_1$  se consume en la resistencia R del devanado del estator ocasionado una pérdida eléctrica  $\Delta P_{el1}$ , así como una pérdida magnética en el campo del estator  $\Delta P_{emag}$  deduciendo dichas componentes, al rotor se le aplica una potencia electromagnética que se expresa mediante la siguiente ecuación de balance energético:

$$P_{elmag} = P_1 - \Delta P_{el1} - \Delta P_{mag}$$

Parte de esta potencia se disipa en cubrir las pérdidas eléctricas del rotor  $\Delta P_{el2}$  en su devanado, la potencia resultante es aquella que va a ser convertida en potencia mecánica, expresado por:

$$P_{mec} = P_{elmag} - \Delta P_{el2}$$

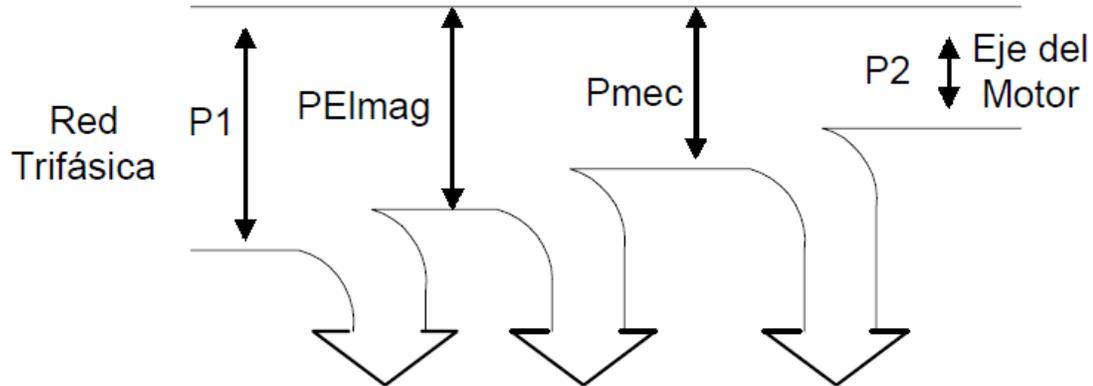
En las maquinas de anillos rozantes, además se tienen pérdidas en las escobillas de contacto, las cuales se añade a la pérdida  $\Delta P_{el2}$ .

La potencia mecánica obtenida en el árbol del eje del rotor, se obtiene luego de vencer su inercia y otras pérdidas adicionales, obteniéndose una potencia  $P_2$  :

$$P_2 = P_{mec} - \Delta P_{fric} - \Delta P_{adic}$$



$$P_2 = P_{mec} - \Delta P_{fric} - \Delta P_{adic}$$



**Pérdidas:**

$$\Delta P_{el\ est} + \Delta P_{adic} \quad \Delta P_{el\ rot} \quad \Delta P_{fric} + \Delta P_{adic}$$

Figura: 42 diagrama de flujo de potencia de un motor de inducción

#### 4.- relación entre eficiencia ( $n$ ) y deslizamiento ( $s$ ) en motores

Para definir la relación entre eficiencia  $n$  y el deslizamiento  $s$  en los motores, se analiza la eficiencia mediante la relación:

$$n = \frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{P_{el\ mag}}{P_1} \right) \left( \frac{P_2}{P_{el\ mag}} \right) = n_1 n_2$$

Donde  $n_1$  y  $n_2$  - eficiencias del estator y del rotor.

Teniendo en cuenta:

$$n_2 = \frac{P_2}{P_{el\ mag}} = \frac{P_{el\ mag} - \Delta P_{el\ 2} - \Delta P_{fric} - \Delta P_{adic}}{P_{el\ mag}}$$

Entonces es válida la siguiente relación:

$$n_2 < \frac{P_{el\ mag} - \Delta P_{el\ 2}}{P_{el\ mag}} < \frac{1 - \Delta P_{el\ 2}}{P_{el\ mag}} < (1 - s)$$

Por lo tanto:

$$n < n_2 < (1 - s)$$

Del análisis realizado se puede concluir con el siguiente:



Para que un motor funcione en su régimen nominal con una alta eficiencia, es necesario que en este régimen se tenga un deslizamiento  $s$  de pequeña magnitud, por lo general  $s_{nom} = 0.01 - 0.06$  para ello el devanado del rotor se diseña de tal forma que tenga una resistencia óhmica pequeña.

### 3.4.3-Datos nominales de los motores eléctricos

Potencia, *kw o HP*

Tensión de servicio, *kV o V*

Frecuencia, *Hz*

Velocidad nominal, *r. p. m*

Corriente nominal, *Amp*

Corriente de arranque, *Amp*

Factor de potencia, *cosφ*

Eficiencia, *n%*

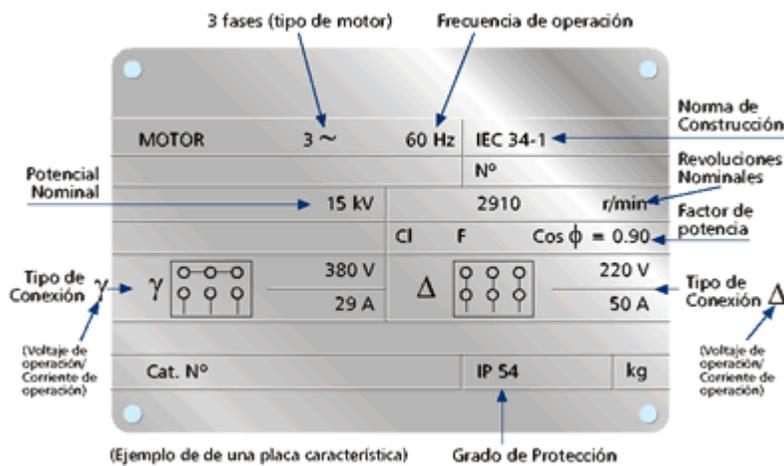


Figura 43: placa de especificaciones de un motor

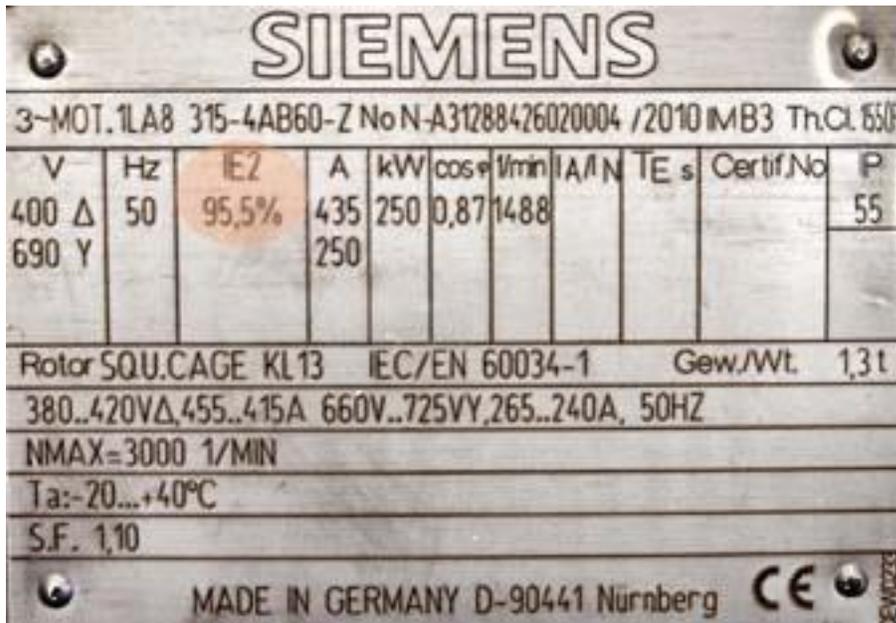


Figura 44: placa de un motor siemens

### 3.4.4.- Sistema de fuerza

En una planta industrial, se denomina sistema de fuerza al conjunto de todos los equipos e instalaciones que tiene por objeto realizar un trabajo mecánico o de producción, para hacer el trabajo se requiere de un motor eléctrico y por lo tanto son estos equipos los principales dentro del proceso de producción, el sistema de fuerza a su vez en una planta es alimentado con energía desde una subestación de distribución del servicio público donde se observa la importancia de la maquina eléctrica en la industria.

Cabe señalar que los sistemas de refrigeración y calefacción también forman parte del sistema de fuerza en una instalación eléctrica de tipo industrial.

En el caso de los sistemas de uso residencial - comercial, el sistema de fuerza está conformado por los circuitos principales de iluminación, aire acondicionado y sistemas auxiliares, solo con estas condiciones en el motor se va a inducir la F.E.M y va a seguir un momento  $M_{el\ magn}$  funcionando el devanado rotor se intercepta con el flujo  $\phi$ , originando un deslizamiento  $n_s = n - n_2$  la fuerza de la F.E.M.

$$F_2 = F_1 S$$



### 3.4.5.- Variadores de velocidad

Los controladores de frecuencia variable son dispositivos complejos y hasta hace poco eran costosos, sin embargo trabajan con motores estándar lo cual permiten su fácil adquisición a unidades motrices existentes, varios tipos de ventiladores (enfriadores de aire, torres de enfriamiento, ventilación, y aire acondicionado etc.....) operan a velocidad variable mediante sistemas de variación de velocidad.

Los sistemas de variación de velocidad alteran la velocidad del motor combinando el voltaje y la frecuencia de la electricidad suministrada al motor en base a los requerimientos del sistema, esto se logra convirtiendo la corriente alterna en continua y luego de múltiples mecanismos de cambio, invirtiendo la corriente continua a corriente alterna sintética con voltaje y frecuencia controladas, si este proceso es realizado en forma apropiada, la velocidad del motor puede ser controlada en un rango amplio con las características de torque apropiadas para la aplicación.

Para mantener un factor de potencia apropiado y reducir el calentamiento excesivo del motor, para esto debe mantenerse el ratio de voltaje y de frecuencia original, esta es la función principal del variador de velocidad, los cuatro componentes principales que hacen posible la operación de los variadores de velocidad son: convertidor, inversor, circuito de corriente continua (que sirve de enlace entre ambos) y la unidad de control tal como se muestra en la figura 45

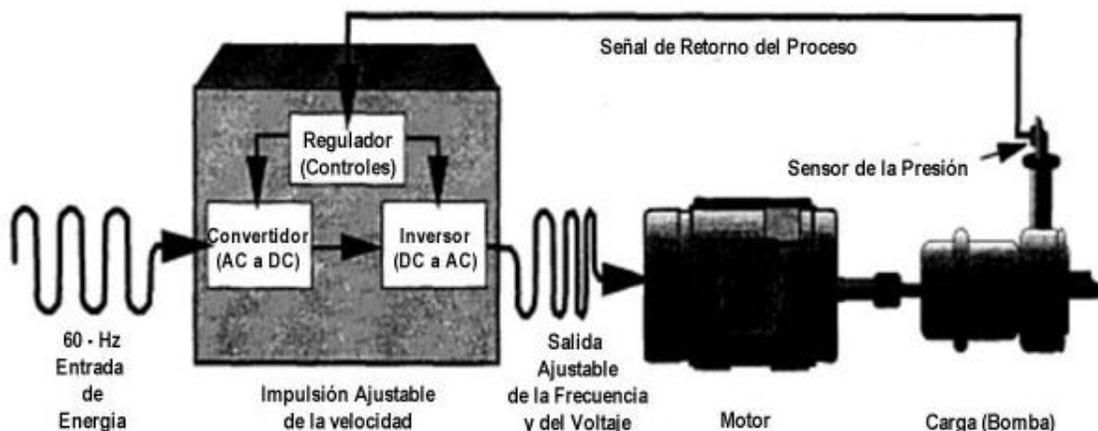


Figura 45: convertidor, inversor de frecuencia ajustable



El convertidor contiene un rectificador y varios circuitos que convierten la frecuencia fija de corriente alterna en continua, el inversor convierte la corriente continua en corriente alterna de voltaje y frecuencia regulables(ambos deben ser regulables para poder mantener ratios de voltaje/frecuencia constante) los circuitos de corriente continua filtran la corriente y la conducen al inversor, la unidad de control regula el voltaje y la frecuencia de salida en base a la señal proveniente del proceso, los tipos principales de inversor de voltaje, inversores de corriente e inversores de modulación de pulsos.

### **3.4.6- Métodos de ensayo en la determinación del rendimiento**

Aunque la fórmula que rige la determinación del rendimiento de un motor eléctrico es el cociente de la potencia cedida en el eje P2 y la potencia absorbida de la red P1 expresado en %, el valor del rendimiento obtenido, puede divergir en función de la normativa que se utilice. Como las políticas energéticas utilizan diferentes Normas de medida del rendimiento, los valores obtenidos para un mismo motor dependerán de la Norma que se haya utilizado.

### **3.5.- Selección del motor de alta eficiencia.**

A continuación se presentan 4 reglas que han de llevar al éxito en el diseño y la explotación de accionamientos eficientes:

#### **Regla 1: Tamaño**

En la elección del motor tamaño del motor entran diferentes factores que hacen que la potencia consumida por el motor seleccionado ascienda al 25% de la potencia asignada del motor.

Cuando el motor funciona fuera del punto nominal de trabajo, que corresponde con su potencia asignada que se indica en placa, desarrolla un rendimiento muy inferior al nominal.

Hay que evitar sobredimensionar el motor mediante la aplicación de coeficientes de seguridad.

En la figura 46 se muestra un ejemplo exagerando la selección errónea del tamaño del motor. En las auditorías energéticas hay que detectar que los motores instalados tengan un consumo cercano al valor que se indica en la placa del motor.

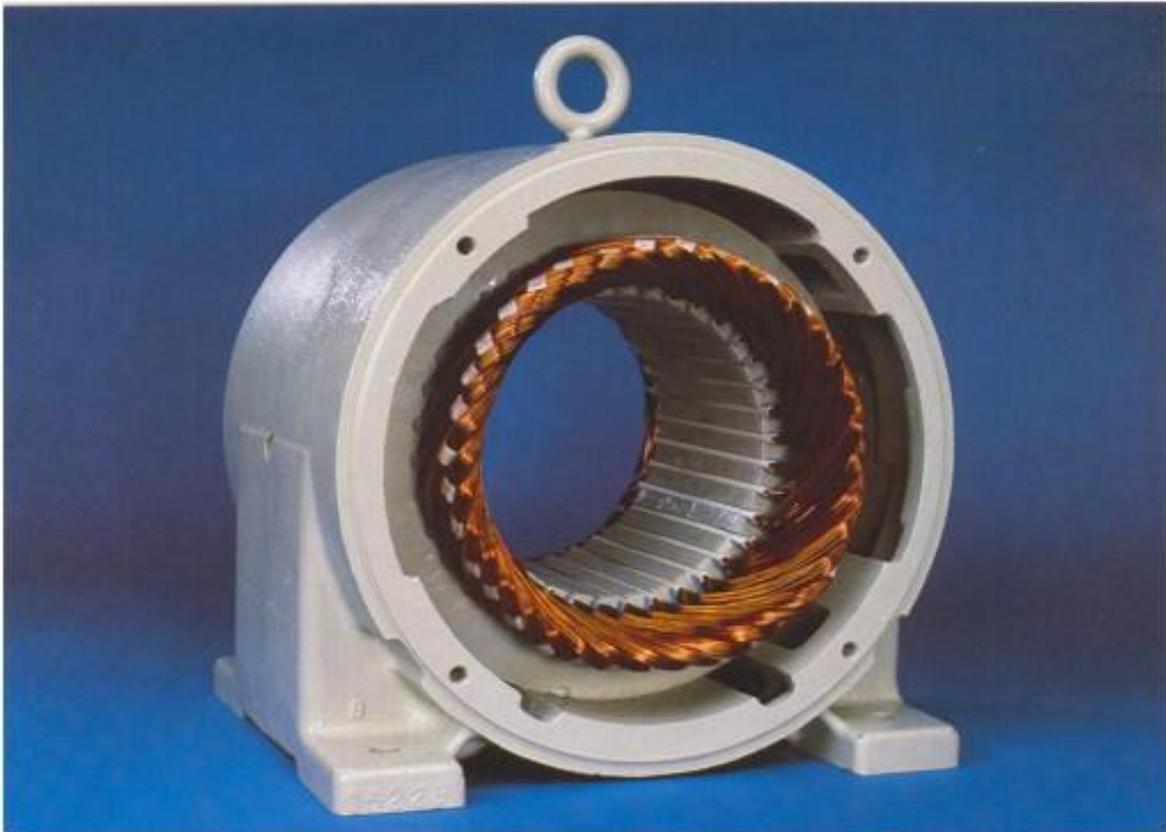


Figura 46: estator de un motor muy grande

## **Regla 2: Pérdidas por efecto Joule estator**

Aumentar la cantidad de cobre alojado en las ranuras del estator

Mayor tamaño de ranura

Disminuir cabeza de bobina

Pérdidas Magnéticas

Mejorar la calidad de la chapa magnética

Disminuir el grosor de las chapas que componen el empilado del motor

Mejorar los procesos de fabricación, evitar rebabas

Aumento entrehierro



Mejorar el factor de bobinado.

Aumentar el tamaño del empilado, longitud del paquete magnético

Pérdidas por efecto Joule en el rotor

Aumentar la inducción en el entrehierro

Aumentar tamaño de las barras conductoras del rotor

Aumentar la conductividad de las barras, utilizar rotores de cobre.

### **3: Pérdidas Mecánicas**

Optimización de la ventilación: Utilización de ventiladores más eficientes .Disminuir las pérdidas por rozamiento: Utilización de rodamientos con bajo nivel de pérdidas y rodamientos más pequeños.

En muchos casos las perdidas mecánicas no son debidas al propio motor sino que existe un sistema de transmisión que hace que debido a las pérdidas que en éste se originan, disminuya el rendimiento global del accionamiento.

Este fenómeno se puede evitar controlando las tensiones de las transmisiones por correas. También hay que estudiar la posibilidad de sustituir el sistema de correas o de reductor con caja de engranajes por accionamiento directo mediante regulación de velocidad.

Pérdidas dependientes de la carga Joule y magnéticas

Este tipo de pérdidas no dejan de ser pérdidas por efecto Joule y magnéticas que se originan en el cobre del estator, en el aluminio o cobre del rotor y en la chapa magnética y aunque son análogas a las indicadas anteriormente se tratan separadamente, ya que para su determinación se utilizan métodos diferentes a los utilizados en los apartados anteriores. Estas pérdidas se pueden reducir mediante la actuación sobre los siguientes parámetros:

Modificación del número ranuras del rotor  $N_2$

Inclinación ranuras del rotor



Bobinado paso acortado

Devanado 2 capas

Conexión en triangulo/estrella

Grupos en paralelo

Tamaño espineta rotor

Resistencia transversal del rotor

Forma de las ranuras del rotor

Mejorando el mecanizado

Actuando sobre el entrehierro

#### **Regla 4: No comprar el motor solamente por el precio de venta.**

En la tabla 3 adjunta se presenta un estudio cuantitativo de las ventajas que supone la inversión en un motor eléctrico de alto rendimiento eff1, respecto a un motor de rendimiento mejorado eff2.

El motor eff1, desarrollado en cumplimiento de las recomendaciones en la Regla 3, alcanza un rendimiento del 93,1% frente al valor del 91,6% del motor eff2.

Esta diferencia de rendimiento hace que en tan sólo 128 días se ahorre la diferencia que costaría haber comprado un motor eff1. Para un valor del precio de la energía eléctrica de 0,071238 Euro/kWh, por cada hora de utilización se ahorrarían 0,0376 Euros respecto a lo que se tendría que pagar con el motor eff2. Aunque esta cifra pueda parecer pequeña, a lo largo del tiempo se llega prácticamente a pagar el motor de clase eff1.

Desde el punto de vista medioambiental, un ahorro de 0,528 kWh, significaría la disminución de emisiones en 0,311kg de CO<sub>2</sub> por hora.



### 3.6.- ¿Cómo se mide la eficiencia de un motor?

La eficiencia del motor se puede medir directa o indirectamente.

La medida directa implica comparar la entrada de energía eléctrica con la salida de potencia en el eje. A simple vista, éste parece el método más sencillo, pero la medida directa requiere de técnicas de medición extremadamente precisas y depende de la temperatura de la habitación- una temperatura más baja hará parecer al motor más eficiente. Con la medida indirecta, la potencia de salida se determina midiendo la potencia eléctrica de entrada y las pérdidas asociadas en el motor. En este caso, la potencia mecánica es la potencia eléctrica menos las pérdidas.

La nueva norma, IEC 60034-2-1: 2007-09, permite varios métodos de medida:

- Medida directa como se utiliza en la norma IEE112-B de Norte América (medida del par)
- Medida con las pérdidas adicionales determinada por pruebas a cargas parciales (método indirecto)
- Medida con las pérdidas adicionales estimadas entre el 2,5 y 0,5% de la potencia de entrada a carga nominal, dependiendo del tamaño del motor (método indirecto)
- Cálculo matemático para las pérdidas adicionales

Bajo la nueva norma, los fabricantes pueden seleccionar cual de los métodos de medida utilizarán. En la documentación del motor se debe indicar que método de medida se ha utilizado. "ABB utiliza el método de determinación de las pérdidas adicionales por medida a cargas parciales, que estimamos puede dar el mejor reflejo del valor real de la eficiencia".

Los motores de alta eficiencia pueden alcanzar grandes reducciones de energía. Pero, además de la eficiencia, al optimizar el rendimiento de un motor durante toda su vida útil también hay que considerar otras características importantes, entre las cuales están su desempeño en el trabajo a realizar y el tamaño del motor y la fiabilidad de los devanados y cojinetes.

Los motores utilizan el 40% de la electricidad del mundo, de 60 a 70% en el sector industrial, y entre 30 y 40% en el sector de servicios. De toda la energía eléctrica que usan los motores, alrededor del 90% la utilizan los motores de inducción de CA entre 0,75 y 200



Kw Si estos motores fueran un poco más eficientes, las emisiones de CO<sub>2</sub> se recortarían drásticamente.

Comparándolos con otras máquinas, los motores eléctricos son bastante eficientes. Un motor de alta eficiencia de 90 Kw convierte un 95% de la energía que utiliza en trabajo útil. Un motor de coche solo utiliza de forma eficiente un 40-45%. Pero el gran número de motores instalados implica que unos cambios pequeños en eficiencia, supongan una gran diferencia. El objetivo de la nueva norma es conseguir mayor consistencia en la forma de medida en todo el mundo.

Anteriormente, se han desarrollado diferentes normas de prueba para cumplir requisitos de aplicación, sin tener como objetivo prioritario la medida de la eficiencia del motor. Estas normas de medida daban una indicación de la eficiencia del motor, pero cuando se usaban para comparar valores de eficiencia, llevaban a ver motores con distinta capacidad de aprovechamiento energético e igualmente eficiente, dificultando al usuario la elección basada en buena información. “Damos la bienvenida a la nueva norma internacional IEC para prueba de motores eléctricos de baja tensión y particularmente al hecho de que los valores de medida de eficiencia van a estar más armonizados en todo el mundo. Hemos esperado durante mucho tiempo a que se desarrollara este escenario”, señala Mikko Helinko, director de R&D de motores en ABB. ABB ya realizó todas las pruebas de acuerdo a la nueva norma en sus rangos de motores y publicó los nuevos valores de eficiencia durante 2008 y principios del 2009, tan pronto como se completaron las pruebas.

### **3.7.-La eficiencia determina los costos de operación del motor.**

A causa de la gran cantidad de energía que consumen los motores de baja tensión, su eficiencia se mira con mucho detalle y está sujeta a diversas pruebas y esquemas de marcado en el mundo.

La eficiencia decide los costos de operación del motor y las emisiones de CO<sub>2</sub>. Un motor de alta eficiencia (Eff1) cuesta normalmente entre un 10 y 15% más que un motor de eficiencia estándar (Eff2). Sin embargo, esta diferencia de precio se amortiza rápidamente en ahorro energético. El coste de compra de un motor representa aproximadamente sólo el 1% del coste total de su ciclo de vida, siendo el consumo de energía la parte más grande de su costo.



*Figura 47: En comparación con otras máquinas, los motores eléctricos son bastante eficientes.*

### **3.8.-Tres bandas de eficiencia**

Con el respaldo de la Comisión Europea, los fabricantes que representaban el 80% de la producción en Europa de motores estándar acordaron en 1998 establecer tres bandas de eficiencia (Eff1, Eff2 y Eff3) para motores de inducción de 2 y 4 polos, de 1,1 a 90kW. Esta eficiencia se medía de acuerdo a una versión modificada de la norma de pruebas EN 60034-2 (1996).

El sistema europeo acertó en quitar del mercado los motores de eficiencia más baja, Eff3. Sin embargo, tuvo menos éxito en introducir la categoría de eficiencia más alta, Eff1. Desde el año 2000 a 2005, el mercado de motores Eff3 cayó de un 43 a 4%. Eff2 aumentó de 54 a 85%; pero Eff1 sólo consiguió un 9% de cuota de mercado en 2005, desde un 3% en el 2000.



Aunque solo estaba pensado para ser efectivo desde 1999 hasta finales del 2003, este esquema europeo se mantuvo. Representó un gran avance para su tiempo, pero hoy en día ya no es un indicador bueno de la eficiencia del motor y no se puede utilizar para distinguir en los tipos de motores más eficientes en la banda Eff1. Esta norma aplicada en Europa necesita ahora ser remplazada y entrar dentro de la tendencia global.

Hoy, 10 países con una demanda de energía eléctrica mundial del 47% tienen en sus directivas marcados niveles de eficiencia mínimos en los motores. Se espera que se unan a este club en 2012, 14 nuevos países. Entre ellos, los europeos que están siguiendo el esquema anterior. Esto cubrirá el 80% de la demanda de energía eléctrica mundial.

### 3.8.1.-Norma anterior vs norma actual

<b>Norma anterior de medida de eficiencia</b>	<b>Norma actual de medida de eficiencia IEC</b>
<b>EN/IEC 60034-2:1996</b>	<b>60034-2-1: 2007-09</b>

Método directo

Método directo

Método indirecto:

Método indirecto:

- Pérdidas adicionales se estiman como el 0,5% de la potencia de entrada a carga nominal.

- se determinan las pérdidas adicionales por medidas a cargas parciales

- se estiman las cargas adicionales como el 2,5 y 0,5% de la potencia de entrada a carga nominal

- se establecen por cálculo matemático

Pérdidas en los bobinados de rotor y estator determinadas a 95 °C.

Pérdidas en los bobinados de rotor y estator determinadas a 25 °C + incremento de temperatura real del motor.



### 3.8.2.-Pérdidas del motor

Las pérdidas del motor se pueden dividir en cinco tipos: pérdidas en el cobre, pérdidas en el hierro, pérdidas en el rotor, pérdidas mecánicas y pérdidas adicionales. De estos, los cuatro primeros se pueden determinar por la potencia de entrada y la corriente en el motor. Las pérdidas adicionales son el resultado de las pérdidas en el flujo magnético, que se producen cuando el motor está funcionando, y son mucho más difíciles de determinar. La inconsistencia en los métodos de medida se debe principalmente a las pérdidas adicionales, que dependen de la norma que utilice el fabricante o el laboratorio. “ABB ya ha adquirido el equipo necesario para realizar las pruebas y estamos actualmente probando de nuevo todos los motores para que los nuevos valores de eficiencia se puedan incluir en la nueva edición de los catálogos de motores”, señala Mikko Helinko.

Como el método anterior estimaba las pérdidas adicionales y en consecuencia las totales demasiado bajas, los nuevos valores de eficiencia calculados serán ligeramente inferiores. El nuevo valor de eficiencia no significa el diseño o el funcionamiento del motor haya cambiado, sólo que la eficiencia se mide ahora de forma mucho más precisa.



*Figura 48: Las pérdidas del motor se pueden dividir en cinco tipos: pérdidas en el cobre, pérdidas en el hierro, pérdidas en el rotor, pérdidas mecánicas y pérdidas adicionales.*

Potencia de salida

Eficiencia según norma Eficiencia según norma



	anterior 2:1996	EN/IEC	60034-actual 09	IEC 60034-2-1:2007-
Motor ABB 7,5 Kw, 2-polos	88,4%		87,9%	
Motor ABB 11 Kw, 4-polos	90,9%		90,3%	
Motor ABB 160 Kw, 4-polos	96%		95,45	

*Ejemplos de valores de eficiencia comparados según la anterior norma y la actual para tres tamaños de motor.*

### **3.8.3.-Nueva clasificación**

Otro objetivo de la nueva norma es cubrir un mayor volumen de motores trifásicos entre 0,5 y 500 KW que se utilizan en la industria, edificios e infraestructuras. Los tipos específicos de motores eléctricos quedan abiertos, porque se espera que nuevas tecnologías de motor, como los motores de imanes permanentes, sean una vía de mayor eficiencia en el futuro.

La mayoría de los motores pequeños usados en las casas como lavadoras, etc., no están cubiertos porque se considera que están bajo otros esquemas que tratan de la eficiencia de la aplicación completa. Tampoco se aplica a los motores eléctricos para vehículos, que son a menudo hechos a medida.

El método de marcado actual (Eff1, Eff2 y Eff3) se reemplaza por una nueva clasificación IEC de motores según su eficiencia (IEC 60034-30). Los fabricantes tienen que volver a probar sus motores. Cada tipo debe ser probado individualmente, por lo que esto conlleva un gran esfuerzo.

IEC 60034-30 introduce una nueva clasificación, (IE1, IE2 y IE3), que abarca a muchos más tipos de motores que anteriormente:



<b>Parámetro</b>	<b>Nuevo estándar de clasificación : IEC 60034-30 – CDV : 2007-08-31</b>
Tensión y frecuencia nominal	$U_N$ hasta 1000 V - $F_N$ : 50 y 60 HZ Conexión directa 'online'
Gama de potencias	0,75 a 370 Kw
Número de polos	2, 4, 6
Validez para motores	Incluye: motores estándar, motores para atmósferas explosivas (Ex), motor reductores y motores freno
Ciclo de trabajo	S1, S3 con tiempo de operación $\geq$ 80%

NORMA Oficial Mexicana NOM-014-ENER-2004, Eficiencia energética de motores eléctricos de corriente alterna, monofásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, enfriados con aire, en potencia nominal de 0,180 kW a 1,500 kW. Límites, método de prueba y marcado.

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.-  
Secretaría de Energía.- Comisión Nacional para el Ahorro de Energía.- Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos (CCNNPURRE).

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-014-ENER-2004, EFICIENCIA ENERGETICA DE MOTORES ELECTRICOS DE CORRIENTE ALTERNA, MONOFASICOS, DE INDUCCION, TIPO JAULA DE ARDILLA, ENFRIADOS CON AIRE, EN POTENCIA NOMINAL DE 0,180 kW A 1,500 kW. LIMITES, METODO DE PRUEBA Y MARCADO.

La Secretaría de Energía, por conducto de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, con fundamento en los artículos 38 fracción II, 40 fracción X, 41, 43 y 47 fracción IV de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; 33 fracciones VIII y IX de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 3 fracción VI inciso c), 34 fracciones XVI, XIX y XXII y 40 del Reglamento Interior de la Secretaría de Energía; 28 y 34 del Reglamento de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; 1, 2, 3 fracción I y 8 fracciones I y VIII del



Decreto por el que se crea la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, como órgano desconcentrado de la Secretaría de Energía y 1 del Acuerdo por el que se delega en favor del Director General de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, las facultades para presidir el Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos, así como expedir las Normas Oficiales Mexicanas en el ámbito de su competencia, publicados en el **Diario Oficial de la Federación** el 20 de septiembre y 29 de octubre de 1999, respectivamente, y considerando, que la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal define las facultades de la Secretaría de Energía, entre las que se encuentra la de expedir normas oficiales mexicanas que promuevan la eficiencia del sector energético;

Que el Programa Nacional de Normalización de 2004 publicado en el **Diario Oficial de la Federación**

el 24 de mayo de ese mismo año, contempla la actualización de la Norma Oficial Mexicana NOM-014-ENER-1997, Eficiencia energética de motores de corriente alterna, monofásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, de uso general en potencia nominal de 0,180 a 1,500 kW. Límites, método de prueba y marcado, cuya finalidad es la preservación y uso racional de los recursos energéticos;

Que habiéndose cumplido el procedimiento establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización y su Reglamento, para la elaboración de proyectos de normas oficiales mexicanas,

el presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional

de los Recursos Energéticos, ordenó la publicación del Proyecto de Norma Oficial Mexicana

PROY-NOM-014-ENER-2003, Eficiencia energética de motores eléctricos de corriente alterna, monofásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, enfriados con aire, en potencia nominal de 0,180 kW A 1,500 kW. Límites, método de prueba y marcado; lo que se realizó en el **Diario Oficial de la Federación** el 1 de noviembre de 2004, con el objeto de que los interesados presentaran sus comentarios al citado Comité Consultivo que lo propuso;

Que durante el plazo de 60 días naturales contados a partir de la fecha de publicación de dicho Proyecto de Norma Oficial Mexicana, la Manifestación de Impacto Regulatorio a que se refiere el artículo 45 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, estuvo a disposición del público en general para su consulta y que dentro del mismo plazo, los



interesados presentaron sus comentarios al proyecto de norma, los cuales fueron analizados por el citado Comité Consultivo, realizándose las modificaciones procedentes;

Que con fecha 17 de marzo de 2005, se publicaron en el **Diario Oficial de la Federación** las respuestas a los comentarios recibidos respecto del Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-014-ENER-2003, Eficiencia energética de motores eléctricos de corriente alterna, monofásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, enfriados con aire, en potencia nominal de 0,180 kW A 1,500 kW. Límites, método de prueba y marcado;

Que en la sesión XXXI Ordinaria del Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y uso Racional de los Recursos Energéticos (CCNNPURRE), celebrada el 25 de noviembre de 2004, los miembros del Comité aprobaron por consenso la norma referida, y

Que la Ley Federal sobre Metrología y Normalización establece que las normas oficiales mexicanas se constituyen como el instrumento idóneo para la prosecución de estos objetivos, se expide la siguiente:

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-014-ENER-2004, EFICIENCIA ENERGETICA DE MOTORES ELECTRICOS DE CORRIENTE ALTERNA, MONOFASICOS, DE INDUCCION, TIPO JAULA DE ARDILLA, ENFRIADOS CON AIRE, EN POTENCIA NOMINAL DE 0,180 kW A 1,500 kW. LIMITES, METODO DE PRUEBA Y MARCADO

Sufragio Efectivo. No Relección.

México, D.F., a 31 de marzo de 2005.- El Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos (CCNNPURRE) y Director General de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, **Carlos Domínguez Ahedo**.- Rúbrica.

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-014-ENER-2004, EFICIENCIA ENERGETICA DE MOTORES ELECTRICOS DE CORRIENTE ALTERNA, MONOFASICOS, DE INDUCCION, TIPO JAULA DE ARDILLA, ENFRIADOS CON AIRE, EN POTENCIA NOMINAL DE 0,180 kW A 1,500 kW. LIMITES, METODO DE PRUEBA Y MARCADO

PREFACIO



La presente Norma Oficial Mexicana fue elaborada por el Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos (CCNNPURRE), con la colaboración de los siguientes organismos, instituciones y empresas:

- ASESORIA Y PRUEBAS A EQUIPO ELECTRICO Y ELECTRONICO, S.A. DE C.V.
- ASOCIACION DE NORMALIZACION Y CERTIFICACION, A.C.
- BOMBAS GRUNDFOS DE MEXICO, S.A. DE C.V.
- CENTRO NACIONAL DE METROLOGIA.
- COMPAÑIA DE MOTORES DOMESTICOS, S.A. DE C.V.
- ENTIDAD MEXICANA DE ACREDITACION, A.C.
- FIDEICOMISO PARA EL AHORRO DE ENERGIA ELECTRICA.
- INDUSTRIAS IEM, S.A. DE C.V.
- INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS.
- MABE MEXICO, S. DE R.L. DE C.V.
- MOTORES US DE MEXICO, S.A. DE C.V.
- POTENCIA INDUSTRIAL, S.A.
- PROGRAMA DE AHORRO DE ENERGIA EN EL SECTOR ELECTRICO.
- ROCKWELL AUTOMATION DE MEXICO, S.A. DE C.V.
- SIEMENS, S.A. DE C.V.
- WEG MEXICO, S.A. DE C.V.

## INDICE

### 0. Introducción

### 1. Objetivo

### 2. Campo de aplicación

### 3. Referencias



## **4. Definiciones**

### **4.1 Dinamómetro**

### **4.2 Eficiencia**

### **4.3 Eficiencia de prueba**

### **4.4 Eficiencia mínima asociada**

### **4.5 Eficiencia nominal ( $\eta$ )**

### **4.6 Equilibrio térmico a carga plena**

### **4.7 Factor de corrección del dinamómetro (FCD)**

### **4.8 Motor eléctrico abierto**

### **4.9 Motor eléctrico cerrado**

### **4.10 Motor eléctrico con capacitor**

### **4.11 Motor eléctrico de fase dividida**

### **4.12 Motor eléctrico de inducción**

### **4.13 Motor eléctrico**

### **4.14 Motor eléctrico monofásico**

### **4.15 Motor eléctrico tipo jaula de ardilla**

### **4.16 Potencia de entrada**

### **4.17 Potencia de salida**

### **4.18 Potencia nominal**

### **4.19 Régimen continuo**

### **4.20 Régimen nominal**

### **4.21 Régimen de prueba**

### **4.22 Torsiómetro**



## **5. Clasificación**

## **6. Especificaciones**

### **6.1 Eficiencia nominal de motores eléctricos monofásicos de inducción**

### **6.2 Eficiencia mínima asociada**

### **6.3 Determinación de la eficiencia**

## **7. Muestreo**

## **8. Criterios de aceptación**

### **8.1 Placa de datos**

### **8.2 Resultados de las pruebas**

## **9. Método de prueba**

### **9.1 Condiciones de la prueba**

### **9.2 Instrumentos de medición y equipo de prueba**

### **9.3 Procedimiento de prueba**

## **10. Marcado**

## **11. Vigilancia**

## **12. Evaluación de la conformidad**

## **13. Bibliografía**

## **14. Concordancia con las normas internacionales**

## **15. Transitorios**

## **0. Introducción**

Esta Norma Oficial Mexicana tiene la función de definir la forma en que se determina y se expresa la eficiencia nominal y mínima asociada y cuáles son los valores mínimos, con el objeto de procurar el uso racional de los recursos energéticos no renovables de la Nación.



## 1. Objetivo

Esta Norma Oficial Mexicana establece los valores mínimos de eficiencia nominal y mínima asociada, el método de prueba para su evaluación, y la especificación de marcado de la eficiencia nominal en la placa de datos de los motores eléctricos de corriente alterna, monofásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, enfriados con aire, en potencia nominal de 0,180 kW a 1,500 kW que se comercializan en los Estados Unidos Mexicanos.

## 2. Campo de aplicación

Esta Norma Oficial Mexicana se aplica a motores eléctricos de corriente alterna, monofásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, enfriados con aire, abierta o cerrada. Se excluyen los motores eléctricos que requieren de equipo auxiliar o adicional para su enfriamiento.

## 3. Referencias

Para la correcta aplicación de esta Norma Oficial Mexicana debe consultarse y aplicarse la Norma Oficial Mexicana siguiente o la que la sustituya:

- NOM-008-SCFI-2002, Sistema General de Unidades de Medida, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 27 de noviembre de 2002.

## 4. Definiciones

Para efectos de la presente Norma Oficial Mexicana se establecen las definiciones siguientes:

### 4.1 Dinamómetro

Aparato para aplicar carga mecánica a un motor eléctrico en forma continua y controlada y que puede incluir dispositivos para medir el par torsional y la frecuencia de rotación desarrollados por dicho motor eléctrico.



## 4.2 Eficiencia

La eficiencia se define como la razón entre la potencia de salida y la potencia de entrada del motor eléctrico. Se expresa en por ciento y se calcula con alguna de las siguientes relaciones:

- a)  $[\text{Potencia de salida} / \text{potencia de entrada}] \times 100,$
- b)  $[(\text{Potencia de entrada} - \text{pérdidas}) / \text{potencia de entrada}] \times 100,$
- c)  $[\text{Potencia de salida} / (\text{potencia de salida} + \text{pérdidas})] \times 100.$

## 4.3 Eficiencia de prueba

Es la eficiencia determinada por el método de prueba definido en el capítulo 9 de esta Norma Oficial Mexicana.

## 4.4 Eficiencia mínima asociada

Es el valor mínimo de eficiencia que debe de cumplir un motor eléctrico probado de acuerdo al método de prueba del capítulo 9.

Cada eficiencia nominal tiene una eficiencia mínima asociada especificada en la columna B de la Tabla 1.

## 4.5 Eficiencia nominal ( $\eta$ )

Es el valor de la eficiencia mostrado en la placa de datos del motor eléctrico, seleccionado de la columna A de la Tabla 1 por el fabricante. Este valor no debe ser mayor que la eficiencia promedio de una población grande de motores eléctricos del mismo diseño.

## 4.6 Equilibrio térmico a carga plena

Es el que se alcanza cuando la diferencia de la temperatura del motor eléctrico entre 2 mediciones continuas, en un lapso de 30 min no exceda de 1°C, trabajando a carga plena.

## 4.7 Factor de Corrección del Dinamómetro (FCD)



Es el par torsional necesario para vencer la oposición que presenta el dinamómetro al movimiento mecánico, en su condición de carga mínima.

#### **4.8 Motor eléctrico abierto**

Es un motor eléctrico que tiene aberturas para ventilación que permite el paso del aire exterior de enfriamiento, sobre y a través del embobinado del motor eléctrico.

#### **4.9 Motor eléctrico cerrado**

Es un motor eléctrico cuya armazón impide el intercambio libre de aire entre el interior y el exterior de éste, sin llegar a ser hermético.

#### **4.10 Motor eléctrico con capacitor**

Es un motor eléctrico monofásico cuyo embobinado principal se conecta directamente a la fuente de energía y su embobinado auxiliar, desplazado 90° eléctricos respecto al embobinado principal, se conecta en serie con un capacitor. Se clasifican en:

##### **4.10.1 Motor eléctrico de arranque por capacitor**

El capacitor permanece conectado al circuito únicamente durante el arranque.

##### **4.10.2 Motor eléctrico de capacitor permanentemente conectado**

El capacitor siempre está conectado a su embobinado, durante el arranque y la operación.

##### **4.10.3 Motor eléctrico con dos capacitores**

Tiene dos capacitores conectados a sus embobinados durante el arranque y uno de ellos permanece conectado durante la operación.

**Nota:** se debe entender por capacitor un valor de capacitancia que no es proporcionado necesariamente por un solo capacitor, sino que pueden ser arreglos de varios capacitores.

#### **4.11 Motor eléctrico de fase dividida**



---

Es un motor eléctrico monofásico cuyo embobinado principal se conecta directamente a la fuente de energía y su embobinado auxiliar, desplazado  $90^\circ$  eléctricos con respecto al embobinado principal, se conecta a la fuente de energía únicamente durante el arranque.

#### **4.12 Motor eléctrico de inducción**

Es un motor eléctrico en el cual solamente una parte, el rotor o el estator, se conecta a la fuente de energía y la otra trabaja por inducción electromagnética.

#### **4.13 Motor eléctrico**

Es una máquina rotatoria para convertir energía eléctrica en mecánica.

#### **4.14 Motor eléctrico monofásico**

Es un motor eléctrico que utiliza para su operación energía eléctrica de corriente alterna monofásica.

#### **4.15 Motor eléctrico tipo jaula de ardilla**

Es un motor eléctrico de inducción, en el cual los conductores del rotor son barras colocadas en las ranuras del núcleo secundario, que se conectan en circuito corto por medio de anillos en sus extremos semejando una jaula de ardilla.

#### **4.16 Potencia de entrada**

Es la potencia eléctrica que el motor toma de la línea.

#### **4.17 Potencia de salida**

Es la potencia mecánica disponible en el eje del motor eléctrico.

#### **4.18 Potencia nominal**

Es la potencia mecánica de salida indicada en la placa de datos del motor eléctrico.

#### **4.19 Régimen continuo**

Es el régimen nominal con el cual debe cumplir un motor eléctrico en funcionamiento continuo.

#### **4.20 Régimen nominal**



---

Es la condición de operación, a la tensión y frecuencia eléctrica nominales en la que el motor eléctrico desarrolla la potencia indicada en la placa de datos.

#### **4.21 Régimen de prueba**

Es la condición de operación a la tensión eléctrica indicada en la Tabla 3, en la que el motor eléctrico desarrolla la potencia indicada en la placa de datos.

#### **4.22 Torsiómetro**

Aparato acoplado entre los ejes del motor eléctrico y del dinamómetro, que trasmite y mide el par torsional. Algunos tipos de torsiómetro miden además la frecuencia de rotación y permiten determinar la potencia mecánica desarrollada por el motor eléctrico.

### **5. Clasificación**

Para los fines de esta Norma Oficial Mexicana, los motores eléctricos se clasifican de acuerdo a su potencia, número de polos y tensión eléctrica nominal, como se indica en la Tabla 2.

### **6. Especificaciones**

#### **6.1 Eficiencia nominal de motores eléctricos monofásicos de inducción**

Todos los motores eléctricos sujetos al cumplimiento de esta Norma Oficial Mexicana, deben indicar en su placa de datos una eficiencia nominal igual o mayor a la especificada en la Tabla 2.

#### **6.2 Eficiencia mínima asociada**

Todos los motores eléctricos sujetos a esta Norma Oficial Mexicana deben de tener una eficiencia de prueba igual o mayor a la eficiencia mínima asociada a la eficiencia nominal indicada en su placa de datos, de acuerdo con la Tabla 1.



**TABLA 1.- Eficiencia nominal y eficiencia mínima asociada  
[en por ciento]**

<b>Columna A Eficiencia nominal</b>	<b>Columna B Eficiencia mínima</b>	<b>Columna A Eficiencia nominal</b>	<b>Columna B Eficiencia mínima</b>
99,0	98,8	90,2	88,5
98,9	98,7	89,5	87,5
98,8	98,6	88,5	86,5
98,7	98,5	87,5	85,5
98,6	98,4	86,5	84,0
98,5	98,2	85,5	82,5
98,4	98,0	84,0	81,5
98,2	97,8	82,5	80,0
98,0	97,6	81,5	78,5
97,8	97,4	80,0	77,0
97,6	97,1	78,5	75,5
97,4	96,8	77,0	74,0
97,1	96,5	75,5	72,0
96,8	96,2	74,0	70,0
96,5	95,8	72,0	68,0
96,2	95,4	70,0	66,0
95,8	95,0	68,0	64,0
95,4	94,5	66,0	62,0
95,0	94,1	64,0	59,5
94,5	93,6	62,0	57,5
94,1	93,0	59,5	55,0
93,6	92,4	57,5	52,5
93,0	91,7	55,0	50,5
92,4	91,0	52,5	48,0
91,7	90,2	50,5	46,0
91,0	89,5	48,0	43,0

**Nota:** los valores de la eficiencia nominal de la columna A se obtienen a partir del 99,0%, con incrementos de pérdidas de 10%. Los valores de eficiencia mínima asociada de la columna B, se obtienen incrementando las pérdidas en un 20%.

### **6.3 Determinación de la eficiencia**

Para determinar la eficiencia de los motores eléctricos de inducción monofásicos en potencia nominal de 0,180 kW a 1,500 kW, se precisa como prueba única el método descrito en el capítulo 9 de la presente Norma Oficial Mexicana.

**TABLA 2.- Eficiencia nominal para motores eléctricos  
monofásicos de inducción tipo jaula de ardilla**



Potencia		Tensión eléctrica nominal								
kW		115 V			127 V			200 - 240 V		
Mayor o igual a	Menor que	Número de polos								
		2	4	6	2	4	6	2	4	6
		Eficiencia nominal en %								
0,180	0,249	55,0	52,5	50,5	52,5	50,5	48,0	52,5	50,5	48,0
0,249	0,373	57,5	55,0	52,5	55,0	52,5	50,5	55,0	52,5	50,5
0,373	0,560	62,0	59,5	57,5	59,5	57,5	55,0	59,5	57,5	55,0
0,560	0,746	64,0	62,0	62,0	62,0	59,5	57,5	62,0	59,5	57,5
0,746	1,119	66,0	64,0	64,0	64,0	62,0	59,5	64,0	62,0	59,5
1,119	1,492	70,0	68,0	68,0	68,0	66,0	66,0	68,0	66,0	66,0
1,492	1,501	74,0	72,0	72,0	72,0	70,0	70,0	72,0	70,0	70,0

## 7. Muestreo

La Secretaría de Energía, a través de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, establecerá el procedimiento para la evaluación de la conformidad (incluyendo el muestreo) de los motores eléctricos con las especificaciones establecidas en esta Norma, de acuerdo con el artículo 73 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.

## 8. Criterios de aceptación

### 8.1 Placa de datos

La eficiencia nominal marcada por el fabricante en la placa de datos del motor eléctrico, debe ser igual o mayor que el valor correspondiente de la Tabla 2 de esta Norma Oficial Mexicana.

### 8.2 Resultados de las pruebas

La eficiencia determinada con el método de prueba del capítulo 9, para cada motor eléctrico probado, debe ser igual o mayor que la eficiencia mínima asociada a la eficiencia nominal marcada en la placa de datos por el fabricante.

## 9. Método de prueba

Los motores eléctricos se prueban por el método de medición directa de las potencias de entrada y de salida del motor eléctrico operando a carga plena y en equilibrio térmico.

### 9.1 Condiciones de la prueba

La frecuencia eléctrica de alimentación para la prueba debe ser de 60 Hz  $\pm$  0,5%.

La tensión eléctrica de corriente alterna de alimentación para la prueba, debe ser la tensión eléctrica indicada en la Tabla 3, medida en sus terminales, sin exceder una variación de  $\pm$ 0,5%. La Distorsión Armónica Total (DAT) de la onda de tensión eléctrica no debe ser mayor al 5%.

**Nota:** La Distorsión Armónica Total (DAT) es un indicador del contenido de armónicas en una onda de tensión eléctrica. Se expresa como un porcentaje de la fundamental y se define como:



$$DAT = \left( \frac{\sum_{i=2}^n V_i^2}{V_1^2} \right) * 100$$

Donde:

$V_i$  es la amplitud de cada armónica

$V_1$  es la amplitud de la fundamental

Las magnitudes eléctricas que varíen senoidalmente, deben expresarse en valores eficaces, a menos que se especifique otra cosa.

**TABLA 3.- Tensión eléctrica para las pruebas [V]**

Tensión eléctrica nominal indicada en la placa de datos		Tensión eléctrica de prueba
Única de hasta	115	115
	127	127
Múltiple con valor menor de hasta	115	115
	127	127
Única desde 200 hasta 240		220

## 9.2 Instrumentos de medición y equipo de prueba

Los instrumentos de medición deben seleccionarse para que el valor leído esté dentro del intervalo de la escala recomendado por el fabricante del instrumento o, en su defecto, en el tercio superior de la escala del mismo.

Los instrumentos analógicos o digitales deben estar calibrados con una incertidumbre máxima de  $\pm 0,25\%$  a plena escala.

Cuando se utilicen transformadores de corriente, se deben realizar las correcciones necesarias para considerar los errores de relación y fase en las lecturas de corriente eléctrica. Estos errores no deben ser mayores de  $0,25\%$ .

El dinamómetro debe seleccionarse de forma que a su carga mínima, la potencia de salida demandada al motor eléctrico no sea mayor de  $15\%$  de la potencia nominal del mismo.

Para evitar la influencia por el acoplamiento del motor con el dinamómetro durante el desarrollo de las pruebas de equilibrio térmico, funcionamiento y carga mínima posible en el dinamómetro, éstas deben realizarse sin desacoplar el motor entre ellas.

Los instrumentos de medición, equipos y aparatos para aplicar este método de prueba son los siguientes:



- 1) Aparato para medir la temperatura detectada por los detectores de temperatura por resistencia o termopares;
- 2) Equipo para controlar la tensión de alimentación;
- 3) Frecuencímetro;
- 4) Voltímetro;
- 5) Wáttmetro monofásico;
- 6) Dinamómetro;
- 7) Torsiómetro o aparato para medir el par torsional;
- 8) Tacómetro, y
- 9) Cronómetro.

### 9.3 Procedimiento de prueba

Antes de iniciar las pruebas se deben colocar tres detectores de temperatura por resistencia o termopares en los devanados o superficies accesibles, mediante los cuales se detectará el equilibrio térmico durante la prueba de funcionamiento a carga nominal. Cada detector se debe instalar en forma tal que quede protegido contra corrientes de aire de enfriamiento y debe permanecer firme en su posición durante toda la prueba.

#### 9.3.1 Prueba de funcionamiento

Se hace funcionar el motor eléctrico a su potencia nominal, a la tensión eléctrica medida en sus terminales y frecuencia eléctrica de prueba, hasta alcanzar el equilibrio térmico definido en el inciso 4.6, en los tres puntos de medición de temperatura.

Se miden y registran:

- 1) La tensión eléctrica de alimentación en las terminales del motor eléctrico, en V;
- 2) La frecuencia eléctrica de alimentación, en Hz;
- 3) La potencia de entrada  $P_e$ , en kW;
- 4) El par torsional en el eje del motor eléctrico  $T_m$ , en N·m, y
- 5) La frecuencia de rotación  $n_m$ , en  $\text{min}^{-1}$ .

#### 9.3.2 Carga mínima posible en el dinamómetro

Se ajusta el dinamómetro a su carga mínima y se opera el motor eléctrico a su tensión eléctrica medida en sus terminales y frecuencia eléctrica de prueba hasta que la potencia de entrada varíe no más de 3% en un lapso de 30 min.

Con la potencia de entrada estabilizada a la carga mínima del dinamómetro se miden y registran:

- 1) La tensión eléctrica de alimentación en las terminales del motor eléctrico, en V;
- 2) La frecuencia eléctrica de alimentación, en Hz;



- 3) La potencia de entrada  $P_{\text{mín}}$ , en kW;
- 4) El par torsional en el eje del motor eléctrico  $T_{\text{mín}}$ , en N·m;
- 5) Frecuencia de rotación  $n_{\text{mín}}$ , en  $\text{min}^{-1}$ , y
- 6) Se verifica que la potencia de salida  $P_d$  demandada al motor eléctrico bajo prueba, sea menor al 15% de su potencia nominal. Donde  $P_d$  en kW, se calcula de la siguiente forma:

$$P_d = \frac{T_{\text{mín}} \cdot n_{\text{mín}}}{9549} \quad [\text{kW}]$$

### 9.3.3 Prueba de operación en vacío

Se desacopla el motor del dinamómetro y se opera en vacío a la tensión eléctrica medida en sus terminales y frecuencia eléctrica de prueba hasta que la potencia de entrada varíe no más del 3% en un lapso de 30 min.

Con la potencia de entrada estabilizada, se miden y registran:

1. La tensión eléctrica de alimentación en las terminales del motor eléctrico, en V;
2. La frecuencia eléctrica de alimentación, en Hz;
3. La potencia de entrada  $P_0$ , en kW, y
4. La frecuencia de rotación  $n_0$ , en  $\text{min}^{-1}$ .

### 9.3.4 Cálculo del Factor de Corrección del Dinamómetro (FCD)

**Nota:** El FCD se debe determinar cuando el dinamómetro está situado entre el motor a probar y el transductor usado para medir el par.

Con las mediciones realizadas en los incisos 9.3.2 y 9.3.3, se calcula:

a) El deslizamiento  $S_{\text{mín}}$ :

$$S_{\text{mín}} = \frac{n_s - n_{\text{mín}}}{n_s}$$

Donde:

$n_s$  es la frecuencia de rotación síncrona, en  $\text{min}^{-1}$ , y

$n_{\text{mín}}$  es la frecuencia de rotación con el dinamómetro a su carga mínima medida en el inciso 9.3.2, en  $\text{min}^{-1}$ .

b) Se calcula el factor de corrección del dinamómetro (FCD), mediante la siguiente fórmula:

$$\text{FCD} = \frac{9549}{n_{\text{mín}}} \cdot [P_{\text{mín}} \cdot (1 - S_{\text{mín}})] - \frac{9549}{n_0} \cdot [P_0] - T_{\text{mín}} \quad [\text{N} \cdot \text{m}]$$

donde:



$n_{\text{mín}}$  es la frecuencia de rotación con el dinamómetro a su carga mínima medida en el inciso 9.3.2, en  $\text{min}^{-1}$ .

$n_0$  es la frecuencia de rotación en vacío medida en el inciso 9.3.3, en  $\text{min}^{-1}$ .

$P_{\text{mín}}$  potencia de entrada con el dinamómetro a su carga mínima medida en el inciso 9.3.2, en kW.

$P_0$  potencia de entrada con el motor eléctrico operando en vacío, medida en el inciso 9.3.3, en kW.

$T_{\text{mín}}$  par torsional medido en el eje del motor eléctrico con el dinamómetro a su carga mínima, según inciso 9.3.2, en N·m

### 9.3.5 Cálculo de la potencia de salida corregida

**Nota:** Cuando la medición del par se hace entre el motor de prueba y el dinamómetro, las pérdidas del dinamómetro no afectan a la medición, con lo cual el FCD se considera igual a cero.

Se calcula la potencia de salida corregida  $P_s$ , en kW, mediante la siguiente fórmula:

$$P_s = \frac{(T_m + \text{FCD}) \cdot n_m}{9\,549} \quad [\text{kW}]$$

Donde:

FCD Factor de corrección del dinamómetro calculado en el inciso 9.3.4, en N·m

$T_m$  es el par torsional medido en el eje del motor eléctrico a su potencia nominal, en el inciso 9.3.1 en N·m

$n_m$  frecuencia de rotación medida a la potencia nominal en el inciso 9.3.1, en  $\text{min}^{-1}$

### 9.3.6 Cálculo de la eficiencia

Se calcula la eficiencia  $\eta_m$  del motor eléctrico a su potencia nominal utilizando la fórmula siguiente:

$$\eta_m = \frac{P_s}{P_e} \cdot 100 \quad [\%]$$

Donde:

$P_e$  Potencia de entrada a la potencia nominal medida en el inciso 9.3.1, en kW.

$P_s$  potencia de salida corregida a la potencia nominal, calculada en el inciso 9.3.5, en kW.

## 10. Marcado

La información mínima que se debe marcar en la placa de datos del motor eléctrico es:

La marca, modelo, tipo de enclaustramiento y tipo de arranque del motor eléctrico;

La eficiencia nominal precedida del símbolo " $\eta$ "; (2 dígitos enteros y 1 decimal)

La potencia nominal en kW; (1 dígito entero y por lo menos 1 decimal)

La tensión eléctrica nominal en V;



La frecuencia eléctrica nominal en Hz, y  
La frecuencia de rotación en  $\text{min}^{-1}$  o r/min

Además de la información especificada por otras normas oficiales mexicanas vigentes que sean aplicables.

Los motores eléctricos certificados en el cumplimiento de esta Norma Oficial Mexicana, podrán ostentar la contraseña del organismo certificador dentro o fuera de la placa de datos.

### **11. Vigilancia**

La Secretaría de Energía, a través de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía y la Procuraduría Federal del Consumidor, conforme a sus atribuciones y en el ámbito de sus respectivas competencias, son las autoridades que están a cargo de vigilar el cumplimiento de la presente Norma Oficial Mexicana una vez que se publique en el **Diario Oficial de la Federación** como norma definitiva.

El incumplimiento de la presente Norma Oficial Mexicana una vez que se publique en el **Diario Oficial de la Federación** como norma definitiva, debe ser sancionado conforme a lo dispuesto por la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, su Reglamento y demás disposiciones.

### **12. Evaluación de la conformidad**

La evaluación de la conformidad de los motores eléctricos con las especificaciones de la presente Norma Oficial Mexicana, debe ser realizada por personas acreditadas y aprobadas en términos de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización y su Reglamento.

### **13. Bibliografía**

Ley Federal sobre Metrología y Normalización, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 1 de julio de 1992 y sus modificaciones a ésta, publicadas en el **Diario Oficial de la Federación** el 20 de mayo de 1997.

Reglamento de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, publicado en el **Diario Oficial de la Federación** el 14 de enero de 1999.

CSA C22.2 100 Motors and generators.

CSA-C747-94 Energy efficiency test methods for single- and three-phase small motors.

IEC 34 PT-1 Rotating electrical machines. Part I: rating and performance.

IEC 34 PT-2 Rotating electrical machines. Part 2: methods for determining losses and efficiency of rotating electrical machines.

IEEE Std. 114 IEEE Standard test procedure for single-phase induction motors.

JIS-4203 Single-phase induction motors for general purpose.

NEMA MG 11 Energy management guide for selection and use of single-phase motors.

NEMA MG 1 Motors and generators.



NMX-J-226, Motores de inducción del tipo rotor en corto circuito o de jaula en potencias hasta de 37,5 W (1/20 CP) de polos sombreados de capacitor permanente conectado y universales hasta 750 W (1 CP).

NMX-J-075/1-ANCE, Aparatos eléctricos-Máquinas rotatorias parte 1: motores de inducción de corriente alterna del tipo de rotor en cortocircuito, en potencias desde 0,062 a 373 kW- Especificaciones.

NMX-J-075/2-ANCE, Aparatos eléctricos-Máquinas rotatorias parte 2: motores de inducción de corriente alterna del tipo de rotor en cortocircuito, en potencias grandes- Especificaciones.

NMX-J-075/3-ANCE, Aparatos eléctricos-Máquinas rotatorias parte 3: métodos de prueba para motores de inducción de corriente alterna del tipo de rotor en cortocircuito, en potencias desde 0,062 kW - Métodos de prueba.

NOM-016-ENER-2002, Eficiencia Energética de Motores de corriente alterna, trifásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla en potencias de 0,746 kW a 373 kW -Límites, métodos de prueba y marcado.

NOM-014-ENER-1997, Eficiencia energética de motores de corriente alterna, monofásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, de uso general en potencia nominal de 0,180 a 1,500 kW. Límites, método de prueba y marcado.

#### **14. Concordancia con las normas internacionales**

Esta Norma no concuerda con ninguna norma internacional, por no existir referencia alguna al momento de elaborar la presente.

#### **15. Transitorios**

1. Esta Norma Oficial Mexicana, una vez publicada en el **Diario Oficial de la Federación** como Norma Oficial Mexicana definitiva, cancela y sustituye a la NOM-014-ENER-1997, Eficiencia energética de motores de corriente alterna, monofásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, de uso general en potencia nominal de 0,180 a 1,500 kW. Límites, método de prueba y marcado, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 17 de julio de 1998.
2. Esta Norma Oficial Mexicana, una vez publicada en el **Diario Oficial de la Federación** como Norma Oficial Mexicana definitiva, entrará en vigor noventa días naturales después de su publicación y a partir de esa fecha, todos los motores eléctricos de corriente alterna, monofásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, enfriados con aire, comprendidos en su campo de aplicación deberán certificarse con base a la misma.
3. Los motores monofásicos cuya certificación en el cumplimiento con la NOM-014-ENER-1997,



Se haya realizado antes de la entrada en vigor de la nueva Norma Oficial Mexicana definitiva, por organismos de certificación acreditados y aprobados, podrán comercializarse, como máximo, hasta el término de la vigencia del certificado estipulada en el mismo.

Sufragio Efectivo. No Reelección.

México, D.F., a 31 de marzo de 2005.- El Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos (CCNNPURRE) y Director General de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, **Carlos Domínguez Ahedo**.- Rúbrica.

## APENDICE A (Informativo)

### NOMENCLATURA

FCD	Factor de corrección del dinamómetro, en N·m
$n_m$	Frecuencia de rotación medida a la potencia nominal, en $\text{min}^{-1}$
$n_{\text{mín}}$	Frecuencia de rotación con el dinamómetro a su carga mínima, en $\text{min}^{-1}$
$n_0$	Frecuencia de rotación en vacío, en $\text{min}^{-1}$
$n_s$	Frecuencia de rotación síncrona, en $\text{min}^{-1}$
$P_0$	Potencia de entrada con el motor operando en vacío, en kW
$P_d$	Potencia demandada al motor bajo prueba por el dinamómetro a su carga mínima, en kW
$P_e$	Potencia de entrada a la potencia nominal, en kW
$P_{\text{mín}}$	Potencia de entrada con el dinamómetro a su carga mínima, en kW
$P_s$	Potencia de salida corregida a la potencia nominal, en kW
$S_{\text{mín}}$	Deslizamiento en por unidad de la frecuencia de rotación síncrona, con el dinamómetro a su carga mínima
$T_m$	Par torsional medido en el eje del motor a su potencia nominal, en N·m
$T_{\text{mín}}$	Par torsional medido en el eje del motor con el dinamómetro a su carga mínima, en N·m
$\eta$	Eficiencia nominal, en por ciento
$\eta_m$	Eficiencia del motor calculada a partir de la prueba a la potencia nominal del motor, en por ciento



**APENDICE B (Informativo)**

**EQUIVALENCIA ENTRE kW Y Cp**

kW	Cp
0,187	1/4
0,249	1/3
0,373	1/2
0,560	3/4
0,746	1
1,119	1 1/2
1,492	2



## Capítulo 4

### 4.- Selección de motores de alta eficiencia

Durante su vida útil un motor eléctrico gasta en su funcionamiento cien veces más de lo que costó su compra. Si se adquieren motores de alta eficiencia se puede pagar mucho menos debido al menor coste de la energía consumida, ahorrando dinero y protegiendo el ambiente.

Comparación de costos de operación de un motor de 50HP (37,3kW)

Base de comparación	Motor estándar	Motor de alta eficiencia	Diferencia	comentarios
Precio de compra (€)	28.540	34.248	5.708	20 % mayor
Eficiencia (%)	89.5	93.6	4.1	4.5 % mayor
Perdidas (%)	10.5	6.4	4.1	39 % menor
Costo anual de energía (€)	23.730.3	22.690.8	1.039.5	3.3 y 2.7 veces el costo inicial de un motor
Costo anual de pérdidas	2.491.7	1.452.2	1.039.5	41.7 % menor
Costo de energía en 20 años(€)	474.606	453.816.7	20.786.4	4.6 % menor
Costo de pérdidas en 20 años (€)	49.033.7	29.044.3	20.786.4	3,6 veces el costo de la diferencia del precio de compra

Figura 49: tabla de comparación entre un motor estándar y uno de alta eficiencia



## 4.1.-Normas para motores comunes y normas para motores de alta eficiencia

A nivel mundial existen diferentes tipos de normas aplicables a los motores, que dependen del país donde se comercializan

Normas aplicable a los motores en cada país:

Normas	entidad	país	denominación
NEMA	National Electrical Manufacturers Association	Usa	NEMA MG1 Seguridad NEMA MG1 Eficiencia energética, valores mínimos
CSA standards	Canadian Standards Association	Canadá	C22.2 N° 100-M1985 Seguridad C390-93 Eficiencia energética + ensayo, valores mínimos
UL standards	Underwriters Laboratories Inc.	Usa	UL 1004 Seguridad
IEEE standards	Institute of Electrical	Internacional	IEEE112 B Método de ensayo
IEC standards	International Electrotechnical Commission	Internacional	IEC 60034-1 General IEC 60034-2 Método de ensayo
CENELEC	European Committee for Electrotechnical	Unión europea	EN 60034-1 General EN 60034-2 Método de ensayo

Figura 50: Tabla de normas para diferentes tipos de motores dependiendo el país ubicado

En estados unidos el departamento de energía (DOE) promulgo la ley EPact que obliga que a partir del 24 de octubre de 1997 a que los motores que se comercialicen en este país sean NEMA o métricos y cumplan con un rendimiento mínimo dependiendo de la potencia y la polaridad.

En estas leyes se establecen unos logotipos que indican que normas cumple el motor



- C: el motor cumple las normas de Canadá CSA.
- URUS: el motor cumple con la UL de EE.UU.
- ENERGY: se cumple con los rendimientos mínimos indicados en la Energy Efficiency de la Ley EPact.

En Europa existe un acuerdo entre los fabricantes y la Dirección General de Energía, que establece a su vez unos logotipos que indican el rendimiento del motor.

- EFF1: motores de alto rendimiento.
- EFF2: motores de rendimiento mejorado.
- EFF3: motores de bajo rendimiento.

La distribución de las tres clases de rendimientos queda de la siguiente manera:

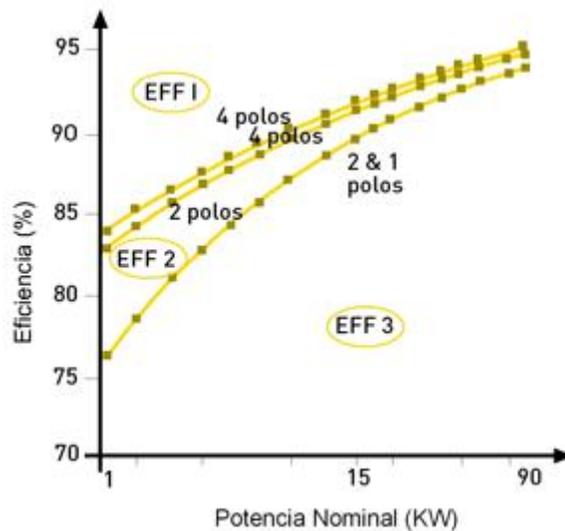


Figura 51: rendimiento de un motor en diferentes polos

### Fundamentos técnicos de los valores de eficiencia.



La clasificación de la eficiencia proporciona al usuario una herramienta sencilla para optimizar la compra del motor.

### Determinación del rendimiento.

El **rendimiento de un motor** se define como la potencia mecánica que se obtiene por unidad de potencia absorbida.

$$\eta = \frac{\text{Potencia mecánica}}{\text{Potencia eléctrica}}$$

Haciendo una gráfica comparativa de los diferentes métodos para motores de 4 polos de 15kW tenemos:

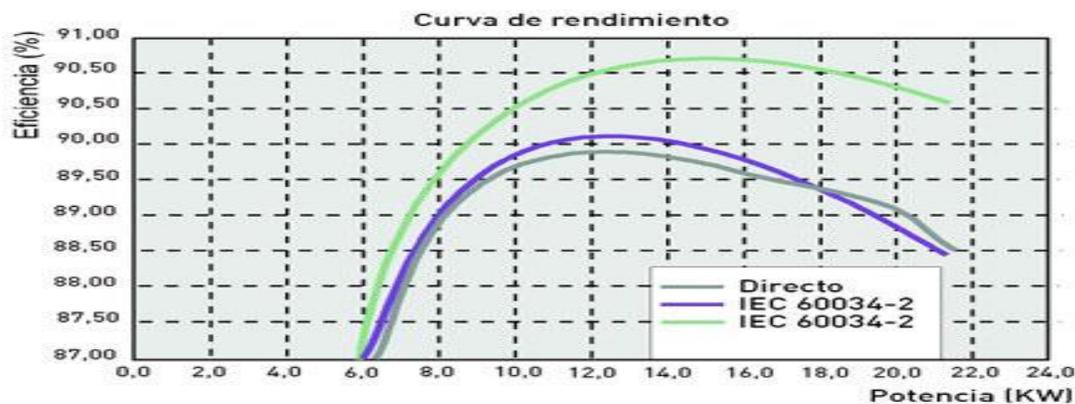


Figura 52: curva de rendimiento de motores de 4 polos de 15kw

### Motor EFF1

Como media, un motor EFF1 reduce las pérdidas de energía por encima del 40%. Esto significa que en el caso de muchas horas de utilización, por ejemplo 6000h/año, en un motor de 15kW, se podrán ahorrar más de 4MWh al año o más de 400€ de la factura de electricidad (considerando 0.10€/K<sub>wh</sub>).

La mejor calidad de los materiales incrementa normalmente la vida útil del motor.

El mayor precio de compra de un motor EFF1 se recupera en un corto plazo de tiempo, comparado con la vida útil del motor eléctrico.



### Motor EFF2

Un motor EFF2 reduce las pérdidas de energía hasta un 20%, lo que significa que en el caso de utilización de 2000h/año, un motor de 15kW, puede ahorrar 0,6MWh al año con un coste adicional mínimo.

La clase EFF2 garantiza una eficiencia satisfactoria con un sobrecoste mínimo.

### Motor EFF3

En general, los motores de la clase EFF3 presentan una muy baja eficiencia y representan una inversión antieconómica en la mayoría de las situaciones, por lo que no es recomendable.

Ventajas en la compra de un motor de alto rendimiento:

tipo	Amhe 200lp2	Amhe 200lla2
Clase eficiencia (CEMEP)	EFF1	EFF2
Rendimiento (%)	93,1	91,6
Potencia en el eje (kW)	30	30
Potencia red (kW)	32,22	32,75
Precio energía (€/kWh)	0,071238	0,071238
Precio motor (€)	2.422,54	2.202,14
Ahorro (€/h)	0,0376	0,0376
Amortización diferencia precio horas	3.094 horas	128,9 días
Amortización motor EFF1 horas	64.445 horas	7,4 años

Figura 53: Tabla de comparación de la compra de un motor ventajas e inconvenientes

### Motor EFF1

Los motores de alta eficiencia se utilizan principalmente:

- En instalaciones nuevas.
- Cuando se realicen modificaciones mayores en procesos existentes.
- Para sustituir motores que han fallado.
- En motores estándar que operan sobrecargados o con baja carga.



- En la adquisición de equipos nuevos como: compresores, sistemas de bombeo, etc.
- Cuando se desee reducir los costes de operación por el ahorro del consumo de energía eléctrica y de la demanda máxima.
- 

## 4.2.- Medidas de eficiencia

**Evitar el arranque y la operación simultánea de motores**, sobre todo los de mediana y gran capacidad, para disminuir el valor máximo de la demanda.

**Evitar la operación en vacío de los motores.**

**Verificar periódicamente la alineación del motor con la carga impulsada.** Una alineación defectuosa puede incrementar las pérdidas por rozamiento y en caso extremo ocasionar daños mayores en el motor y en la carga.

**Corregir la caída de tensión en los alimentadores.** Una tensión reducida en los terminales del motor, genera un incremento de la corriente, sobrecalentamiento y disminución de su eficiencia. Las normas permiten una caída de tensión del 5%. Para ello utiliza conductores correctamente dimensionados.

**Equilibrar la tensión de alimentación en los motores trifásicos de corriente alterna.** El desequilibrio entre fases no debe exceder en ningún caso del 5%, pero mientras menor sea el desequilibrio, los motores operarán con mayor eficiencia.

**Mantener bien ajustado y en óptimas condiciones el interruptor de arranque de los motores monofásicos de fase partida.** El mal funcionamiento de este accesorio que se emplea para desconectar el devanado de arranque (y el condensador en los motores de arranque por condensador) provoca un sobrecalentamiento en los conductores ocasionando significativas pérdidas de energía y en caso extremo el fallo del motor.

**Utilizar arrancadores a tensión reducida en aquellos motores que realicen un número elevado de arranques.** Con esto se evita un calentamiento excesivo en los conductores y se logra disminuir las pérdidas durante la aceleración.



**Sustituir en los motores de rotor devanado, los reguladores con resistencias para el control de la velocidad, por reguladores electrónicos más eficientes**, porque las resistencias llegan a consumir hasta un 20% de la potencia que el motor toma de la red.

**Instalar equipos de control de la temperatura del aceite de lubricación** de cojinetes de motores de gran capacidad a fin de minimizar las pérdidas por fricción y elevar la eficiencia.

**No se recomienda rebobinar los motores más de 2 veces**, porque puede variar las características de diseño del motor, lo cual incrementaría las pérdidas de energía.

### Ejemplo

Una manera rápida de calcular el ahorro monetario de estos motores sería:

$$\text{Ahorro económico anual (€)} = h \cdot \% \text{ Pot} \cdot \text{€/kWh} \cdot (1/\eta_{\text{std}} - 1/\eta_{\text{HEM}})$$

Donde:

- $h$  = tiempo de utilización anual (en horas).
- $\text{kW}$  = potencia del motor (en kW).
- $\% \text{Pot}$  = fracción de plena carga a que trabaja el motor.
- $\text{€/kWh}$  = coste de la electricidad (en €/kWh).
- $\eta_{\text{std}}$  = eficiencia de un motor estándar (EFF3).
- $\eta_{\text{HEM}}$  = eficiencia de un motor de alta eficiencia.

Si no se conoce la eficiencia del motor existente en la actualidad, una estimación razonable será suponer una eficiencia energética en el límite entre las de clases EFF2 y EFF3 para un motor que nunca se ha reparado.

Si el motor se ha reparado, se debe considerar una pérdida adicional de eficiencia del 0,5% por cada reparación.

Si se opera por debajo del 100% de la carga se utilizarán los valores de eficiencia para cargas parciales. Los fabricantes presentan en sus folletos los valores de la eficiencia para el 75% y el 50% de la plena carga.



### Ejemplo práctico

Sea un motor de 4 polos y 15kW, que acciona una bomba impulsora de agua de refrigeración, que trabaja a plena carga 6000h/año. Se supone que el coste de la electricidad es de 0.10€/kWh.

Los motores EFF1 y estándar presentan una eficiencia del 91,8% y del 88,2% respectivamente.

$$\text{Ahorro anual} = 6000 \cdot 15 \cdot 100\% \cdot 0.10 \cdot (1 / 88.2 - 1 / 91.8)$$

$$\text{Ahorro anual de energía} = 400\text{€}$$

### POTENCIAS PARA MÁQUINAS

#### A. POTENCIA PARA ELEVACIÓN DE AGUA

$P = h/\eta$  P- potencia en kW

Q- caudal en m<sup>3</sup>/s

h- altura de la elevación en m

$\eta$  - rendimiento mecánico

Una bomba tiene un flujo inicial de 48 m<sup>3</sup> por hora, sin embargo se recirculan 8 m<sup>3</sup> por hora, es decir, se requiere un flujo de 40 m<sup>3</sup>. Determinar el comportamiento de la bomba si trabaja únicamente con el flujo requerido.

N = 1765 r.p.m.

Flujo = 48 m<sup>3</sup> por hora

H = 80 metros

P = 14 kW

Mediante las relaciones de afinidad se determinan los siguientes parámetros:

$$N_2 = \frac{40}{48} \times 1765 = 1470 \text{ RPM}$$

$$H_2 = \left[ \frac{40}{48} \right] \times 80 = 55.55 \text{ metros}$$



$$P_2 = \left[ \frac{40}{48} \right] \times 14 = 8.1 \text{ Kw}$$

## B. POTENCIAS PARA MÁQUINAS DIVERSAS (Orientativas)

### a) Máquinas herramientas para metales

- Torno revolver..... 3 a 20
- Torno paralelo..... 3 a 45
- Torno automático..... 1 a 15
- Fresadora..... 1 a 25
- Rectificadora..... 1 a 30
- Martillos pilón..... 10 a 100
- Cizallas..... 1 a 40
- Máquinas de cortar y roscar..... 1 a 20
- Taladradoras verticales..... 1 a 10
- Taladradoras radiales..... 10 a 40
- Mandriladoras..... 10 a 30

### b) Industria de la construcción

- Hormigoneras..... 3 a 6
- Muela, perforadoras, sierras..... 1 a 3
- Cintas transportadoras..... 2 a 5

### c) Máquinas para trabajar madera

- Sierra de cinta..... 0.5 a 6
- Sierra circular..... 2 a 6
- Taladradoras..... 2 a 4
- Cepilladoras..... 20.75
- Tornos..... 1 a 15

### d) Máquinas agrícolas

- Empacadoras de paja..... 2 a 5
- Trilladoras..... 7 a 15
- Centrifugadoras de leche..... 0.5 a 3
- Elevadores de granos..... 1 a 3
- Elevadores de sacos..... 1 a 3
- Limpiadores de grano..... 1 a 3

## C. POTENCIA DE UN MOTOR PARA MECANISMOS DE ELEVACIÓN

$P = F \cdot v / 1,000 \cdot \eta$  Potencia - potencia mínima del motor en kW

F - fuerza resistente a la marcha en N

$F = m \cdot g \cdot v$  - velocidad en m/s

$\eta$  - rendimiento mecánico



g - aceleración (9.81)

#### D. POTENCIA DE UN MOTOR PARA UN MECANISMO GIRATORIO

$P = hp$

P- Potencia mínima del motor en kW

M- par de giro en  $N_m$

n - revoluciones por minuto

Si el torque requerido para un agitador es de  $15 N_m$ , y se requiere una velocidad de 3,600

r.p.m, ¿cuál será la potencia nominal del motor para satisfacer esta carga?

$$HP = \frac{15 N_m \times 3,600 \text{ r.p.m}}{7,124} = 7.58 \text{ HP}$$

#### E. POTENCIA DE UN MOTOR PARA MECÁNICO DE TRASLACIÓN

$P = F \cdot w \cdot v / 2\pi \cdot 9,550 \cdot \eta$

P- potencia en kW

F- peso total en N

w- Resistencia de traslación 0.007 cojinetes de rodillo 0.020 de fricción

v- velocidad de traslación en  $m \times \text{min}^{-1}$

$\eta$  - rendimiento mecánico

#### F. POTENCIA DE UN MOTOR PARA UN ASCENSOR

$P = 1/2 \cdot f \cdot v / 1,000 \cdot \eta$

P – potencia en kW

F- fuerza en N

v- velocidad en m/s

$\eta$ - rendimiento mecánico

En ascensores y montacargas, el

Peso de la cabina y la mitad de la

Carga útil queda compensada por el contrapeso



---

## Conclusiones

Con el presente proyecto podemos concluir en lo siguiente:

- Un motor debe ser correctamente seleccionado de acuerdo a las características de la carga que impulsara y de las características generales de operación.
- La elevación de la temperatura influye directamente en la vida útil del motor, por lo que se debe evitar las sobre cargas que se traducen en calor y degradación de los aislantes y afectación a partes mecánicas como los baleros.
- Los motores correctamente seleccionados pueden llegar a alcanzar una larga vida de operación.
- Los costos de reparación de un motor deben estar por debajo del 50% del costo de un motor nuevo de lo contrario es preferible adquirir uno nuevo para asegurar una mejor eficiencia en el trabajo.
- En muchos de los casos es preferible sustituir un motor por uno nuevo en vez de repararlo ya que se ha demostrado que los motores reducen su capacidad original, debido a que no utilizan los materiales adecuados en su reparación también por la forma constructiva de los devanados.
- Es recomendable seguir las indicaciones de mantenimiento que da el fabricante una vez concluido el periodo de garantía se debe planear su mantenimiento de acuerdo al tipo de servicio necesario.
- Es recomendable contar con motores sustitutos, en aquellos que son de gran tamaño o que desempeñan procesos claves en la producción de una planta. Con el fin de reducir al mínimo los tiempos de paro por fallas.
- La selección de motores contribuirá a economizar los costos de mantenimiento del motor y así asegurar la continuidad en la producción y los costos por una selección serán inferiores a los costos por mala selección del motor.

En la actualidad la creciente demanda de energía eléctrica a nivel mundial obliga a los fabricantes de equipos eléctricos hacer cada día, mejoras a los productos con la finalidad de tener el máximo rendimiento de las maquinas, con un ahorro de energía mayor, que sea en beneficio del consumidor, y de las propias compañías suministradoras de energía eléctrica, en caso de los motores de uso industrial es cada vez as frecuente el uso de motores de alta eficiencia ya que se obtienen múltiples beneficios al hacer uso de estos , sobre todo en el pago de consumo de energía al reducirse las perdidas eléctricas y mecánicas.



---

Para mejorar la eficiencia de los motores eléctricos se debe reducir sus pérdidas, pero para lograr una reducción efectiva de ellas se necesita una mayor inversión. Esto último resumido en el uso de mejores materiales, optimización de diseños, mejoras en los acoplamientos del motor con la carga y en los procesos de producción.

Se disminuyen los costos de operación y se puede lograr una recuperación de la inversión en un tiempo razonable. Estudios indican que en un año, el costo de la energía es aproximadamente 6 veces el costo de adquisición del motor, haciendo que en promedio durante la vida útil del motor sólo el 1% del total de su costo pertenece al precio de compra.

Reducen la pérdida de energía en más de un 40%.

El uso de mejores materiales significa que el motor funciona “más frío” que los motores estándar, incrementando la vida del motor (sobretudo del aislamiento y del lubricante) y mejorando su factor de servicio.

Debido a las mejoras en su diseño, tienen la capacidad de tolerar mayores variaciones de voltaje y, de ser necesario, mayores temperaturas ambiente, dado que los motores de alta eficiencia poseen mayores velocidades de operación (lo que se traduce en mejores capacidades de disipación térmica).

Son más robustos que el estándar, lo que significa menores costos de mantenimiento, mayor tiempo de vida útil y por tanto disminución en tiempos de paradas de producción.



## ***Bibliografía***

- [1] CHAMPAN, Stephen J. “Maquinas Eléctricas” Ed. McGraw-Hill; Trad. Rozo Castillo, Eduardo; Bogotá, Colombia: 2000
- [2] Irving L Kosow “Maquinas Eléctricas y Transformadores” Editorial Prentice Hall
- [3] José Manuel Aller “Maquina Eléctrica Rotativa” Editorial Equinoccio
- [4] José Roldan Victoria “Accionamiento de Maquinas-Motores Eléctricos” Editorial Paranfino 3ra Edición
- [5] NORMA OFICCIAL MEXICANA NOM-016-ENER-2004, EFICIENCIA DE MOTORES ELECTRICOS DE CORRIENTE ALTERNA, MONOFACICO, DE INDUCCION, TIPO JAULA DE ARDILLA, ENFIADOS CON AIRE  
EN POTENCIA NOMINAL DE 0,180KW A 1,500KW, LIMITES DE PRUEBA Y MARCADO
- [6] Ulises Villanueva “Motores ABB de alta eficiencia” Nuevos estándares
- [7] Agencia internacional de energía “Estándares de la eficiencia del motor”
- [8] Instituto de energía termodinámica “Cursos Motores Eléctricos”



## Sitios de consulta web

[www.energeticointegral.com](http://www.energeticointegral.com)

[www.weg.com.mx](http://www.weg.com.mx)

[www.eia.doe.gov](http://www.eia.doe.gov)

<http://pdf.directindustry.es/pdf/baldor-electric-company/motores-catrifasicos-iec-de-50-hertz/11550-123189.html>

<http://es.scribd.com/search?query=eficiencia+de+motores+electricos>

[http://www.interempresas.net/Electricidad\\_Electronica/Articulos/30790-Nuevas-normas-para-medir-la-eficiencia-de-los-motores-de-forma-mas-precisa.html](http://www.interempresas.net/Electricidad_Electronica/Articulos/30790-Nuevas-normas-para-medir-la-eficiencia-de-los-motores-de-forma-mas-precisa.html)

<http://todoproductividad.blogspot.com/2010/02/eficiencia-energetica-en-motores.html>

<http://www.monografias.com/trabajos20/fallas-motores/fallas-motores.shtml>