

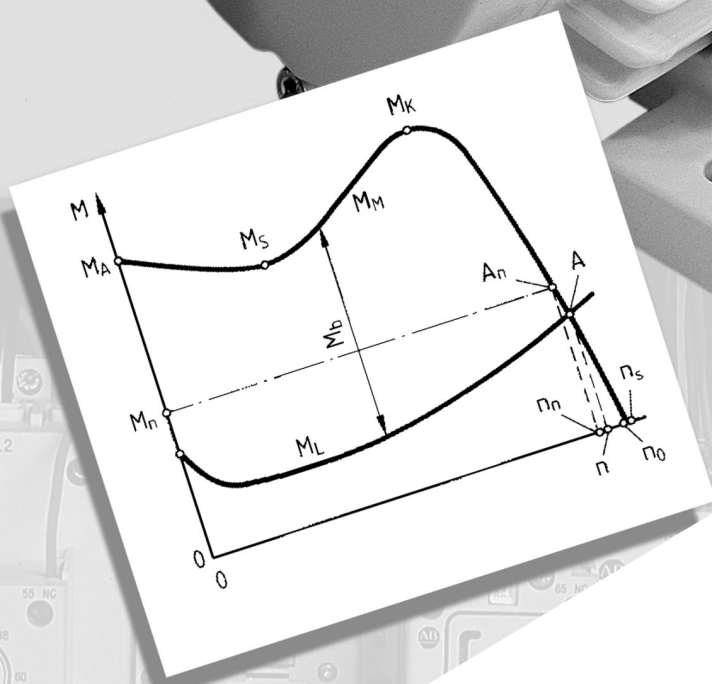
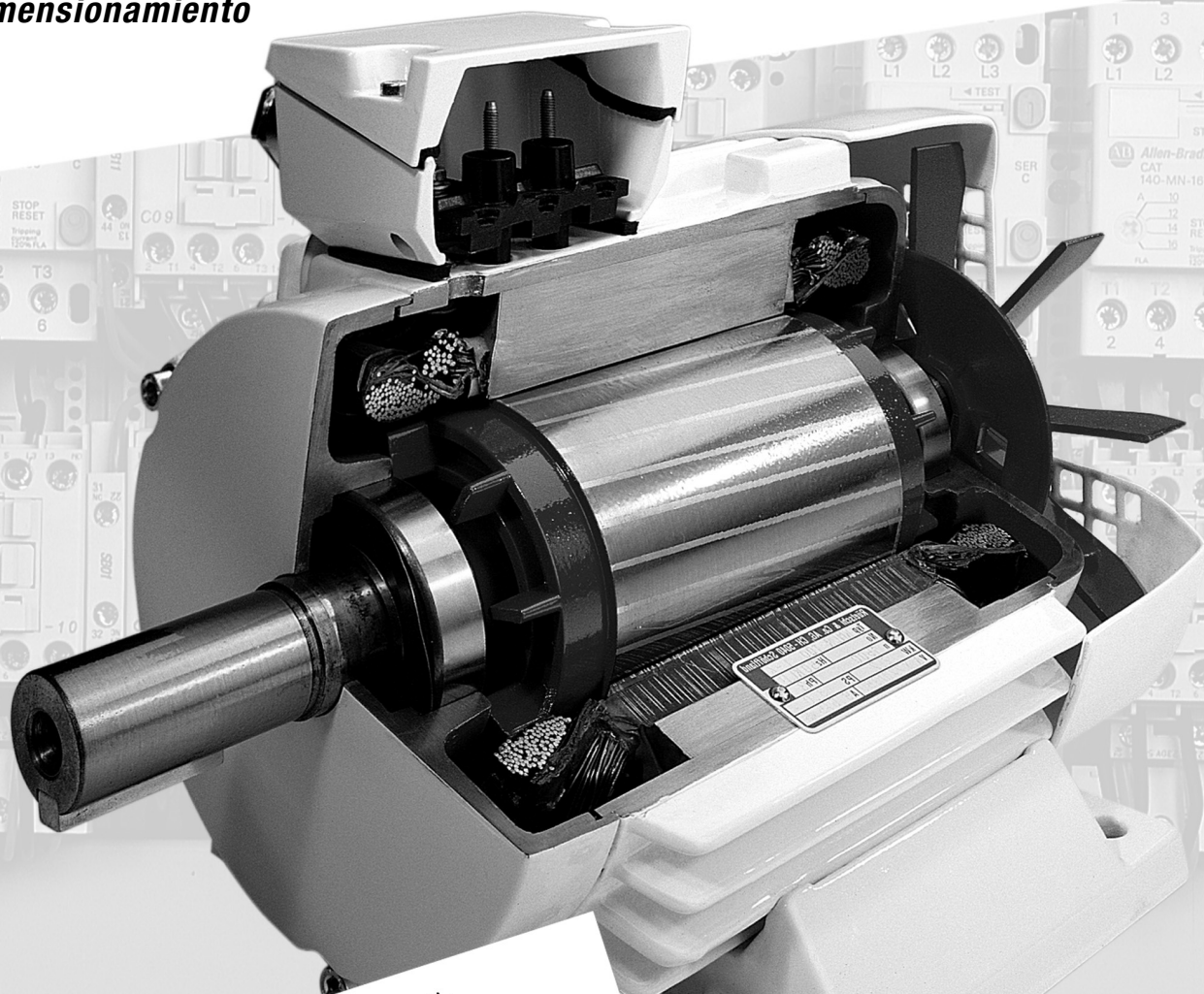
Conceptos básicos sobre el uso de los motores de inducción trifásicos

Diseño

Tipos de servicio

Selección

Dimensionamiento



**Motor
Management**

TM

Prólogo

Este manual técnico sobre motores de inducción trifásicos es la primera publicación de una serie sobre control de motores que denominamos “Motor Management”.

Gracias a esta información básica, el usuario tendrá a su disposición una creciente referencia de datos de funcionamiento y utilización necesarios para el diseño y la aplicación. Se tratarán los siguientes temas:

- Arranque y funcionamiento de motores
- Protecciones de motores y accionamientos
- Selección y funcionamiento de controles
- Comunicaciones

Hoy en día es posible encontrar motores eléctricos en casi todos los procesos de producción. Es por esta razón que la explotación óptima de su aplicación se está convirtiendo en una tarea cada vez más importante de cara a la rentabilidad de sus operaciones. La serie “Motor Management” sobre control de motores de Rockwell Automation le permitirá:

- optimizar el uso de sus sistemas
- reducir los costes de mantenimiento
- aumentar el grado de dependencia

Para nosotros es una satisfacción poder ofrecerles, a través de nuestras publicaciones, soluciones económicas y eficaces para sus aplicaciones.

Copyright © 1996 de Rockwell Automation AG, Aarau.

Toda la información proporcionada en este manual es precisa según nuestro conocimiento, declinando cualquier responsabilidad legal.

Índice

1	Motores de inducción trifásicos	1.1
1.1	Principios de funcionamiento	1.1
1.1.1	Estatórotor	1.1
1.1.2	Rotor	1.1
1.1.3	Deslizamiento	1.3
1.1.4	Disipación	1.4
1.2	Características del par de torsión	1.6
1.2.1	Característica principal	1.6
1.2.2	Diseño del motor	1.8
1.3	Características de funcionamiento	1.10
2	Tipos de servicio de motores eléctricos	2.1
2.1	Tipos de servicio primarios S1... S9	2.1
2.1.1	S1: Servicio continuo	2.2
2.1.2	S2: Servicio temporal	2.3
2.1.3	S3: Tipo de servicio periódico intermitente sin arranque	2.4
2.1.4	S4: Servicio periódico intermitente con arranque	2.5
2.1.5	S5: Servicio periódico intermitente con arranque y frenado eléctrico	2.6
2.1.6	S6: Servicio periódico de funcionamiento continuo	2.7
2.1.7	S7: Servicio de funcionamiento continuo con arranque y frenado eléctrico	2.8
2.1.8	S8: Servicio periódico de funcionamiento continuo con cambios de carga/velocidad relacionados	2.9
2.1.9	S9: Servicio con variaciones de carga y velocidad no periódicas	2.11
2.2	Valores medios de potencia, par y corriente	2.12
2.3	Potencia del motor y tipos de servicio	2.14
2.3.1	Aumento de potencia comparado con S1	2.14
2.3.2	Valor nominal del límite mecánico	2.15
2.3.3	Reducción de potencia comparado con S1	2.15

3	Pares de carga característicos	3.1
3.1	Pares de carga en función de la velocidad	3.2
3.1.1	Par constante	3.2
3.1.2	Aumento del par en proporción a la velocidad	3.3
3.1.3	Aumento del par con el cuadrado de la velocidad	3.5
3.1.4	Reducción del par en proporción inversa a la velocidad	3.5
3.2	Pares de carga en función del ángulo	3.6
3.3	Pares de carga en función de la trayectoria	3.6
3.4	Pares de carga en función del tiempo	3.6
3.5	Par mínimo	3.6
4	Selección y dimensionamiento del motor eléctrico	4.1
4.1	Capacidad del motor	4.2
4.1.1	Datos de catálogo y parámetros de aplicación	4.3
4.1.2	Determinación del valor nominal unitario	4.4
4.1.3	Datos de catálogo	4.4
4.1.4	Condiciones de funcionamiento	4.4
4.1.5	Procedimiento para seleccionar motores	4.4
4.2	Dimensionamiento con el par de carga	4.7
4.3	Cálculo con el par acelerador o el tiempo de aceleración	4.8
4.3.1	Par acelerador	4.8
4.3.2	Tiempo de aceleración	4.8
4.4	Cálculo con la frecuencia de conmutación	4.11
4.5	Selección a partir de los datos de catálogo	4.13
5	Símbolos de las ecuaciones	4.14

1 Motores de inducción trifásicos

El motor de inducción trifásico, también llamado motor asíncrono, es hoy día el motor eléctrico que más se utiliza en las aplicaciones industriales, sobre todo el motor con rotor de jaula de ardilla.

1.1 Principios de funcionamiento

La sección del *motor de inducción trifásico*, tal como se muestra en la **Figura 1.2.2**, se compone de un bastidor o estator fijo, un bobinado trifásico alimentado por una *red eléctrica trifásica* y un *rotor* giratorio. No hay ninguna conexión eléctrica entre el estator y el rotor. Las corrientes del rotor se inducen desde el estator a través del entrehierro. Tanto el estator como el rotor están fabricados de una lámina de núcleo altamente magnetizable que proporciona pérdidas por corrientes de Foucault e histéresis bajas.

1.1.1 Estator

El *bobinado del estator* está formado por tres bobinados individuales que se superponen y están decalados con un ángulo eléctrico de 120°. Cuando se conecta a la alimentación, la corriente de entrada primero magnetiza el estator. Esta *corriente de magnetización* genera un *campo rotativo* que gira con la *velocidad de sincronismo* n_s .

$\text{Velocidad de sincronismo } n_s = 60 \frac{f}{p}$	n_s = velocidad de sincronismo/minuto f = frecuencia s^{-1} (segundo) p = número de pares de polos (número de polos/2)
---	---

Para el número de pares de polos más pequeño $2p = 2$ en un circuito de 50 Hz, la velocidad sincrónica más alta es $n_s = 3000/\text{min}^{-1}$. Las velocidades sincrónicas de un circuito de 50 Hz se indican en la **Tabla 1.2.1**.

1.1.2 Rotor

En los motores de inducción con rotor de jaula de ardilla, el rotor está formado por un bloque laminar de núcleo de rotor cilíndrico y ranurado provisto de barras de aluminio unidas por delante con anillas para formar una jaula cerrada.

El *rotor* de los motores de inducción trifásicos a veces se denomina *rotor*. Este nombre tiene su origen en la forma de ancla que tenían los rotores de los primeros dispositivos eléctricos. En un equipo eléctrico, el bobinado del rotor está inducido por el campo magnético, mientras que en los motores trifásicos, este papel corresponde a los rotores.

Pares de polos 2p	2	4	6	8	10	12	16	24	32	48
n _s en rpm	3000	1500	1000	750	600	500	375	250	188	125

Tabla 1.2.1 Velocidades sincrónicas típicas de un circuito de 50 Hz

Las velocidades sincrónicas son un 20% más altas en un circuito de 60 Hz

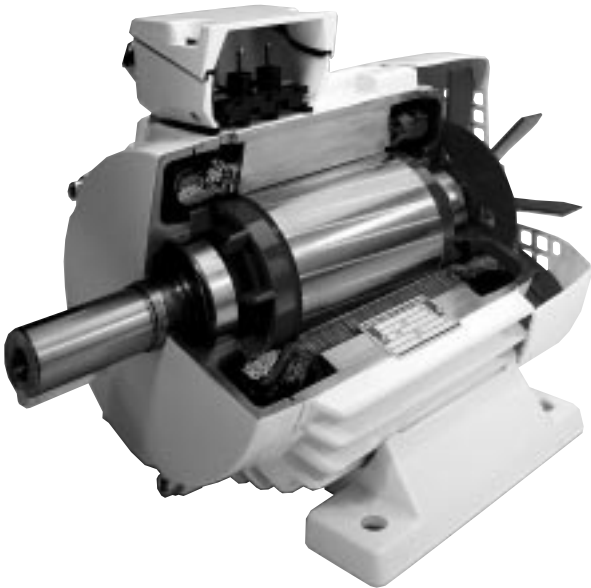
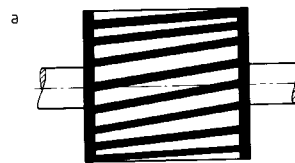


Figura 1.2.2 Motor trifásico de jaula de ardilla de ultima generación

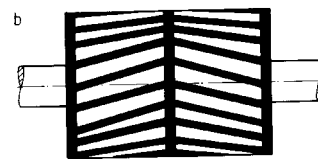
El motor de inducción *parado* actúa como un transformador cortocircuitado en el secundario. Por consiguiente, el *bobinado del estator* corresponde al *bobinado principal* y el *bobinado del rotor* (bobinado de jaula), al *bobinado secundario*. Dado que está en cortocircuito, la corriente interna del rotor depende de la tensión inducida y de su resistencia. La interacción entre el *flujo magnético* y los *conductores de corriente del rotor* genera un *par de torsión* que se corresponde con la rotación del campo rotativo. Las barras de la jaula está dispuestas de forma excéntrica con respecto al eje de rotación para impedir fluctuaciones en el par de torsión (véase la **Figura** 1.3.1). Esto se denomina "inclinación".

Cuando está *en vacío*, el rotor casi alcanza la velocidad sincrónica del campo rotativo, ya que el par de torsión antagonista es reducido (ninguna pérdida sin carga). Si la rotación fuera la de sincronismo, la tensión ya no se induciría, la corriente dejaría de fluir y ya no habría par de torsión.

Durante el *funcionamiento*, la velocidad del rotor baja hasta la *velocidad de carga* n . La diferencia entre la velocidad sincrónica y la de carga se denomina *deslizamiento* s . Basado en este deslizamiento s , dependiente de la carga, la tensión inducida en el bobinado del rotor cambia y éste, a su vez, cambia la corriente del rotor y el par de torsión M . Al aumentar el deslizamiento, también lo hacen la corriente del rotor y el par de torsión. Dado que el motor de inducción trifásico actúa como un transformador, la corriente del rotor se transforma en la parte del estator (o secundario) y la corriente de alimentación del estator cambia esencialmente de la misma manera. La *potencia eléctrica* del estator generada por la corriente de alimentación se convierte, a través del *entrehierro*, en *potencia mecánica* en el rotor. Por ello, la corriente del estator consta de dos componentes, la *corriente de magnetización* y la *corriente de carga* en sí.



a barras de jaula excéntricas únicas



b barras de jaula transpuestas dobles

Figura 1.3.1 Tipos de bobinados de rotor de jaula de ardilla

1.1.3 Deslizamiento

La diferencia entre la velocidad sincrónica n_s y la velocidad n de funcionamiento de régimen se denomina *deslizamiento* s y suele expresarse en porcentaje. Dependiendo del tamaño de la máquina, durante el funcionamiento de régimen esta diferencia es aproximadamente del 10-3%. El deslizamiento es una de las características más importantes de una máquina de inducción.

Deslizamiento $s = \frac{n_s - n}{n_s}$	s = deslizamiento
	n_s = velocidad sincrónica
	n = velocidad del rotor

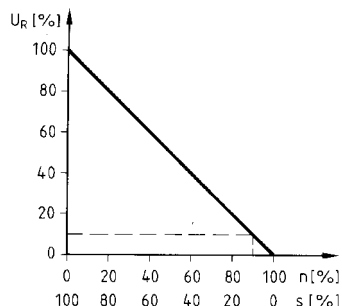


Figura 1.4.1 La tensión rotórica U_R es proporcional al deslizamiento s . Una tensión del rotor del 10% corresponde a un deslizamiento del 10%.

La tensión rotórica inducida U_R , mostrada en la **Figura 1.4.1**, es proporcional al deslizamiento s . En la posición de parada, la tensión alcanza su máximo con $n = 1$ y $s = 1$, lo que también intensifica al máximo el flujo de corriente. En las aplicaciones reales, este hecho lo confirma la elevada corriente de arranque (aflujo de corriente de arranque). El par de torsión también alcanza su máximo durante el periodo de parada con una resistencia de rotor determinada. Este comportamiento puede modificarse variando el diseño. Sin embargo, la resistencia del rotor no suele utilizarse para este fin. La siguiente fórmula se aplica para la velocidad del rotor:

Velocidad del rotor $n = n_s \cdot (1 - s)$	n = velocidad del rotor
	n_s = velocidad sincrónica
	s = deslizamiento

1.1.4 Disipación

Dado que la velocidad n del rotor es inferior a la velocidad sincrónica n_s del campo rotativo por el valor del deslizamiento s , la potencia mecánica P_2 del rotor también es inferior a la potencia del campo rotativo P_D transmitida eléctricamente. La diferencia P_{VR} se pierde en el rotor en forma de calor. En consecuencia, estas pérdidas en el bobinado dependen directamente del deslizamiento s . Desde el primer momento del proceso de arranque, toda la potencia inducida en el rotor se convierte en calor.

Disipación en el rotor $P_{VR} = P_D \cdot s = \text{pérdida óhmica } P_{CuR} \text{ en W}$
--

La ecuación muestra que el peligro térmico es mayor para un rotor estacionario con $s = 1$, ya que toda la potencia de entrada eléctrica se convierte en disipación de calor en el motor. Debido a la elevada intensidad del arranque de los motores de inducción, el calor disipado es múltiplo de la potencia nominal del motor. Asimismo, los motores autoventilados convencionales no proporcionan una refrigeración adecuada cuando se detienen.

Si analizamos todas las pérdidas de potencia P_v de un motor, como muestra la **Figura 1.5.1**, encontramos las siguientes *pérdidas individuales*:

• P_{Fe}	<i>Pérdidas en el núcleo del estator</i>	$\Rightarrow$ más o menos constante durante el funcionamiento
• P_{CuS}	<i>Pérdida óhmica en el estator</i>	$\Rightarrow$ función cuadrada de la corriente
• P_{CuR}	<i>Pérdida óhmica en el rotor</i>	$\Rightarrow$ función cuadrada de la corriente
• P_{Lu}	<i>Pérdida por resistencia aerodinámica</i>	$\Rightarrow$ más o menos constante durante el funcionamiento
• P_{La}	<i>Pérdidas por rozamiento mecánico</i>	$\Rightarrow$ más o menos constantes durante el funcionamiento
• P_{zus}	<i>Pérdidas por dispersión</i>	$\Rightarrow$ más o menos constantes durante el funcionamiento

La *pérdida en el núcleo* del estator P_{Fe} se debe a las pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas que dependen de la tensión y la frecuencia. Por ello, durante el funcionamiento son más o menos constantes. En el rotor, las pérdidas son insignificantes debido a la baja frecuencia de la corriente del rotor durante el funcionamiento. Las *pérdidas óhmicas* se originan en el estator P_{CuS} y el rotor P_{CuR} . Ambas son una función cuadrada de la carga. Las *pérdidas por resistencia aerodinámica* P_{Lu} y *por rozamiento mecánico* P_{La} también son constantes debido a la velocidad de funcionamiento prácticamente constante. Las *pérdidas por dispersión* P_{zus} son originadas principalmente por las corrientes parásitas de los componentes metálicos de la máquina.

Leyenda:

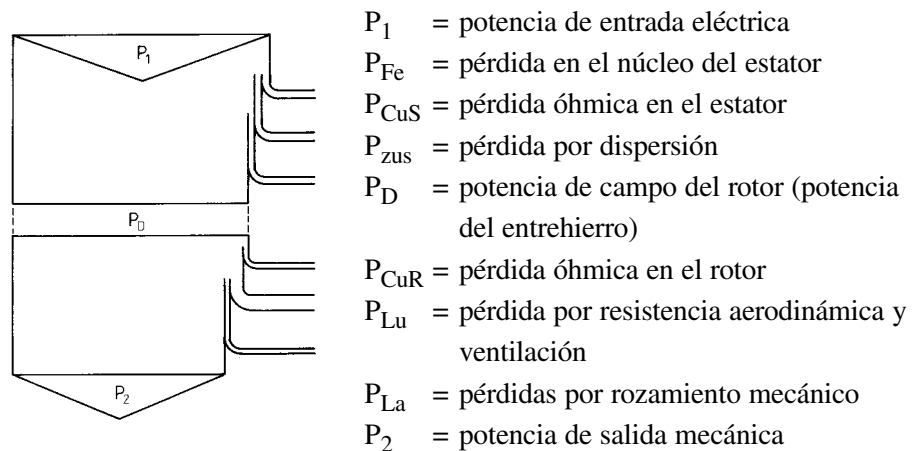


Figura 1.5.1 Potencia de salida y pérdidas en un motor de inducción trifásico

1.2 Características del par de torsión

1.2.1 Característica principal

La **Figura 1.6** muestra, mediante los siguientes parámetros, las características de par de torsión propias de los motores de inducción con rotor de jaula de ardilla. El *par acelerador* abarca toda la característica de par, desde la parada hasta la velocidad máxima.

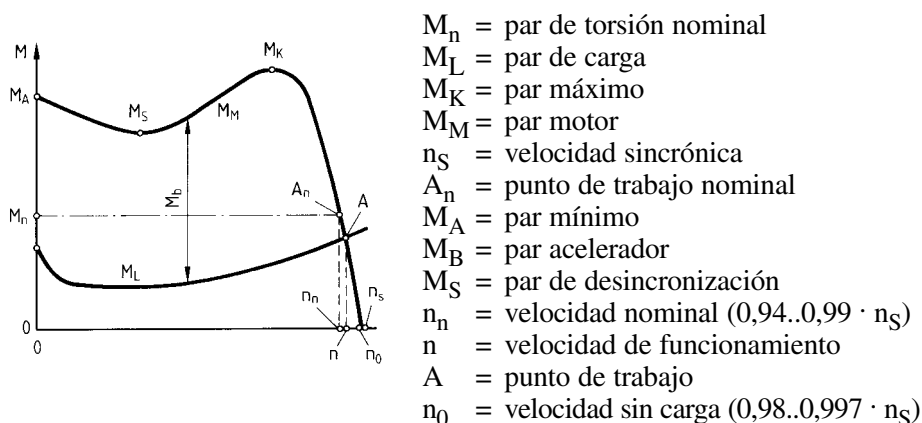


Figura 1.6.1 Característica de par del motor de inducción respecto a la velocidad

M_A *Par inicial de arranque* en la posición de parada; también llamado *par mínimo*. Los valores proporcionados por los fabricantes de motores deberían estar comprendidos entre -15% y +25%.

M_n *Par de torsión de régimen* durante el funcionamiento de régimen con una potencia de régimen P_n y una velocidad de régimen n_n . Sin carga, el par es muy bajo y cubre la fricción interna. Cuando el motor se carga, su velocidad disminuye ligeramente por el valor del deslizamiento s y el par aumenta. Un motor estándar en funcionamiento continuo debe poder proporcionar el par nominal sin exceder el límite de temperatura.

En algunos modos de funcionamiento (S2, S3 y S6), el par nominal también puede excederse hasta cierto punto a lo largo de todo el régimen de funcionamiento, siempre que el límite de temperatura no se sobrepase.

M_K *Par máximo*. Éste es el *par máximo* que un motor puede proporcionar. Si la potencia aumenta por encima de la carga nominal P_n , el deslizamiento s continúa incrementándose, la velocidad n disminuye y el motor proporciona un par mayor. Esto puede aumentarse hasta el valor máximo M_K (par máximo), momento en el que el motor se hace *inestable*, es decir, su velocidad disminuye de repente con este valor de deslizamiento (deslizamiento de interrupción) y la velocidad del motor tiende a 0.

Según las normas, el par máximo debe ser $M_K \geq 1,6 M_n$ y es necesario poder sobrecargar el motor al menos durante 15 segundos con este valor y la tensión y frecuencia nominal. Los datos de catálogo permiten una tolerancia de hasta un -10%. En la mayoría de los motores, el par máximo es considerablemente mayor y suele alcanzar valores de $M_K = 2...3,5 M_n$. Por consiguiente, los motores de inducción son especialmente apropiados para las cargas intermitentes, siempre que el calor adicional pueda disiparse.

M_S *Par de desincronización*; es el par mínimo producido durante la aceleración. En cualquier caso, debe ser mayor que el par de carga M_L a esa determinada velocidad, ya que, de lo contrario, el motor no puede acelerarse. Los valores mínimos del par de desincronización se indican en las normas correspondientes al funcionamiento a tensión nominal.

M_L *Par de carga*, el *par antagonista* que representa a la carga durante la aceleración.

M_M *Par motor*, también denominado *par acelerador*.

M_B *Par acelerador*, como la diferencia entre el par motor M_M y el par de carga M_L .

Con un servicio continuo, un modo de funcionamiento S1 y una carga nominal P_n , un motor bien dimensionado gira a la velocidad nominal n_n y proporciona el par nominal M_n :

Par nominal	$M_n = 9555 \cdot \frac{P_n}{n_n}$	M_n = par nominal en Nm P_n = potencia nominal en kW n_n = velocidad nominal/minuto
--------------------	------------------------------------	---

Sin embargo, el par M también puede calcularse con los datos eléctricos del motor:

Par de régimen	$M_n = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot \eta \cdot 9,55}{n}$	U = tensión en V I = intensidad en A $\cos\varphi$ = factor de potencia η = rendimiento n = velocidad
-----------------------	--	--

Durante el arranque, el par mínimo M_A debe ser mayor que el par mínimo de la carga y, durante la fase de aceleración completa, el par motor M_M debe permanecer por encima del par de carga M_L , como muestra la **Figura 1.6.1**. En la intersección de las dos líneas de par (punto de funcionamiento A), el motor funciona con velocidad constante n . En caso de sobrecarga, el punto de trabajo A aumenta por encima del punto de trabajo nominal A_n . Esto sólo se permite durante un periodo corto de tiempo para evitar el sobrecalentamiento del motor.

El punto de trabajo A tampoco debe ser demasiado bajo, por lo que no debería elegirse un motor sobredimensionado. Si está por debajo del 50% de la carga nominal, el rendimiento η y el factor de potencia $\cos\phi$ disminuyen enormemente y los motores dejan de funcionar de forma económica. Un motor más grande también tiene una intensidad de arranque I_A mayor, ya que esta corriente es independiente del par de carga. Los motores de mayor tamaño sólo reducirían el tiempo de aceleración.

1.2.2 Diseño del motor

En los motores de inducción trifásicos, las características del par pueden adaptarse en gran medida a la aplicación. En este caso, las propiedades importantes son una *intensidad de arranque baja* I_A y un *par de arranque alto* M_A . La característica de par y el tamaño de la intensidad de arranque vienen determinados principalmente por el *tipo de jaula del rotor* y la *forma de la ranura del rotor*, como puede verse en la **Figura 1.8.1**.

Es posible conseguir un par mínimo elevado M_A y una intensidad de arranque baja I_A mediante una resistencia óhmica de rotor relativamente alta en el par de arranque. Básicamente, durante el arranque se origina un "efecto de desplazamiento de corriente" (efecto pelicular) más o menos elevado; esto se aplica a todos los tipos de diseños de rotor. Se distinguen los siguientes diseños:

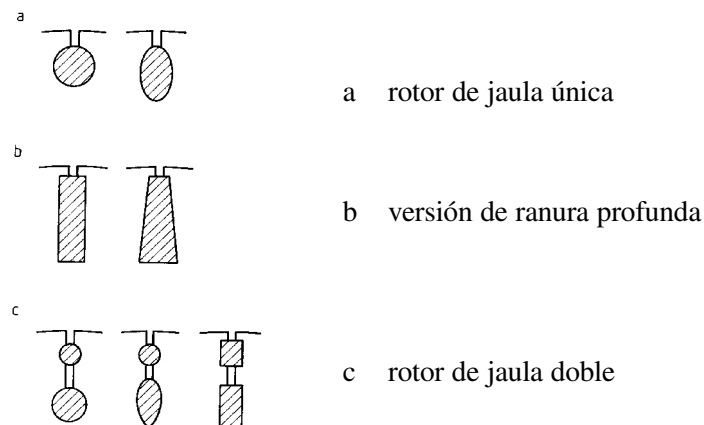


Figure 1.8.1 Slot shapes for squirrel-cage rotors

- *Rotores de jaula de ardilla normales con ranura única* y conductores circulares, rectangulares o trapezoidales, hechos normalmente de aluminio y provistos de un par de arranque relativamente elevado ($1,8...2,5 \times M_n$) y una corriente de arranque alta ($5...10 \times I_n$).
- *Rotores de desplazamiento de corriente*, también llamados *rotors de barra profunda*. Si las barras de la jaula son altas y estrechas, durante la puesta en marcha se produce un *desplazamiento de corriente*, dado que en ese momento la frecuencia del rotor es alta. La corriente fluye por la parte exterior o "piel" del rotor. Este efecto reduce la sección transversal eficaz del conductor y, por consiguiente, aumenta la resistencia óhmica. El resultado es un par de arranque M_A bueno y una intensidad de arranque I_A baja favorable. Durante el funcionamiento, el desplazamiento de corriente deja de tener efecto, ya que en ese momento la frecuencia del rotor es muy baja y las corrientes y los pares del motor son normales.
- *Rotores de jaula de ardilla doble*, cuya barra está dividida en dos barras individuales que suelen estar eléctricamente aisladas la una de la otra. La *jaula externa* tiene una *resistencia óhmica alta* y la *interna*, una *resistencia óhmica baja*. Esto se consigue utilizando un material (Cu, Al, Ms) y un tamaño de sección transversal de conductor apropiados. El efecto es incluso mayor que en un rotor de desplazamiento de corriente. Durante el arranque, la corriente fluye esencialmente sólo por la parte exterior de la jaula, lo cual reduce la corriente de arranque I_A e incrementa relativamente el par de arranque M_A . Durante el funcionamiento, la corriente se distribuye entre las dos jaulas de acuerdo a sus resistencias óhmicas.
- *Rotores de jaula de ardilla de alta resistencia*, también llamados rotores de deslizamiento, con forma de ranura como la de un rotor de jaula de ardilla normal, pero con conductores de latón o de aleación de aluminio de alta resistencia en lugar de conductores de Al o Cu. Esto hace que la resistencia óhmica aumente. Este rotor, comparado con el de desplazamiento de corriente, permanece constante a lo largo de todo el régimen de velocidad y, durante su funcionamiento, produce un deslizamiento elevado con una característica de velocidad *flexible* y un par de arranque máximo poco pronunciado. El par de arranque M_A es alto respecto a la resistencia del rotor y la intensidad de arranque I_A disminuye. Dado que, durante el funcionamiento, la resistencia óhmica es alta, las pérdidas son relativamente grandes, por lo que las prestaciones son poco económicas. En consecuencia, estos rotores se utilizan poco hoy en día, sobre todo desde que las características deseadas también pueden conseguirse con dispositivos electrónicos de bajas pérdidas, como los variadores y los arrancadores suaves.

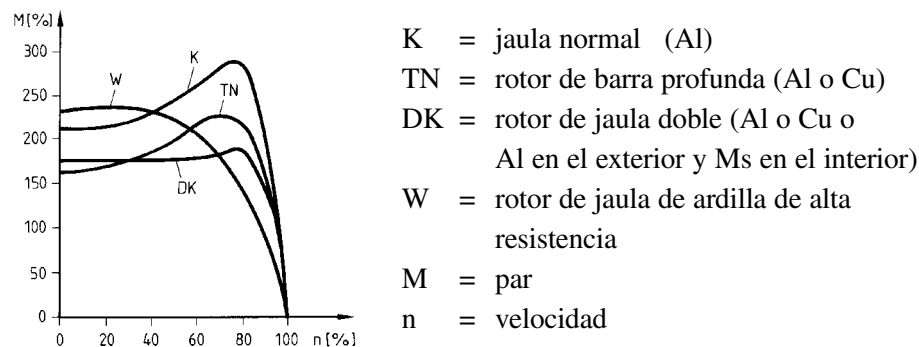


Figura 1.10.1 Característica de par principal de varios tipos de jaulas

1.3 Características de funcionamiento

Las características de funcionamiento son una presentación gráfica del comportamiento de:

- la velocidad
 - el factor de potencia
 - el rendimiento
 - la corriente
 - la potencia
 - el deslizamiento
- en función de la carga.

La **Figura 1.10.2** muestra las características de funcionamiento de un motor de inducción típico.

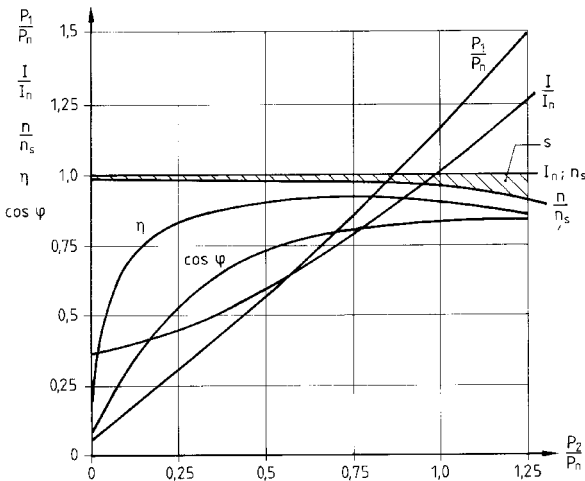


Figura 1.10.2 Características de funcionamiento de un motor de inducción en función de la carga

- | | |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| n = velocidad | n_s = velocidad sincrónica |
| P_1 = potencia de entrada | P_2 = potencia de salida |
| η = rendimiento | $\cos \varphi$ = factor de potencia |
| I = corriente de entrada | I_n = intensidad nominal |
| s = deslizamiento | P_n = potencia nominal |

- n La *velocidad* n sólo disminuye ligeramente conforme aumenta la carga. Por consiguiente, los motores de jaula de ardilla estándar tienen unas *características de velocidad "rígidas"*.
- s El *deslizamiento* s aumenta más o menos proporcionalmente con el incremento de la carga.
- $\cos\phi$ El *factor de potencia* $\cos\phi$ depende *en gran medida de la carga* y normalmente alcanza su máximo durante la sobrecarga. En el régimen de carga parcial, es relativamente desfavorable, ya que, incluso con cargas parciales, la magnetización es prácticamente constante.
- η El *rendimiento* η muestra una característica *relativamente plana* y es prácticamente constante por encima de la media-carga. Suele alcanzar su máximo cuando está por debajo de la potencia de régimen P_n .
- I La *intensidad* I aumenta *proporcionalmente* comenzando más o menos a media-carga. Por debajo de la media-carga, la corriente disminuye sólo ligeramente hasta convertirse en la corriente de carga nula I_0 (magnetización constante).
- P La *potencia* P_1 aumenta más o menos en proporción con el inicio de carga comenzando en la potencia de carga nula. En el régimen de sobrecarga, la potencia aumenta algo más deprisa, ya que las pérdidas también se incrementan con más rapidez.

Dado que el rendimiento η y el factor de potencia $\cos\phi$ pueden tener un efecto importante sobre la eficacia económica de un motor, es muy importante saber cuáles son los valores de la carga parcial. Ambos valores determinan el rendimiento económico del funcionamiento. En el régimen de carga parcial, los dos valores disminuyen. Además, el factor de potencia $\cos\phi$ de los motores de velocidad baja es inferior al de los motores de velocidad elevada. Por consiguiente, los motores de velocidad alta y dimensionamiento preciso no sólo resultan más baratos al comprarlos, sino también al utilizarlos.

2 Tipos de servicio de motores eléctricos

Normalmente, los motores de inducción trifásicos de servicio continuo están diseñados para la potencia nominal. Los accionadores son una excepción. Sin embargo, la mayoría de los motores funcionan con un tipo de servicio no continuo. Algunos motores sólo se conectan por unos instantes, otros funcionan todo el día, pero sólo se cargan brevemente, y muchos motores deben acelerar grandes volantes o funcionan en un modo conmutado y se frenan eléctricamente. En todos estos tipos de servicio distintos, un motor se calienta de forma diferente que en un servicio continuo. Para evitar daños en el bobinado y el rotor del motor por sobrecalentamiento, deben tenerse en cuenta estos procesos de calentamiento especiales.

2.1 Tipos de servicio primarios S1 - S9

Para los fines del diseño, la información sobre el *tipo de servicio* debe ser lo más exacta posible, ya que la potencia generada puede variar mucho respecto a la potencia de salida continua. El número de tipos de servicio posibles es por ello teóricamente ilimitado. Para facilitar el entendimiento entre fabricantes y operadores, se han detallado nueve tipos de servicio principales (S1 - S9) en IEC 34. Casi todos los casos que ocurren en la práctica pueden asignarse a uno de estos tipos de servicio:

- S1: Servicio continuo
- S2: Servicio temporal
- S3: Tipo de servicio periódico intermitente sin arranque
- S4: Servicio periódico intermitente con arranque
- S5: Servicio periódico intermitente con arranque y frenado eléctrico
- S6: Tipo de servicio de funcionamiento continuo
- S7: Servicio de funcionamiento continuo con arranque y frenado eléctrico
- S8: Servicio periódico de funcionamiento continuo con cambios de carga/velocidad relacionados
- S9: Servicio con variaciones de carga y velocidad no periódicas

Los fabricantes de motores deben asignar la capacidad de carga del motor a uno de estos tipos de servicio definidos y, donde sea necesario, proporcionar los valores de tiempo de funcionamiento, periodo de carga o ciclo de servicio relativo.

En las descripciones y diagramas referentes a los tipos de servicio S1 - S9, se utilizan los siguientes símbolos:

P	= potencia en kW	t_{Br}	= tiempo de frenado en seg., min
P_v	= pérdidas en kW	t_L	= tiempo de reposo en seg., min, h
n	= velocidad/min	t_r	= ciclo de servicio relativo (%)
ϑ	= temperatura en °C	t_s	= duración de ciclo en segundos
ϑ_{max}	= temp. máxima en °C	t_{St}	= tiempo de parada en seg., min, h
t	= tiempo en seg., min, h	T	= constante térmica de tiempo en minutos
t_B	= periodo de carga	t_A	= tiempo de arranque en seg., min
J_M	= momento de inercia del motor en kgm ²		
J_{ext}	= momento de inercia de la carga referido al eje del motor en kgm ²		

La velocidad n se especifica normalmente en revoluciones por minuto. Generalmente, la placa de datos indica la velocidad nominal n_n a plena carga, pero en los catálogos también se especifica la velocidad sincrónica o nominal.

Los tipos de servicio S1 - S9 cubren muchas de las aplicaciones que se dan en este campo. Si no es posible asignar el tipo de carga a uno de los tipos de servicio definidos, es necesario proporcionar al fabricante la descripción exacta del ciclo o seleccionar un tipo de servicio que se ajuste a una carga al menos tan dura como la aplicación misma.

2.1.1 S1: Servicio continuo

Funcionamiento en un estado de carga constante, como el mostrado en la **Figura 2.2.1**, con una duración suficiente para alcanzar el equilibrio térmico. El periodo de carga t_B es mucho mayor que la constante térmica de tiempo T .

Identificación S1: especificación de la potencia en kW, si es necesario con abreviatura S1.

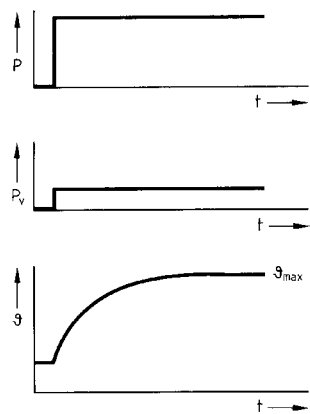


Figura 2.2.1 Tipo de servicio S1: servicio continuo

2.1.2 S2: Servicio temporal

Funcionamiento en un estado de carga constante, como el mostrado en la **Figura 2.3.1**, que, no obstante, no dura lo suficiente para alcanzar el equilibrio térmico y con un intervalo posterior que dura hasta que la temperatura de la máquina difiere en no más de 2 K de la temperatura del refrigerante.

El servicio es temporal cuando el periodo de carga $t_B \leq 3 T$ (constante térmica de tiempo). Comparado con el servicio continuo, el motor puede generar más potencia durante el periodo de carga. Consulte con el fabricante para obtener más detalles.

Identificación S2: por especificación del periodo de carga t_B y la potencia P en kW.

- Ejemplo: S2: 10 min, 11 kW.
- Para el tiempo de funcionamiento t_B , se recomiendan periodos de 10, 30, 60 y 90 min.

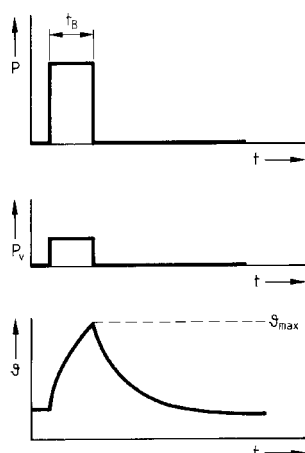


Figura 2.3.1 Tipo de servicio S2: servicio temporal

2.1.3 S3: Tipo de servicio periódico intermitente sin arranque

Funcionamiento, como el mostrado en la **Figura 2.4.1**, que está compuesto de una secuencia de ciclos de servicio similares con una duración de ciclo t_S a carga constante y un intervalo que generalmente es tan corto que no se alcanza el equilibrio térmico y la corriente de arranque no afecta al calentamiento de forma apreciable. Éste es el caso cuando $t_B \leq 3 T$. La potencia durante este periodo debe ser mayor que la potencia de salida continua del motor. Consulte con el fabricante para obtener más detalles.

$$\text{Ciclo de servicio relativo } t_r = \frac{t_B}{t_B + t_S} \cdot 100$$

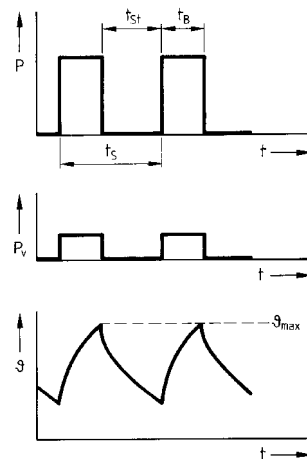
t_B = periodo de carga en seg., min t_S = duración de ciclo en seg., min

t_r = ciclo de servicio relativo en %

Identificación: por especificación del periodo de carga t_B , la duración de ciclo t_S y la potencia P , pero también por el ciclo de servicio relativo t_r en % y por la duración de ciclo.

- Ejemplo: S3: 15 min / 60 min. 11 kW.

- Ejemplo: S3: 25%, 60 min. 11 kW.



ciclo de servicio relativo

$$t_r = \frac{t_B}{t_B + t_S} \cdot 100$$

Figura 2.4.1 Tipo de servicio S3: tipo de servicio periódico intermitente sin arranque

Si no se especifica la duración de ciclo, se aplica $t_S = 10$ min.

Los valores recomendados para el ciclo de servicio relativo t_r son 15%, 25%, 40% y 60%.

2.1.4 S4: Servicio periódico intermitente con arranque

Funcionamiento, como el mostrado en la **Figura 2.5.1**, que consiste en una secuencia de ciclos de servicio idénticos con una duración de ciclo t_S , en la que cada ciclo abarca un tiempo de arranque t_A determinado, un tiempo t_B con carga constante y un intervalo t_{St} .

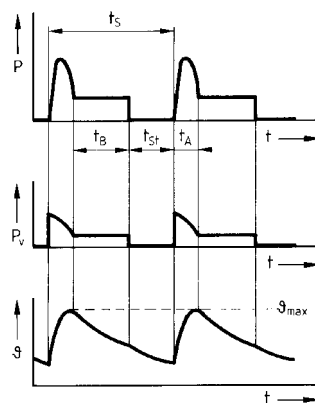
$$\text{Ciclo de servicio relativo } t_r = \frac{(t_A + t_B) \cdot 100}{t_A + t_B + t_{St}} = \frac{t_A + t_B}{t_S} \cdot 100$$

t_A = tiempo de arranque en seg., min t_S = duración de ciclo en seg., min
 t_r = ciclo de servicio relativo en % t_B = tiempo de carga en seg., min
 t_{St} = tiempo de parada en seg., min

Identificación: por el ciclo de servicio relativo t_r en %, el número Z_L de arranques por hora y la potencia P .

- Ejemplo: S4: 25%, 500 arranques por hora, 11 kW.

- Información adicional sobre los momentos de inercia del motor y la carga J_M y J_{ext} durante el arranque



ciclo de servicio relativo

$$t_r = \frac{t_A + t_B}{t_A + t_B + t_{St}} \cdot 100$$

Figura 2.5.1 Tipo de servicio S3: servicio periódico intermitente con arranque

Aquí debe tenerse en cuenta si el motor se detiene al final del ciclo por efecto de la carga o por medio de un freno mecánico. Si el motor sigue funcionando después de desconectarlo con el fin de enfriar significativamente el bobinado, esto debe indicarse. Si no se indica, se asume que el motor se detendrá en un periodo de tiempo muy breve.

En este tipo de servicio, el máximo número de conmutaciones sin carga Z_0 se utilizan como base para calcular la máxima frecuencia de conmutaciones de funcionamiento de acuerdo con el par de carga, la posible masa adicional y un posible efecto de volante. Comparado con el servicio continuo S1, puede apreciarse una reducción de potencia.

2.1.5 S5: Servicio periódico intermitente con arranque y frenado eléctrico

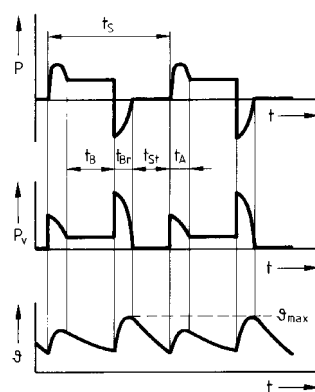
Funcionamiento, como el mostrado en la **Figura 2.6.1**, que está compuesto de una secuencia de ciclos de servicio similares con una duración de ciclo t_s , en la que cada ciclo abarca un tiempo de arranque t_A determinado, un tiempo t_B con carga constante y un tiempo t_{Br} de frenado eléctrico de alta velocidad. No hay intervalo.

$$\text{Ciclo de servicio relativo } t_r = \frac{(t_A + t_B + t_{Br}) \cdot 100}{t_A + t_B + t_{Br} + t_{St}} = \frac{t_A + t_B + t_{Br}}{t_s} \cdot 100$$

t_A = tiempo de arranque en seg., min t_{St} = tiempo de parada en seg., min
 t_B = periodo de carga en seg., min t_r = ciclo de servicio relativo en %
 t_s = duración de ciclo en seg., min t_{Br} = tiempo de frenado en seg., min

Identificación: similar a S4, pero también identificado con especificación del tipo de frenado (frenado de contramarcha, frenado regenerativo, etc.).

- En caso de duda y cuando los tiempos de arranque y frenado sean largos en relación al tiempo de funcionamiento nominal, los tres intervalos de tiempo deben indicarse por separado.
- Ejemplo: S4: 25%, 500 arranques por hora, frenado de contramarcha, 11 kW.
- Información adicional sobre los momentos de inercia del motor y la carga J_M y J_{ext} durante el arranque y el frenado.



ciclo de servicio relativo

$$t_r = \frac{t_A + t_B + t_{Br}}{t_A + t_B + t_{Br} + t_{St}} \cdot 100$$

Figura 2.6.1 Tipo de servicio S5: servicio periódico intermitente con arranque y frenado eléctrico

Comparado con el servicio continuo S1, en este modo es necesaria una reducción de potencia. Consulte con el fabricante para obtener más detalles.

2.1.6 S6: Servicio periódico de funcionamiento continuo

Funcionamiento, como el mostrado en la **Figura 2.7.1**, que está compuesto de una secuencia de ciclos de servicio similares con una duración de ciclo t_s , en la que cada ciclo abarca un tiempo t_B con carga constante y un tiempo de reposo t_L , sin intervalo. Después del tiempo de funcionamiento t_B , el motor sigue girando sin carga y, debido a la corriente de carga nula, no se enfría hasta la temperatura del refrigerante, pero se ventila durante el tiempo de reposo t_L . Éste es el estado de funcionamiento cuando $t_B \leq T$.

Ciclo de servicio relativo

$$t_r = \frac{t_B}{t_B + t_L} \cdot 100 = \frac{t_B}{t_s} \cdot 100$$

t_B = periodo de carga en seg., min

t_L = tiempo de reposo en seg., min

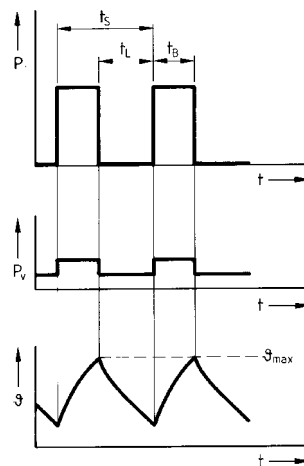
t_s = duración de ciclo en seg., min

t_r = ciclo de servicio relativo en %

Identificación: como en S3, por el ciclo de servicio t_B , la duración de ciclo t_s , y la potencia P.

- Ejemplo: S6: 25%, 40 min, 11 kW.

- Si no se indica una duración de ciclo, se aplica $t_s = 10$ min.



ciclo de servicio relativo

$$t_r = \frac{t_B}{t_B + t_L} \cdot 100$$

Figura 2.7.1 Tipo de servicio S6: servicio periódico de funcionamiento continuo

Comparado con el servicio continuo S1, puede escogerse una potencia mayor para el periodo de funcionamiento t_B . Consulte con el fabricante para obtener más detalles.

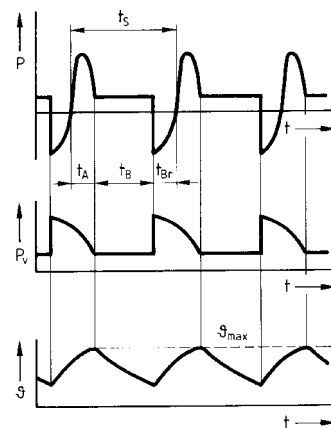
2.1.7 S7: Servicio de funcionamiento continuo con arranque y frenado eléctrico

Funcionamiento, como el mostrado en la **Figura 2.8.1**, que está compuesto por una secuencia de ciclos de servicio similares con una duración de ciclo t_s , en la que cada ciclo abarca un tiempo de arranque t_A determinado, un tiempo t_B con carga constante P y un tiempo t_{Br} con frenado eléctrico de alta velocidad. No hay intervalo.

Ciclo de servicio relativo $t_r = 1$

Identificación: como S4, identificado sin indicación del ciclo de servicio relativo t_r , pero con indicación del tipo de frenado (contramarcha, frenado regenerativo, etc).

- En caso de duda y cuando los tiempos de arranque y frenado sean lo bastante largos en relación al tiempo de funcionamiento nominal, deben indicarse los tres intervalos de tiempo por separado.
- Ejemplo: S7: 500 ciclos de servicio por hora, frenado por contramarcha, 11 kW.
- Información adicional sobre los momentos de inercia del motor y la carga J_M y J_{ext} durante el arranque y el frenado.



ciclo de servicio relativo $t_r = 1$

Figura 2.8.1 S7: servicio de funcionamiento continuo con arranque y frenado eléctrico

Comparado con el servicio continuo S1, en este modo es necesaria una reducción de potencia. Consulte con el fabricante para obtener más detalles.

2.1.8 S8: Servicio periódico de funcionamiento continuo con cambios de carga/velocidad relacionados

Funcionamiento, como el mostrado en la **Figura 2.10.1**, que está compuesto de una secuencia de ciclos de servicio similares con una duración de ciclo t_s . Cada uno de estos ciclos abarca un tiempo con una carga constante y una velocidad determinada, y después uno o varios tiempos con cargas diferentes que corresponden a velocidades distintas, por ejemplo, por inversión de los polos. No hay intervalo ni tiempo de reposo.

Este modo no puede registrarse con una simple fórmula. Hay que emplear una carga continua adecuada como referencia para el ciclo de carga:

Ciclo de servicio relativo	$t_{r1} = \frac{(t_A + t_{B1}) \cdot 100}{t_A + t_{B1} + t_{Br1} + t_{B2} + t_{Br2} + t_{B3}} = \frac{t_A + t_{B1}}{t_s} \cdot 100$
Ciclo de servicio relativo	$t_{r2} = \frac{(t_{Br1} + t_{B2}) \cdot 100}{t_A + t_{B1} + t_{Br1} + t_{B2} + t_{Br2} + t_{B3}} = \frac{t_{Br1} + t_{B2}}{t_s} \cdot 100$
Ciclo de servicio relativo	$t_{r3} = \frac{(t_{Br2} + t_{B3}) \cdot 100}{t_A + t_{B1} + t_{Br1} + t_{B2} + t_{Br2} + t_{B3}} = \frac{t_{Br2} + t_{B3}}{t_s} \cdot 100$

t_A = tiempo de arranque en seg., min t_s = duración de ciclo en seg., min
 t_B = periodo de carga en seg., min t_r = ciclo de servicio relativo en %
 t_{Br} = tiempo de frenado en seg., min

Identificación: como S5, excepto que para cada velocidad debe especificarse el tiempo durante el que ocurre esa velocidad dentro del periodo de cada ciclo.

- Ejemplo: S8: 30%, 3000/m, 10 min, 1500/m 20 min. 2 ciclos por hora. 11 kW.

- Información adicional sobre los momentos de inercia del motor y la carga J_M y J_{ext} durante el arranque y el frenado.

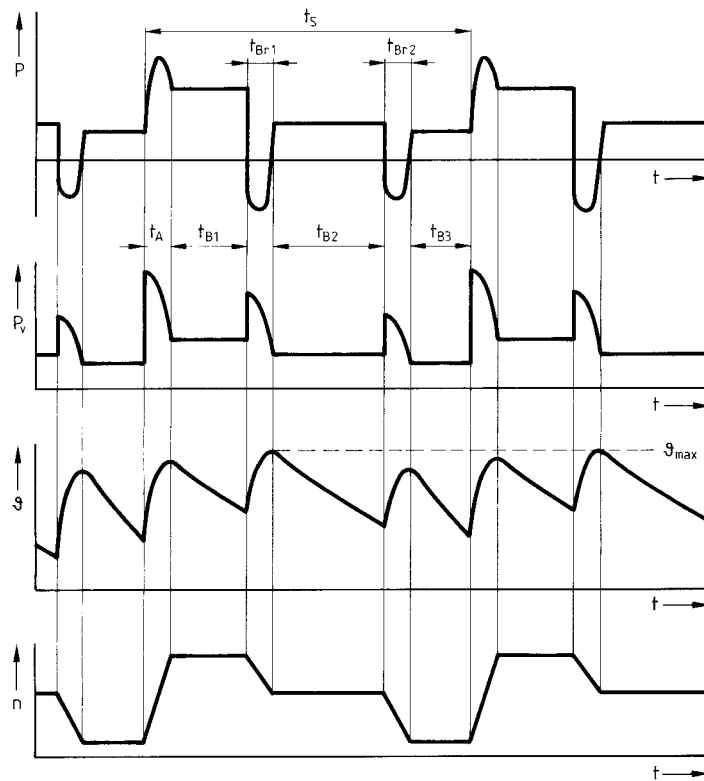


Figura 2.10.1 Tipo de servicio S8: servicio periódico de funcionamiento continuo con cambios de carga/velocidad relacionados

$$\text{Ciclo de servicio relativo } t_{r1} = \frac{t_A + t_{B1}}{t_A + t_{B1} + t_{Br1} + t_{B2} + t_{Br2} + t_{B3}} \quad 100$$

$$\text{Ciclo de servicio relativo } t_{r2} = \frac{t_{Br1} + t_{B2}}{t_A + t_{B1} + t_{Br1} + t_{B2} + t_{Br2} + t_{B3}} \quad 100$$

$$\text{Ciclo de servicio relativo } t_{r3} = \frac{t_{Br2} + t_{B3}}{t_A + t_{B1} + t_{Br1} + t_{B2} + t_{Br2} + t_{B3}} \quad 100$$

Comparado con el servicio continuo S1, en este tipo de servicio es necesaria una reducción de potencia. El cálculo exacto es muy complejo y sólo es posible con información detallada del fabricante.

2.1.9 S9: Servicio con variaciones de carga y velocidad no periódicas

En este modo de funcionamiento, como se muestra en la **Figura 2.11.1**, la carga y la velocidad varían de forma no periódica dentro del régimen de funcionamiento máximo. Pueden darse con frecuencia picos de carga situados muy por encima de la potencia nominal. La posibilidad de sobrecarga puede tenerse en cuenta por sobredimensionamiento selectivo.

El tipo de servicio no puede registrarse con una simple fórmula. Debe emplearse una carga continua adecuada como referencia para el ciclo de carga:

Identificación: generalmente, los fabricantes y usuarios están de acuerdo en emplear una potencia de salida continua equivalente ("equ") en lugar de la carga variable para velocidades distintas y funcionamiento irregular con sobrecarga.

Ejemplo: S9, 11 kW equ 740/min; 22 kW equ 1460/min.

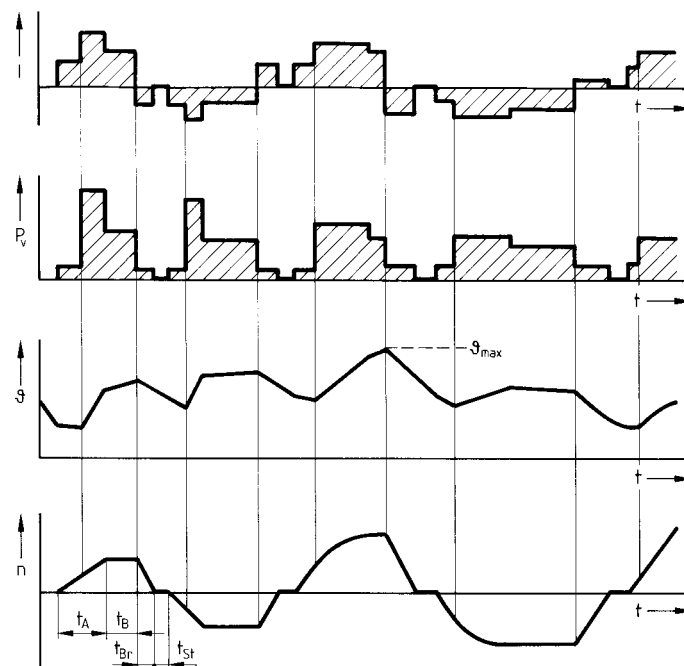


Figura 2.11.1 Tipo de servicio S9: servicio con variaciones de carga y velocidad no periódicas

Comparado con el servicio continuo S1, la potencia de salida continua equivalente del tipo de servicio S9 puede ser menor, igual o incluso mayor, dependiendo de la característica de carga y la duración de los intervalos.

2.2. Valores medios de potencia, par y corriente

En muchos casos, el uso real de un motor difiere de los tipos de servicio S1 - S9 porque la potencia P necesaria o el par M_L (y, por tanto, la corriente I) no son constantes. Puesto que las pérdidas P_v varían con el cuadrado de la carga, los valores individuales (potencias, pares, corrientes) pueden sustituirse por una potencia media P_{mi} .

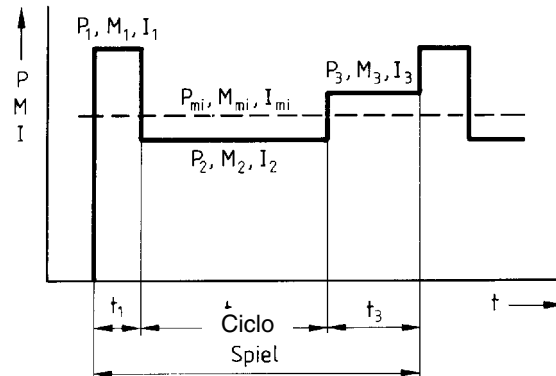


Figura 1.12.1 Cálculo de la potencia media P_{mi} , el par medio M_{mi} y la corriente media I_{mi} (I_{eff})

$$\text{Potencia media } P_{mi} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + P_3^2 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3}}$$

Estos valores se determinan por conversión cuadrática, como se muestra en la **Figura 2.12.1**, empleando las potencias de salida individuales y los tiempos eficaces asociados. El par máximo alcanzado en este caso no debe exceder el 80% del par máximo de un motor de inducción trifásico. Sin embargo, no es posible realizar este tipo cálculo de valores medios en S2.

Potencia media	$P_{mi} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + P_3^2 \cdot t_3 + \dots}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}}$
Par medio	$M_{mi} = \sqrt{\frac{M^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + M_3^2 \cdot t_3 + \dots}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}}$
Intensidad media	$(I_{eff}) = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + I_3^2 \cdot t_3 + \dots}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}}$

Cuando las potencias difieren por un factor mayor que 2, este tipo de cálculo de valores medios es demasiado impreciso y los cálculos deben realizarse con la intensidad media tomada de las características del motor.

Ejemplo: En una máquina de manipulación industrial automática, se determinan los siguientes ciclos de carga para una duración de ciclo de 10 minutos:

6 kW durante 3 minutos, 3 kW durante 2 minutos, 7 kW durante 2 minutos, 2 kW durante 3 minutos:

¿Cuál es la carga media?

$$P_{mi} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + P_3^2 \cdot t_3 + \dots}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}} = \sqrt{\frac{6^2 \cdot 3 + 3^2 \cdot 2 + 7^2 \cdot 2 + 2^2 \cdot 3}{3 + 2 + 2 + 3}} = 4,85 \text{ kW}$$

2.3 Potencia del motor y tipos de servicio

Los tipos de servicio S1 - S9 pueden dividirse en dos grupos, en función de si es posible o necesario un aumento o una reducción de la potencia nominal respecto a S1:

<i>Aumento de potencia</i> comparado con S1:	⇒ para S2, S3 y S6
<i>Reducción de potencia</i> comparado con S1:	⇒ para S4, S5, S7 y S8

2.3.1 Aumento de potencia comparado con S1

Puesto que en los tipos de servicio S2, S3 y S6 la máquina no funciona a plena carga de forma continua, sino sólo en bloques, puede enfriarse de nuevo durante el tiempo de parada t_{st} y, por tanto, sobrecargarse mecánica y térmicamente durante el periodo de carga t_B . Para determinar el aumento máximo, las siguientes variables desempeñan un papel importante:

P_n	Potencia nominal del motor en kW
P_{mech}	Valor nominal del límite mecánico del motor en kW
P_{th}	Valor nominal del límite térmico del motor en kW
M_n	Par nominal en Nm
M_K	Par máximo en Nm
T	Constante térmica de tiempo en minutos (Tabla 2.18.1)
k_0	Proporción de pérdidas equivalentes con carga/sin carga (Tabla 2.18.2)
t_r	Ciclo de servicio relativo en %
h	Proporción de disipación de calor con ventilación/sin ventilación (Tabla 2.19.1)
z_0	Frecuencia de inversión por hora sin carga (Tabla 2.19.2)

Lo cierto es que estos cálculos no son sencillos. Por este motivo, muchos fabricantes de motores de inducción trifásicos también ofrecen programas informáticos para los cálculos relativos a motores. Con su ayuda es posible encontrar el motor adecuado de forma rápida y fiable.

2.3.2 Valor nominal del límite mecánico

Cuando se aumenta la potencia en los tipos de servicio S2, S3 y S6, debe tenerse en cuenta el valor nominal del límite mecánico P_{mech} . Las normas indican que debe ser posible sobrecargar motores de inducción multifásicos durante 15 segundos, con independencia de su tipo de servicio y diseño, con el voltaje y la frecuencia nominal de entrada, hasta 1,6 veces el par nominal. Los datos de los catálogos, sin embargo, están sujetos a tolerancias de hasta un -10%, de forma que el par máximo M_K debe ser superior por un factor de $\leq 1,76$ con respecto al nuevo par aumentado M_{max} . En consecuencia, el valor nominal del límite mecánico puede definirse del siguiente modo en lo referente a datos de catálogo:

$$\text{Valor nominal del límite mecánico } P_{\text{mech}} \leq \frac{M_K}{M_n} \cdot \frac{P_n}{1,76}$$

P_n = potencia nominal en W

M_n = par nominal en Nm

M_k = par máximo en Nm

2.3.3 Reducción de potencia comparado con S1

En los tipos de servicio S4, S5, S7, S8 y S9, la potencia del motor debe reducirse, ya que en todos estos casos las pérdidas en el arranque o el frenado desempeñan un papel principal.

El método de cálculo se basa en la máxima frecuencia de conmutación sin carga z_0 , como se indica en la **Tabla 2.19.2**. Esta frecuencia indica el máximo número de inversiones permitido por hora sin que el motor se caliente en exceso. La máxima frecuencia de conmutación permitida en unas condiciones de carga determinadas puede calcularse ahora utilizando factores de reducción como el factor de inercia, el factor de par antagonista y el factor de carga.

El factor de inercia FI tiene en cuenta los momentos de inercia externos como el momento de inercia del motor J_{Mot} y el momento de inercia de la carga J_{zus} :

$$\text{Factor de inercia } FI = \frac{J_{\text{Mot}} + J_{\text{zus}}}{J_{\text{Mot}}}$$

J_{Mot} = momento de inercia del motor en kgm^2

J_{zus} = momento de inercia de la carga en kgm^2

Si las velocidades de la máquina accionada y del motor no son iguales, todos los momentos de inercia deben convertirse a la velocidad del motor n_{Mot} :

$$\text{Momento de inercia de la carga convertido } J_{\text{zus}} = \frac{J_1 \cdot n_1^2 + J_2 \cdot n_2^2 + \dots}{n_{\text{Mot}}^2}$$

J = momento de inercia en kgm^2

n = velocidad/min

El *factor de par antagonista* k_g tiene en cuenta un par de carga medio M_L que está presente durante la aceleración y que debe ser superado por el par motor medio M_{Mot} :

$$\text{Factor de par antagonista } k_g = 1 - \frac{M_L}{M_{\text{Mot}}}$$

M_L = par de carga

M_{Mot} = par motor

Cuando se utilizan engranajes con un rendimiento de engranaje η_G y las velocidades son por ello diferentes, los pares de carga de la máquina accionada deben convertirse a la velocidad del motor n :

$$\text{Pares de carga convertidos } M_L = \frac{M_{L1} \cdot n_1}{\eta_{G1} \cdot n_n} + \frac{M_{L2} \cdot n_2}{\eta_{G2} \cdot n_n} + \dots$$

M = par en Nm

n = velocidad/min

η = rendimiento de engranaje

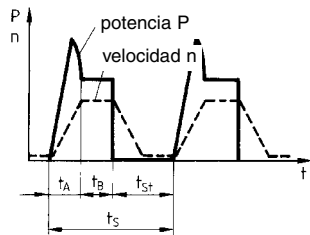


Figura 2.17.1 Tipo de servicio S4 para el servicio periódico de un centro de maquinado automático

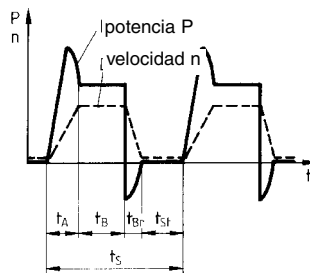


Figura 2.17.2 Tipo de servicio S5 para el servicio periódico de una sierra circular

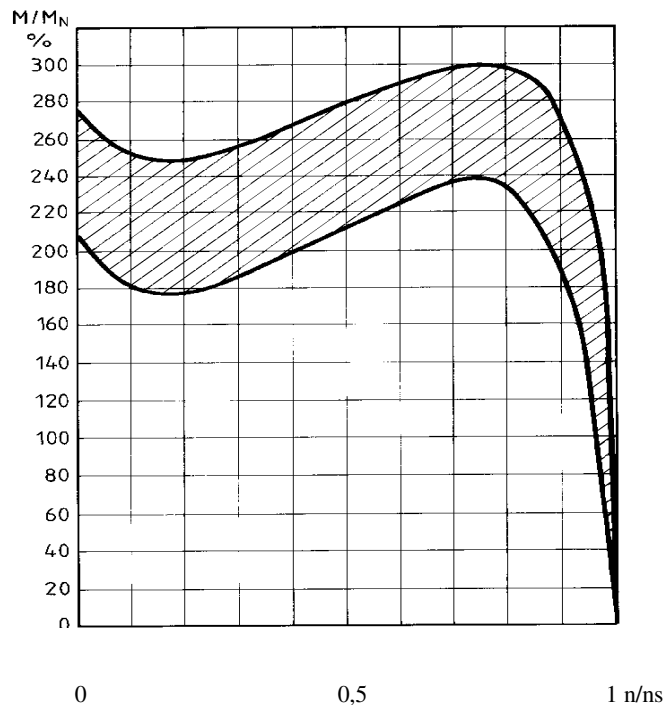


Figura 2.17.3 Régimen de variación típica de la característica de par en motores de inducción trifásicos

El *factor de carga* k_L con el que se tiene en cuenta la carga durante el funcionamiento. En los casos en los que la característica de carga no se conoce con exactitud, se aplica lo siguiente:

$$\text{Factor de carga } k_L = 1 - (P / P_n)^2 \cdot \frac{(1 - k_0)t_r}{(1 - k_0)t_r + (1 - t_r)h}$$

k_L = Factor de carga
 P = Potencia requerida en kW
 P_n = Potencia nominal del motor
 k_0 = Proporción de pérdidas sin carga/con carga equivalentes (**Tabla 2.18.2**)
 h = Proporción de disipación de calor con ventilación/sin ventilación (**Tabla 2.19.1**)
 t_r = Ciclo de servicio relativo (ver tipos de servicio S1 - S9)

Potencia nominal P_n - kW	2 polos min	4 polos min	6 polos min	8 polos min
0,09 ... 1,1	7 ... 10	11 ... 10	12	—
1,5 ... 3,0	5 ... 8	9 ... 12	12	12 ... 16
4,0	14	11	13	12
5,5 ... 18,5	11 ... 15	10 ... 19	13 ... 20	10 ... 14
22 ... 45	25 ... 35	30 ... 40	40 ... 50	45 ... 55
55 ... 90	40	45 ... 50	50 ... 55	55 ... 65
110 ... 132	45 ... 50	55	60	75

Tabla 2.18.1 Constante de tiempo de calentamiento típica T en minutos para motores de inducción

Potencia de régimen P_n - kW	2 polos	4 polos	6 polos	8 polos
0,09...1,5	0,35	0,45	0,5	0,5
2,2...18,5	0,25	0,25	0,3	0,3
22				
30...55	0,25	0,3	0,3	0,3
75...160	0,35	0,35	0,3	0,3

Tabla 2.18.2 Proporción típica K_0 entre pérdidas equivalentes sin carga y en funcionamiento

Las pérdidas equivalentes son la suma de los porcentajes de pérdidas individuales que contribuyen al calentamiento del bobinado, como pérdidas de carga, núcleo y rotor.

Potencia nominal P_n - kW	2 polos	4 polos	6 polos	8 polos
0,09...18,5	0,4	0,45	0,5	0,5
22...500	0,2	0,3	0,3	0,3

Tabla 2.19.1 Proporción típica h de disipación de calor entre motores sin ventilación y motores con ventilación

Tamaño	2 polos	4 polos	6 polos	8 polos
56	2 300	5 000	8 000	-
63	3 000	8 600	8 000	-
71	4 000	6900	6 000	7 000
80	1 700	5 000	5 500	8 000
90S	2 000	3 000	7 900	11 000
90L	2 000	2 500	6 200	11 000
100L	1 000	4 000	5 100	10 000
112M	720	1700	3 200	2 500
132S	450	850	2 200	2 800
132M	-	1000	1 700	3 000
160M	400	900	1 700	2 300
160L	400	900	1 600	2 300
180M	200	600	-	-
180L	-	550	800	1 200
200L	150	400	620	900
225S	-	280	-	700
225M	90	270	450	670
250M	60	200	320	500
280S	41	130	260	400
280M	39	120	240	370
315S	34	100	180	300
315M	32	90	170	269

Tabla 2.19.2 Frecuencia típica de conmutación sin carga z_0 por hora

3 Pares de carga característicos

Los motores están correctamente dimensionados si funcionan habitualmente con el par nominal M_n y la velocidad nominal n_n . De este modo generan la potencia de salida nominal P_n y consumen la intensidad nominal I_n . La característica de par de la mayoría de las máquinas accionadas puede asignarse a curvas características, lo cual facilita enormemente el diseño de motores.

Las *cargas* o *máquinas accionadas* son dispositivos mecánicos que se utilizan para manipular o dar forma a materiales, como *máquinas herramienta*, *prensas*, *calandrias*, *centrifugadoras*, etc., pero también *sistemas transportadores* como *grúas*, *cintas transportadoras* y *mecanismos de avance transversal*. Asimismo, las *bombas* y los *ventiladores* pueden incluirse en un mismo grupo. En maquinarias de gran tamaño y complejidad, como *laminadoras* o *máquinas de hacer papel*, el sistema se divide en partes y cada motor se examina por separado. La estructura detallada de la máquina accionada no suele considerarse para el diseño del motor. Normalmente, se puede describir con la suficiente precisión mediante la *característica de par* $M_L = f(n)$ o $M_L = f(t)$, la *velocidad en función del tiempo* $n = f(t)$, la *máxima aceleración/deceleración permitida* y el momento de inercia total en relación al eje del motor.

Las características suelen variar mucho entre el funcionamiento sin carga y a plena carga. El momento de inercia también puede variar, dependiendo de si hay más o menos material procesado en la máquina.

Para el dimensionado de motores y la verificación de los ciclos de arranque y frenado, es de gran importancia conocer el comportamiento del par de carga M_L en función de la velocidad.

Cualquier máquina accionada aplica al motor un par determinado que, normalmente, depende de la velocidad. También se conoce como *par estacionario* y viene determinado básicamente por el proceso tecnológico. En general, actúa contra la dirección del movimiento, excepto en el movimiento descendente de mecanismos de elevación, donde actúa en la dirección del movimiento. Además, hay *pares de aceleración* y *deceleración* cuando varía la velocidad, que están determinados por el momento de inercia. Con frecuencia, la característica de par de carga en un motor es típica y, por tanto, puede describirse con ciertos atributos. Esto se denomina *clasificación de máquinas accionadas*.

Con el fin de obtener una idea general de los muchos y variados diseños de máquinas accionadas, éstos se categorizan en función de sus características de carga típicas o sus curvas de potencia de salida, como se indica en la **Figura 3.2.1** y la **Figura 3.4.1**. Aquí hay que tener en cuenta que, por ejemplo, los ventiladores y los compresores muestran características distintas, dependiendo de si funcionan a plena carga o sin carga. Es mejor arrancarlas sin carga.

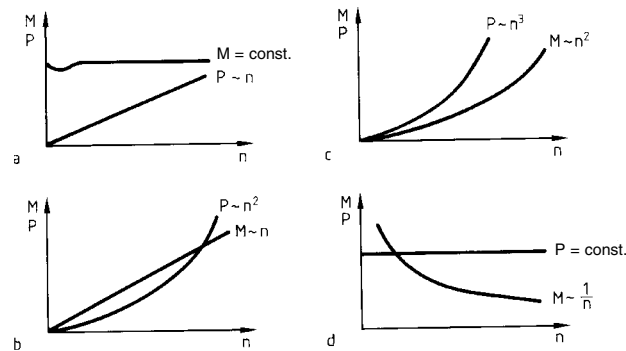


Figura 3.2.1 Característica de par o de potencia de salida para cargas típicas en función de la velocidad

- | | | |
|---|--|---------------------------------------|
| a | $M \approx \text{const.}$ | $\Rightarrow P$ proporcional a n |
| b | $M \approx \text{proporcional a } n,$ | $\Rightarrow P$ proporcional a n^2 |
| c | $M \approx \text{proporcional a } n^2$ | $\Rightarrow P$ proporcional a n^3 |
| d | $M \approx \text{proporcional a } 1/n$ | $\Rightarrow P \approx \text{const.}$ |

En muchos casos, es importante el par de carga medio M_{Lm} . Para una característica de par conocida, puede determinarse de acuerdo con el par M_n tras la aceleración completa.

3.1 Pares de carga en función de la velocidad

Los principios físicos de la ingeniería de motores muestran que la potencia mecánica P de un motor es en función del par M y la velocidad n o la velocidad angular ω .

3.1.1 Par constante

Básicamente, el par de una máquina accionada es resultado del rozamiento mecánico que permanece constante en una amplia gama de velocidades, como se indica en la **Figura 3.2.1 a**. Durante el arranque, suele ser necesario superar un rozamiento estático mayor.

$$P = M \cdot 2 \pi \cdot n = M \cdot \omega$$

Con un par constante M, la potencia P es una función proporcional de la velocidad n.

$$P \sim n$$

Éstos son algunos ejemplos de cargas mecánicas con par constante:

- mecanismos de elevación, ascensores, montacargas
- máquinas herramienta con una fuerza de corte constante
- cintas transportadoras, motores de alimentación
- rectificadoras sin ventilación
- bombas y compresores de pistón con presión constante
- laminadoras
- en parte también cizallas y perforadoras
- cepilladoras
- rodamientos, engranajes

En estas aplicaciones, el par de carga medio M_{Lm} corresponde aproximadamente al par nominal M_N de la carga. Por tanto, en estas aplicaciones, la potencia P puede reducirse proporcionalmente disminuyendo la velocidad n. Al reducir la velocidad a la mitad, también se reduce la potencia a la mitad.

3.1.2 Aumento del par en proporción a la velocidad

Esta relación surge, como se muestra en la **Figura 3.2.1**, por ejemplo, en el rozamiento proporcional a la velocidad (rozamiento viscoso) durante el laminado y procesamiento de papel, tejidos o baldosas de goma.

Cuando el par M aumenta proporcionalmente, la potencia P aumenta con el cuadrado de la velocidad:

$$P \sim n^2$$

Éstos son algunos ejemplos:

- calandrias, extrusores
- satinado de papel y tejidos
- frenos electromagnéticos

En estas aplicaciones, el par de carga medio M_{Lm} es aproximadamente igual a la mitad del par nominal $M_N / 2$. Cuando la velocidad n se reduce, la potencia P disminuye por su cuadrado. Cuando se reduce la velocidad n a la mitad, la potencia P se reduce a una cuarta parte.

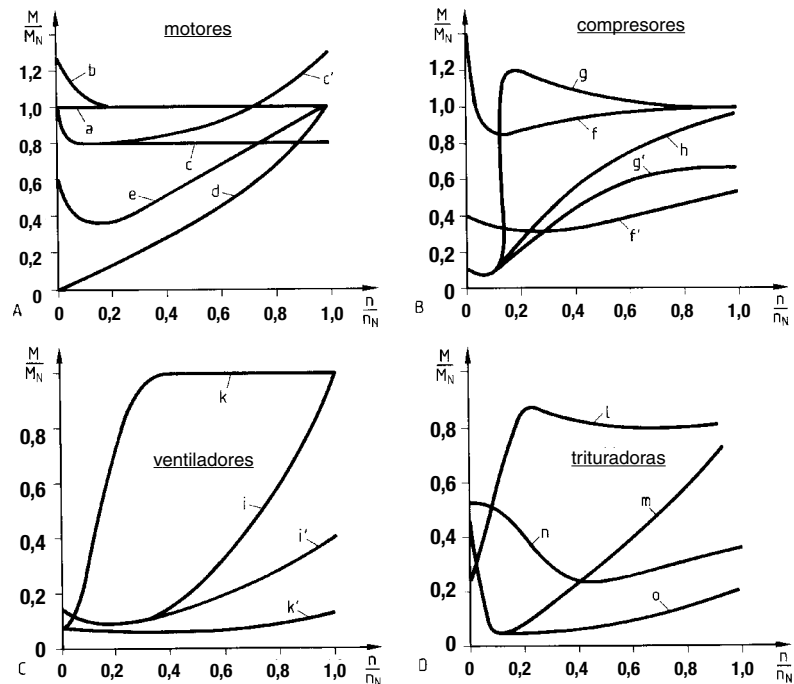


Figura 3.4.1 Característica de par de carga típica en máquinas accionadas con arranque

A Aplicaciones diversas

- a elevadores, ascensores, motores de alimentación
- b máquinas herramienta para manipulación de metal
- c vehículos de velocidad lenta, c' vehículos de velocidad rápida
- d extrusores
- e calandrias

B Compresores

- f compresores de pistón de contrapresión, f' sin carga
- g compresores giratorios de contrapresión, g' sin carga
- h turbocompresores

C Ventiladores

- i ventiladores de contrapresión o bombas centrífugas, i' ventiladores sin carga
- k soplantes giratorios de pistón, k' sin carga

D Trituradoras

- l molinos de bolas
- m trituradoras centrífugas
- n trituradoras de martillo
- o trituradoras de impacto

3.1.3 Aumento del par con el cuadrado de la velocidad

Esta relación surge, como se muestra en la **Figura 3.2.1**, principalmente cuando hay rozamiento gaseoso o líquido.

Cuando el par M aumenta de forma cuadrática, la potencia P aumenta con el cubo de la velocidad n .

$$P \sim n^3$$

Éstos son algunos ejemplos:

- soplantes y ventiladores de todos los tipos
- hélices
- motores de pistón con impulsión en un circuito abierto de tubos
- bombas centrífugas
- aparatos mezcladores, centrifugadoras
- vehículos

El par de carga medio M_{Lm} es aproximadamente un tercio del par nominal $M_n/3$. Dado que el par M aumenta de forma cuadrática al incrementarse la velocidad n , la potencia P es en función del cubo de la velocidad. Con la mitad de velocidad, sólo es necesario un octavo de la potencia.

Esta relación es importante, por ejemplo, en motores de bombas y ventiladores para calefacción y ventilación. En lugar de reducir la cantidad de impulsión con una válvula corredera o de estrangulamiento, es mejor ajustar la velocidad del motor de accionamiento.

3.1.4 Reducción del par en proporción inversa a la velocidad

Si el par M disminuye en proporción inversa a la velocidad n , la potencia P permanece constante.

$$P \approx \text{const.}$$

Al aumentar la velocidad, como se muestra en la **Figura 3.2.1**, el par disminuye. Éstos son algunos ejemplos:

- tornos al aire
- máquinas de pelar giratorias
- devanadoras
- bobinadoras

El par de carga medio M_L sólo puede determinarse en un gráfico.

3.2 Pares de carga en función del ángulo

Estas características aparecen en maquinaria con *movimiento alternativo*, por ejemplo, en motores de mesa. También están presentes en la maquinaria de pistones (compresores en bombas de calor) debido a la carga intermitente. La corriente eléctrica de entrada del motor de accionamiento sigue este ciclo de movimiento y puede generar una caída de tensión que fluctúe rítmicamente en la línea. En general, al planear estas aplicaciones, se traza lo que se conoce como *diagrama de fuerzas de par*.

3.3 Pares de carga en función de la trayectoria

Son típicos, por ejemplo, en vehículos, motores de mesa, cables de transporte aéreos y cintas transportadoras.

3.4 Pares de carga en función del tiempo

Estos motores se cargan de forma intermitente o periódica. Éstos son algunos ejemplos:

- perforadoras
- montacargas
- sistemas transportadores
- quebrantadoras de rocas
- molinos de bolas

3.5 Par mínimo

Otro concepto importante es el *par mínimo o estático*, causado por el rozamiento estático. Para que un motor pueda arrancar de forma fiable, debe conocerse este valor con la mayor precisión posible y el par de arranque M_A del motor debe ser mayor que el par de carga. En máquinas grandes con rodamientos deslizantes, puede ser significativamente mayor que el par nominal M_n .

La **Figura 3.4.1** muestra algunas características de par de máquinas accionadas comunes. La comparación con la **Figura 3.2.1** indica que la mayoría de ellas tienen una característica típica y, por tanto, es posible su clasificación.

Ejemplo: La velocidad de un motor de inducción operado con un controlador de carga puede ajustarse en cualquier punto entre el 50% y el 100%. ¿Cómo afecta esto al régimen de impulsión de una bomba de pistón o centrífuga?

- *Bomba de pistón*: la demanda de par es prácticamente independiente de la velocidad, como se muestra en la **Figura 3.2.1 a**, y el par se mantiene casi constante. La potencia de impulsión es, por tanto, proporcional a la velocidad. A la mitad de velocidad, se reduce también a $P' = P \cdot 0,50 = 50\%$.

- *Bomba centrífuga:* en las bombas centrífugas, como se muestra en la **Figura 3.2.1 c**, hay una relación cuadrática entre la demanda de par y la velocidad. Por tanto, la potencia cambia cúbicamente. Así, a la mitad de velocidad la potencia es $P' = P \cdot 0,5^3 = 0,125 = 12,5\%$. En consecuencia, el régimen de impulsión puede reducirse a un octavo del valor original.

El ejemplo muestra cómo el control automático de la velocidad tiene una gran influencia sobre la potencia de la máquina accionada.

4 Selección y dimensionamiento del motor eléctrico

Los motores eléctricos son conversores de energía para *procesos cinemáticos*, como los que tienen lugar en la tecnología de la mayoría de las máquinas accionadas. He aquí algunos ejemplos:

- *Aplicaciones de motor:*
 - máquinas herramienta
 - grúas, elevadores, vehículos
 - bombas, ventiladores, compresores
 - prensas, máquinas de curvado, laminadores, calandrias, etc.
- *Procesos actuadores:*
 - correderas y válvulas
 - dispositivos de alimentación, aplicaciones robóticas
 - procesos cinemáticos en enlaces de control

Todos los procesos cinemáticos implican las variables *fuerza - par - potencia - energía y tiempo*. Los sólidos, líquidos o gases cambian de posición en función del tiempo. Pero otros conceptos como la *velocidad, aceleración, rendimiento*, etc. también desempeñan un papel. Los motores eléctricos toman su energía de fuentes de alimentación de utilidad y la convierten en energía mecánica. Es posible encontrar dispositivos auxiliares, como embragues, transmisiones, engranajes, frenos y máquinas accionadas, entre el motor y la carga en sí; es decir, el sólido, líquido o gas en movimiento. Para elegir un motor y dimensionarlo adecuadamente, es preciso determinar con relativa precisión los parámetros pertinentes de cada elemento de la cadena del flujo energético, empezando por la carga en sí. Por ello, es importante realizar una selección correcta. A fin de escoger el motor adecuado, es necesario encontrar el ideal para la tarea cinemática en cuestión. Incluso más importante que el tipo de motor, con sus accesorios como engranajes, frenos, embragues, etc., es el dimensionamiento correcto del motor.

Un motor subdimensionado no dará buenos resultados con un servicio continuo. Un motor sobredimensionado origina gastos innecesarios, su funcionamiento es poco económico (mayor coste de adquisición, inferior rendimiento en su funcionamiento, mayores pérdidas y necesidad de más potencia reactiva) y puede cargar la máquina con un par acelerador excesivamente elevado.

En cualquier caso, es preciso definir las condiciones básicas de aplicación y, con ellas, los siguientes factores importantes:

- *Transmisión de potencia*: como accionamiento único, el motor puede acoplarse directamente a la carga o mediante una transmisión, o bien puede utilizarse como motor central conectado a ejes intermedios, transmisiones por correa y por cadena, etc.
- *Condiciones de funcionamiento*: las condiciones de funcionamiento, como la capacidad de sobrecarga, frecuencia de arranque, modo de funcionamiento, pares máximos, temperatura ambiente, etc., no sólo afectan a las dimensiones requeridas para el motor, sino también a la selección de los accesorios del mismo.
- *Condiciones de espacio*: estas condiciones y las posibilidades de disposición del sistema completo influyen sobre todo en la selección de los accesorios del motor.

4.1 Capacidad del motor

El *motor de inducción trifásico* se utiliza con más frecuencia en las tecnologías de accionamiento debido a su sencilla estructura mecánica y eléctrica y a su alta fiabilidad. Su aplicación sólo está limitada por sus características de par y velocidad.

El paso de la corriente por el *bobinado del estator* y el *rotor* genera calor. Este calor no puede exceder las temperaturas especificadas para los materiales de aislamiento *clase IP*. Las temperaturas que se generan dependen del nivel de carga del motor, su variación con el tiempo y las condiciones de enfriamiento. Los motores deben tener unas dimensiones tales que, con una carga constante y unas condiciones de potencia y refrigeración nominales, no excedan las temperatura máximas.

- El *par necesario para acelerar* la masa centrífuga aumenta el tiempo de aceleración del motor. La *intensidad de arranque* que fluye en este momento calienta el bobinado de forma dramática.
- La máxima *frecuencia de conmutación*, es decir, el número de arranques consecutivos, es limitada. Cuando los procesos de arranque son frecuentes, el motor alcanza el límite de temperatura permitido, incluso sin el par de carga y sin una masa centrífuga adicional.
- El *ciclo de servicio* es otro factor importante en la selección del motor. El tiempo de enfriamiento en los intervalos de conmutación debe ser suficiente para que el límite de temperatura no se exceda con el siguiente arranque. Si el ciclo de servicio es corto, el motor puede aceptar una carga mayor, dado que no puede calentarse hasta el límite de temperatura durante ese corto periodo de tiempo y se enfría de nuevo durante los intervalos.
- Los motores subdimensionados pueden sobrecargarse térmicamente debido a un tiempo de arranque demasiado largo, mientras que los motores sobredimensionados sobrecargarían la transmisión y la máquina accionada durante el proceso de arranque.

4.1.1 Datos de catálogo y parámetros de aplicación

La mayoría de los requisitos de aplicación recurren al denominado "motor estándar", que suele ser un motor de inducción. La siguiente información hace referencia a este tipo de motor, siempre que no se indique lo contrario. Los motores de inducción pueden emplearse en una amplia gama de aplicaciones. A fin de seleccionar un motor apropiado que se ajuste a las especificaciones del fabricante, es necesario establecer una serie de requisitos mínimos relacionados con:

- *el suministro eléctrico*
- *las características eléctricas y mecánicas del motor*
- *las condiciones de funcionamiento*
- *los costes de inversión, funcionamiento y mantenimiento*
- *la vida útil*
- *las medidas de protección medioambientales y contra accidentes*

Una vez establecidos estos requisitos, es posible elegir un motor y unos dispositivos auxiliares apropiados.

Factor de selección		Característica del motor
<i>Par</i>	⇒	<i>Potencia</i>
<i>Momento de inercia</i>	⇒	<i>Tiempo de arranque</i>
<i>Pares de carga típicos</i>	⇒	<i>Par motor</i>
<i>Análisis del diseño según</i>	⇒	<i>Optimización</i>
- el par de carga		- par motor
- el par acelerador		- tiempo de arranque
- el tiempo de aceleración		- capacidad de aceleración
- la frecuencia de inversión		- calentamiento del motor
<i>Modos de funcionamiento</i>	⇒	<i>Calentamiento del motor</i>
<i>Condiciones de arranque</i>	⇒	<i>Característica del par</i>
<i>Frenado e inversión</i>	⇒	<i>Calor de frenado</i>
<i>Procesos térmicos</i>	⇒	<i>Capacidad</i>

Tabla 4.3.1 Factores de selección del tipo de motor y la potencia nominal

4.1.2 Determinación del valor nominal unitario

El valor nominal unitario de un motor puede determinarse según varios aspectos, ya que cada requisito de aplicación es diferente. En la información general de la **Tabla 4.3.1** se indican los principales factores de selección:

4.1.3 Datos de catálogo

El grado con el que un motor individual cumple los requisitos puede determinarse comparando el motor con los datos de catálogo del fabricante. En la **Tabla 4.5.1** se indican los parámetros más importantes que deben tenerse presentes, dependiendo de la aplicación. Algunos de estos parámetros se han estandarizado y otros son específicos del fabricante o pueden ser seleccionados por el cliente, normalmente eligiendo entre varias opciones. Por consiguiente, el ingeniero del diseño suele tener cierta libertad de selección a la hora de definir los detalles de un motor. Muchos fabricantes ofrecen diseños modulares de motor.

Normalmente, las especificaciones siguientes pueden definirse al comprar el motor.

- *diseño del rotor* y, por consiguiente, la característica del par
- *sistema de refrigeración*
- tipo de *aislamiento* de los bobinados
- *estilo*
- *tipo de instalación*
- *grado de protección* y dispositivos protectores, además de otros datos

4.1.4 Condiciones de funcionamiento

En lo que al diseño se refiere, las condiciones de funcionamiento y los parámetros de la carga accionada son tan importantes como los datos del motor.

La **Tabla 4.6.1** muestra los principales datos que deben tenerse en cuenta respecto al diseño. En los casos críticos, el motor accionador puede seleccionarse para una tarea específica con la ayuda del proveedor del motor.

4.1.5 Procedimiento para seleccionar motores

La mayoría de los motores funcionan con un servicio continuo S1. El primer punto que debe considerarse es la potencia de salida obtenida con el servicio continuo. Dado que la vida útil de las máquinas eléctricas depende en gran medida de la temperatura de funcionamiento continua, la selección debe efectuarse con cuidado. El segundo punto que debe tenerse en cuenta es si el motor es apropiado para las condiciones de arranque en lo que a tiempo o par de arranque se refiere. En el caso de los motores con modos de funcionamiento complejos (S2 ... S9), las consideraciones son básicamente las mismas, aunque suele ser necesario consultar con los proveedores debido a las condiciones variables de la carga y a las temperaturas fluctuantes del bobinado.

Datos a definir		Observaciones
Requisitos eléctricos		
Tipo de corriente		Tensión de funcionamiento, para los motores multitensión indicar todos valores y tolerancias posibles
Corriente trifásica, corriente monofásica	V	
Frecuencia	Hz	
Datos de catálogo		
Designación de tipo		Especificaciones del fabricante
Valor nominal		Para motores con varias velocidades, valor por velocidad
Velocidad		Para motores con varios polos, velocidad por potencia de salida
Intensidad nominal	A	Especificaciones del fabricante
Intensidad nominal/arranque mínima		Especificaciones del fabricante
Par	Nm	Para aplicaciones especiales
Par nominal/mínimo		Especificaciones del fabricante
Par nominal/desincronización		Especificaciones del fabricante
Par nominal/arranque máximo		Especificaciones del fabricante
Momento de inercia	kgm ²	Especificaciones del fabricante
Rendimiento η	%	Especificaciones del fabricante
Tiempo de bloqueo máx.	s	Especificaciones del fabricante
Tiempo de arranque máx.	s	Especificaciones del fabricante
Tolerancias		Establecidas por normas
Tipo de diseño		
Conmutación		Para arranque estrella-triángulo, especificar siempre triángulo
Triángulo, estrella		
Tipo de rotor		
Rotor de jaula, rotor bobinado		
Modelo	IM..	IEC 34-7, Pieza 7
Tipo de protección	IP..	IEC 34-7, Pieza 7
Tipo de enfriamiento		
Enfriamiento interno natural		
Enfriamiento automático exterior		
Enfriamiento de circuito cerrado independiente		
Tipo de aislamiento		
B, F, H		Indicar límite temp., si es necesario
Amplitud de vibración		Normal o reducida
Nivel de ruido	db	
Normas especiales		Normas eléctricas y mecánicas
Caja de bornas		Indicar tipo de protección y diseño, si es necesario
Extremos axiales		Indicar tipo de protección y diseño, si es necesario
Componentes exteriores e interiores		Indicar interruptor o enchufe, si es necesario
Frenos, tacogenerador		
Calentador de espacios, ventilación independiente		
Herramientas medidoras de temperatura		Para rodamientos o bobinados del estator
- Protección del termistor		
- Interruptor bimetálico		Contactos de conexión o corte
- Resistores PTC		

Tabla 4.5.1 Datos de catálogo para motores

Datos para definirse		Observaciones
Par antagonista - constante - aumento cuadrático - curva especial	Nm	Convertir para eje de motor, si es necesario Hablar con fabricante, si es necesario
Momento de inercia de la carga	kgm ²	Convertir para máx. velocidad del motor
Tipo de arranque - estrella-triángulo - arranque a plena carga - arranque sin carga - otros métodos		Arranque de estrella-triángulo intensificado, si es necesario Arrancador suave o controlador de carga, si es necesario
Frenado eléctrico		Frenado de contramarcha o dinámico
Modo de funcionamiento		
S1		Funcionamiento continuo
S2	min	Servicio temporal
S3	%	Tipo de servicio periódico intermitente sin arranque
S4	%, c/h	Servicio periódico intermitente con arranque
S5	%, c/h	Servicio periódico intermitente con arranque y frenado eléctrico
S6	%	Tipo de servicio de funcionamiento continuo
S7	c/h	Servicio de funcionamiento continuo con arranque y frenado eléctrico
S8	%, c/h	Servicio periódico de funcionamiento continuo con cambios de carga/velocidad relacionados
S9		Servicio con variaciones de carga y velocidad no periódicas
Temperatura ambiente	°C	
Altura		metros sobre el nivel del mar
Sentido de rotación		a la dcha., a la izda. o ambos
Ajuste de velocidad		método y desde...a...
Influencias climáticas		Considerar también humedad relativa
Carga de rodamiento y axial		
Fuerza axial	N	Dirección de fuerza respecto a posición de eje
Fuerza radial	N	Indicar distancia respecto al saliente del eje
Fuerzas rotativas	N	

Tabla 4.6.1 Datos importantes para el diseño del motor

4.2 Dimensionamiento con el par de carga

El par de carga M_L se origina a partir del par antagonista de la máquina accionada y el rendimiento η con el que se registran todas las pérdidas mecánicas.

Según las características de carga durante la aceleración, el par de carga puede:

- aumentar gradualmente (por ejemplo, un ventilador)
- alcanzar el valor nominal en el arranque (por ejemplo, elevadores)
- estar presente sólo después de la aceleración (por ejemplo, máquinas para manipulación de madera)
- estar presente de forma constante o intermitente

Para un par de carga constante $M_L = \text{const.}$ y una velocidad nominal n , el cálculo se realiza con la siguiente relación:

En un elevador, la potencia elevadora P con una velocidad v y una fuerza F

$\text{Potencia } P = \frac{M \cdot n}{9.55 \cdot \eta}$	P = potencia en W M = par en Nm n = velocidad/min η = rendimiento
--	--

determinadas, y teniendo en cuenta el rendimiento η , calculamos:

$\text{Potencia } P = \frac{F \cdot v}{\eta}$	P = potencia elevadora en W F = fuerza elevadora en N v = velocidad elevadora en m/s η = eficacia
---	--

En cualquier momento durante la aceleración, el par de carga M_L debe ser inferior al par motor respectivo M_M . Si éste no es el caso, no se produce ninguna aceleración hacia velocidades más altas.

4.3 Cálculo con el par acelerador o el tiempo de aceleración

4.3.1 Par acelerador

Una carga sólo puede acelerarse cuando el motor accionador proporciona un par mayor que el requerido por la carga en el momento. La diferencia se denomina *par acelerador* M_B . El par acelerador y el momento de volante del motor, transmisión y sistema que debe acelerarse dan como resultado el tiempo de aceleración t_A . En muchos casos se llega a la simple suposición de que el par de carga es constante durante la aceleración. Esta suposición se consigue calculando un par de carga medio y sustituyendo el par motor variable por un par acelerador medio constante determinado a partir de la característica.

El par acelerador M_B correspondiente a un tiempo de inicio t_A determinado se calcula como sigue:

Par acelerador

$$M_B = M_m - M_L = J' \cdot \alpha = J' \cdot \frac{\omega}{t_A} = \frac{J' \cdot 2\pi \cdot n}{60 \cdot t_A} = \frac{J' \cdot n}{9,55 \cdot t_A}$$

M_M = par motor en Nm
 t_A = tiempo de arranque en seg.
 n = velocidad del motor/min
 M_B = par acelerador medio en Nm
 J' = momento de inercia en kgm² reducido al eje del motor

M_L = par de carga en Nm
 α = aceleración angular/s²
 ω = velocidad angular/s

4.3.2 Tiempo de aceleración

El tiempo de aceleración t_A puede determinarse con la relación anterior, si se conoce el par acelerador medio M_B . En la **Figura 4.8.1** se muestra una forma relativamente sencilla de calcularlo. El par motor M_M y el par de carga M_L se trazan en papel gráfico para que después los pares medios puedan definirse gráficamente, por ejemplo, contando los cuadros. El diagrama final mostrará el par acelerador medio M_B .

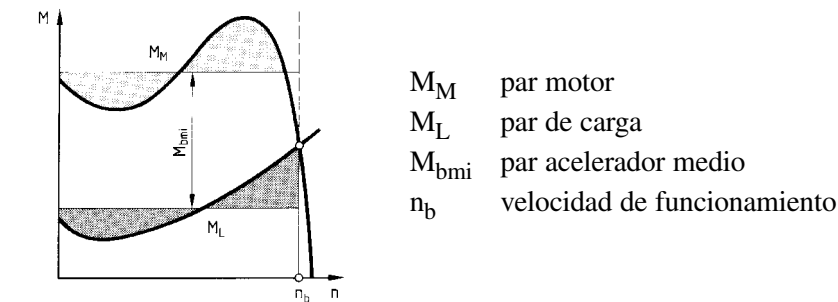


Figura 4.8.1 Cálculo del par acelerador medio equilibrando el área en papel gráfico

$$\text{Tiempo de aceleración en seg. } t_A = \frac{J' \cdot n}{9,55 \cdot M_B}$$

M_B = par acelerador medio en Nm

J' = momento de inercia en kgm^2 reducido al eje del motor

n = velocidad del motor/min

Ejemplo: Suponga que un motor bipolar con $n = 2980$ rpm, $P = 110$ kW, $J = 1,3$ kgm^2 y sin carga tiene un par acelerador medio de $M_B = 1,5 \cdot M_n$. ¿Cuánto dura

a) el tiempo de arranque sin carga?

b) el tiempo de arranque con una carga $J_L = 1000$ kgm^2 y una velocidad $n_L = 300$ rpm si se necesita de forma continua el par nominal durante la aceleración?

Solución: a) Tiempo de arranque sin carga

$$\text{Par nominal del motor } M_n = \frac{P \cdot 60}{2\pi \cdot n} = \frac{110\,000 \text{ W} \cdot 60}{2\pi \cdot 2\,980/\text{min}} = 352,5 \text{ Nm}$$

$$\text{Par acelerador } M_B = 1,5 \cdot M_n = 1,5 \cdot 352 \text{ Nm} = 528,7 \text{ Nm}$$

$$\text{Tiempo de aceleración } t_A = \frac{J \cdot n}{9,55 \cdot M_B} = \frac{1,3 \text{ kgm}^2 \cdot 2\,980 \text{ VPM}}{9,55 \cdot 528,7 \text{ Nm}} = \mathbf{0,76 \text{ seg.}}$$

b) Tiempo de aceleración con carga

El momento de inercia de la carga convertido a la velocidad del motor es:

$$J' = J_L \cdot (n_L/n)^2 = 1000 \text{ kgm}^2 \cdot (300 \text{ rpm}/2980 \text{ rpm})^2 = 10,1 \text{ kgm}^2$$

El momento de aceleración efectivo junto con la carga puede calcularse a partir de la diferencia entre el par acelerador medio del motor y el par nominal continuamente solicitado de la carga:

$$M_B = 1,5M_n - M_n = 0,5 \cdot M_n$$

$$\text{Tiempo de aceleración } t_A = \frac{(J' + J_{\text{Mot}}) \cdot n}{9,55 \cdot M_B} = \frac{(10,1 + 1,3) \text{ kgm}^2 \cdot 2\,980 \text{ rpm}}{9,55 \cdot 0,5 \cdot 352,5 \text{ Nm}} = \mathbf{20 \text{ seg.}}$$

Al elegir un motor, sin olvidar la frecuencia de permutación, el tiempo de aceleración t_A debe ser inferior al tiempo máximo especificado por el fabricante. Los motores sin carga y motores que sólo tienen masas centrífugas adicionales pequeñas, como los embragues, etc., alcanzan su velocidad en vacío con mucha rapidez. Esto suele ser también el caso del arranque con carga. Los tiempos de arranque son muy largos sólo cuando es necesario acelerar masas centrífugas grandes. Esto se denomina *arranque duro*, que es el caso, por ejemplo, de las centrifugadoras, molinos de bolas, calandrias, sistemas de transporte y ventiladores grandes. A menudo estas aplicaciones requieren motores especiales y los mecanismos de conmutación correspondientes. La **Figura 4.10.1** muestra los valores de referencia del tiempo de arranque de los motores estándar en función de la potencia de nominal.

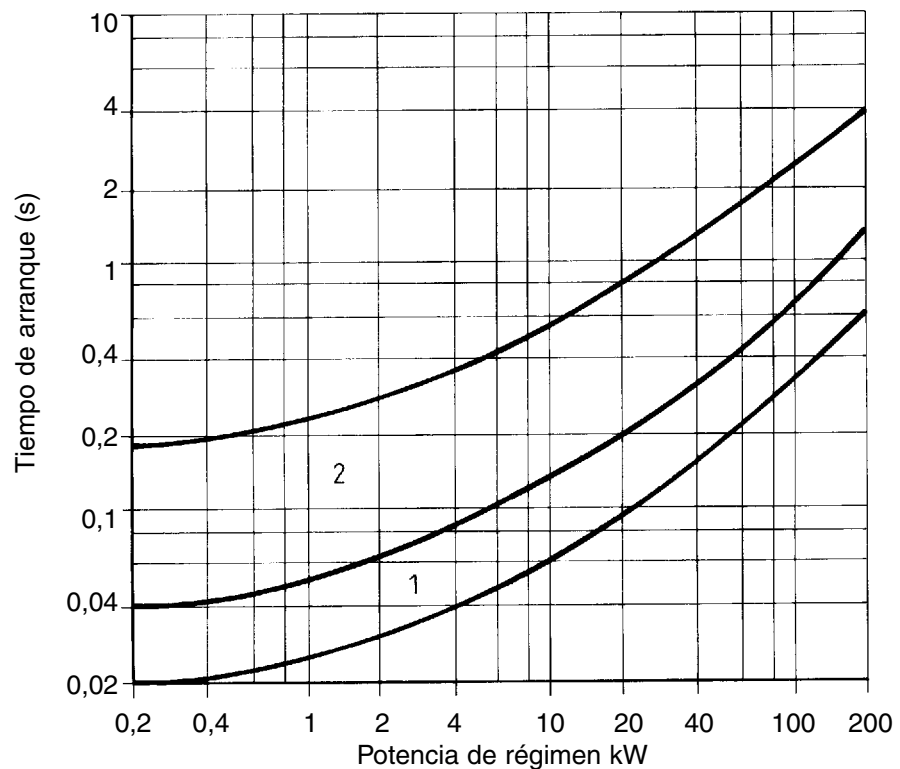


Figura 4.10.1 Valores de referencia típicos del tiempo de arranque de los motores estándar en función de la potencia nominal

1 arranque sin carga (motor + embrague)

2 arranque con carga (sin masas centrífugas grandes)

Si la curva del par de carga M_L es compleja y el par motor M_M no es constante, conviene hacer el cálculo por zonas individuales, como en la **Figura 4.11.1**.

Luego los tiempos de aceleración de las zonas individuales y los pares aceleradores medios originados en el segmento se calculan y se suman para los segmentos de velocidad individuales (por ejemplo, un aumento de velocidad del 20% por segmento).

Tiempo de aceleración para pares no constantes

$$t_A = \frac{\sum J' \cdot \Delta n}{9,55 \cdot M_B}$$

t_A = tiempo de arranque en seg.
 J' = momento de inercia en kgm^2 reducido al eje del motor
 Δn = diferencia de velocidad en rpm
 M_B = par acelerador en Nm

4.4 Cálculo con la frecuencia de conmutación

El arranque frecuente de los motores se denomina *modo de conmutación* y es necesario comprobar la *máxima frecuencia de conmutación por hora*. Los datos del fabricante suelen mostrar la conmutación sin carga permitida por hora, es decir, el número de conmutaciones con el que el motor alcanza su temperatura máxima sin carga y sin un momento de volante adicional durante el funcionamiento en vacío. La frecuencia de conmutación desempeña un papel importante en el modo de funcionamiento S4.

La frecuencia de conmutación permitida para un motor viene determinada por su límite de temperatura. Se calcula a partir del valor medio cuadrado de corriente de la característica de ciclo. Este valor medio no puede exceder la corriente nominal de la máquina.

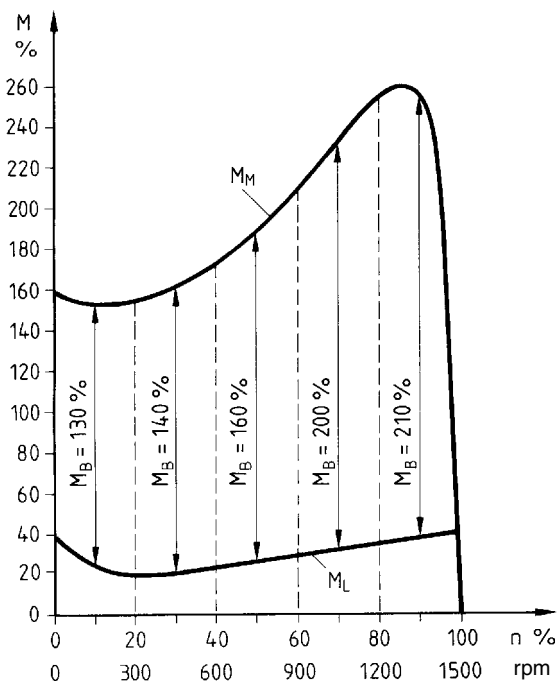


Figura 4.11.1 Par acelerador para calcular el tiempo de aceleración cuando el par motor M_M y el par de carga M_L no son constantes y muestran un comportamiento muy distinto

Las conmutaciones excesivas que hacen que se activen los dispositivos protectores o que incluso llegan a destruir el motor suelen tener lugar durante la fase de puesta en servicio, los ajustes y las interrupciones repetitivas.

Una *masa de inercia adicional* produce con frecuencia una condición de carga. En este caso, el número de conmutaciones z_z permitidas por hora puede calcularse sobre la base del principio de la energía del modo de conmutación:

Conmutaciones permitidas con masa adicional

$$z_z = \frac{z_0 \cdot J_M}{J_M + J_z}$$

z_z = conmutaciones permitidas por hora con masa adicional
 z_0 = conmutaciones permitidas por hora sin carga
 J_M = momento de inercia de la masa del motor en kgm^2
 J_z = momento de inercia reducido de la masa adicional en kgm^2

Con un servicio conmutado y un momento de carga existente M_L , el número de conmutaciones z_L permitidas por hora se calcula como sigue:

Conmutaciones permitidas con par de carga

$$z_L = \frac{z_0 \cdot (M_M - M_L)}{M_M}$$

z_L = conmutaciones permitidas por hora con par de carga

z_0 = conmutaciones permitidas por hora sin carga

M_M = par motor medio durante la aceleración en Nm

M_L = par de carga medio durante la aceleración en Nm

En la práctica, normalmente hay un volante de carga J_z y un par de carga adicional M_L , de manera que el número de conmutaciones z_{zul} permitidas por hora se calcula así:

$$z_{zul} = z_z \cdot \frac{z_L}{z_0} = z_0 \cdot \frac{J_M \cdot (M_M - M_L)}{(J_z + J_M) \cdot M_M} \text{ y convertido:}$$

Conmutaciones permitidas con carga adicional y momento de volante

$$z_L = z_0 \cdot \frac{1 - M_{Lmi} / M_{Mmi}}{1 + J_z / J_M}$$

z_L = conmutaciones permitidas por hora con momento de volante y par de carga

z_0 = conmutaciones permitidas sin carga

M_{Mmi} = par motor medio durante la aceleración en Nm

M_{Lmi} = par de carga medio durante la aceleración en Nm

J_z = momento de inercia reducido de la masa adicional en kgm²

J_M = momento de inercia de la masa del motor in kgm²

Potencia nominal P_n - kW	2 polos	4 polos	6 polos	8 polos
0,09...1,5	1500...4000	2500...8500	5500...8000	7000...11000
2,2...18,5	400...1000	800...4000	1500...5000	2000...10000
22	200	600	800	1200
30...55	50...150	200...400	300...600	500...900
75...160	30...40	90...130	170...260	270...400

Tabla 4.13.1 Típica frecuencia de conmutación z_0 por hora sin carga

4.5 Selección a partir de los datos de catálogo

Utilizando los valores medios de la potencia P_{mi} , par M_{mi} y corriente I_{mi} calculados para condiciones menos exigentes, es posible elegir un motor a partir de datos de catálogo, los cuales no pueden ser inferiores a las medias calculadas:

$$P_{mi} \leq P_n, \quad M_{mi} \leq M_n, \quad I_{mi} \leq I_n$$

La mayoría de las aplicaciones de motor pueden asignarse a los 9 tipos de servicio S1 - S9. En situaciones más complejas, donde no es posible una selección clara, puede definirse un tipo de servicio similar y luego convertirse a S1. Sin embargo, este método requiere unos conocimientos detallados sobre las constantes térmicas de tiempo y las condiciones de enfriamiento. El fabricante del motor puede proporcionarle estos datos.

5 Símbolos de las ecuaciones

Símbolo	Significado	Unidad	Observación
f	frecuencia	s^{-1}	frecuencia de línea
FI	factor de inercia		
h	proporción de emisión de calor sin ventilación/con ventilación		
I	intensidad	A	corriente de línea de alimentación
I_{mi}	intensidad media (I_{eff})	A	valor eficaz
I_n	intensidad nominal	A	máx. corriente continua
J'	momento de inercia reducido al eje del motor	kgm^2	
J_{ext}	momento de inercia de la carga respecto al eje del motor	kgm^2	
J_M	momento de inercia del motor	kgm^2	
J_{mot}	momento motor	kgm^2	
J_Z	momento de inercia reducido de la masa adicional	kgm^2	
J_{zus}	momento de inercia adicional	kgm^2	
k_0	proporción de pérdidas equivalentes con carga/sin carga		
k_g	factor de par antagonista	Nm	
k_L	factor de carga	Nm	
M	par	Nm	
M_A	par mínimo	Nm	
M_B	par acelerador	Nm	
M_K	par máx.	Nm	
M_L	par de carga	Nm	
M_{Lmi}	par de carga medio durante la aceleración	Nm	
M_M	par motor	Nm	
M_{Mmi}	par motor medio durante la aceleración	Nm	
M_{mi}	par medio	Nm	
M_n	par nominal	Nm	
M_S	par de desincronización	Nm	

Símbolo	Significado	Unidad	Observación
n	velocidad	rpm	
n	velocidad de funcionamiento	rpm	
n_0	velocidad sin carga	rpm	
n_n	velocidad nominal	rpm	
n_s	velocidad sincrónica	rpm	
p	número de pares de polos (número de polos/2)		
P	potencia	kW	
P_2	potencia de salida	kW	
P_1	potencia de entrada	kW	
P_{Cu}	pérdida de carga	kW	
P_{CuR}	pérdida óhmica del rotor	kW	función cuadrada de la corriente
P_{CuS}	pérdida óhmica del estator	kW	función cuadrada de la corriente
P_{Fe}	pérdida en el núcleo del estator	kW	más o menos constante durante el funcionamiento
P_{La}	pérdida por rozamiento de rodamientos	kW	más o menos constante durante el funcionamiento
P_{Lu}	pérdida por resistencia aerodinámica	kW	más o menos constante durante el funcionamiento
P_{mech}	valor nominal del límite mecánico del motor	kW	
P_{mi}	potencia media	kW	
P_n	potencia nominal	kW	
P_{th}	valor nominal del límite térmico	kW	
P_v	pérdidas	kW	
P_{VR}	pérdidas en el rotor	kW	
P_{zus}	pérdida por dispersión	kW	más o menos constante durante el funcionamiento
s	deslizamiento	kW	
S1	servicio continuo		
S2	servicio temporal		
S3	servicio periódico intermitente		...sin arranque
S4	servicio periódico intermitente		...con arranque
S5	servicio periódico intermitente		...con arranque y frenado eléctrico

Símbolo	Significado	Unidad	Observación
S6	servicio de funcionamiento continuo		... con carga periódica intermitente
S7	servicio de funcionamiento continuo		... con arranque y frenado eléctrico
S8	servicio periódico de funcionamiento continuo		... con cambios de carga/velocidad relacionados
S9	servicio		con variaciones de carga y velocidad no periódicas
t	tiempo	s, min, h	
T	constante térmica de tiempo	min	
t _A	tiempo de arranque	s, min	
t _B	tiempo de carga, tiempo de funcionamiento	s, min	
t _B	tiempo de funcionamiento	s, min	
t _{Br}	tiempo de frenado	s, min	
t _L	tiempo sin carga	s, min, h	
t _r	ciclo de servicio relativo	%	
t _S	duración del ciclo	s, min, h	
t _{St}	tiempo de parada	s, min, h	
U	tensión	V	
z ₀ sin carga	frecuencia de conmutación	h ⁻¹ (por hora)	
z _A	frecuencia de arranque sin carga	h ⁻¹	
z _L	conmutaciones permitidas por hora con par de carga y posible masa adicional	h ⁻¹	
z _z	conmutaciones permitidas por hora con masa adicional	h ⁻¹	
z _{zul}	frecuencia de conmutación permitida	h ⁻¹	
η	rendimiento	%	
ϑ		temperatura °C	
ϑ _{max}	temperatura máxima	°C	
Δn	diferencial de velocidad	rpm	
cosφ	factor de potencia		

Tabla de símbolos y unidades

Le ofrecemos más de 500.000 maneras de mejorar sus sistemas de automatización

Dispositivos eléctricos

Contactores y arrancadores de motor
Protección de motores
Centros de control de motores
Control de energía eléctrica
Conmutadores de carga y mando
Relés

Sensores

Conmutadores de fin de carrera, fotoeléctricos y de proximidad
Sensores de presión y temperatura
Sistemas de identificación (HF)
Sistemas de lectura de códigos de barras
Codificadores
Sistemas de procesamiento de imágenes

Controladores

Dispositivos de control y unidades de señalización
Pantallas de texto y LCD
Consolas de control
Ordenadores industriales
Software de visualización

Accionadores industriales

Arrancadores suaves
Convertidores de frecuencia
Accionadores de CA y CC
Controles axiales y servoaccionadores
Controles CNC

Automatización

Controles programables
E/S digital y analógica
Módulos periféricos inteligentes

Comunicaciones

Redes y sistemas de bus de campo
Redes de comunicaciones abiertas (MAP)

Soluciones de sistema

Desarrollos adaptados
Control de procesos/lotes
Sistemas de control de quemadores
Controles de moldeo a presión y prensas
SCADA

Control de calidad

Adquisición y análisis de datos estadísticos

Servicios

Soporte a nivel mundial
Formación de clientes
Servicios de reparación y cambio de piezas
Soporte técnico



Rockwell Automation ayuda a sus clientes a lograr mejores ganancias de sus inversiones integrando marcas líder de la automatización industrial y creando así una amplia gama de productos de integración fácil. Estos productos disponen del soporte de proveedores de soluciones de sistema además de los recursos de tecnología avanzada de Rockwell.



Con oficinas en las principales ciudades del mundo.

Alemania • Arabia Saudita • Argentina • Australia • Bahrein • Bélgica • Bolivia • Brasil • Bulgaria • Canadá • Chile • Chipre • Colombia • Corea • Costa Rica • Croacia
Dinamarca • Ecuador • Egipto • El Salvador • Emiratos • Arabes Unidos • Eslovaquia • Eslovenia • España • Estados Unidos • Finlandia • Francia • Ghana • Grecia
Guatemala • Holanda • Honduras • Hong Kong • Hungría • India • Indonesia • Irlanda • Islandia • Israel • Italia • Jamaica • Japón • Jordania • Katár • Kuwait • Las Filipinas
Libano • Macao • Malasia • Malta • México • Marruecos • Nigeria • Noruega • Nueva Zelanda • Omán • Pakistán • Panamá • Perú • Polonia • Portugal • Puerto Rico • Reino Unido • República Checa • República de Sudáfrica • República Dominicana • República Popular China • Rumania • Rusia • Singapur • Suecia • Suiza • Taiwan • Tailandia
Trinidad • Tunisia • Turquia • Uruguay • Venezuela

Sede central: 1201 South Second Street, Milwaukee, WI 53204, USA, Tel.: +1 414 382 2000, Fax: +1 414 382 4444
Sede central europea: Avenue Herrmann Debruxlaan 46, 1160 Bruselas, Bélgica, Tel.: +32 2 663 0600, Fax: +32 2 663 0640
Sede central de Asia-Pacífico: 27/F Citicorp Centre, 18 Whitfield Road, Causeway Bay, Hong Kong, Tel.: +852 2887 4788, Fax: +852 2510 9436

Oficina Central: C/ Doctor Trueta, 113 - 119, 08005 Barcelona, Tel.: +34 3 331 3004 / 331 7154, Fax: +34 3 331 7962 / 432 2913
Madrid: C/Belmonte del Tajo, 31, 28019 Madrid, Tel.: +34 1 565 1616, Fax: +34 1 565 1687
Bilbao: Villa de Plencia, 30, Urbanización Antiguo Golf, 48930 Las Arenas-Getxo (Vizcaya) Tel.: +34 4 480 1681, Fax: +34 4 480 0916
Sevilla: Avda. San Francisco Javier, 9, Edif. Sevilla 2, 41018 Sevilla, Tel.: +34 5 466 3551, Fax: +34 5 465 6258
Valencia: Fontanares, 51, 46018 Valencia, Tel.: +34 6 377 0612, Fax: +34 6 377 0761
Valladolid: Miguel Iscar, 16 pº 4, 47001 Valladolid, Tel.: +34 8 321 0529, Fax: +34 8 321 0001