

TEMA 5: MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA

1. Introducción
2. Motores monofásicos
 - a. Constitución de un motor monofásico con impedancia de arranque
 - b. Característica par-velocidad
 - c. Principio de funcionamiento
 - d. Par de arranque
 - e. Otros tipos de motores monofásicos
3. Constitución y principio de funcionamiento de los motores de corriente alterna
 - a. Principios de funcionamiento
4. Balance de potencias
5. Curvas características
6. Comportamiento del motor según la característica par-velocidad
7. Estudio de las conexiones de un motor trifásico
8. Arranque
 - a. Arranque directo
 - b. Arranque estrella-triángulo
 - c. Arranque con impedancia estatórica
 - d. Arranque por autotransformador
 - e. Arranque electrónico
9. Regulación de la velocidad
 - a. Control por cambio del número de polos
 - b. Modificando la frecuencia
 - c. Actuando sobre la tensión aplicada
10. Ejercicios

1. INTRODUCCIÓN

En este tema estudiaremos los motores de corriente alterna, fundamentalmente los trifásicos en jaula de ardilla (o rotor en cortocircuito), aunque también los monofásicos.

Los motores trifásicos en jaula de ardilla son los representantes de los motores eléctricos por excelencia, por su sencillez y robustez. No presentan chispas, como sucede en el colector de los motores de corriente continua.

Analizaremos su control de velocidad, la forma de invertir el sentido de giro y los métodos de arranque que normalmente se emplean.

2. MOTORES MONOFÁSICOS

Los motores monofásicos son los más conocidos de todos por su empleo en aplicaciones domésticas y herramientas portátiles. Existen en el mercado muchos tipos, pero sólo estudiaremos los dos más importantes: los **motores monofásicos con impedancia de arranque** y los **motores universales**.

a) Constitución de un motor monofásico con impedancia de arranque

Estos motores son muy semejantes a los trifásicos. Están formados por un rotor en jaula de ardilla y por un estator. En el estator se alojan dos devanados, uno principal, que ocupa los 2/3 de las ranuras totales, y otro auxiliar, que ocupa el tercio restante y que sólo actúa durante el arranque

NOTA

Impedancia: Relación entre la tensión y corriente eficaces en un circuito de corriente alterna

Corriente eficaz: Es la corriente cuyo valor coincide con una de corriente continua, que produjera la misma disipación de calor en una resistencia que la correspondiente en alterna. Para el caso de una señal sinusoidal:

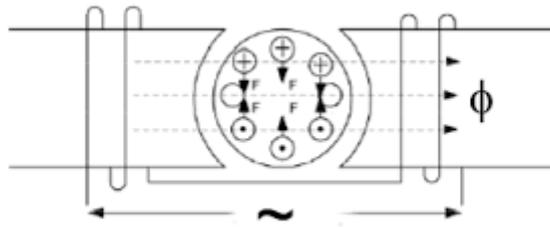
$$I_{ef} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$$

Tensión eficaz: Es la tensión cuyo valor coincide con una de corriente alterna, que produjera una corriente en continua como la anterior (I_{eficaz}). Para el caso de una señal sinusoidal:

$$V_{ef} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}}$$

b) Característica par-velocidad

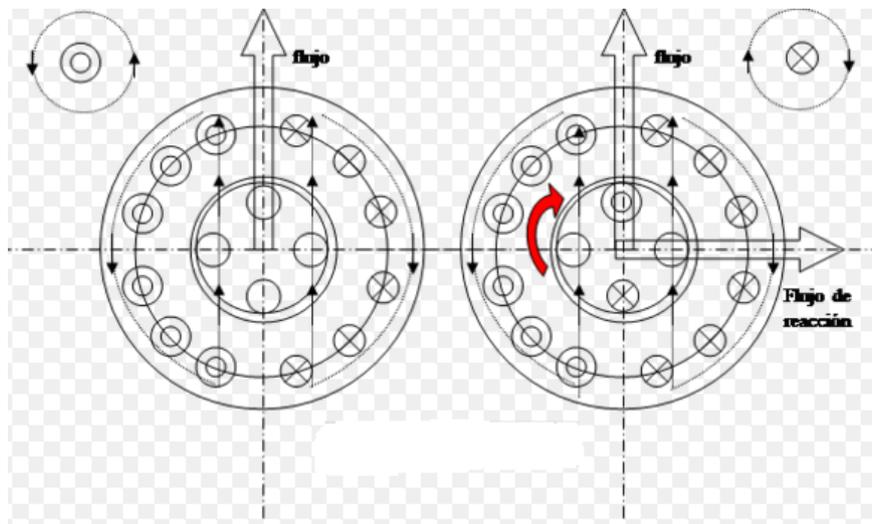
Cuando se aplica una tensión alterna al estator, la intensidad resultante I_s , crea un flujo alterno ϕ_s . El flujo es alterno, cambia de sentido, pero no es giratorio. El flujo induce tensiones en el rotor que dan lugar a unas corrientes intensas. Realmente, el rotor se comporta como el secundario de un transformador en cortocircuito y, en consecuencia, el motor no se pone en marcha por sí solo, debido a que las fuerzas que se crean en los conductores de la parte superior del rotor van hacia abajo y las de los conductores de la parte inferior van hacia arriba, por lo que tenemos fuerzas iguales en magnitud y sentido contrario, es decir, se anulan. No obstante, si le damos un impulso al rotor en uno u otro sentido, seguirá girando en la dirección del impulso.



c) Principio de funcionamiento

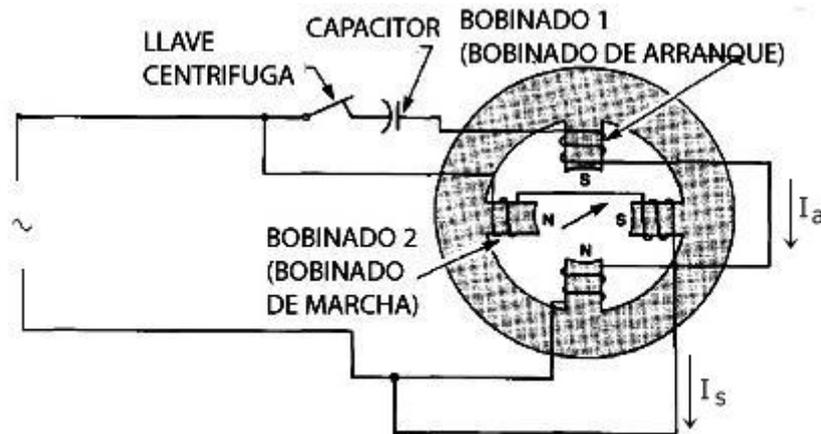
El principio de funcionamiento es complejo, se puede explicar mediante la teoría del doble campo giratorio. Tan pronto como el motor empieza a moverse, nace un campo giratorio por la acción combinada de la fuerza magnetomotriz del estator y del rotor.

Las corrientes que circulan por el rotor crean en éste un flujo ϕ_r que está en cuadratura con el flujo ϕ_s del estator. Es importante hacer notar que los dos flujos no alcanzan sus valores máximos al mismo tiempo, ya que ϕ_r se retrasa unos 90° con respecto a ϕ_s debido a la autoinducción del rotor. La acción combinada de ambos flujos produce un campo magnético giratorio, por lo que el rotor seguirá el giro del campo magnético.



d) Par de arranque

Para tener un par de arranque en un motor monofásico deberemos crear de una forma u otra un campo giratorio, lo que se consigue mediante un devanado auxiliar dispuesto de la siguiente forma:



El devanado auxiliar produce un fuerte flujo ϕ_a durante el periodo de arranque en el que ϕ_r es débil, con el resultado de que ϕ_a refuerza ϕ_r entregando un par de arranque electromagnético:

$$M = K \cdot I_a \cdot I_s \cdot \sin \varphi$$

Para conseguir el desfase φ entre I_a e I_s se añade una impedancia en serie con el devanado auxiliar. Esta impedancia puede ser **resistiva**, **inductiva** o **capacitiva**, dependiendo del par de arranque deseado.

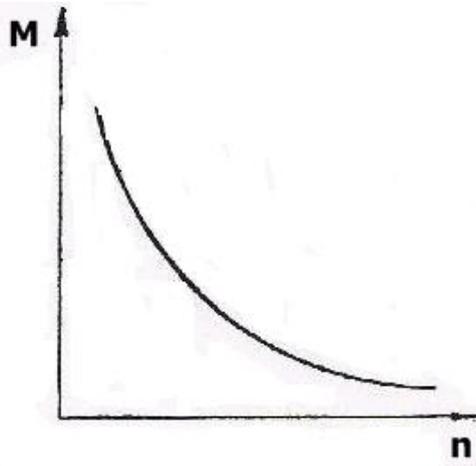
En algunos motores en serie con el devanado auxiliar, se coloca un interruptor especial que desconecta el devanado cuando se ha alcanzado el 75% de la velocidad síncrona.

e) Otros tipos de motores monofásicos

Además de los motores monofásicos vistos en los puntos anteriores, existen otros llamados **motores universales**.

Un motor universal es un motor previsto para funcionar aproximadamente a la misma velocidad e igual potencia suministrada, tanto con **corriente continua**, como con **corriente monofásica de frecuencia no superior a 60 Hz**.

Estos motores son muy utilizados en los taladros portátiles, sierras, aspiradoras, batidoras, etc. La curva par-velocidad de un motor universal funcionando sobre corriente alterna y sobre corriente continua es:



Podemos ver que la velocidad disminuye rápidamente con el aumento de la carga y viceversa. Esta característica de aumento de la velocidad para cargas débiles es muy favorable para el caso de taladradoras portátiles, puesto que el motor trabajará a gran velocidad para con los pequeños taladros y a velocidad más baja con taladros grandes.

El motor universal consta de un estator bobinado. El inducido posee un colector y está bobinado como un inducido de corriente continua. La teoría de funcionamiento cuando al motor se le aplica corriente alterna es la misma que la que se vio para los motores de corriente continua excitación serie.

NOTA: La tensión y la intensidad en corriente alterna pueden tener un desfase φ . Este desfase viene dado por la impedancia del circuito (inductiva, reactiva o capacitiva). Por lo tanto la potencia absorbida por un motor en corriente alterna viene dada por la expresión:

$$P_{ab} = U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

Ejemplo 1:

Un motor de corriente alterna monofásico tiene una potencia $P=5CV$, $U=220V$, un rendimiento del 75% y un $\cos\varphi=0'80$. Determina:

- La intensidad que absorbe el motor
- Las pérdidas que tiene el motor
- Si gira a 1500 rpm, halla el par en ese instante

Solución:

$$a) \mu = \frac{P_u}{P_{ab}}; \quad P_{ab} = \frac{P_u}{\mu}; \quad P_{ab} = \frac{5 \times 736}{0'75}; \quad P_{ab} = \frac{3680}{0'75}; \quad P_{ab} = 4906'6W$$

$$P_{ab} = U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

$$I = \frac{P_{ab}}{U \cdot \cos\varphi}$$

$$I = \frac{4906'6}{220 \cdot 0'8}$$

$$I = 27'87A$$

$$b) P_p = P_{ab} - P_u; \quad P_p = 4906'6 - 3680 = 1226'6W$$

$$c) P_u = \omega \cdot M_u = \frac{2\pi}{60} \cdot n \cdot M_u;$$

$$M_u = \frac{P_u \cdot 60}{2\pi \cdot n}$$
$$M_u = \frac{3680 \cdot 60}{2\pi \cdot 1500} = 23'42 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Ejemplo 2:

Si el motor del ejemplo anterior tiene un factor de potencia igual a la unidad, suponiendo que absorbe la misma intensidad al conectarlo a una línea de la misma tensión, y manteniendo el mismo rendimiento; determina la potencia que nos suministraría en el eje.

Solución:

$$\cos\varphi = 1$$

$$U = 220V$$

$$I_{ab} = 27'87A$$

$$\mu = 75\%$$

$$P_{ab} = U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

$$P_{ab} = 220 \cdot 27'87 \cdot 1 = 6131'4W$$

$$\mu = \frac{P_u}{P_{ab}}; \quad P_u = P_{ab} \cdot \mu \quad P_u = 6131'4 \cdot 0'75 = 4598'5W$$

Ejemplo 3:

Tomamos de nuevo el motor del ejemplo 1 y corregimos el factor de potencia igual a 1, manteniendo el resto de datos exactamente iguales. ¿Qué intensidad absorbe en estas condiciones?

Solución:

La potencia absorbida se mantiene por tanto en

$$P_{ab} = 4906'6W$$

$$P_{ab} = U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

$$I = \frac{P_{ab}}{U \cdot \cos\varphi}$$

$$I = \frac{4906'6}{220 \cdot 1}$$

$$I = 22'3A$$

Como podemos ver, para la misma potencia útil, la intensidad absorbida es menor si el factor de potencia se acerca a la unidad.

3. CONSTITUCIÓN Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA

Los motores de corriente alterna están constituidos por:

- Estató: Construido por chapas magnéticas, aisladas y ranuradas interiormente
- Devanado estatórico: Normalmente trifásico si el motor es trifásico. Va alojado en las ranuras del estator
- Roto: Formado por chapas magnéticas, ranuradas exteriormente
- Devanado rotórico: Puede ser trifásico o unas simples barras de cobre o aluminio unidas por los extremos con unos anillos del mismo metal.

Entre rotor y estator existe una separación que se llama **entrehierro**.

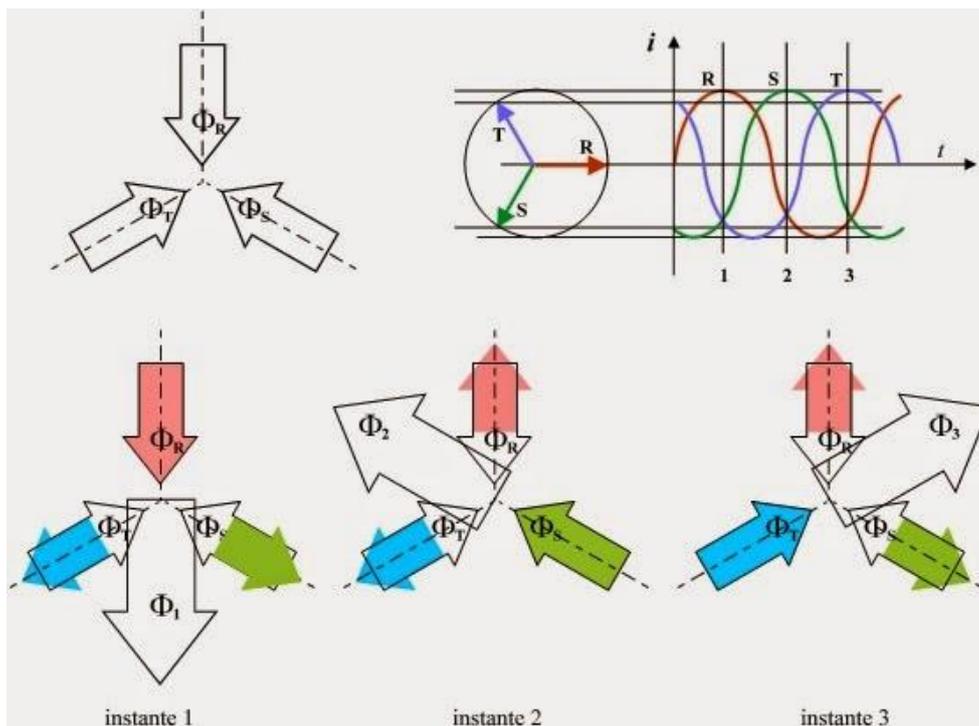
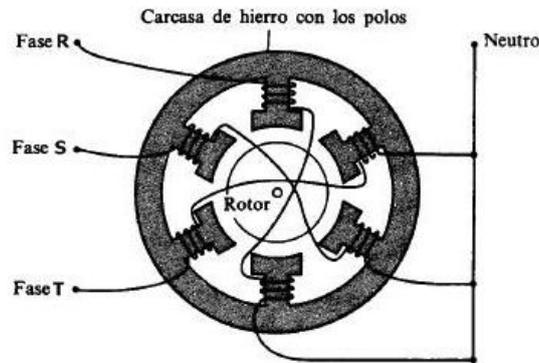


https://youtu.be/Y3fH8HV64tA?list=PL6Bd9iqkUWfOJpJ3c8LR8EOTd_VgtP0sJ (a partir de 8:10)

<https://youtu.be/1QZE81mqpAo> (a partir de 3:15)

a) Principios de funcionamiento

En los motores asíncronos trifásicos, el campo magnético resultante es de distribución senoidal y giratorio, y como consecuencia, se ponen de manifiesto fuerzas electromagnéticas y pares que arrastran el rotor en el mismo sentido en que gira el campo. Supongamos un devanado con tres pares de polos.



Una corriente monofásica, como ya hemos visto, no genera por sí sola el campo magnético giratorio, pero si se le ayuda a arrancar por algún procedimiento, sí que puede llegar a hacerlo.

Por cada devanado R,S,T del estator, circularán tres corrientes I_R , I_S , I_T , desfasadas entre sí 120° , tal como se aprecia en la gráfica. Estas corrientes crean flujos magnéticos Φ_R , Φ_S , Φ_T .

En el instante 1, I_R toma valor máximo y positivo, I_S e I_T toman valores negativos, con lo que el flujo resultante será el que se muestra Φ_1 . En el instante 2, los flujos Φ_R , Φ_S y Φ_T se suman tomando el valor Φ_2 . Y lo mismo pasa para el instante 3. El flujo resultante es giratorio. En el video de a continuación se ve más gráficamente.

<https://youtu.be/xqJ89o0t-i0>

Al cabo del periodo de frecuencia el flujo ha dado una vuelta completa. La velocidad de giro del campo magnético depende de la frecuencia y se denomina **velocidad síncrona** (n_1).

Los devanados pueden formar más de tres pares de polos, como en el ejemplo anterior. Si suponemos que en el estator tenemos un devanado trifásico de p pares de polos, al ser alimentado por un sistema trifásico de frecuencia f_1 , según hemos visto anteriormente, nos crea un campo magnético giratorio de velocidad:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}$$

n_1 =Velocidad giratoria del campo magnético en revoluciones por minuto (rpm)

f_1 =Frecuencia del sistema trifásico en hercios (Hz)

p =Pares de polos

En el rotor se crean unas fem, que al estar el rotor en cortocircuito, dan lugar a corrientes rotóricas. Estas corrientes, al circular por las espiras del rotor, originan un flujo magnético, que junto con el del estator genera un flujo también giratorio.

Las corrientes inducidas y el flujo determinan un par de giro sobre el rotor, cuyo sentido es el mismo que el campo magnético giratorio.

El rotor seguirá el sentido del campo magnético, pero nunca llevará la misma velocidad que éste, pues si esto ocurriera, las corrientes inducidas serían cero, al no haber desplazamiento relativo. Así pues el rotor alcanzará una **velocidad inferior a la de sincronismo**, que va a depender de la carga a que esté conectado (aumenta la carga, disminuye la velocidad, aumentan las corrientes inducidas, aumenta el par). Si el motor está en vacío, la velocidad del rotor será próxima a la de sincronismo.

Definimos deslizamiento absoluto como:

$$d = n_1 - n_2$$

Definimos deslizamiento relativo como:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \times 100 \quad \text{En \%}$$

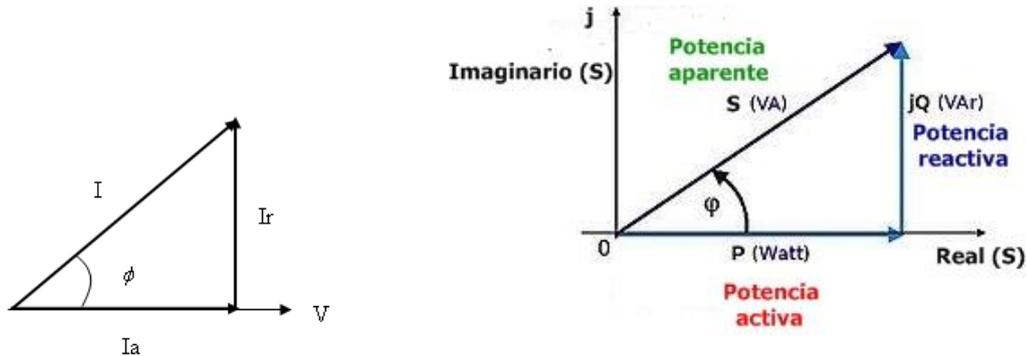
ó

$$S = (n_1 - n_2)/n_1 \quad \text{En tanto por uno}$$

Donde: n_1 =velocidad del campo magnético giratorio (rpm) n_2 =velocidad del rotor (rpm)

4. BALANCE DE POTENCIAS

NOTA: La intensidad en los circuitos de corriente trifásica está desfasada un ángulo ϕ , con respecto a la tensión. Esto hace que la potencia también tenga un ángulo ϕ , de desfase con respecto a la tensión:



La potencia compleja **S(VA, voltioamperios)**, se le denomina **potencia aparente**.

La parte real es la **P(W)**, se la denomina **potencia activa**, que es la potencia capaz de transformar la energía eléctrica en trabajo: movimiento, calor, luz, etc. Aquí también se incluyen las pérdidas por histéresis y corrientes de Foucault del hierro.

La parte imaginaria es la **Q (Var, voltioamperios reactivos)**, se la denomina **potencia reactiva**, que es una potencia que se intercambia con la red, debido a la presencia de condensadores y autoinducciones en el circuito. Esta potencia se consume de la red en un semiperiodo, y en el otro se entrega a la red. Es necesaria para crear el desfase entre tensión e intensidad en los motores trifásicos. Pero aunque no se consume este intercambio permanente con la red hace que haya paso de intensidad constantemente por los cables, es decir, hay más corriente y la compañía nos cobrará más.

Si disminuimos la potencia reactiva (ϕ lo más próximo a 0, por tanto $\cos\phi$ lo más próximo a 1), la intensidad necesaria para desarrollar una determinada potencia ($P_{ab}=P_{activa}$), será menor y por tanto menos coste, menos diámetro de cables y menos pérdidas por efecto Joule

La potencia absorbida de la red por un motor trifásico de inducción vale:

$$P_{ab} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos\phi_1$$

Donde:

U_L =Tensión de línea

I_L =Intensidad de línea

$\cos\phi_1$ =Factor de potencia del estator

De esta potencia:

- P_{Cu1} : Una parte se degrada en calor en las resistencias del estator (R_1).

$$P_{Cu1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1$$

La potencia que queda después de las pérdidas en el cobre del estator es P_C , que es la potencia que queda disponible para crear el campo magnético:

$$P_C = P_{ab} - P_{Cu1}$$

- P_{Fe} : A la potencia que queda le quitamos las pérdidas por las corrientes de Foucault e histéresis, y nos quedará la potencia electromagnética transmitida al motor:

$$P_a = P_C - P_{Fe}$$

- P_{Cu2} : Otra parte de la potencia se pierde en calor en la resistencia del rotor (R_2):

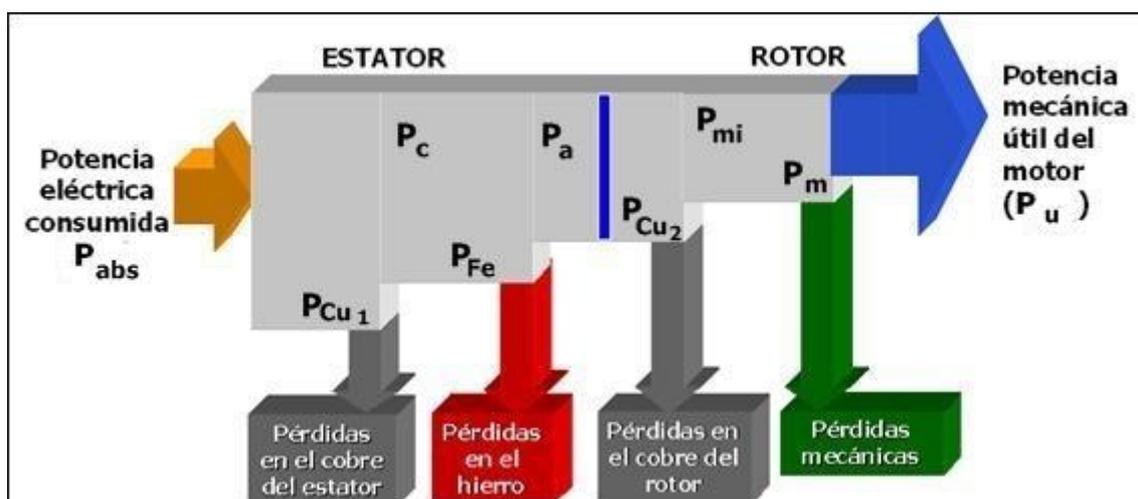
$$P_{Cu2} = m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2$$

Por tanto la potencia que nos queda ahora se llama potencia mecánica interna (P_{mi}):

$$P_{mi} = P_a - P_{Cu2}$$

- P_m : Por último tenemos que quitar las pérdidas mecánicas: rozamientos, ventilación, etc:

$$P_u = P_{mi} - P_m$$



Ejemplo:

Un motor trifásico absorbe una intensidad de 20A cuando se conecta a una red de 380V, con un $\cos\varphi=0'8$. La resistencia del estator es de 2Ω cuando la intensidad que circula es 11'54A. Conocemos también que las pérdidas en el hierro son de 200W, y las del cobre en el rotor más las pérdidas mecánicas son 500W. Determina:

- Potencia absorbida
- Pérdidas en el cobre y en el estator
- Potencia electromagnética transmitida
- Potencia útil
- Rendimiento

Solución:

$$a) P_{ab} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos\varphi_1 = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 20 \cdot 0'8 = \mathbf{10531 W}$$

$$b) P_{Cu_1} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot R_1 = 3 \cdot 11'54^2 \cdot 2 = \mathbf{800W} \quad P_{Fe} = \mathbf{200W}$$

$$c) P_a = P_{abs} - (P_{Cu_1} + P_{Fe}) = 10531 - (800 + 200) = \mathbf{9531W}$$

$$d) P_u = P_a - (P_m + P_{Cu_2}) = 9531 - 500 = \mathbf{9031W}$$

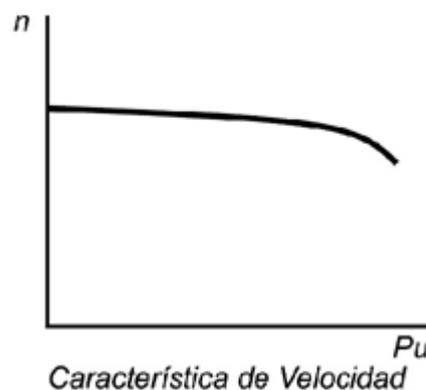
$$e) \mu = \frac{P_u}{P_{abs}} = \frac{9031}{10531} = 0'8575 = \mathbf{85'75\%}$$

5. CURVAS CARACTERÍSTICAS

A continuación veremos las curvas características más importantes de los motores de inducción.

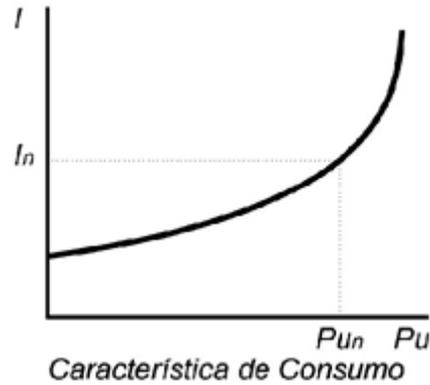
CARACTERÍSTICA DE VELOCIDAD

Representa la velocidad en función de la potencia útil, manteniendo constante la tensión y la frecuencia. La velocidad se reduce muy poco con la carga, del orden de un 2 a un 5 por ciento, se dice que es una característica dura.



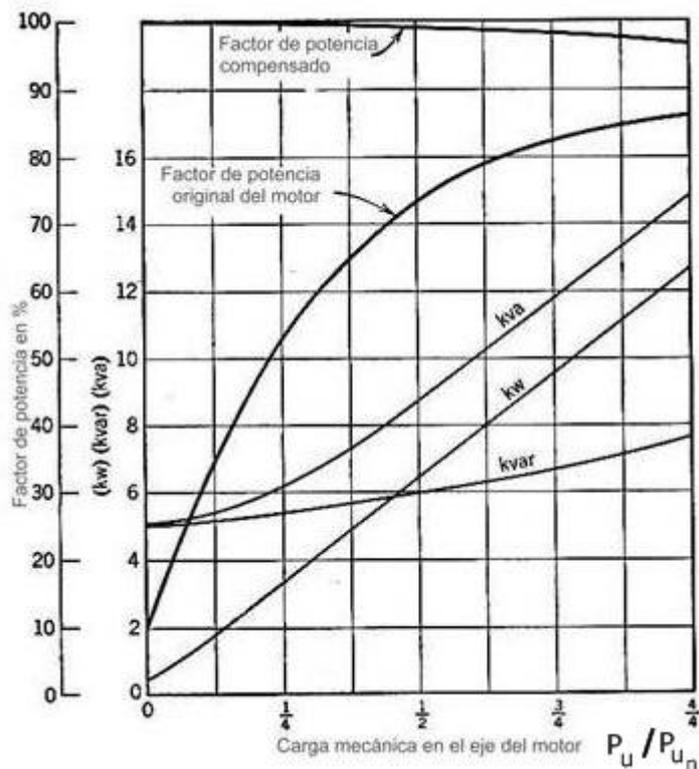
CARACTERÍSTICA DE CONSUMO

Representa la intensidad de corriente que la máquina absorbe de la red en función de la potencia útil manteniendo constantes la tensión y la frecuencia. La corriente de vacío está comprendida entre 0,25 y 0,50 de la nominal.



CARACTERÍSTICA DE FACTOR DE POTENCIA

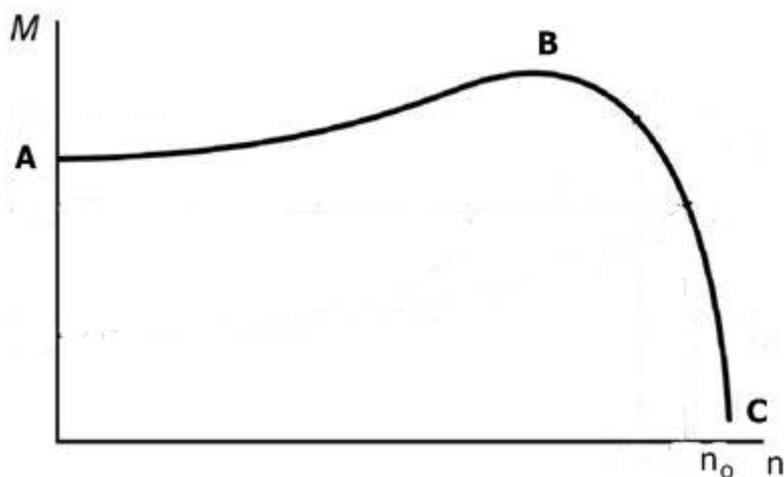
Representa la variación del factor de potencia en función de la potencia útil desarrollada por el motor.



Como vemos, cuanto más se aproxima la potencia a la potencia nominal, mayor es el factor de potencia, y mejor por tanto. Por ello es importante usar el motor lo más próximo posible a su potencia nominal.

CARACTERÍSTICA MECÁNICA

También conocida como característica par-velocidad, esta es la curva más importante de un motor y representa la variación del par del motor en función de la velocidad manteniendo constantes la tensión y la frecuencia.

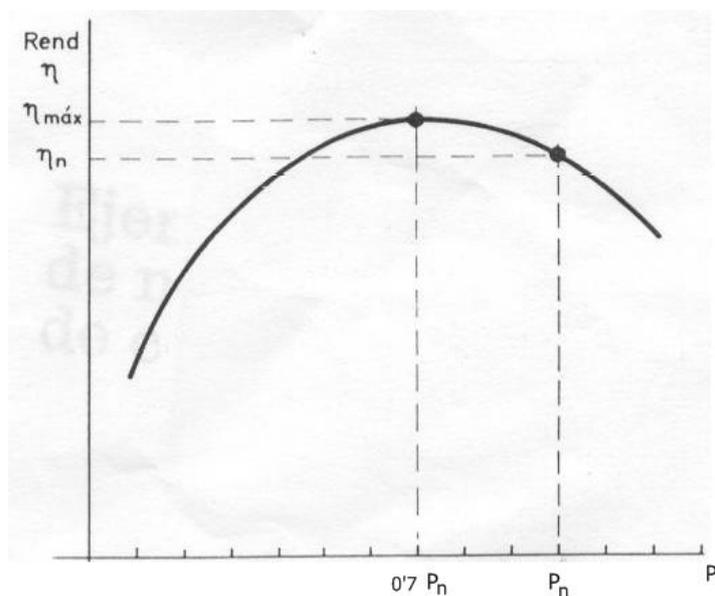


Vemos varias cosas en esta curva:

- La velocidad prácticamente es lineal entre vacío (C) y plena carga (B), y se reduce muy lentamente
- En el tramo AB el motor se vuelve inestable, y la velocidad se reduce rápidamente.
- El punto A, corresponde al par de arranque. La relación par de arranque-par nominal suele oscilar entre 1'25 a 2'25

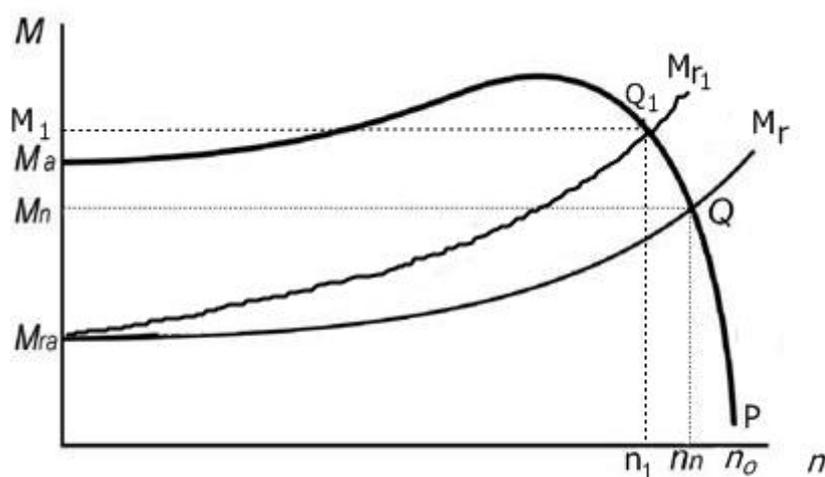
CARACTERÍSTICA DE RENDIMIENTO

Nos representa el rendimiento en función de la potencia útil. El rendimiento aumenta rápidamente hasta llegar a un punto máximo, en este punto, el rendimiento disminuye a medida que aumenta la potencia



6. COMPORTAMIENTOS DEL MOTOR SEGÚN LA CARACTERÍSTICA PAR VELOCIDAD

Vamos a partir de la característica par velocidad de un sistema motor carga. En ella vamos a detenernos en tres puntos críticos del funcionamiento: arranque, funcionamiento en vacío y funcionamiento en carga estable.



- **Arranque:** En el momento del arranque la velocidad es cero ($n=0$). El par de arranque M_a debe ser entre 1'25 y 2'5 veces el valor del par nominal (M_n), y la intensidad de arranque (I_a) entre 5 y 8 veces el de la intensidad nominal (I_n)
- **Funcionamiento en vacío:** Si el motor arranca en vacío, el punto de funcionamiento es el punto P, en el que el par suministrado es nulo, y la velocidad de vacío (n_o) está cercana a la velocidad de sincronismo.
- **Funcionamiento estable con carga:** En funcionamiento estable, el par motor debe ser igual al par resistente ($M = M_r$), el sistema estará funcionando en el punto Q, con $M=M_n$ y $n=n_n$. Si el par resistente aumenta, según la curva M_{r1} , las nuevas condiciones de equilibrio estable estarían proporcionadas por el punto Q_1 , con un aumento del par hasta igualar al resistente, y una disminución de la velocidad. El sistema motor-carga estaría funcionando con M_1 y n_1 .

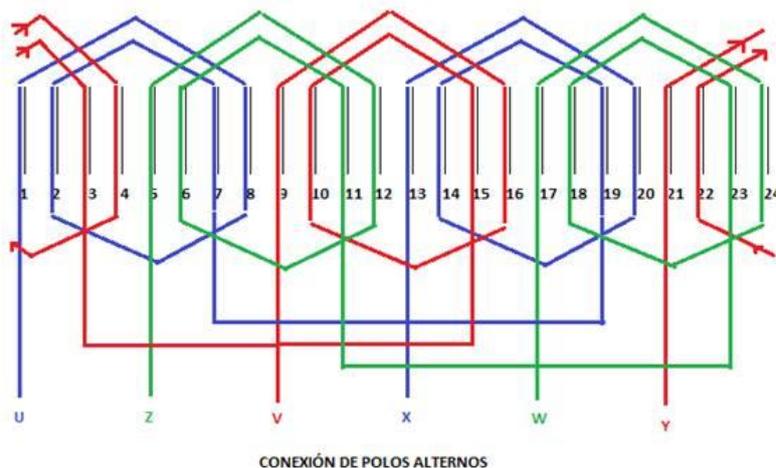
7. ESTUDIO DE LAS CONEXIONES DE UN MOTOR TRIFÁSICO

Vamos a considerar un motor asíncrono trifásico de rotor en jaula de ardilla o rotor bobinado, y de una sola velocidad.

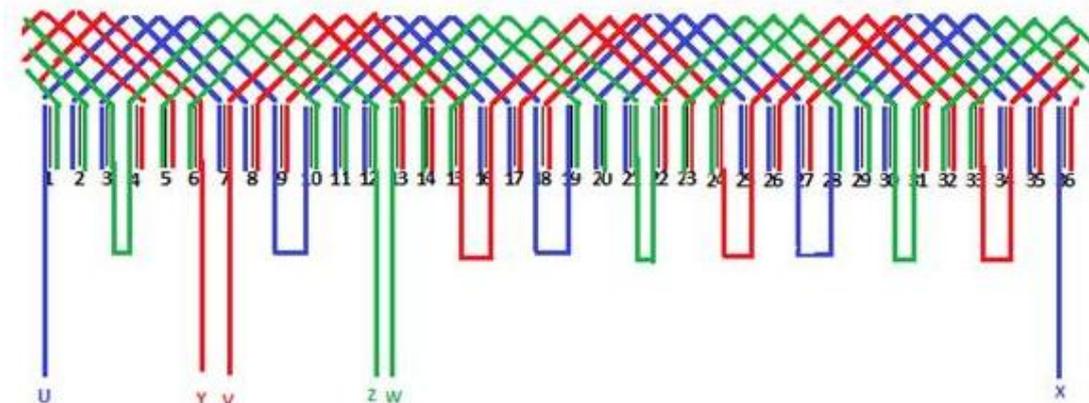
Como ya dijimos anteriormente, el estator está constituido por un paquete de chapas magnéticas ranuradas, y en las ranuras del mismo se alojan, con arreglo a un determinado esquema, los tres devanados independientes de un arrollamiento trifásico.

Estos devanados obedecen a un estudio en el cual hay que tener en cuenta entre otras características, el número de polos, la frecuencia y por tanto la velocidad de la máquina ($n = \frac{60 \cdot f}{p}$). Podemos clasificar los arrollamientos atendiendo a varios criterios:

- a) En función del número de lados de bobina que alberga cada ranura:



- A UNA CAPA (un lado por ranura)



- DOBLE CAPA (dos lados por ranura)
 MIXTOS

b) Atendiendo al paso del devanado:

- Paso constante
- Paso variable

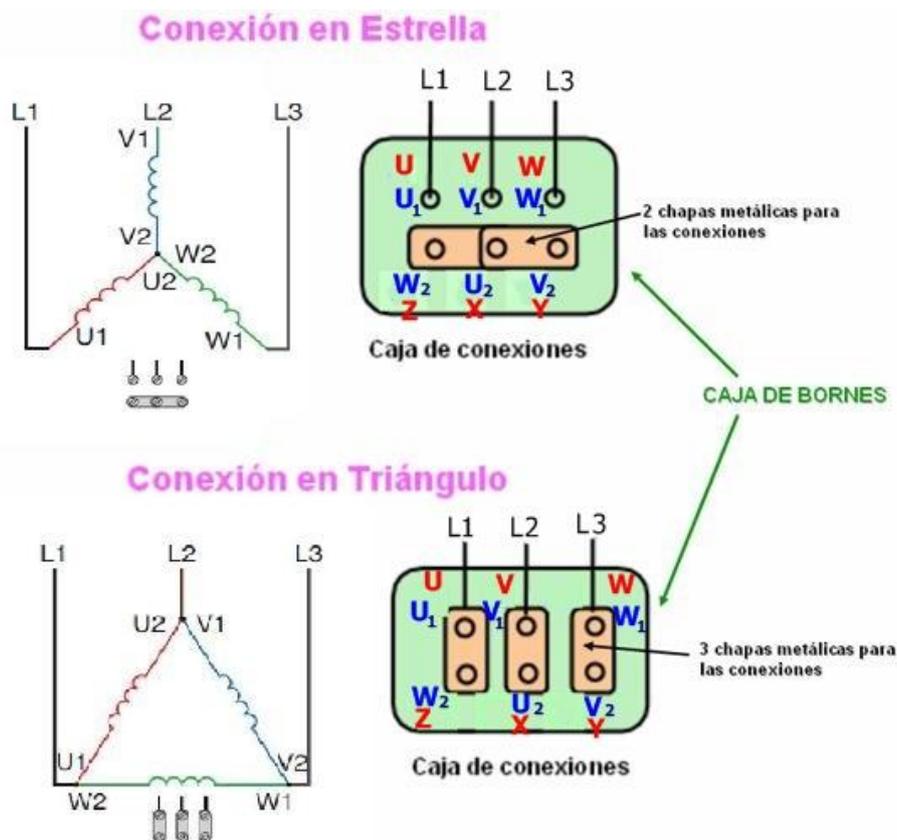
c) Según el número de ranuras por polo y fase:

- Enteros
- Fraccionario

Los terminales de estos arrollamientos se denominan:

	PRINCIPIO		FINAL	
	Designación antigua	Designación moderna	Designación antigua	Designación moderna
1ª FASE	U	U ₁	X	U ₂
2ª FASE	V	V ₁	Y	V ₂
3ª FASE	W	W ₁	Z	W ₂

Los terminales se llevan a una caja de bornes donde normalmente se realizan las conexiones, según la forma mostrada a continuación:



NOTA: En un sistema trifásico hay que diferenciar entre tensión de fase (U_F) y la de línea (U_L).

La U_F , es la tensión que hay entre cualquier fase y el neutro.

La U_L , es la tensión que hay entre dos fases.

La relación entre ambas es:

$$U_L = \sqrt{3}U_F$$

Las tensiones e intensidades en los devanados serán:

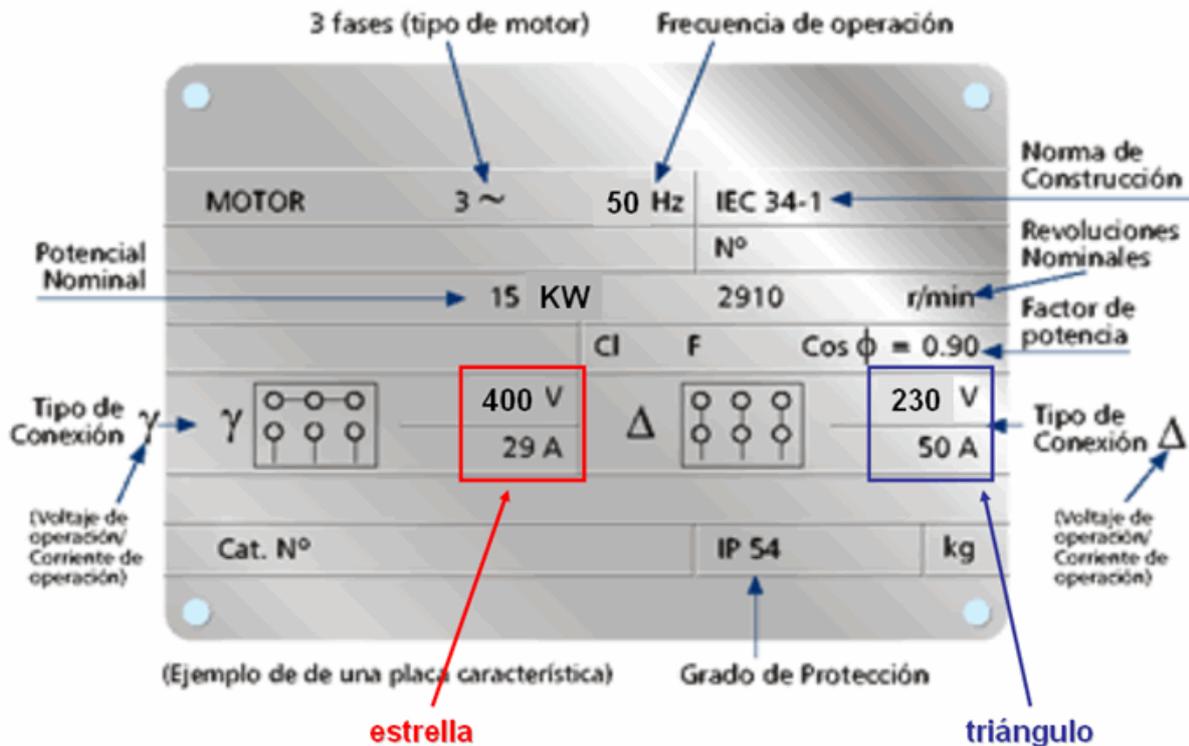
Conexión en estrella: $U_{\text{DEVANADO}}=U_{\text{FASE}}$

$I_{\text{DEVANADO}}=I_{\text{LINEA}}$

Conexión en triángulo: $U_{\text{DEVANADO}}=U_{\text{LINEA}}$

$I_{\text{DEVANADO}}= I_{\text{LINEA}}/\sqrt{3}$

En la placa de características del motor siempre vienen indicadas dos tensiones, una para la conexión en estrella y otra para la conexión en triángulo. Hay que tener en cuenta que al devanado del motor siempre le debe llegar la menor de las tensiones indicadas en su placa.



Ejemplo: En el motor trifásico de arriba (230/400V), dependerá de la tensión de línea, habrá que conectarlo de una forma o de otra.

Si la $U_L=230V$ ($U_F = 230/\sqrt{3} = 133V$). En ese caso tenemos que usar la conexión en triángulo.

Si la $U_L=400V$ ($U_F = 400/\sqrt{3} = 230V$). En este caso tendremos que usar la conexión en estrella.

Es importante señalar que **en ambos casos el motor desarrolla su potencia nominal.**

La **potencia nominal** se refiere a la **potencia útil** en el eje.

La potencia absorbida sigue calculándose por la fórmula:

$$\mu = \frac{P_u}{P_{ab}}$$

Esta potencia absorbida sería potencia activa, es decir, aquella que tiene capacidad para crear trabajo efectivo. Las potencias en un motor trifásico se rigen por las siguientes fórmulas:

Potencia activa (P_a)

$$P_a = P_{ab} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos\varphi \text{ (W)}$$

Potencia reactiva (P_r)

$$P_r = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sen\varphi \text{ (VAr)}$$

Potencia aparente (P)

$$P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \text{ (VA)}$$

Si queremos **cambiar el sentido de giro** del motor bastará con **intercambiar dos de las fases**.

Ejemplo 1:

Un motor de 37 KW, tensión 220/380, tiene un factor de potencia de 0'85 y un rendimiento del 90%.
Determina:

- La intensidad que absorbe si se conecta a una línea de 220V
- La intensidad de corriente que circula por el devanado del estator
- La intensidad de corriente que circula por el devanado del estator si se conecta a 380V
- Determina las pérdidas en vatios que tiene el motor cuando se conecta a 220V

Solución:

- a) Lo conectaremos en configuración triángulo

$$P_{ab} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos\varphi$$

$$P_{ab} = \frac{P_u}{\mu} = \frac{37000}{0'9} = 41111'1W$$

$$I_L = \frac{P_{ab}}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos\varphi} = \frac{41111'1}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0'85} = \mathbf{129'92A}$$

b) $I_{DEVANADO} = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{126'92}{\sqrt{3}} = \mathbf{73'27A}$

- c) Lo conectaremos en configuración estrella, por lo tanto $I_{DEVANADO}=I_{LINEA}$.

$$I_L = \frac{P_{ab}}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos\varphi} = \frac{41111'1}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0'85} = \mathbf{73'48A}$$

- d) $P_{ab}=41111'1 \text{ W}$
 $P_u=37000W$

$$P_p = P_{ab} - P_u = 41111'1 - 37000 = \mathbf{4111'1W}$$

Ejemplo 2:

Un motor trifásico tiene una potencia de 20CV cuando se conecta a 380V. Su conexión es estrella, su factor de potencia 0'75, y su rendimiento 80%. Determina:

- La intensidad de línea y de fase que absorbe y el triángulo de potencias del mismo
- La intensidad de línea y de fase que absorbe si el factor de potencia es 0'95

Solución:

$$a) P_u = 20 \text{ CV} \times \frac{736 \text{ W}}{1 \text{ CV}} = 14720 \text{ W}$$

$$P_{ab} = \frac{P_u}{\mu} = \frac{14720}{0'8} = 18400 \text{ W}$$

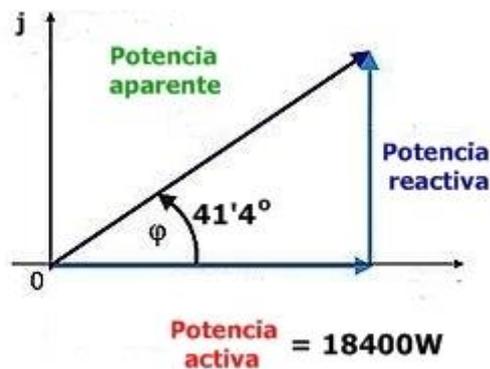
$$I_L = \frac{P_{ab}}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos\varphi} = \frac{18400}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0'75} = 37'27 \text{ A}$$

Al estar conectado en estrella, la intensidad de línea es la misma que la del devanado (I_{FASE})

TRIÁNGULO DE POTENCIAS

Al ser $\cos\varphi=0'75$, tenemos que

$$\varphi = \cos^{-1}(0'75) = 41'4^\circ$$



$$\tan(41'4^\circ) = \frac{P_r}{P_a} = \frac{P_r}{18400};$$

$$P_r = 18400 \times \tan(41'4^\circ) = 16221 \text{ VAr}$$

$$\cos(41'4) = \frac{18400}{Potencia\ aparente}; \quad Potencia\ aparente = \frac{18400}{\cos(41'4)} = 24533 \text{ VA}$$

b)

$$I_L = \frac{P_{ab}}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos\varphi} = \frac{18400}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0'95} = 29'42 \text{ A}$$

Comprobamos que el motor absorbe de la red ha bajado al aumentar el factor de potencia

8. ARRANQUE

La reglamentación de baja tensión existente en España, dice que los motores de corriente alterna de más de 0'75 KW estarán provistos de dispositivos de arranque, de forma que no permitan que la relación de la corriente en el arranque a la corriente nominal sea superior a un valor señalado, y que va en función de la potencia del motor.

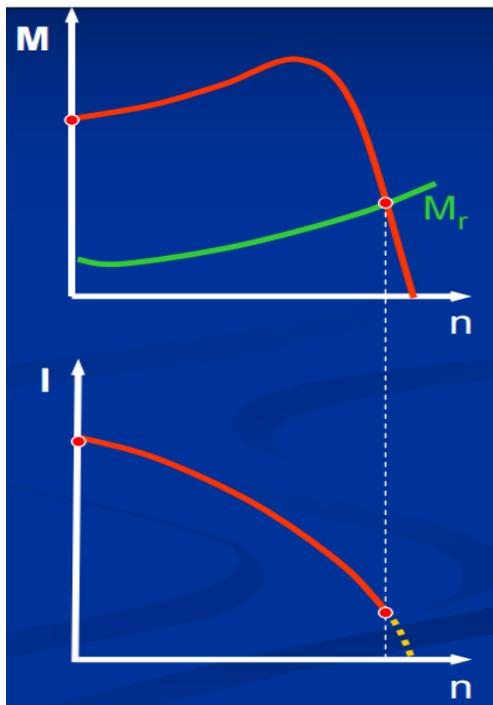
POTENCIA NOMINAL DEL MOTOR	$I_{arranque}/I_{nominal}$
De 0'75 a 1'5 KW	4'5
De 1'5 a 5 KW	3
De 5 a 15 KW	2
Más de 15 KW	1'5

El par de arranque del motor debe exceder con creces el par resistente, sin embargo la intensidad de arranque como vemos debe estar limitada, además hay que tener en cuenta otros factores como son: el tiempo de arranque, la aceleración, calentamiento del motor, etc.

Para el arranque de los motores de rotor de jaula de ardilla existen, entre otros, los siguientes métodos:

a) Arranque directo

Se conecta el motor a la red en un solo tiempo y tiene las siguientes características:



Es el método más simple y seguro
La I_a es entre 4 y 8 veces la I_n según el motor

Puede producir una aceleración excesiva y puede producir roturas y falta de confort

La caída de tensión en la línea puede perturbar el funcionamiento de otros aparatos conectados

El motor soporta la tensión de la red durante el arranque

b) Arranque estrella-triángulo

Se emplea sólo para los motores que deban funcionar en triángulo, es decir, los devanados vana a estar conectados a la tensión mayor (tensión de línea).

Se basa en que si en vez de conectarlo en triángulo, lo conectamos en estrella, la tensión que le llegará a las bobinas será la tensión de fase, que es menor que la tensión de línea ($V_{FASE} = \frac{V_{LINEA}}{\sqrt{3}}$), por lo tanto la intensidad que absorbe el motor también será menor.

Vamos a ver cuál es la relación entre la $I_{ESTRELLA}$ (Y) y $I_{TRIÁNGULO}$ (Δ).

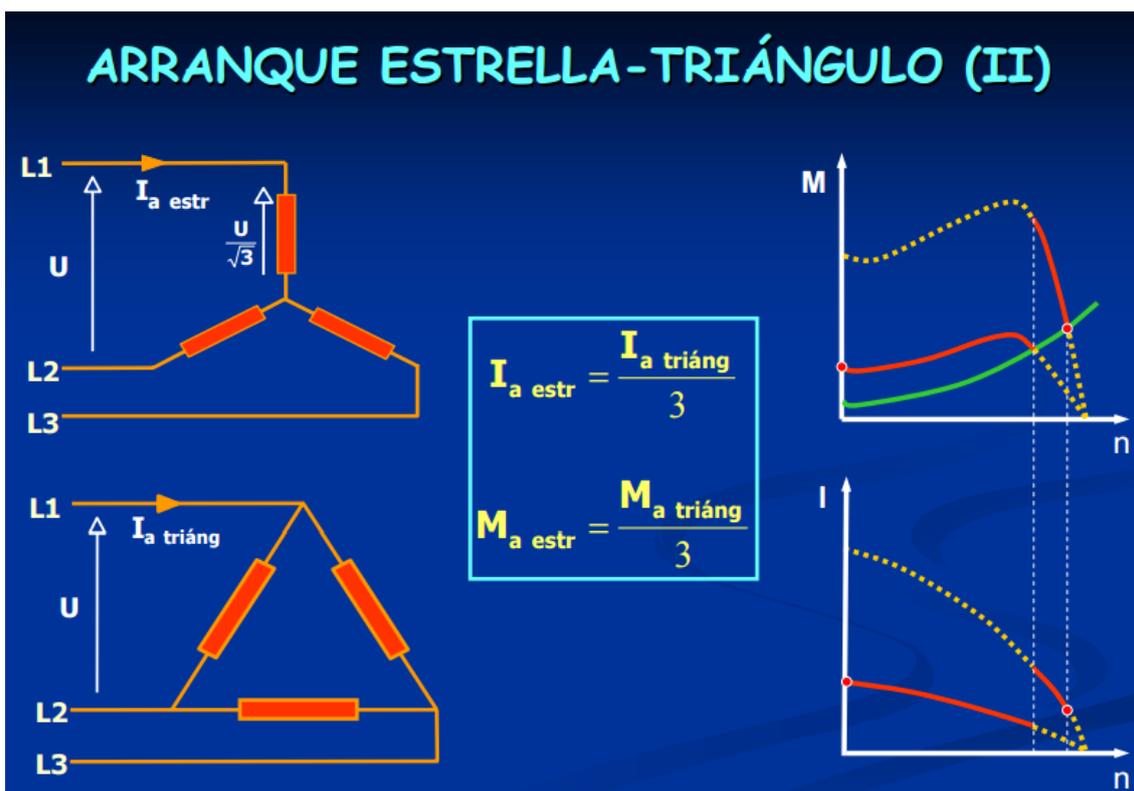
$$I_L(Y) = I_{DEVANADO}(Y) = \frac{V_{DEVANADO}}{Z} = \frac{V_F}{Z} = \frac{V_L / \sqrt{3}}{Z} = \frac{V_L}{\sqrt{3} \cdot Z}$$

$$I_L(\Delta) = \sqrt{3} I_{DEVANADO}(\Delta) = \sqrt{3} \cdot \frac{V_L}{Z}$$

$$I_L(\Delta) = 3 I_L(Y)$$

Al comienzo se conecta el motor en estrella, llegando a los devanados una tensión $V_L/\sqrt{3}$. Cuando el motor alcanza cierta velocidad, se pasa al conexionado en triángulo, con lo que a los devanados les llega una tensión V_L , y consumiendo el triple de intensidad.

Este método de arranque es apropiado para máquinas cuyo par resistente es débil o que arrancan en vacío.

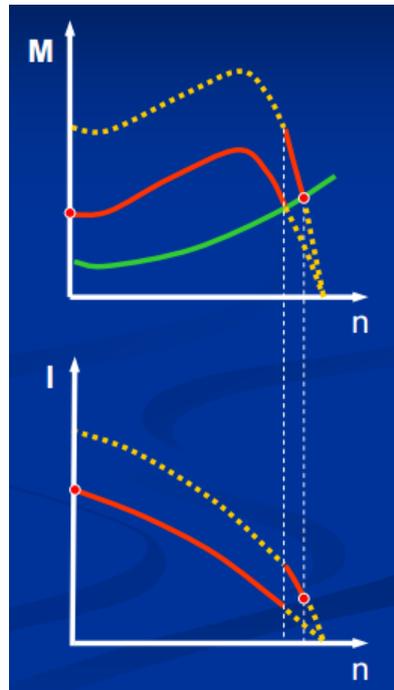


c) Arranque con impedancia estática

Consiste en intercalar en cada fase del motor una impedancia que irá reduciéndose a medida que el motor va adquiriendo velocidad.

La intensidad de arranque se reduce proporcionalmente a la tensión

El par de arranque se reduce proporcionalmente al cuadrado de la tensión

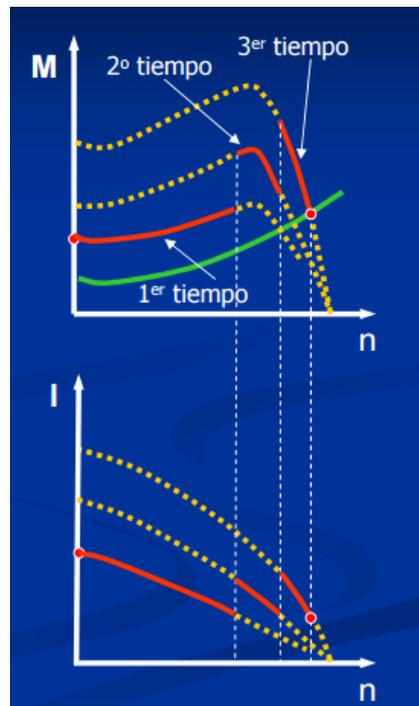


c) Arranque con autotransformador

Utiliza un autotransformador para reducir la tensión de alimentación en el momento de arranque, intercalado entre el motor y la red. Se suelen emplear autotransformadores de dos o más escalones de tensión.

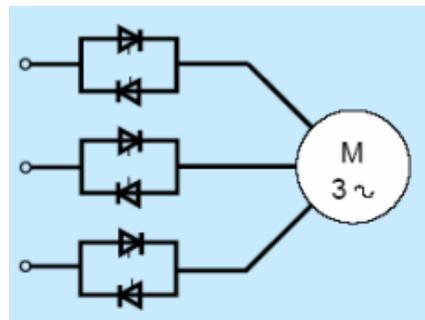
En este caso tanto la intensidad como el par de arranque se reducen de forma proporcional al cuadrado de la tensión en el secundario del autotransformador.

El par de arranque del motor se reduce considerablemente, por lo que este arranque sólo es posible para motores con pares resistentes pequeños en la zona de baja velocidad.



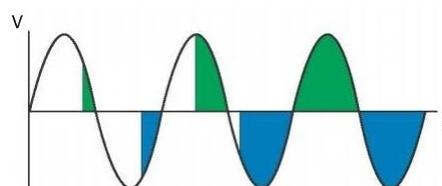
d) Arranque electrónico

Los arrancadores electrónicos pertenecen al grupo de equipos de electrónica de potencia. Se componen de dos tiristores en antiparalelo por fase, que van en serie con cada una de las bobinas del estator.



Permite un aumento continuo y lineal del par, por lo tanto más suave y permitiendo un aumento en la vida útil de las partes del motor implicadas.

Al iniciar el arranque, los tiristores dejan pasar la corriente que alimenta el motor según la programación realizada en el circuito de maniobra, que irá aumentando hasta alcanzar los valores nominales de la tensión de servicio.



Al reducir la tensión en bornes del motor, el par se reduce cuadráticamente, y la intensidad lo hace de forma lineal con la tensión.

- En el caso de motores con rotor bobinado y anillos rozantes, se pueden intercalar resistencias en serie con los devanados del rotor, que se van eliminando progresivamente, hasta que quedan todas cortocircuitadas y el motor girando a su velocidad nominal.

9. REGULACIÓN DE LA VELOCIDAD

El motor de corriente alterna, sobre todo el motor en jaula de ardilla, ofrece mejores características que el de corriente continua en cuestiones tan importantes como la robustez y fiabilidad.

Hasta los años cincuenta suponía un verdadero problema la regulación de velocidad de los motores de corriente alterna. Esto se resolvió con la aplicación del control electrónico, básicamente mediante la variación de la tensión de alimentación.

Recordemos que la velocidad del rotor de un motor de inducción obedecía a la expresión:

$$S = (n_1 - n_2)/n_1$$

$$n_2 = n_1(1 - S) = \frac{(60f_1)(1 - S)}{p}$$

Esto nos dice que la velocidad puede controlarse:

- Variando la velocidad del sincronismo:
 - a) Modificando el número de polos
 - b) Cambiando la frecuencia
- Modificando el deslizamiento:
 - c) Alterando la tensión aplicada al motor

a) Control por cambio de número de polos

Si aumentamos el número de polos de 2 a 4 por ejemplo, la velocidad del motor disminuirá de n a $n/2$, o sea, será la mitad. Es uno de los métodos más usados desde hace muchísimos años, y como vemos, es un control a saltos. Sólo es posible en motores de jaula de ardilla, ya que el número de polos del estator y rotor deben ser iguales, y estos motores lo adaptan automáticamente.

Una forma de realizarlo es intercalar en las ranuras del estator dos arrollamientos independientes, cada uno con diferente número de polos. Entonces, según el que se conecte a la red, haremos que el motor gire a una velocidad u otra.

Esto puede presentar algunos inconvenientes, que se solucionan con arrollamientos de polos conmutables. Las dos configuraciones más usadas son la **estrella-doble estrella** y la conexión **Dhalander-triángulo-doble estrella**.

b) Modificando la frecuencia

Si variamos la frecuencia variaremos también la velocidad, aunque el problema reside en cómo variar la frecuencia. Para ello, se pueden utilizar:

- Una fuente independiente de corrientes alternas trifásicas de frecuencia regulable. Se aplica en casos muy especiales, por el problema que supone accionar el generador.
- Un convertidor de frecuencia. Se utiliza para pequeños motores bipolares de más de 3000 rpm.
- Control electrónico. Actualmente gracias al desarrollo de los componentes semiconductores, se puede controlar electrónicamente la frecuencia de la alimentación.

Para el correcto funcionamiento de estos motores, se debe trabajar a par constante, por lo que una variación en la frecuencia ha de llevar aparejada una disminución de la tensión.

c) Regulación de velocidad actuando sobre la tensión aplicada

Se trata de un método muy limitado, únicamente usado en pequeños motores de inducción. El par varía con el cuadrado del voltaje aplicado a los bornes. Sólo es aplicable para pequeñas cargas, como son los algunos motores pequeños de ventilación.

10. EJERCICIOS

1. Un motor de inducción trifásico, estator en estrella, conectado a una red de 380V, 50 Hz, desarrolla un par útil de 35 N·m girando a 715 rpm. La potencia electromagnética transmitida es de 2820W, $P_{Fe}=150W$ y $P_{Cu1} = P_{Cu2} = P_{Cu} = 99W$. Determina:
 - a. Potencia en el eje
 - b. Diferentes pérdidas y rendimiento
 - c. Intensidad absorbida por el motor en la red si $\cos\phi=0'82$
2. Calcula la velocidad de un motor conectado a una red de 50 Hz, si el deslizamiento es del 4% y tiene:
 - a. Dos polos
 - b. Cuatro polos

c. Seis polos

3. Si conectamos un motor trifásico 380/660 V a una línea de 380V, ¿cuál debería ser su conexión? ¿Y si lo conectamos a una línea de 660V?
4. Un motor trifásico de corriente alterna de 57 KW y tensión de 220/380 V, tiene un factor de potencia de 0'75 y un rendimiento del 85%. Determina:
 - a. La intensidad que absorbe si se conecta a una línea de 220V
 - b. La intensidad de corriente que circula por el devanado del estatorLo mismo que en los dos apartados anteriores si se conecta a una línea de 380V
5. El estator y el rotor de un motor de corriente alterna son de chapas aisladas:
 - a. Para que la corriente sea menor
 - b. Para que se ventile más
 - c. Para disminuir pérdidas
 - d. Para aumentar la potencia
6. El campo magnético creado por una corriente trifásica:
 - a. Es igual que el campo creado por una monofásica
 - b. Es giratorio
 - c. Es fijo
 - d. Tiene todas las características anteriores
7. La velocidad síncrona es:
 - a. La velocidad del rotor
 - b. La velocidad del campo magnético
 - c. La velocidad de los electrones dentro del conductor
 - d. La velocidad alta en uno de dos velocidades
8. La potencia absorbida por un motor trifásico se caracteriza porque:
 - a. Depende del tipo de motor, puede ser menor que la útil
 - b. Es mayor que la potencia útil en el eje
 - c. Es igual a la potencia mecánica interna
 - d. Es mayor que la absorbida por un monofásico
9. El par en un motor trifásico:
 - a. Se mantiene constante de vacío a plena carga
 - b. Varía en función del M_r hasta que $M_n = M_r$
 - c. Es máximo en el arranque para que el motor pueda arrancar
 - d. Es mínimo, pues lo ayudamos a arrancar

10. Un motor que tiene inscrito en su placa 220/380 V y se conecta a una línea de 220V, ¿cómo se conecta?
- En conexión triángulo
 - En conexión estrella
 - Da igual, no importa la conexión
 - En estrella-triángulo
11. Para invertir el sentido de giro en un motor trifásico:
- Cambio dos fases
 - Cambio las conexiones de la placa de bornes
 - Cambio las tres fases
 - Cambio las conexiones internas
12. En un motor de jaula de ardilla 220/380 conectado a una línea de 380V, ¿qué método de arranque utilizarías?
- Arranque estrella-triángulo
 - Por resistencias rotóricas
 - Por autotransformador
 - En triángulo
13. Para regular la velocidad de un motor trifásico:
- Puedo modificar el número de polos del rotor
 - Puedo modificar la frecuencia
 - Puedo modificar la intensidad de arranque
 - Todas las anteriores
14. Un motor monofásico universal:
- Es el que hay que colocarle un condensador
 - Arranca por sí solo, es muy semejante al de corriente serie
 - Se emplea para mantener n constante
 - Es el que tiene tres devanados estatóricos
 -
15. Calcular el par útil de un motor asíncrono trifásico que posee las siguientes características: 400V, 50 Hz; $\cos\varphi=0'86$; $\mu=92\%$; potencia eléctrica absorbida de la red = 9KW; pares de polos del devanado estatórico = 2; deslizamiento a plena carga = 4%.
16. Una máquina dispone para su accionamiento de dos motores de inducción iguales en cuyas placas de características pone lo siguiente

$$U = 380/220 \text{ V}$$

$$n_n = 1445 \text{ rpm}$$

$$P_n = 5 \text{ KW}$$

$$I = 10/17'3 \text{ A}$$

$$\cos\varphi = 0'80$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

Si la línea tiene una tensión entre fases de 220V, calcular:

- a) La potencia absorbida de la red
 - b) La intensidad de línea absorbida por la máquina
 - c) El rendimiento de la máquina
 - d) El par motor que desarrolla cada uno de los motores
17. Un motor asíncrono trifásico de 4 polos absorbe una potencia de 25 KW cuando se conecta en triángulo a una línea de 400V, 50 Hz. El factor de potencia del motor es 0,73 y el rendimiento es del 80%. Considerando que el deslizamiento a plena carga es del 6%. Calcular
- a. La velocidad síncrona, la del rotor y el deslizamiento absoluto a plena carga.
 - b. La intensidad absorbida en el funcionamiento a plena carga.
 - c. El par motor a plena carga
 - d. Las pérdidas en el devanado estatórico si la resistencia de uno de ellos es 3Ω .
18. Si tenemos un motor trifásico de inducción en cuya placa de características aparece la inscripción 400/690V, y la línea trifásica que tenemos tiene una tensión de línea de 400V. ¿Cómo lo debemos conectar en estrella o en triángulo? ¿Podríamos realizar un arranque estrella-triángulo a un motor de 230/400V? Justifica brevemente tu respuesta.
19. Calcular la velocidad del campo electromagnético giratorio de un motor de corriente alterna asíncrono trifásico de 2 pares de polos si se conecta a una línea eléctrica de 50 Hz de frecuencia. ¿Cuál será la velocidad del campo si la frecuencia de la línea es de 60 Hz?
20. Calcular la velocidad del motor anterior si el rotor tiene un deslizamiento a plena carga del 4%.
21. Un motor trifásico de inducción gira a una velocidad de 960 rpm cuando se conecta a una línea de 50 Hz. Calcular:
- a. El número de polos.
 - b. La velocidad de sincronismo.
 - c. El deslizamiento.
22. Un motor asíncrono trifásico de 4 polos absorbe una potencia de 8 kW cuando se conecta en triángulo a una línea de 400 V, 50 Hz. El factor de potencia del motor es de 0,85 y el rendimiento es del 93%. Considerando que el deslizamiento a plena carga es del 4%, calcular:
- a. La intensidad consumida en el funcionamiento a plena carga
 - b. El par motor a plena carga
23. El par resistente en un motor asíncrono es de 28 N·m y la potencia que absorbe de la red eléctrica es de 10 KW, siendo su rendimiento del 85%. Calcular la velocidad de giro y explica qué sucederá si se incrementa dicho par resistente en un 100%.
24. Un motor asíncrono trifásico tiene las siguientes características: $U=400$ V, $P=5,2$ KW, $I=12$ A, $f=50$ Hz, $\cos\varphi=0,8$, $n=1375$ rpm. Si el motor trabaja en condiciones nominales y se desprecian las pérdidas calcular:
- a. El número de polos
 - b. El deslizamiento nominal
 - c. El par motor suministrado
 - d. La potencia activa absorbida
 - e. El rendimiento del motor

25. Un motor asíncrono se encuentra conectado a una red eléctrica de 380 V de tensión de línea y 50 Hz de frecuencia. Está moviendo un par resistente de 25 N·m a una velocidad de 1450 rpm. Si el factor de potencia del motor es de 0,8 y la corriente de línea consumida de 9 A, calcular:
- El rendimiento del motor
 - Las pérdidas en el devanado estatórico si la resistencia de uno de ellos es de 2Ω y se encuentra conectado en estrella
 - Las pérdidas del apartado b) si se conecta en triángulo
26. Un motor CA monofásico de 220 V tiene las siguientes características: potencia útil 2 CV, rendimiento del 70% y factor de potencia de 0,80. Calcula:
- Potencia activa (P), potencia reactiva (Q) y potencia aparente (S) que absorbe de la red
 - La intensidad de corriente que absorbe
 - Las pérdidas de potencia totales
 - El par motor cuando gira a 1480 rpm
27. Un motor CA de corriente trifásica de 50 Hz tiene un inductor de 6 polos y el inducido de jaula de ardilla gira a 981 r.p.m. con el motor a plena carga. En estas condiciones, calcula:
- La velocidad síncrona
 - El deslizamiento absoluto
 - El deslizamiento relativo
28. Un motor de inducción trifásico de cuatro polos conectado en estrella tiene un deslizamiento del 5% a plena carga. Si la frecuencia de la alimentación es de 50 Hz, calcula:
- La velocidad síncrona
 - La velocidad de giro del rotor
 - El deslizamiento absoluto
29. Un motor CA trifásico tiene las siguientes características: potencia útil 1500 W, 220 V, 50 Hz, f.d.p. 0,7 y su rendimiento es del 75%. Si sus devanados están conectados en estrella, se pide:
- La potencia activa, reactiva y aparente
 - La intensidad de línea que absorbe
 - La intensidad que circula por cada devanado del estator
 - La tensión a que está sometido cada devanado del estator
30. Un motor de corriente alterna trifásico posee las siguientes características: potencia útil 1000 W, 380 V, 50 Hz, factor de potencia 0,7 y rendimiento del 80%. Si sus devanados están conectados en estrella, calcula:
- La intensidad que absorbe la línea
 - La intensidad de corriente que circula por el devanado del estator
 - La tensión en bornes de cada devanado del estator
 - La potencia activa, reactiva y aparente en función de los valores de línea
31. Un motor asíncrono trifásico de 4 polos absorbe una potencia de 8 KW cuando se conecta, en triángulo, a una línea de 400 V, 50 Hz. El factor de potencia del motor es de 0,7 y el rendimiento es del 75%. Considerando que el deslizamiento a plena carga es del 4%, calcular:
- La velocidad síncrona, la del rotor y el deslizamiento absoluto a plena carga
 - La intensidad absorbida en el funcionamiento a plena carga
 - El par motor a plena carga
 - Las pérdidas en el devanado estatórico si la resistencia de uno de ellos es 3Ω

32. Se desea conectar a una red trifásica de 400 V un motor de inducción 230/400 V, 50 Hz, 22 kW de potencia entregada en el eje, rendimiento a plena carga 91,7%, factor de potencia 0,88 y 2945 rpm de velocidad nominal. Calcular:
- La intensidad que absorberá la línea
 - El par que desarrollará en el eje a plena carga
33. Un motor trifásico de inducción conectado a una red trifásica de 400 V tiene las siguientes características: potencia entregada en el eje 4 kW, tensiones 230/400 V, frecuencia 50 Hz, rendimiento 85%, factor de potencia 0,83 y velocidad nominal 1440 rpm. Calcular:
- La velocidad síncrona y el deslizamiento absoluto y relativo
 - La intensidad que absorbe de la línea eléctrica
 - El par que desarrolla en el eje
34. La placa de características de un motor síncrono trifásico indica los siguientes datos: 2500 kW, 5000 V, 60 Hz y 36 polos. Calcular:
- La velocidad síncrona del motor
 - El par motor
 - La intensidad que absorbe de la línea si el rendimiento es del 80% y el f.d.p 0'85

35. La placa de características de un motor de inducción es:

$$U_N = 400/230 \text{ V}$$

$$P_N = 5 \text{ kW}$$

$$I_N = 10/17,3 \text{ A}$$

$$f_N = 50 \text{ Hz}$$

$$\cos \varphi_N = 0,82$$

$$n_N = 1450 \text{ rpm}$$

Calcular:

- La intensidad de línea que absorbe
- El número de pares de polos
- La potencia activa que absorbe de la red
- El rendimiento
- El par motor que desarrolla

36. La placa de características de un motor de inducción es:

$$U_N = 400/230 \text{ V}$$

$$P_N = 50 \text{ kW}$$

$$I_N = 92/160 \text{ A}$$

$$f_N = 50 \text{ Hz}$$

$$\cos \varphi_N = 0,85$$

$$n_N = 970 \text{ min}^{-1}$$

Calcular:

- El número de pares de polos
- El rendimiento
- El par motor que desarrolla