



**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**  
*DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA*



# **POTENCIAS, CALENTAMIENTO, RENDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS**

**Miguel Ángel Rodríguez Pozueta**

## ABREVIATURAS UTILIZADAS EN EL TEXTO:

c.a.	Corriente alterna
c.c.	Corriente continua
f.d.p.	Factor de potencia ( $\cos \varphi$ )
f.c.e.m.	Fuerza contraelectromotriz
f.e.m.	Fuerza electromotriz

© 2011, Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Universidad de Cantabria (España)

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

*This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/> or send a letter to Creative Commons, 444 Castro Street, Suite 900, Mountain View, California, 94041, USA.*



*Está permitida la reproducción total o parcial de este documento bajo la licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Unported que incluye, entre otras, la condición inexcusable de citar su autoría (Miguel Angel Rodríguez Pozueta - Universidad de Cantabria) y su carácter gratuito.*

*Este documento puede descargarse gratuitamente desde esta Web: <http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>*

# ÍNDICE

**ÍNDICE**

**POTENCIAS, CALENTAMIENTO, RENDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS**

Introducción .....	1
Potencias en una máquina eléctrica. Pérdidas .....	1
Origen de las pérdidas .....	2
Pérdidas en el cobre $P_{Cu}$ .....	3
Pérdidas magnéticas o pérdidas en el hierro $P_{Fe}$ .....	4
Pérdidas mecánicas $P_m$ .....	4
Sistemas de refrigeración. Calentamiento y enfriamiento .....	5
Clase térmica de los sistemas de aislamiento .....	7
Carga. Funcionamiento en vacío y en reposo. Servicio .....	9
Potencias nominal y asignada .....	10
Servicios tipo .....	13
Servicio continuo. Servicio tipo S1 .....	13
Servicio temporal o de corta duración. Servicio tipo S2 .....	14
Servicio intermitente periódico. Servicio tipo S3 .....	15
Servicio intermitente periódico con frenado eléctrico. Servicio tipo S5 .....	16
Servicio ininterrumpido periódico. Servicio tipo S6 .....	17
Servicio con cargas y velocidades constantes diferentes. Servicio tipo S10 .....	18
Marcha industrial. Índice de carga .....	19
Marcha industrial .....	19
Índice de carga .....	21
Clasificación de las pérdidas .....	21
Rendimiento .....	23
Definición de rendimiento .....	23
Rendimiento en generadores de c.a. y transformadores. Rendimiento máximo .....	24

## ÍNDICE

Códigos IP e IK .....	26
Código IP .....	26
Código IK .....	28
Otros aspectos tecnológicos .....	29
Sistema de refrigeración .....	29
Formas constructivas .....	29
Tamaño de la carcasa .....	30
Designación de bornes .....	30
Ruido y vibraciones .....	30
Clases de rendimiento .....	30
Compatibilidad electromagnética .....	30
Placa de características .....	31
Bibliografía .....	31

## POTENCIAS, CALENTAMIENTO, RENDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Miguel Ángel Rodríguez Pozueta

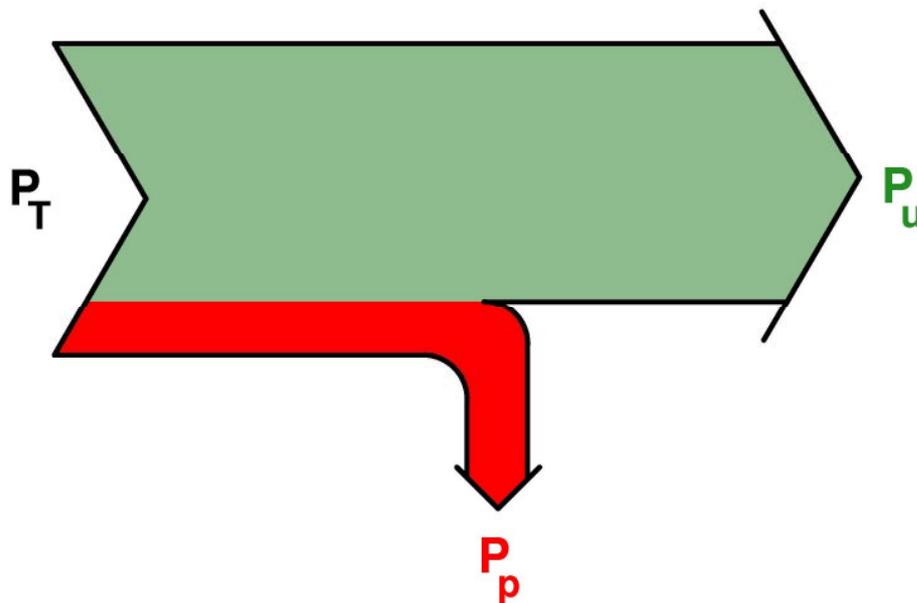
### INTRODUCCIÓN

Este texto comienza con el análisis la máxima potencia que puede suministrar una máquina eléctrica en unas condiciones dadas; la cual, en la mayor parte de las máquinas, depende sobre todo de la temperatura que llega a alcanzar la máquina y de la temperatura que sus materiales, especialmente los aislantes, son capaces de soportar. Esta potencia límite no es una magnitud fija para una máquina sino que depende de sus condiciones de funcionamiento y ambientales, las cuáles habrá que analizar y especificar a la hora de elegir la máquina que se necesita para una aplicación dada. Para ello se pueden utilizar unas formas de funcionamiento o *servicios* normalizados.

Seguidamente el texto analiza el rendimiento de una máquina eléctrica y las magnitudes que lo afectan.

Finalmente se tratan una serie de aspectos tecnológicos que hoy en día están normalizados y que también habrá que especificar para caracterizar completamente una máquina eléctrica. Entre otros, estos aspectos son: tamaño, forma, grado de protección y disposición de la carcasa, sistema de enfriamiento, etc.

### POTENCIAS EN UNA MÁQUINA ELÉCTRICA. PÉRDIDAS



*Fig. 1: Flujo de potencia en una máquina eléctrica*  
( $P_T$ : Potencia total absorbida;  $P_u$ : Potencia útil suministrada;  $P_p$ : Pérdidas)

Una máquina eléctrica realiza una conversión de energía (Fig. 1). Así, un *motor* es una máquina que transforma la potencia eléctrica que absorbe de la red a la que está conectado su devanado inducido y la transforma en potencia mecánica de rotación que suministra por

su eje (Tabla I). En un *generador* la conversión es a la inversa, absorbe potencia mecánica por su eje (para lo cual ejerce un par de frenado) y suministra energía eléctrica a través de su inducido (Tabla I). En un *transformador* las potencias absorbida y suministrada son eléctricas, pero tienen diferentes tensiones (Tabla I).

Se denomina **potencia total** a la absorbida por la máquina y **potencia útil** a la suministrada. Cuando alguna de estas potencias sea de tipo eléctrico en corriente alterna se tratará de una potencia activa (véase la Tabla I).

*Tabla I: Potencias total y útil en los diferentes tipos de máquinas eléctricas*

	<b>Potencia útil <math>P_u</math></b>	<b>Potencia total <math>P_T</math></b>
<b>Motores</b>	Potencia mecánica motriz en el eje (ejerce un par motor)	Potencia eléctrica (activa en c.a.) absorbida de la red eléctrica (produce una f.c.e.m.)
<b>Generadores</b>	Potencia eléctrica (activa en c.a.) suministrada a la red eléctrica (genera una f.e.m.)	Potencia mecánica absorbida por el eje (origina un par de frenado)
<b>Transformadores</b>	Potencia activa suministrada por el secundario	Potencia activa absorbida de una red eléctrica por el primario

La transformación de energía no es perfecta, por lo que la potencia útil siempre es inferior a la potencia total absorbida por la máquina. Esto significa que una fracción de la potencia absorbida no se aprovecha y constituye la potencia perdida o simplemente las **pérdidas  $P_p$**  de la máquina eléctrica (Fig. 1). Por lo tanto, se verifica que:

$$P_T = P_u + P_p \quad (1)$$

Las pérdidas se transforman en calor lo que provoca un calentamiento de la máquina y una elevación de su temperatura, la cual se limita empleando diferentes sistemas de refrigeración.

## ORIGEN DE LAS PÉRDIDAS

Según la causa que las origina, las pérdidas que se producen en una máquina eléctrica se pueden clasificar en: pérdidas en el cobre, pérdidas en el hierro y pérdidas mecánicas (Fig. 9).

Además, existen las llamadas pérdidas adicionales que engloban una serie de pérdidas debidas a diferentes causas de difícil cuantificación y que en un estudio básico, como el que corresponde a este texto, se desprecian.

Las pérdidas adicionales se producen en el cobre y en el hierro, pero por causas diferentes a las pérdidas normales, que son las que se van a explicar en los siguientes apartados. Principalmente las pérdidas adicionales se deben al reparto no uniforme de la corriente en la sección de un conductor, a la existencia de campos magnéticos armónicos y a las pulsaciones de inducción magnética producidas por el ranurado.

### Pérdidas en el cobre $P_{Cu}$

Estas pérdidas son debidas al efecto Joule que se produce cuando circula corriente por un conductor con resistencia eléctrica (pérdidas del tipo  $R i^2$ ). Se usa esta denominación aunque el conductor no sea de cobre.

Estas pérdidas se pueden calcular así:

$$P_{Cu} = \sum_j R_j \cdot i_j^2 \quad (2)$$

En la relación (2)  $R_j$  e  $i_j$  son, respectivamente, la resistencia y la corriente del devanado  $j$ . Si el devanado  $j$  está construido con un conductor de sección  $s_j$ , longitud  $l_j$  y resistividad  $\rho_j$ , su resistencia vale

$$R_j = \rho_j \frac{l_j}{s_j} \quad (3)$$

La densidad de corriente  $J_j$  en el conductor  $j$  es el cociente entre la corriente y la sección del conductor:

$$J_j = \frac{i_j}{s_j} \quad (4)$$

Combinando las relaciones (2), (3) y (4) se obtiene finalmente la siguiente expresión:

$$P_{Cu} = \sum_j \left( \rho_j \frac{l_j}{s_j} \right) \cdot (J_j \cdot s_j)^2 = \sum_j (l_j \cdot s_j) \cdot \rho_j \cdot J_j^2$$

$$P_{Cu} = \sum_j V_{Cu j} \cdot \rho_j \cdot J_j^2 \quad (5)$$

En la expresión (5)  $V_{Cu j}$  representa el volumen del conductor  $j$ .

La expresión (5) señala que las pérdidas en el cobre dependen del volumen del bobinado, de la resistividad del material conductor y, sobre todo, de la densidad de corriente.

Para una máquina ya construida resulta que las pérdidas en el cobre sólo son proporcionales al cuadrado de la corriente<sup>1</sup> (según la relación (2)) o, lo que es equivalente, al cuadrado de la densidad de corriente (según la relación (5)).

Como dato orientativo se puede indicar que la densidad de corriente  $J$  en los devanados de las máquinas eléctricas puede alcanzar valores de hasta  $5 \text{ A/mm}^2$  para máquinas pequeñas y  $3 \text{ A/mm}^2$  para máquinas grandes, en las que la refrigeración suele ser más difícil.

<sup>1</sup> Si los conductores del devanado tienen suficiente sección como para que el efecto piel sea apreciable, la frecuencia de las corrientes afecta a la resistencia de los conductores e influye en las pérdidas del cobre.

### **Pérdidas magnéticas o pérdidas en el hierro $P_{Fe}$**

Las pérdidas en el hierro se producen en los núcleos ferromagnéticos de la máquina cuando son sometidos a la acción de campos magnéticos variables con el tiempo. Estas pérdidas son de tipo magnético y son debidas a la suma de las debidas a los fenómenos de la histéresis ( $P_H$ ) y de las corrientes de Foucault ( $P_F$ ).

Para reducir el valor de estas pérdidas, los núcleos magnéticos que están bajo la acción de un campo magnético variable se construyen de un acero especial al silicio que presenta alta permeabilidad magnética, baja conductividad eléctrica y cuyo ciclo de histéresis presenta un área pequeña. Además estos núcleos magnéticos no son macizos, sino que se construyen apilando chapas de pequeño espesor (de 0,3 a 0,5 mm) y aisladas entre sí.

Teniendo en cuenta las expresiones que permiten calcular  $P_H$  y  $P_F$  se deduce que:

$$P_{Fe} = P_H + P_F$$

$$P_{Fe} = V_{Fe} \left( k_H f B_M^\alpha + k_F f^2 B_M^2 a^2 \sigma \right) \quad (6)$$

En las expresiones anteriores,  $\alpha$ ,  $k_H$  y  $k_F$  son constantes del material ferromagnético,  $f$  es la frecuencia,  $B_M$  es el valor máximo de la inducción magnética,  $a$  es el espesor de la chapas con que se construye el circuito magnético,  $\sigma$  es la conductividad eléctrica (inversa de la resistividad) de dichas chapas y  $V_{Fe}$  es el volumen de material ferromagnético.

Es evidente que en una máquina ya construida, los valores de  $\alpha$ ,  $k_H$ ,  $k_F$ ,  $a$ ,  $\sigma$  y  $V_{Fe}$  ya están fijados y no van a cambiar. Luego, de la relación (6) se deduce que las pérdidas en el hierro  $P_{Fe}$  van a variar sólo con la inducción magnética  $B_M$  y con la frecuencia  $f$ . Luego, teniendo en cuenta que el exponente  $\alpha$  toma valores cercanos a 2, resulta finalmente que las pérdidas en el hierro de una máquina eléctrica dependen aproximadamente del cuadrado de la inducción  $B_M$  y de la frecuencia  $f$  elevada a un exponente comprendido entre 1 y 2.

### **Pérdidas mecánicas $P_m$**

Las pérdidas mecánicas se producen por el rozamiento del eje con los cojinetes donde se apoya, la fricción de las escobillas contra el colector -en las máquinas que poseen colector- y por el gasto de potencia del sistema de refrigeración (que normalmente consiste en un ventilador colocado en el eje o árbol de la máquina).

Las pérdidas de rozamiento y fricción dependen aproximadamente de forma lineal con la velocidad mientras que las pérdidas por ventilación varían aproximadamente con el cubo de la velocidad. Por lo tanto, las pérdidas mecánicas dependen de la velocidad de giro de la máquina de esta manera:

$$P_m = A n + B n^3 \quad (7)$$

Evidentemente estas pérdidas sólo existen en máquinas eléctricas con movimiento; es decir, no aparecen en los transformadores.

## SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN. CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO

El calor producido por las pérdidas de una máquina eléctrica en funcionamiento provoca una elevación de su temperatura. Al aumentar la temperatura de un cuerpo se incrementa la cantidad de calor evacuada al exterior a través de su superficie. Al final la temperatura aumenta hasta que en la máquina se alcanza un *equilibrio térmico* en el que se genera tanto calor debido a las pérdidas como el que se disipa a través de la superficie externa y, entonces, la temperatura se mantiene constante (en la práctica, según la norma UNE-EN 60034-1 [16] se considera que una máquina eléctrica ha alcanzado el equilibrio térmico cuando su temperatura no varía más 2 K (2 grados Kelvin) por hora).

En principio se podrá aumentar la potencia que suministra una máquina eléctrica -y, consecuentemente, las pérdidas que se producen en ella- mientras que la temperatura que se alcance no deteriore los materiales con los que está construida (normalmente los elementos más sensibles a la temperatura son los materiales aislantes). Por lo tanto, la potencia máxima que puede dar una máquina está limitada por la máxima temperatura admisible que puede soportar.

Si a una máquina dada se le mejora el sistema de evacuación de calor a través de su superficie externa, con el mismo aumento de temperatura podrá expulsar más calor y aumentará la potencia útil máxima que podrá proporcionar. Esto ha llevado a la búsqueda de sistemas de refrigeración cada vez más eficientes a medida que se ha ido aumentando la potencia de las máquinas eléctricas. En efecto, el simple aumento de la superficie externa para aumentar la transmisión de calor al exterior llevaría a la construcción de máquinas de dimensiones excesivamente grandes cuando se quiere aumentar su potencia; por lo que en máquinas de potencias altas se necesitan sistemas de refrigeración que consigan evacuar más cantidad de calor por unidad de superficie.

En los sistemas de refrigeración existen uno o varios fluidos refrigerantes que transportan fuera de la máquina el calor producido en su interior. El fluido *refrigerante primario* es aquel que está en contacto directo con la máquina. En algunos casos existe un fluido *refrigerante secundario* que enfría, a su vez, al refrigerante primario a través de un intercambiador de calor.

En máquinas pequeñas se coloca un ventilador en el propio eje de la máquina. Este ventilador mueve el aire ambiente que actúa como el único fluido refrigerante. Para facilitar esta eliminación de calor se suele dotar a las carcasas de las máquinas de unas aletas que aumentan la superficie de intercambio de calor con el medio ambiente.

Para potencias mayores se usan sistemas de refrigeración en ciclo cerrado en los que el refrigerante primario es refrigerado mediante intercambiadores de calor en los que usualmente el refrigerante secundario es agua. Ambos fluidos refrigerantes, primario y secundario, normalmente se mueven por *circulación forzada*; esto es, están accionados por ventiladores (para refrigerantes gaseosos) o bombas (para refrigerantes líquidos). Sin embargo, en algunas ocasiones el movimiento de un fluido refrigerante se produce simplemente por *convección natural*; es decir, debido a la diferente densidad que presenta el fluido frío (más denso) y caliente (menos denso). Esto hace que el fluido caliente ascienda y cuando se enfríe descienda, estableciéndose finalmente una circulación continua del mismo.

En grandes alternadores se usa como refrigerante primario no el aire sino el hidrógeno. Este refrigerante tiene una serie de ventajas:

1. Su movimiento requiere mucha menos energía dada su menor densidad (14 veces más pequeña que la del aire).
2. La transmisión de calor entre la máquina y el hidrógeno es notablemente mayor que la del aire.
3. Reduce el envejecimiento de los materiales aislantes pues no están sometidos a la acción oxidante del aire ni tampoco al polvo ni a la humedad.

Para prevenir riesgos de explosión debe evitarse el contacto del hidrógeno con el aire. La mezcla de aire e hidrógeno es inexploriva (y, por lo tanto, segura) cuando el contenido de hidrógeno supera el 70%.

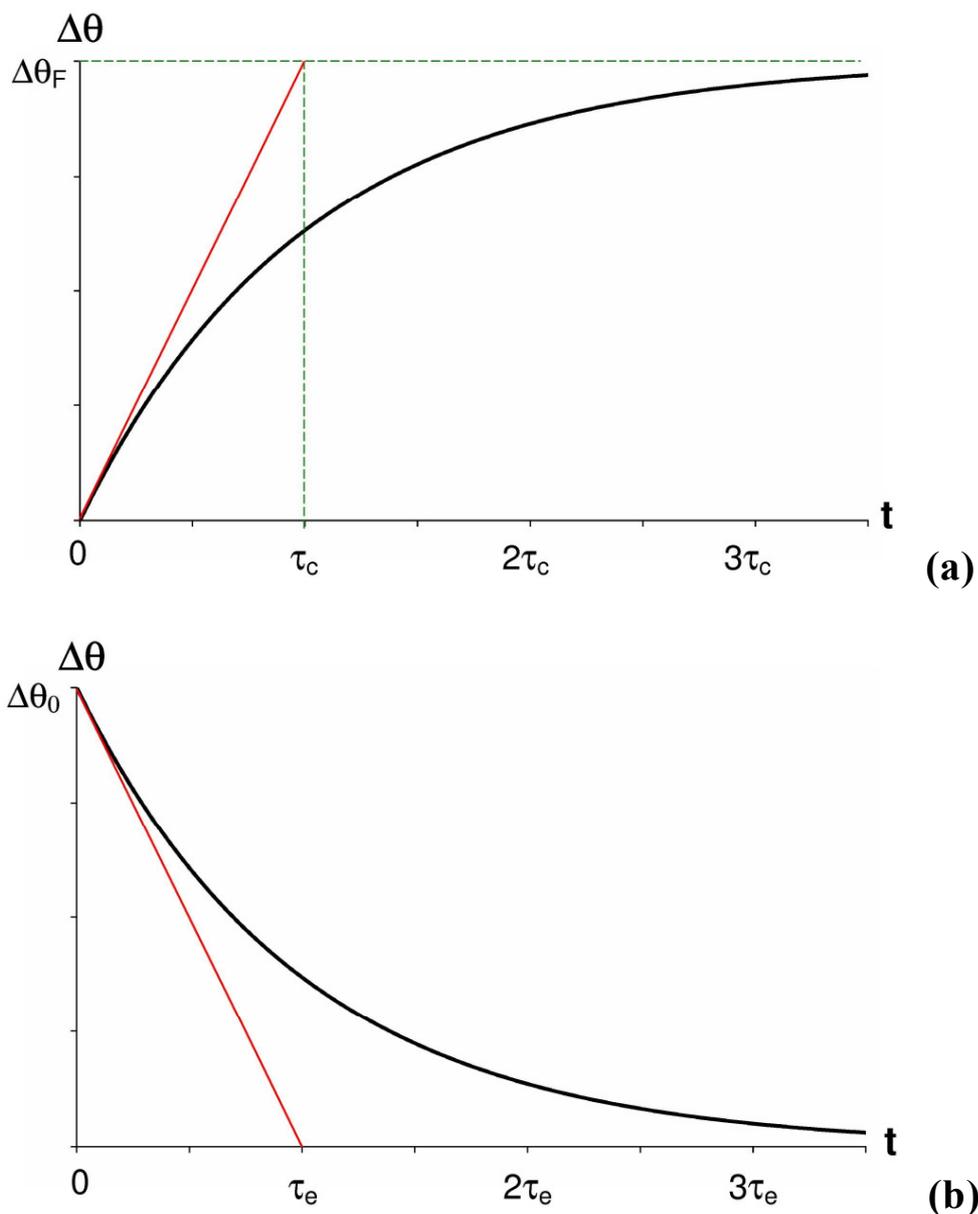


Fig. 2: Curvas de calentamiento (a) y de enfriamiento (b) de una máquina eléctrica

El último avance ha consistido en utilizar en las máquinas eléctricas conductores huecos por cuyo interior circula directamente un fluido refrigerante que evacua el calor originado por las pérdidas producidas en los conductores, las cuales son una parte importante de las pérdidas totales de la máquina. Con ello se evita la barrera térmica que suponen los materiales aislantes que rodean a un conductor y que dificulta la transmisión de calor a través de ella.

Evidentemente el proceso de calentamiento lleva un tiempo desde que comienza hasta que se alcanza el equilibrio térmico. Dado que en primera aproximación una máquina eléctrica desde un punto de vista térmico se la puede considerar como un cuerpo homogéneo, la evolución temporal de la temperatura hasta conseguir alcanzar el equilibrio térmico se puede aceptar que sigue una ley exponencial (Fig. 2a) con una constante de tiempo  $\tau_c$ .

Cuando se detiene una máquina que había estado funcionando con anterioridad y que había aumentado su temperatura con respecto a la de su fluido refrigerante (normalmente el aire ambiente), se produce un fenómeno de enfriamiento hasta alcanzar la temperatura del refrigerante. Mediante este enfriamiento se va evacuando al exterior el calor almacenado previamente por la máquina. Este proceso sigue en el tiempo también una ley exponencial (Fig. 2b) que puede tener una constante de tiempo  $\tau_e$  diferente a la del calentamiento, ya que cuando la máquina está en reposo no están funcionando sus sistemas de refrigeración.

En las curvas de la Fig. 2 en los ejes verticales no se indica la temperatura ( $\theta$ ) de la máquina sino su calentamiento ( $\Delta\theta$ ). Se denomina *calentamiento* a la diferencia entre la temperatura de la máquina y la del fluido de refrigeración, que usualmente es el aire ambiente. La norma UNE-EN 600034-1 [16] establece que en España, para altitudes por debajo de 1000 m sobre el nivel del mar, se debe considerar que la temperatura del aire ambiente es 40 °C. Por lo tanto, el calentamiento en máquinas refrigeradas por aire es igual a la diferencia de su temperatura menos 40 °C.

De lo anterior se deduce que el término “calentamiento” se va a utilizar con dos acepciones. Una es el proceso de calentamiento, por el que una máquina aumenta su temperatura, y la otra es la magnitud calentamiento  $\Delta\theta$  que se acaba de definir.

## CLASE TÉRMICA DE LOS SISTEMAS DE AISLAMIENTO

Según la norma UNE-EN 60085 [13] un *sistema de aislamiento eléctrico* es “una estructura aislante que contiene uno o más materiales aislantes eléctricos junto con partes conductoras asociadas y que se utiliza en un dispositivo electrotécnico”.

En casi todas las máquinas eléctricas la potencia que pueden suministrar está limitada por la temperatura que son capaces de soportar. Normalmente los materiales aislantes son los elementos más sensibles a la temperatura y, por consiguiente, son los que limitan la potencia que puede proporcionar una máquina dada.

A medida que pasa el tiempo un material aislante va envejeciendo y el sistema de aislamiento eléctrico va perdiendo sus cualidades dieléctricas, lo cual se ve agravado si resulta sometido a temperaturas elevadas. Es decir, los materiales aislantes y los sistemas

de aislamiento eléctrico tienen una *vida* que, de forma orientativa, se puede establecer en unos 40 años en las máquinas grandes, 30 años en las medianas y 20 años en las pequeñas.

Se han estudiado y analizado los materiales aislantes utilizados en las máquinas eléctricas para averiguar cuál es la máxima temperatura que pueden soportar sin peligro de acortar su vida. Esta temperatura máxima se denomina *endurancia térmica* (véanse las normas UNE-EN 60085 [13] y 60034-1 [16]).

La *clase térmica* de un *sistema de aislamiento* se designa mediante el valor numérico de su temperatura de utilización continua máxima recomendada medida en grados Celsius. Algunas de estas clases térmicas se designan también mediante una letra. Todas estas designaciones están recogidas en la tabla II.

La clase térmica de un sistema de aislamiento eléctrico puede no estar directamente relacionada con la *endurancia térmica* de uno de los materiales aislantes incluidos en él. Es la combinación de todos los elementos que constituyen el sistema de aislamiento lo que da lugar a su clase térmica.

En la tercera columna de la tabla II se indica la temperatura máxima a la que se puede someter un sistema de aislamiento según su clase térmica para que su vida no se vea reducida. En la cuarta columna de esta tabla se señala el *calentamiento* máximo a que se puede someter si el fluido refrigerante es el aire ambiente. Esta cuarta columna se obtiene restando 40 °C a los valores de la columna 3.

*Tabla II: Clase térmica de los sistemas de aislamiento eléctrico según las normas UNE-EN 60085 y 60034-1*

CLASE TÉRMICA (°C)	LETRA DE DESIGNACIÓN	TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	CALENTAMIENTO MÁXIMO (*) (°C)
90	Y	90	50
105	A	105	65
120	E	120	80
130	B	130	90
155	F	155	115
180	H	180	140
200	N	200	160
220	R	220	180
250	-	250	210

(\*) Esta columna indica el calentamiento máximo en el supuesto que el fluido refrigerante sea aire ambiente que se encuentre a 40 °C

Normalmente la temperatura de los bobinados se mide mediante procedimientos que proporcionan el valor medio de dicha magnitud, pudiendo haber *puntos calientes* de la máquina donde la temperatura tiene un valor superior al medio. Por lo tanto, la norma UNE-EN 60034-1 [16] establece que debe haber un margen de seguridad de 5 a 15 °C -o incluso mayor- según los casos, entre la temperatura que se mide por estos procedimientos y la temperatura máxima indicada en la tabla II. De esta forma se garantiza que en los puntos calientes no se superen las temperaturas máximas señaladas en dicha tabla.

Los materiales aislantes cuya endurancia térmica es más baja son aquellos con mayor proporción de componentes orgánicos. Por el contrario, los aislantes que aguantan temperaturas más elevadas están formados en mayor medida por sustancias inorgánicas.

A continuación se citan algunos ejemplos de los aislantes cuya endurancia térmica se corresponde con las clases térmicas de los sistemas de aislamiento recogidas en la tabla II:

- 90 °C: Algodón, seda, papel sin impregnación.
- 105 °C: Algodón, seda, papel impregnados o sumergidos en aceite.
- 120 °C: Fibras orgánicas sintéticas. Por ejemplo: esmaltes de acetato de polivinilo, barnices de resinas alquídicas,...
- 130 °C: Materiales a base de poliéster y poliimidos aglutinados mediante materiales orgánicos. Por ejemplo, los esmaltes de resinas de poliuretano.
- 155 °C: Materiales a base de fibra de mica, amianto y fibra de vidrio aglutinados mediante materiales orgánicos. Por ejemplo, la fibra de vidrio tratada con resinas de poliéster.
- 180 °C: Materiales a base de mica, amianto y fibra de vidrio aglutinados con siliconas de alta estabilidad térmica. Por ejemplo, el papel de mica aglomerado con siliconas.
- 200 °C: Materiales a base de mica, vidrio, cerámica,... capaces de soportar hasta 200 °C.
- 220 °C: Materiales a base de mica, vidrio, cerámica,... poliimidas tipo Kapton, capaces de soportar hasta 220 °C.
- 250 °C: Materiales a base de mica, vidrio, cerámica,... poliimidas tipo Kapton, capaces de soportar hasta 250 °C.

## CARGA. FUNCIONAMIENTO EN VACÍO Y EN REPOSO. SERVICIO

El término **carga** se utiliza en la ingeniería eléctrica con varios significados diferentes:

- Por un lado, las cargas eléctricas (positivas y negativas) crean campos eléctricos; los cuáles, a su vez, ejercen fuerzas sobre ellas.
- Por otro lado, se denomina carga a un elemento que demanda potencia, que puede ser mecánica (por ejemplo, una bomba, una grúa,...) o eléctrica (por ejemplo, un motor, una resistencia,...).
- Por último, la norma UNE-EN 600034-1 [16] define como carga al “*conjunto de los valores numéricos de las magnitudes eléctricas y mecánicas que caracterizan las exigencias impuestas a una máquina rotativa por un circuito eléctrico o un dispositivo mecánico en un instante dado*”. Con este significado se usa también el término **marcha**.

En este texto se va a emplear la palabra carga sobre todo de acuerdo con la última definición; es decir, carga va a ser el conjunto de valores de las magnitudes que definen un estado de funcionamiento de una máquina eléctrica. De todas estas magnitudes, la más significativa para definir una carga es la potencia suministrada. La potencia suministrada que se suele usar en la definición de una carga es la potencia útil para los motores y generadores de corriente continua y la potencia aparente suministrada para los transformadores y generadores de corriente alterna. En este último caso se prefiere usar la potencia aparente suministrada y no la potencia activa suministrada (que es la potencia útil) porque las pérdidas de la máquina dependen de la corriente pero no de su factor de potencia.

Se dice que una máquina está *en carga* cuando está funcionando y suministra una potencia no nula.

Según la norma UNE-EN 600034-1 [16], una máquina está funcionando *en vacío* cuando “*está girando y su potencia de salida es nula manteniendo las otras condiciones normales de funcionamiento*”. Así, un motor en vacío está girando alimentado a su tensión y frecuencia asignadas y con el eje libre, desacoplado de cualquier carga mecánica. Análogamente, un generador en vacío está movido por un motor de accionamiento a su velocidad asignada, pero tiene su inducido en circuito abierto y no proporciona potencia eléctrica alguna.

La norma UNE-EN 600034-1 [16] también señala que una máquina está *en reposo* cuando “*carece de todo movimiento y de toda alimentación eléctrica o accionamiento mecánico*”. Es decir, cuando no recibe ni produce potencia eléctrica ni potencia mecánica. (A partir de su versión de 2011 la norma UNE anterior pasa a denominar este estado indicando que la máquina está “*desenergizada y en reposo*”).

En estos dos últimos estados la potencia suministrada por la máquina es nula, pero en el reposo las pérdidas son nulas (la máquina está completamente parada y desconectada) mientras que en vacío la máquina está girando y tiene algunas pérdidas.

Evidentemente cuando una máquina está en funcionamiento estará bien “en carga” o bien “en vacío”. Cuando esté desconectada de la red y sin movimiento la máquina estará “en reposo”.

Por otra parte, la norma UNE-EN 600034-1 [16] define como *servicio* a la “*estipulación de la carga o cargas a la que está sometida la máquina incluyendo, en su caso, los periodos de arranque, frenado, reposo y marcha en vacío indicando sus duraciones y secuencias en el tiempo*”. Es decir, un servicio es la especificación del ciclo de carga al que se ve sometida la máquina en su funcionamiento.

## POTENCIAS NOMINAL Y ASIGNADA

Como ya se ha ido indicando en párrafos anteriores, la potencia máxima que puede proporcionar una máquina eléctrica casi siempre está limitada por el calentamiento que produce, el cual no debe dar lugar a una temperatura superior a la que es capaz de soportar. Como normalmente son los aislamientos los elementos de una máquina más sensibles al calor, esta temperatura límite viene dada por la clase térmica de éstos.

Pero la cuestión es que en una máquina eléctrica esta potencia máxima no es única, pues depende de las condiciones de funcionamiento. Así podemos señalar los siguientes aspectos que condicionan el valor de esta potencia máxima:

- La temperatura ambiente. La misma máquina suministrando la misma potencia puede dar lugar a una temperatura soportable por sus aislamientos cuando se encuentra situada en la intemperie de un país nórdico con una temperatura ambiente inferior a 0 °C y, sin embargo, dar lugar a temperaturas excesivas en la máquina cuando se encuentra en un desierto con una temperatura ambiente superior a 50 °C.

- La altitud sobre el nivel del mar. Si alguno de los refrigerantes de la máquina es el aire ambiente hay que tener en cuenta que su densidad disminuye con la altitud sobre el nivel del mar. Esto reduce la capacidad refrigerante del aire a medida que se aumenta la altitud y por lo tanto disminuye la potencia máxima de la máquina.
- Las demás magnitudes de la máquina que no sean dependientes de la potencia: tensión, frecuencia,... Influye el valor y la calidad de estas magnitudes. Por ejemplo, en las máquinas de corriente alterna trifásica la potencia máxima, además de estar influenciada por el valor eficaz de la tensión, también está afectada por su forma de onda (contenido armónico) y por el equilibrio entre fases.
- El ciclo de carga de la máquina, el cual viene especificado por su servicio. Así, si se desconecta una máquina eléctrica antes de llegar al equilibrio térmico -cuando la temperatura aún no ha subido lo suficiente para ser dañina- se la puede hacer funcionar con una potencia que de otra manera, al alcanzar el equilibrio térmico después de haber estado funcionando más tiempo, daría lugar a temperaturas peligrosas.

Para dar una indicación de la máxima potencia que es capaz de proporcionar una máquina eléctrica antes se usaba el concepto de potencia nominal, pero en la actualidad se emplea el concepto de la potencia asignada, que es más versátil. De todos modos, en este texto ambos conceptos se usarán prácticamente como sinónimos.

La **potencia nominal** es la máxima potencia que puede suministrar la máquina sin que sufra temperaturas peligrosas para su integridad cuando el resto de las magnitudes (tensión, frecuencia, velocidad, factor de potencia,...) tienen sus valores nominales, se encuentra a una altitud sobre el nivel del mar inferior a 1000 metros, la temperatura ambiente es 40 °C y funciona en régimen permanente o indefinido (es decir, el tiempo suficiente para alcanzar el equilibrio térmico). Además, en el caso de máquinas de corriente alterna trifásica las tensiones deben estar equilibradas y tener un contenido armónico pequeño.

La norma [16] incluye la definición de valor asignado de una magnitud como “*un valor, normalmente asignado por el fabricante, para una condición de funcionamiento especificada de la máquina*”. Es decir, los valores asignados son los valores de las magnitudes eléctricas y mecánicas para los que el fabricante ha diseñado la máquina. Entre los valores asignados está la potencia asignada. En este texto los valores asignados llevarán el subíndice N.

Pues bien, la **potencia asignada** para máquinas rotativas está definida en la norma UNE-EN 60034-1 [16] y es la máxima potencia que el fabricante de la máquina garantiza que, cuando se encuentra a una altitud sobre el nivel del mar inferior a 1000 metros y la temperatura ambiente no supera los 40 °C, no da lugar a calentamientos peligrosos para un servicio dado. Además, en el caso de máquinas de corriente alterna trifásica las tensiones deben estar equilibradas y tener un contenido armónico pequeño. Evidentemente, para especificar completamente una potencia asignada hay que indicar el servicio a que se refiere.

De la definición anterior se deduce que una misma máquina puede tener diferentes potencias asignadas dependiendo del servicio al que se refiera cada una de ellas. Una máquina tendrá una potencia asignada más alta para un servicio en el que la potencia se

aplica un tiempo corto, antes de que se alcance el equilibrio térmico, y luego se la deja enfriar completamente y la misma máquina tendrá una potencia asignada menor para un servicio en el que se le aplique una potencia el tiempo suficiente para alcanzar el equilibrio térmico. La potencia asignada del primer servicio daría lugar a temperaturas peligrosas si la máquina funcionara con el segundo servicio, pero es perfectamente soportable para el servicio para la que ha sido definida.

El servicio que debe dar una máquina se puede especificar mediante los tres métodos citados en el apartado 4.1 de la norma UNE-EN 60034-1 [16] y que son los siguientes:

1. Numéricamente, si la carga varía de forma conocida.
2. Gráficamente mediante curvas que muestran la evolución de las magnitudes variables en el tiempo.
3. Eligiendo un servicio tipo (que se definen en el siguiente apartado de este texto) entre los 10 que establece la norma que no sea menos severo que el servicio real al que se va a someter a la máquina. Es decir, habrá que analizar la forma en que va a funcionar la máquina y elegir el servicio tipo normalizado que más se aproxime a esa forma de funcionamiento y que no produzca calentamientos inferiores al servicio real.

Si no se especifica otro servicio se sobreentiende que la potencia asignada que indica el fabricante corresponde al servicio continuo S1 (ver el apartado siguiente) con lo que la potencia asignada coincide con la antigua potencia nominal.

La potencia asignada para transformadores está definida en la norma UNE-EN 60076-1 [5] y se refiere a una carga permanente en la que se alcanza el equilibrio térmico.

El tipo de potencia que es la potencia asignada viene recogido en las normas (en el apartado 5.5 de la norma UNE-EN 60034-1 [16] -para máquinas rotativas- y en el apartado 4.1 de la norma UNE-EN 60076-1 [5] -para transformadores-) y depende del tipo de máquina:

- En **generadores de c.c.** la potencia asignada es potencia eléctrica en bornes del inducido, se mide en W, kW o MW y se designa  $P_N$ .
- En **generadores de c.a.** la potencia asignada es potencia eléctrica aparente en bornes del inducido, se mide en VA, kVA o MVA y se designa  $S_N$ .
- En **motores** la potencia asignada es potencia mecánica en el eje, se mide en W, kW o MW (antes también se usaban los caballos de vapor) y se designa  $P_N$ .
- En **transformadores** la potencia asignada es potencia eléctrica aparente en bornes del primario o del secundario, se mide en VA, kVA o MVA y se designa  $S_N$ .

Se dice que una máquina funciona a plena carga cuando todas las magnitudes de la máquina toman sus valores asignados, especialmente la potencia que es igual a la potencia asignada. Una máquina está sobrecargada si está proporcionando una potencia superior a la asignada.

## SERVICIOS TIPO

La norma UNE-EN 60034-1 [16] establece 10 servicios tipo que se designan S1, S2,... y S10, respectivamente, y que se agrupan en 5 categorías (para más información remitimos al lector a la citada norma [16]). Aunque estos servicios tipo han sido definidos básicamente para motores, algunas de ellos también son aplicables a generadores. Seguidamente se da un resumen de estos servicios tipo:

1. **Servicio continuo (S1):** Carga constante durante el tiempo suficiente para que se establezca el equilibrio térmico.
2. **Servicio temporal o de corta duración (S2):** Carga constante durante un tiempo inferior al necesario para alcanzar el equilibrio térmico seguido de un tiempo de reposo en el que se alcanza la temperatura del refrigerante (con un margen de 2 K).
3. **Servicios periódicos:** Sucesión de ciclos de servicios idénticos. No se alcanza equilibrio térmico durante el calentamiento. Se subdividen en:
  - Servicios intermitentes periódicos (S3, S4, S5): Cada ciclo incluye un tiempo con carga (carga constante y, en algunos casos, con arranques y/o frenado) y otro de reposo.
  - Servicios ininterrumpidos periódicos (S6, S7, S8): En cada ciclo no se incluye un tiempo de reposo (aunque, en algunos casos, existe un tiempo de marcha en vacío).
4. **Servicio con variaciones no periódicas de carga y de velocidad (S9):** La carga y la velocidad tienen variaciones no periódicas. A veces incluye sobrecargas superiores a la plena carga.
5. **Servicio con cargas y velocidades constantes diferentes (S10):** Consta de un número especificado de valores diferentes de carga (algunas pueden ser la marcha en vacío y/o el reposo) y, en su caso, de velocidad. Durante cada una de estas combinaciones carga/velocidad se alcanza el equilibrio térmico.

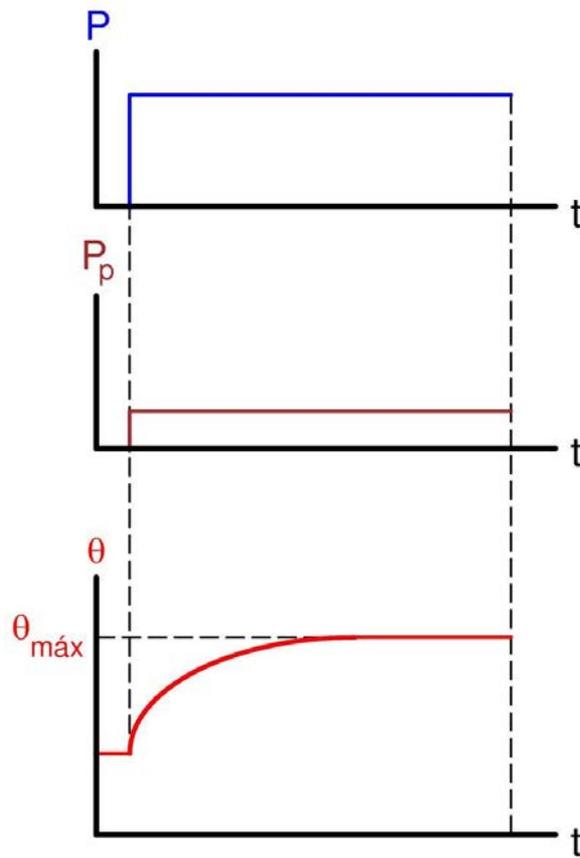
La norma [16] proporciona para cada servicio tipo las curvas de la carga, de las pérdidas, de la temperatura y, en algunos casos, de la velocidad de la máquina que sirven para definirlos mejor. Seguidamente vamos a comentar algunos de los servicios tipo mediante estas curvas. Esto facilitará al lector el estudio de esta norma si quiere profundizar más en este tema.

### Servicio continuo. Servicio tipo S1

En el servicio tipo S1 la carga se mantiene constante el tiempo suficiente para que se alcance el equilibrio térmico durante el calentamiento.

Así, en la Fig. 3 se observa que tanto la carga  $P$  (que en los motores será igual a la potencia útil  $P_u$ ) como las pérdidas  $P_p$  que produce permanecen constantes todo el tiempo. Por lo tanto, la temperatura  $\theta$  aumenta exponencialmente, como se indicó en la Fig. 2a, y toma un valor máximo  $\theta_{\text{máx}}$  igual al correspondiente al equilibrio térmico.

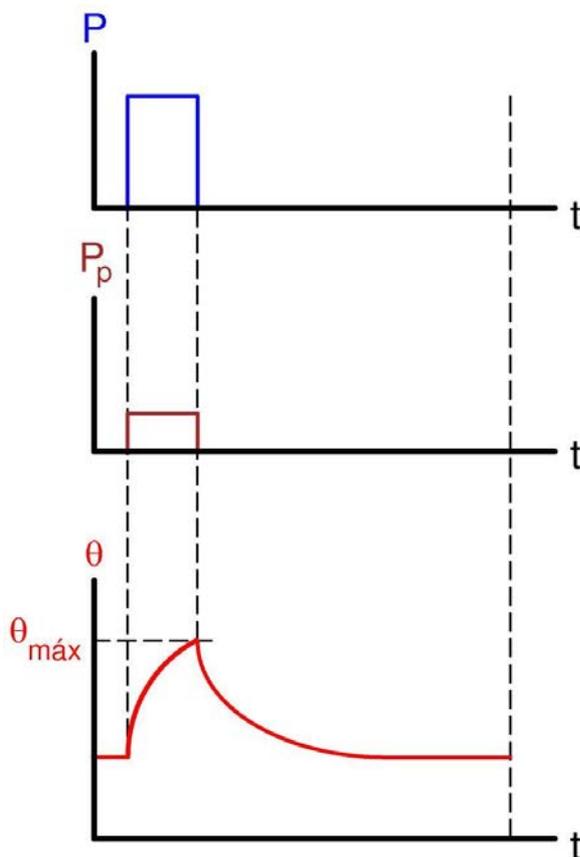
La potencia asignada para este servicio tipo sería aquella potencia  $P$  para la que la temperatura máxima coincidiera con la clase térmica de su aislamiento.



(En la norma UNE-EN 60034-1 [16] se denomina “ $P_v$ ” a  $P_p$ )

*Fig. 3: Servicio S1*

**Servicio temporal o de corta duración. Servicio tipo S2**



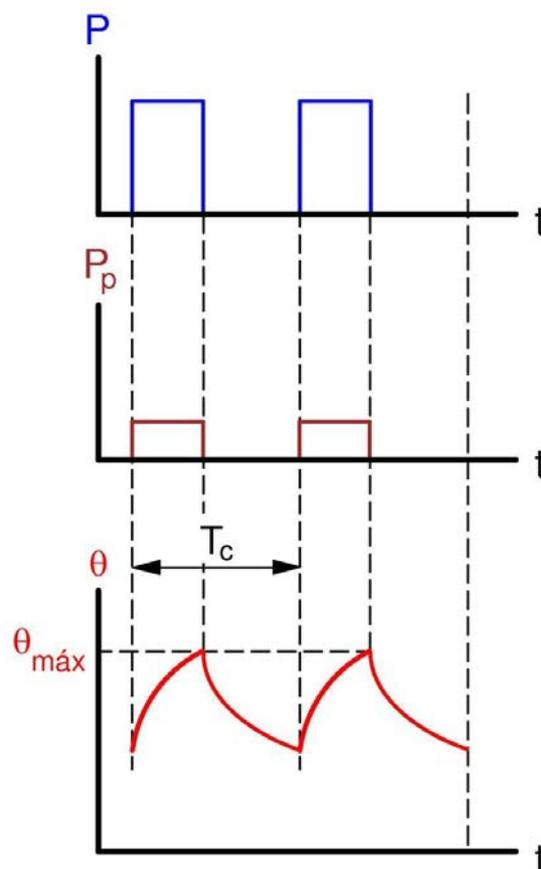
*Fig. 4: Servicio S2*

En el servicio tipo S2 la carga se mantiene constante un tiempo corto para que se no alcance el equilibrio térmico. Después se deja la máquina en reposo para que se enfríe hasta alcanzar el equilibrio térmico con el fluido refrigerante con un margen de 2 K (2 grados Kelvin).

Así, en la Fig. 4 se observa que tanto la carga  $P$  como las pérdidas  $P_p$  que produce la máquina permanecen constantes durante una parte del tiempo y se anulan después. Por lo tanto, la temperatura  $\theta$  aumenta exponencialmente, como se indicó en la Fig. 2a, pero antes de que se alcance el equilibrio térmico se produce la desconexión de la máquina y después se la deja enfriar completamente hasta alcanzar la temperatura del fluido refrigerante. Por lo tanto, en este servicio tipo la temperatura máxima  $\theta_{\text{máx}}$  es inferior a la que se alcanzaría si se dejase funcionar la máquina hasta alcanzar el equilibrio térmico durante el calentamiento.

Es evidente que la potencia asignada de una máquina eléctrica para el servicio tipo S2 es mayor que para el servicio tipo S1, pues en el servicio tipo S2 admite una carga  $P$  mayor (y consecuentemente unas pérdidas  $P_p$  mayores) para alcanzar la misma temperatura máxima  $\theta_{\text{máx}}$  que en el servicio tipo S1.

### Servicio intermitente periódico. Servicio tipo S3



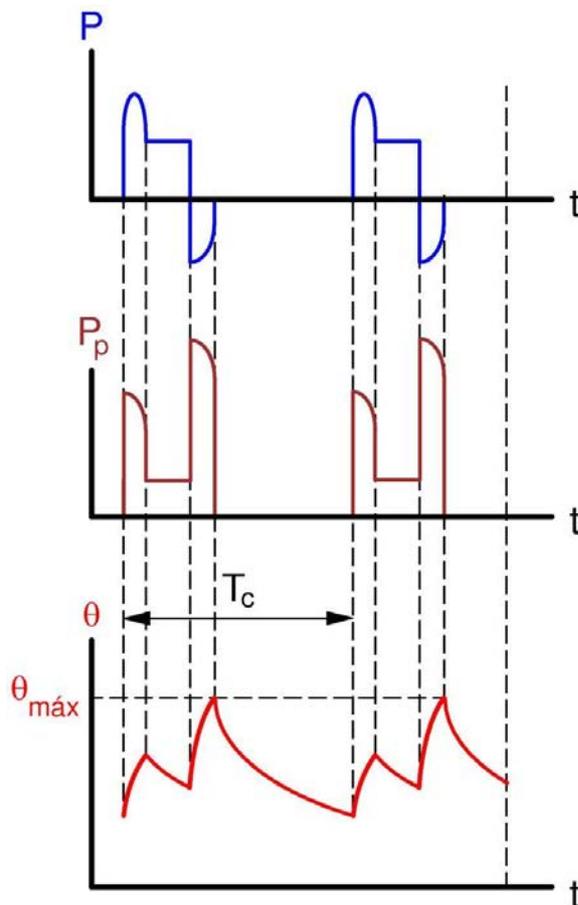
*Fig. 5: Servicio S3*

El servicio S3 (Fig. 5) es un servicio que se repite periódicamente siendo  $T_c$  su periodo. Como en todos los servicios periódicos no se alcanza el equilibrio térmico

durante el calentamiento. Dentro de los servicios periódicos, los servicios intermitentes periódicos incluyen dentro de cada ciclo un tiempo de reposo.

En este servicio cada ciclo consta de un tiempo de funcionamiento con carga constante y un tiempo de reposo (nótese en la Fig. 5 que durante el reposo no hay pérdidas). En este servicio, el ciclo es tal que la intensidad de arranque no influye de forma apreciable en el calentamiento.

**Servicio intermitente periódico con frenado eléctrico. Servicio tipo S5**



*Fig. 6: Servicio S5*

Este es otro servicio intermitente periódico, luego consta de ciclos que se repiten con un periodo  $T_c$  y dentro de cada ciclo hay un tiempo de reposo. No se alcanza el equilibrio térmico en el calentamiento.

Como se aprecia en la Fig. 6 cada ciclo de este servicio consta de un tiempo apreciable de arranque, un tiempo de carga constante, un tiempo de frenado eléctrico y un tiempo de reposo.

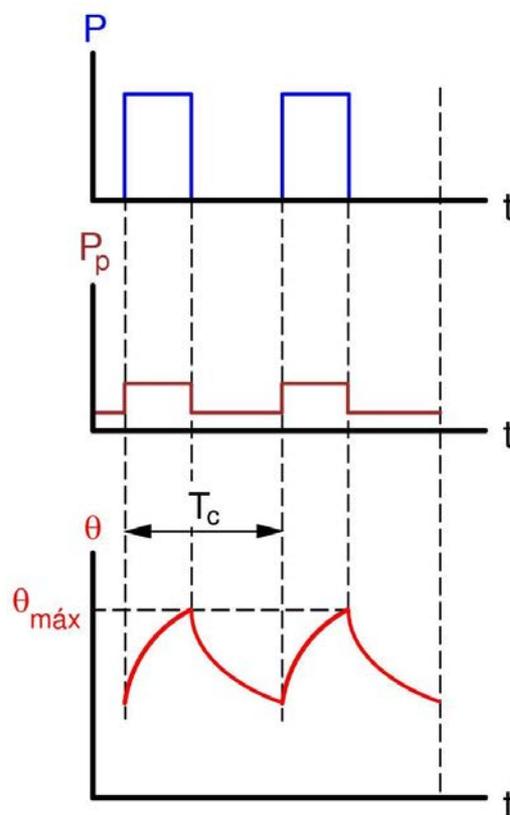
En la Fig. 6 el arranque se manifiesta porque al conectar la carga, estando la máquina previamente en reposo, hay un momento inicial de carga alta y, sobre todo, de unas pérdidas elevadas que suben la temperatura de la máquina con una constante de tiempo alta. Esto es debido a que la corriente de arranque de las máquinas eléctricas es muy alta, varias veces superior a la intensidad asignada.

En el funcionamiento a carga constante la máquina produce unas pérdidas menores que en el arranque por lo que se enfría con respecto a la temperatura que alcanzó durante el arranque, a pesar de que sigue produciendo calor.

Al final del funcionamiento a carga constante la máquina se detiene no sólo desconectándola, sino aplicándole un sistema de frenado eléctrico. Esto se manifiesta en la Fig. 6 porque aparece una potencia útil negativa (frenado) que da lugar a unas pérdidas muy elevadas, superiores aún a las del arranque, que producen una rápida subida de temperatura.

En el tiempo de reposo la máquina está parada y no hay potencia útil ni se producen pérdidas. En consecuencia la temperatura disminuye.

### **Servicio ininterrumpido periódico. Servicio tipo S6**



*Fig. 7: Servicio S6*

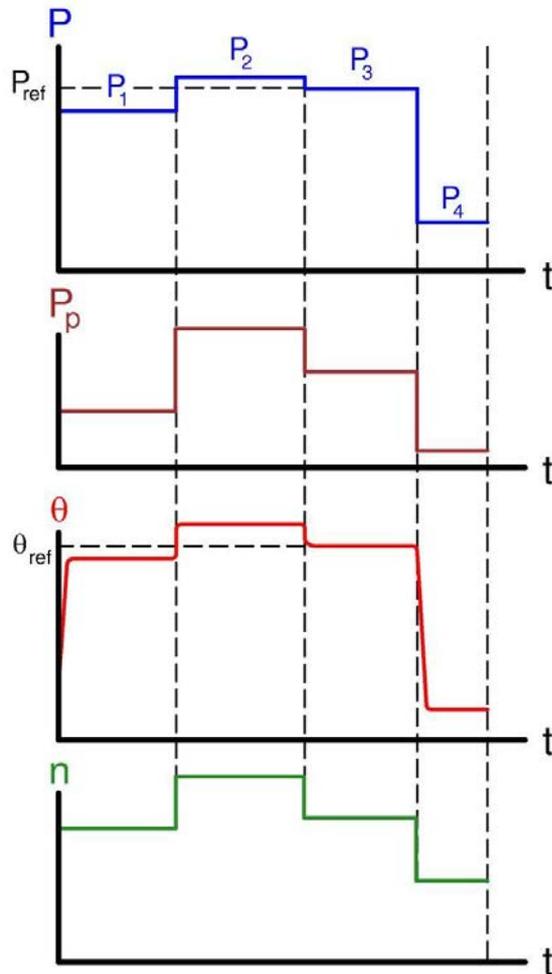
El servicio tipo S6 (Fig. 7) es un servicio que también se repite periódicamente siendo  $T_c$  su periodo. Como en todos los servicios periódicos no se alcanza el equilibrio térmico durante el calentamiento. Dentro de los servicios periódicos, los servicios ininterrumpidos periódicos no incluyen dentro de cada ciclo un tiempo de reposo, aunque sí puede haber un tiempo de funcionamiento en vacío.

En este servicio cada ciclo consta de un tiempo de funcionamiento con carga constante, en el que la intensidad de arranque no influye de forma apreciable en el calentamiento, y un tiempo de marcha en vacío (nótese en la Fig. 5 que durante el vacío no hay potencia útil pero sí hay pérdidas).

El servicio tipo S6 es muy parecido al servicio tipo S3 en el que el tiempo de reposo se ha cambiado por un tiempo de marcha en vacío.

**Servicio con cargas y velocidades constantes diferentes. Servicio tipo S10**

Este servicio consiste en la aplicación sucesiva de varias cargas constantes distintas, cada una de las cuáles actúa el tiempo suficiente para alcanzar el equilibrio térmico. La velocidad de giro  $n$  de la máquina puede ser distinta para cada una de estas cargas.



*Fig. 8: Servicio S10*

Alguna de la cargas puede tener valor nulo; es decir, corresponder a un funcionamiento en vacío o en reposo.

Este servicio tipo está representado en la Fig. 10, en la que a las habituales curvas de  $P$ ,  $P_p$  y  $\theta$  en función del tiempo se ha añadido una curva que muestra la evolución temporal de la velocidad  $n$  de la máquina.

Para este servicio se escoge una carga de referencia  $P_{ref}$  que en servicio continuo S1 da lugar a la temperatura  $\theta_{ref}$ . Algunas de las carga del servicio S10 son superiores a  $P_{ref}$  (aunque no deben superar 1,15 veces el valor de  $P_{ref}$ ) y, consiguientemente, la temperatura de la máquina es mayor que  $\theta_{ref}$  durante una parte del tiempo, aunque también habrá momentos en que esta temperatura es inferior a  $\theta_{ref}$ . El hecho de que se la temperatura supere el valor  $\theta_{ref}$  va a originar una reducción de la vida de la máquina en el servicio tipo S10 con respecto a la que corresponde al servicio S1. Esta disminución de la vida térmica esperada de la máquina se puede calcular mediante el método explicado en la norma [16].

La designación completa de los servicios tipo S3 a S10, según la norma UNE-EN 60034-1 [16], exige el indicar varias magnitudes: el periodo  $T_c$  (que usualmente es de 10 minutos), el factor de marcha (la proporción del tiempo en que la máquina está en carga dentro de cada ciclo con respecto al periodo  $T_c$  del ciclo), los momentos de inercia del motor y de la carga, etc.

## MARCHA INDUSTRIAL. ÍNDICE DE CARGA

### Marcha industrial

Se dice que una máquina de corriente alterna funciona con una *marcha industrial* si está funcionando en régimen permanente y se dan estas condiciones:

1. La tensión se mantiene constante e igual a la asignada, su forma de onda es sinusoidal y, en el caso trifásico, las tres fases están equilibradas.
2. La frecuencia es constante e igual a la asignada (50 Hz en Europa y 60 Hz en América).

Hay muchas marchas industriales que se diferencian entre sí por la potencia que proporciona la máquina en cada una de ellas. Este tipo de marcha es la más habitual en el funcionamiento de las máquinas eléctricas y entre ellas hay dos especialmente significativas:

- La marcha en vacío en la que la máquina funciona con la tensión y frecuencia asignadas y la potencia que proporciona la máquina es nula.
- La marcha asignada en la que la máquina funciona con la tensión y frecuencia asignadas y la potencia que proporciona la máquina es la asignada.

A partir de ahora cuando este texto diga que una máquina está funcionando “en marcha industrial” quiere indicar que, aunque varíe la potencia, siempre funciona con marchas industriales porque su tensión y su frecuencia siempre tienen su valor asignado.

El funcionamiento más frecuente de una máquina eléctrica es en marcha industrial suministrando una potencia comprendida entre los límites impuestos por los estados en vacío (potencia nula) y asignado (potencia asignada).

En todas las marchas industriales de una máquina se dan estas circunstancias:

- En las máquinas de c.a., salvo que la corriente sea apreciablemente superior a la asignada (es decir, cuando la potencia supera bastante a la potencia asignada con lo que la máquina está sobrecargada), apenas existe diferencia entre los valores de la tensión en bornes  $V$  y la f.e.m.  $E$  de las fases del inducido. Teniendo en cuenta lo que se indicó al estudiar las f.e.m.s [27] se deduce que:

$$\left. \begin{array}{l} V \approx E = 4,44 N f \xi_b \Phi_M \\ V = \text{cte} \text{ y } f = \text{cte} \end{array} \right\} \rightarrow \Phi_M = \text{cte} \rightarrow B_M = \text{cte} \quad (8)$$

Una máquina eléctrica en marcha industrial conserva siempre el mismo valor de la tensión  $V$  y de la frecuencia  $f$  (los valores asignados) para todas las cargas. Por otra parte, el número de espiras  $N$  y el factor de bobinado  $\xi_b$  son constantes para una máquina dada. Por consiguiente, se deduce que en marcha industrial una máquina eléctrica conserva prácticamente constantes los valores del flujo por polo y de la inducción magnética en el entrehierro para todas las cargas.

- El hecho de que en marcha industrial para todas las cargas haya la misma inducción magnética y la misma frecuencia hace que las pérdidas debidas a la histéresis magnética  $P_H$  y a las corrientes de Foucault  $P_F$  tengan siempre el mismo valor (véase la relación (6)). Por consiguiente, en marcha industrial la máquina tiene las mismas pérdidas magnéticas o pérdidas en el hierro  $P_{Fe}$  para todas las cargas:

$$\left. \begin{array}{l} B_M = \text{cte} \\ f = \text{cte} \end{array} \right\} \rightarrow \left. \begin{array}{l} P_H = \text{cte} \\ P_F = \text{cte} \end{array} \right\} \rightarrow P_{Fe} = \text{cte} \quad (9)$$

- En una máquina de c.a. en marcha industrial sucede que para todas las cargas su velocidad apenas va a variar (ver la ecuación (10)). Esto se debe a que la velocidad de sincronismo  $n_1$  va a ser constante -por serlo la frecuencia  $f$ - y a que las máquinas de alterna funcionan a la velocidad de sincronismo (máquinas síncronas) o a una velocidad poco variable y próxima a la de sincronismo (máquinas de inducción).

El hecho de que la velocidad se mantenga prácticamente constante para todas las cargas da lugar a que (según la relación (7)) en todas ellas prácticamente se tengan las mismas pérdidas de tipo mecánico  $P_m$ . Por tanto, en marcha industrial la máquina tiene las mismas pérdidas mecánicas  $P_m$  para todas las cargas:

$$\left. \begin{array}{l} n_1 = \frac{60 f}{p} \\ f = \text{cte} \end{array} \right\} \rightarrow n_1 = \text{cte} \rightarrow n \approx \text{cte} \rightarrow P_m \approx \text{cte} \quad (10)$$

En resumen:

- Las máquinas de alterna funcionan en marcha industrial cuando están alimentadas a la tensión y frecuencia asignadas.
- En todas las marchas industriales de una máquina eléctrica esta tiene siempre los mismos valores (con un pequeño margen de variación) de flujo por polo ( $\Phi_M$ ), inducción magnética ( $B_M$ ), velocidad ( $n$ ), pérdidas en el hierro ( $P_{Fe}$ ) y pérdidas mecánicas ( $P_m$ ).
- Las marchas industriales más destacadas son las marchas en vacío y con carga asignada.

### Índice de carga

El *índice de carga o factor de utilización C* es el cociente entre la carga de la máquina y su potencia asignada. Hay que tener en cuenta que estas potencias son la potencia mecánica en el eje en los motores y la potencia eléctrica (potencia aparente en corriente alterna) en los generadores y transformadores.

Por consiguiente, en un motor el índice de carga se obtiene así:

$$C = \frac{P_u}{P_N} \quad (\text{Motor}) \quad (11a)$$

Mientras que en un generador de corriente alterna o en un transformador el índice de carga se calcula así:

$$C = \frac{S}{S_N} \quad (11b)$$

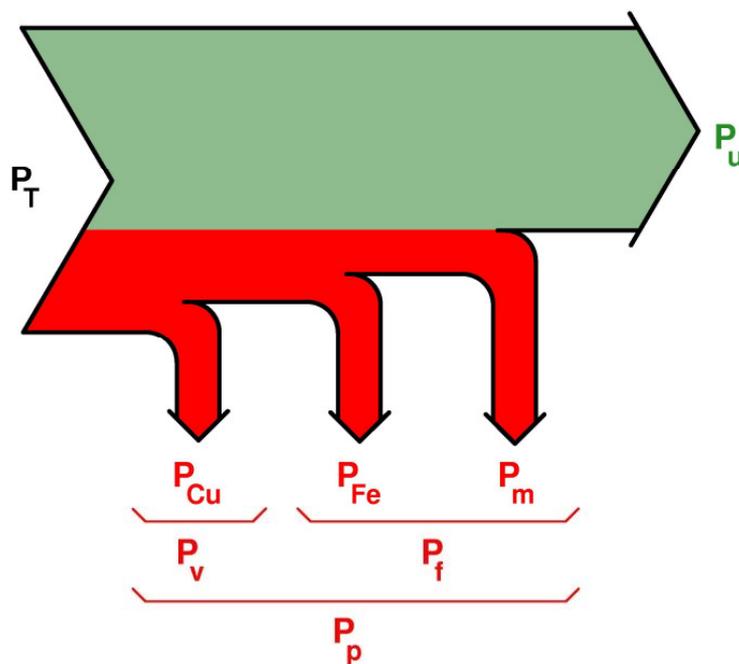
(Generador c.a. o transformador)

La potencia aparente S es proporcional al producto de la tensión V por la corriente I. En marcha industrial la tensión V es constante e igual a la asignada. Luego, en este caso sucede que el índice de carga también es igual al cociente entre la corriente absorbida I y la corriente asignada  $I_N$ :

$$C = \frac{S}{S_N} = \frac{V_N \cdot I}{V_N \cdot I_N} = \frac{I}{I_N} \quad (11c)$$

(Generador c.a. o transformador con marcha industrial)

### CLASIFICACIÓN DE LAS PÉRDIDAS



*Fig. 9: Clasificación de las pérdidas de una máquina eléctrica*

Las pérdidas que se producen en una máquina eléctrica están reflejadas en la Fig. 9 y se pueden clasificar atendiendo a dos criterios: su origen y su variación con la carga.

Como ya se ha indicado en un apartado anterior, las pérdidas se pueden clasificar por su origen de la siguiente manera (Fig. 9):

- Pérdidas en cobre,  $P_{Cu}$ .
- Pérdidas en el hierro,  $P_{Fe}$ .
- Pérdidas mecánicas,  $P_m$ .

En consecuencia, de acuerdo con esta clasificación se obtiene que:

$$P_p = P_{Cu} + P_{Fe} + P_m \quad (12)$$

La clasificación de las pérdidas por su variación con la carga se va a analizar cuando la máquina está funcionando siempre en marcha industrial; es decir, alimentada a tensión y frecuencia asignadas. En este caso, los cambios de carga dan lugar a variaciones en la corriente absorbida, lo cual afecta al valor de las pérdidas en el cobre, mientras que -según se dedujo en el apartado dedicado a la marcha industrial- las pérdidas en el hierro y mecánicas siempre tienen aproximadamente el mismo valor.

Por consiguiente, atendiendo a su variación con la carga las pérdidas se pueden clasificar de esta manera (Fig. 9):

- Pérdidas fijas,  $P_f$ , que son las pérdidas cuyo valor apenas varía de una carga a otra. Evidentemente, en marcha industrial estas pérdidas son la suma de las del hierro  $P_{Fe}$  y mecánicas  $P_m$  (Fig. 9):

$$P_f = P_{Fe} + P_m \quad (13)$$

- Pérdidas variables,  $P_v$ , que son las pérdidas que varían con la carga de la máquina. En marcha industrial estas pérdidas son las del cobre que varían proporcionalmente al cuadrado de la corriente (Fig. 9):

$$P_v = P_{Cu} \quad (14)$$

Luego, si en condiciones asignadas las pérdidas variables valen  $P_{vN}$  y la corriente es  $I_N$ , funcionando en marcha industrial se cumplirá que:

$$\frac{P_v}{P_{vN}} = \left( \frac{I}{I_N} \right)^2 \rightarrow P_v = \left( \frac{I}{I_N} \right)^2 \cdot P_{vN} \quad (15)$$

Por lo tanto, de acuerdo con esta clasificación se obtiene que:

$$P_p = P_f + P_v \quad (16)$$

## RENDIMIENTO

### Definición de rendimiento

El concepto de *rendimiento*  $\eta$  proviene de la Mecánica y se define como el cociente entre la potencia útil y la potencia total:

$$\eta = \frac{P_u}{P_T} \quad (17a)$$

Teniendo en cuenta la relación (1), que se deduce de la Fig. 1, se pueden obtener otras expresiones del rendimiento equivalentes a la (17a) y que se muestran a continuación:

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + P_p} = \frac{1}{1 + \frac{P_p}{P_u}} \quad (17b)$$

$$\eta = \frac{P_T - P_p}{P_T} = 1 - \frac{P_p}{P_T} \quad (17c)$$

El rendimiento de las máquinas eléctricas es bastante elevado, lo que conlleva que los valores de la potencia útil  $P_u$  y de la potencia total  $P_T$  son muy similares. Esto significa que, cuando se intentan obtener las pérdidas  $P_p$  experimentalmente, su determinación por diferencia entre  $P_T$  y  $P_u$  (véase la relación (1)) da errores apreciables a poco error que se cometa al medir  $P_u$  y  $P_T$ . Normalmente, se prefiere realizar ensayos para medir experimentalmente las pérdidas  $P_p$  de la máquina y obtener el rendimiento mediante la aplicación de una de las relaciones (17b) o (17c). A su vez, las pérdidas  $P_p$  se pueden determinar mediante un ensayo que las obtenga en forma global o mediante una serie de ensayos que van midiendo cada tipo de pérdidas por separado para proceder a sumarlas posteriormente (véase la norma UNE-EN 60034-2-1 [14]).

Teniendo en cuenta la relación (12) (véase la Fig. 9), de la fórmula (17b) se deduce la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + P_{Fe} + P_m + P_{Cu}} \quad (18a)$$

Por otra parte, de las expresiones (16) y (17b) se obtiene que:

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + P_f + P_v} \quad (18b)$$

**Rendimiento en generadores de c.a. y transformadores. Rendimiento máximo**

En los transformadores y generadores de corriente alterna funcionando en marcha industrial se verifica la relación (11c). En este caso, de la expresión (15) se deduce que:

$$P_v = C^2 P_{vN} \tag{19}$$

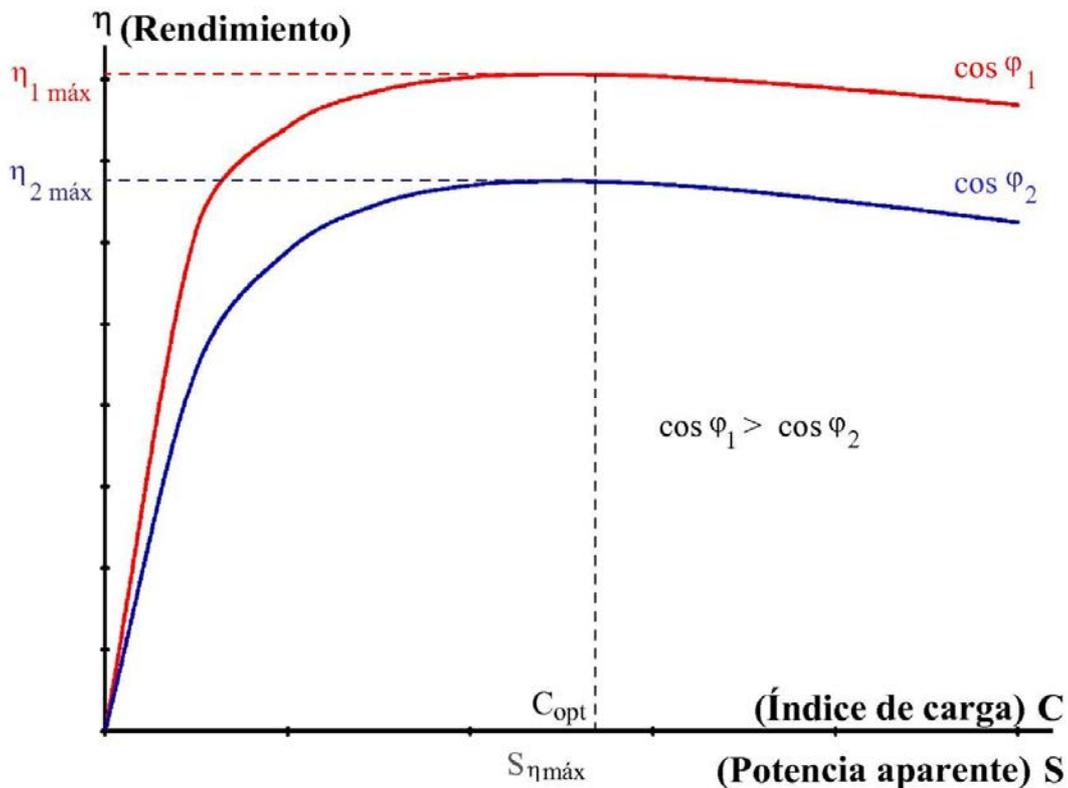
Teniendo presente la relación (11b) se demuestra que:

$$P_u = S \cos \varphi = (C \cdot S_N) \cos \varphi \tag{20}$$

Luego, partiendo de la fórmula (18b) el rendimiento en este caso se puede expresar de esta manera:

$$\eta = \frac{C S_N \cos \varphi}{C S_N \cos \varphi + P_f + C^2 P_{vN}} \tag{21}$$

La fórmula (21) indica que el rendimiento de estas máquinas varía en función del factor de potencia  $\cos \varphi$  y del índice de carga  $C$  (el cual, a su vez, depende de la potencia aparente  $S$ ). En la Fig. 10 se muestran dos curvas -cada una de ellas ha sido obtenida mediante la relación (21) con un factor de potencia constante y diferente de la otra curva- en las que se aprecia la variación del rendimiento en función de la carga.



*Fig. 10: Curvas del rendimiento ( $\eta$ ) en función del índice de carga ( $C$ ) o de la potencia aparente ( $S$ ) para varios factores de potencia ( $\cos \varphi$ )*

Observando la Fig. 10 se pueden extraer varias conclusiones:

- El rendimiento se reduce drásticamente para valores pequeños de C.
- Para un mismo valor de C el rendimiento es mayor cuanto mayor es el factor de potencia (f.d.p.).
- Independientemente del f.d.p. el rendimiento máximo ( $\eta_{\text{máx}}$ ) se produce siempre para la misma potencia aparente ( $S_{\eta_{\text{máx}}}$ ) a la que corresponde el índice de carga óptimo ( $C_{\text{opt}}$ ).
- El rendimiento máximo es mayor cuanto mayor es el f.d.p. El mayor de todos los rendimientos máximos se produce cuando el factor de potencia vale 1.

El índice de carga óptimo ( $C_{\text{opt}}$ ) se obtiene calculando el máximo de la expresión (21) supuesto el f.d.p. constante. Operando de esta manera se deduce que, sea cual sea el factor de potencia, cuando el rendimiento es máximo se cumple siempre la condición de rendimiento máximo de una máquina eléctrica: *el rendimiento es máximo cuando las pérdidas fijas igualan a las pérdidas variables.*

$$\text{Condición de rendimiento máximo: } P_f = P_v \quad (22)$$

Luego, teniendo en cuenta la relación (19), el índice de carga óptimo se calcula así:

$$P_f = C_{\text{opt}}^2 \cdot P_{vN}$$

$$C_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{P_f}{P_{vN}}} \quad (23)$$

Partiendo de (11b) se obtiene que:

$$S_{\eta \text{ máx}} = C_{\text{opt}} \cdot S_N \quad (24)$$

El rendimiento máximo, que es función del f.d.p., se calcula sustituyendo la relación (23) en la fórmula (21) y teniendo en cuenta, además, la condición (22) y la relación (24):

$$\eta_{\text{máx}} = \frac{C_{\text{opt}} S_N \cos \varphi}{C_{\text{opt}} S_N \cos \varphi + P_f + C_{\text{opt}}^2 P_{vN}}$$

$$\eta_{\text{máx}} = \frac{S_{\eta \text{ máx}} \cos \varphi}{S_{\eta \text{ máx}} \cos \varphi + 2 P_f} \quad (25)$$

De todo lo anterior se pueden deducir una serie de consecuencias prácticas:

- Se debe evitar el funcionamiento de la máquina con cargas pequeñas porque el rendimiento sería pequeño.

- Se debe procurar que la máquina funcione con un índice de carga próximo al óptimo ( $C_{opt}$ ) para obtener un rendimiento mejor.
- Se debe elegir una máquina eléctrica cuya potencia asignada no sea demasiado elevada para el servicio a la que se destina, ya que trabajaría con un índice de carga reducido y su rendimiento sería bajo.
- Si  $\cos \varphi_1 > \cos \varphi_2$  puede suceder que el rendimiento máximo para  $\cos \varphi_2$  sea inferior a un rendimiento diferente del máximo para  $\cos \varphi_1$ .

## CÓDIGOS IP E IK

### Código IP

El **código IP** es una manera de especificar el grado de protección de las envolventes de cualquier material eléctrico (armarios, cuadros, carcasas de máquinas eléctricas, etc.). Este código indica la protección que presenta la envolvente contra la penetración de objetos sólidos y de agua en su interior, así como la protección de las personas contra el contacto con los elementos en tensión y/o movimiento situados en el interior de la envolvente.

El código IP para las máquinas eléctricas viene definido por la norma UNE-EN 60034-5 [8]. Este código consiste en las letras IP (Abreviatura de **I**nternational **P**rotection) seguida de dos cifras. Opcionalmente pueden añadirse una o dos letras suplementarias a continuación de la segunda cifra característica para indicar información adicional.

La primera cifra característica indica la protección que presenta la carcasa frente a la entrada de objetos sólidos, según se muestra en la tabla III. Esta cifra tiene realmente un doble significado. Por un lado señala la protección que brinda la envolvente a la entrada de partículas, polvo, etc. que podrían dañar su interior (tercera columna de la tabla III). Por otro, indica la protección de las personas o de sus herramientas contra el contacto de elementos en tensión eléctrica o en movimiento en el interior de la máquina (cuarta columna de la tabla III). En efecto, cuanto más cerrada sea la envolvente más difícil es que entren dentro de la máquina partículas sólidas y también, más difícil es que accidentalmente, una persona introduzca un dedo, una mano, una herramienta, etc. dentro de la máquina, con el consiguiente riesgo para su integridad física. Como se aprecia en la tabla III, cuanto mayor es la primera cifra característica del código IP la carcasa presenta mayor protección a la entrada de cuerpos sólidos y al contacto de las personas con elementos peligrosos del interior de la máquina.

La segunda cifra característica indica la protección de envolvente de la máquina contra la entrada de agua a su interior. Cuanta más alta sea esta cifra mayor protección brinda la carcasa contra la entrada de agua.

Así, por ejemplo, una máquina con grado de protección IP53 tiene una carcasa que protege contra el polvo y el contacto con elementos del interior y que protege contra la entrada de agua sólo cuando ésta cae en forma de lluvia con una inclinación con la vertical inferior a  $60^\circ$ .

Estas dos cifras deben interpretarse por separado. Así, si una norma indica que para una aplicación dada la máquina debe tener como mínimo un IP55, una máquina con IP64

no valdría. En efecto, si bien el número 64 es superior a 55, si se compara cifra a cifra se observa que la primera cifra es superior a la requerida (6 es mayor que 5), pero la segunda cifra es demasiado pequeña (4 es inferior a 5) y la máquina con IP64 no tendría suficiente protección contra la entrada de agua.

Cuando no es necesaria una cifra característica será sustituida por la letra “X” (“XX” si se omiten las dos cifras). Así, si una norma señala que para una aplicación dada la máquina debe tener como mínimo un IP5X, indica que el IP debe tener su primera cifra característica igual o superior a 5, pero que no introduce ninguna indicación sobre la segunda cifra característica, la cual puede adoptar cualquier valor.

*Tabla III: Grados de protección indicados por la primera cifra característica*

Cifra	Descripción abreviada	Grado de protección del equipo contra la entrada de cuerpos sólidos	Significado para la protección de personas
		Tipo de protección proporcionada por la envolvente	Contra el acceso a partes peligrosas de:
<b>0</b>	No protegida	Sin protección particular	(No protegido)
<b>1</b>	Protegida contra los cuerpos sólidos de más de 50 mm de Ø	Cuerpos sólidos con un diámetro superior a 50 mm	una gran superficie del cuerpo humano, por ejemplo la mano
<b>2</b>	Protegida contra los cuerpos sólidos de más de 12 mm de Ø	Cuerpos sólidos con un diámetro superior a 12 mm	dedos u objetos análogos que no sobrepasen 80 mm de longitud
<b>3</b>	Protegida contra cuerpos sólidos de más de 2,5 mm de Ø	Cuerpos sólidos con un diámetro superior a 2,5 mm	herramientas o hilos de diámetro superior a 2,5 mm
<b>4</b>	Protegida contra cuerpos sólidos de mas de 1 mm de Ø	Cuerpos sólidos con un diámetro superior a 1 mm	alambres, hilos o cintas de espesor superior a 1 mm
<b>5</b>	Protegida contra la penetración de polvo	No se impide totalmente la entrada de polvo, pero sí que el polvo entre en cantidad suficiente tal que llegue a perjudicar el funcionamiento satisfactorio del equipo	alambre
<b>6</b>	Totalmente estanco al polvo	Ninguna entrada de polvo	alambre

Para las cifras 5 y 6 existe protección total contra el contacto con las partes en tensión o con las piezas en movimiento, interiores a la envolvente de la máquina, o aproximación a las mismas.

*Tabla IV: Grados de protección indicados por la segunda cifra característica*

Cifra	Descripción abreviada	Grado de protección del equipo contra el agua
		Tipo de protección proporcionada por la envolvente
<b>0</b>	No protegida	Sin protección particular
<b>1</b>	Protegida contra la caída vertical de gotas de agua	La caída vertical de gotas de agua no deberán tener efectos perjudiciales
<b>2</b>	Protegida contra la caída de gotas de agua con una inclinación máxima de 15°	Las caídas verticales de gotas de agua no deberán tener efectos perjudiciales cuando la envolvente está inclinada hasta 15° con respecto a la posición normal
<b>3</b>	Protegida contra la lluvia fina (pulverizada)	El agua pulverizada de lluvia que cae en una dirección que forma un ángulo de hasta 60° con la vertical, no deberá tener efectos perjudiciales
<b>4</b>	Protegida contra las proyecciones de agua	El agua proyectada en todas las direcciones sobre la envolvente no deberá tener efectos perjudiciales
<b>5</b>	Protegida contra los chorros de agua	El agua proyectada con la ayuda de una boquilla, en todas las direcciones, sobre la envolvente, no deberá tener efectos perjudiciales
<b>6</b>	Protegida contra fuertes chorros de agua o contra la mar gruesa	Bajo efectos de fuertes chorros o con mar gruesa, el agua no deberá penetrar en la envolvente en cantidades perjudiciales
<b>7</b>	Protegida contra los efectos de la inmersión	Cuando se sumerge la envolvente en agua en unas condiciones de presión y con una duración determinada, no deberá ser posible la penetración de agua en el interior de la envolvente en cantidades perjudiciales
<b>8</b>	Protegida prolongada contra la inmersión	El equipo es adecuado para la inmersión prolongada en agua bajo las condiciones especificadas por el fabricante. NOTA: Esto significa normalmente que el equipo es rigurosamente estanco. No obstante, para cierto tipo de equipos, esto puede significar que el agua pueda penetrar pero sólo de manera que no produzca efectos perjudiciales

### Código IK

Antes el código IP incluía una tercera cifra característica que hoy en día se utiliza en un código independiente, el **código IK**. El código IK para las máquinas eléctricas viene definido por la norma UNE-EN 50102 [2]. Este código consiste en las letras IK seguidas de un número de dos cifras (la primera es un cero cuando el número es inferior a 10) y sirve para informar de la resistencia de la envolvente a los golpes.

En la tabla V se muestra la energía de impacto que debe poder resistir la carcasa según su código IK. Cuánto mayor es el código IK más resistente a los golpes es la carcasa de una máquina eléctrica. El código IK va desde el código IK00 (carcasa sin ninguna garantía en cuanto a la protección a los golpes) al IK10 (máxima protección a los golpes).

Nótese que, a diferencia del código IP, las dos cifras del código IK forman un único número que debe ser tomado globalmente, no cifra a cifra.

*Tabla V: Correspondencia entre el código IK y la energía de impacto*

Código IK	IK00	IK01	IK02	IK03	IK04	IK05	IK06	IK07	IK08	IK09	IK10
Energía de impacto (Julios)	No protegido según esta norma	0,15	0,2	0,35	0,5	0,7	1	2	5	10	20

## OTROS ASPECTOS TECNOLÓGICOS

Para caracterizar completamente una máquina eléctrica no sólo hay que indicar sus valores asignados, el servicio y los códigos IP e IK. Hay una serie de aspectos tecnológicos, como la forma y el tamaño de la carcasa, el sistema de refrigeración, etc. que el fabricante indica en sus catálogos y en la placa de características y cuya denominación está recogida en una serie de normas.

Seguidamente se va dar una breve enumeración de algunos de estos aspectos tecnológicos y se indican las normas donde están recogidos para que el lector interesado pueda acudir a ellas y ampliar la información.

### Sistema de refrigeración

Para las máquinas rotativas la norma UNE-EN 60034-6 [3] recoge el denominado *código IC* que indica los refrigerantes utilizados para refrigerar la máquina y la constitución de su sistema de enfriamiento.

La norma UNE-EN 60076-2 [6] para transformadores en baño de aceite y la norma UNE-EN 60076-11 [10] para transformadores de tipo seco muestran la denominación a emplear para designar los refrigerantes y el sistema de refrigeración de estas máquinas.

### Formas constructivas

Para las máquinas rotativas la norma UNE-EN 60034-7 [4] recoge el denominado *código IM* que indica los tipos de construcción y las disposiciones de montaje. Por lo tanto, mediante este código se indican entre otros aspectos constructivos:

- La posición del eje: horizontal o vertical.
- El sistema de fijación de la carcasa (patas o bridas) y la posición de éste.
- El número de cojinetes de la máquina eléctrica.
- Si el eje sobresale por uno o por ambos extremos de la máquina.
- La posición donde se coloca la caja de bornes.

Este código tiene dos variantes: código I (designación alfanumérica) y código II (designación numérica); las cuáles se describen en la norma UNE-EN 60034-7 [4].

### Tamaño de carcasa

Los tamaños de las carcasas de las máquinas eléctricas están normalizados. Así, la norma UNE-EN 50347 [7] proporciona las dimensiones y la designación de las carcasas para motores de inducción trifásicos. Para la designación del tamaño de estas carcasas se toma como dato de referencia:

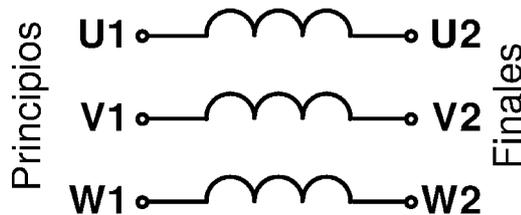
- En máquina con patas: la altura del eje; esto es, la distancia entre el centro del eje y el plano de fondo de las patas.
- En máquinas con bridas: el diámetro del círculo de agujeros de fijación.

### Designación de bornes

Los extremos de los devanados están conectados a unos terminales o bornes ubicados en la caja de bornes que, a su vez, se coloca sobre la carcasa de la máquina.

La designación de estos bornes varía según el tipo de devanado y se ajusta a la siguiente normativa:

- UNE-EN 60034-8 [12] para las máquinas rotativas.
- UNE 20158 [1] para transformadores.



*Fig. 11:* Designación de los bornes de un devanado estático trifásico según la norma UNE-EN 60034-8

### Ruido y vibraciones

Las normas UNE-EN 60034-9 [11] y UNE-EN 60034-14 [9] fijan, respectivamente, los límites de los niveles de potencia acústica y los límites de la intensidad de vibración en desplazamiento, velocidad y aceleración para las máquinas eléctricas rotativas.

### Clases de rendimiento

La norma UNE-EN 60034-30 [15] clasifica por su rendimiento a los motores asíncronos trifásicos de jaula de 2, 4 y 6 polos, tensión asignada de hasta 1000 V y cuyas potencias estén comprendidas entre 0,75 y 375 kW. Para ello define el **código IE** (International Energy-efficiency Class).

### Compatibilidad electromagnética

Los dispositivos eléctricos y electrónicos pueden producir interferencias electromagnéticas (EMI) de unos sobre otros. Estas interferencias se transmiten por radiación o por conducción a través de los conductores de la red eléctrica y pueden producir un funcionamiento anómalo de algunos dispositivos o, incluso, su deterioro.

Para evitar los efectos perniciosos de las EMI se han establecido normas de compatibilidad electromagnética (EMC) que por un lado limitan las interferencias que puede generar un dispositivo y por otro establecen sus límites de inmunidad.

Como se indica en la norma UNE-EN 60034-11 [10], los transformadores son elementos pasivos tanto en la emisión como en la inmunidad de perturbaciones electromagnéticas.

En general las máquinas rotativas son inmunes a las EMI, pero son generadoras de estas emisiones, las cuáles deben ser limitadas para garantizar una correcta compatibilidad electromagnética.

La compatibilidad electromagnética de las máquinas eléctricas rotativas de tensiones asignadas no superiores a 1000 V en c.a. o 1500 V en c.c. se analiza en el apartado 13 de la norma UNE-EN 60034-1 [16].

## PLACA DE CARACTERÍSTICAS

La placa de características es una placa fijada a la carcasa y grabada de forma indeleble que recoge los datos más importantes de una máquina eléctrica. Una máquina puede tener una o varias placas de características.

En la/s placa/s de características se indican los aspectos tecnológicos más importantes: los valores asignados, el código IP, la clase térmica de los aislamientos,... y, además, otro tipo de información: el fabricante, el número de serie, el código de la máquina en el catálogo del fabricante, el año de fabricación,...

Existen normas donde se indican los datos que debe/n recoger la/s placa/s de características según el tipo de máquina eléctrica de que se trate:

- El apartado 10 de la norma UNE-EN 60034-1 [16] para las máquinas rotativas.
- El apartado 7 de la norma UNE-EN 60076-1 [5] para transformadores.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] AENOR. 1985. *UNE 20158: Marcado de los bornes y tomas de los transformadores de potencia*. Madrid: AENOR.
- [2] AENOR. 1996. *UNE-EN 50102: Grados de protección proporcionados por las envolventes de materiales eléctricos contra los impactos mecánicos externos (código IK)*. Madrid: AENOR.
- [3] AENOR. 1997. *UNE-EN 60034-6: Máquinas eléctricas rotativas. Parte 6: Métodos de refrigeración (Código IC)*. Madrid: AENOR.
- [4] AENOR. 1997. *UNE-EN 60034-7: Máquinas eléctricas rotativas. Parte 7: Clasificación de los tipos de construcción y de las disposiciones de montaje (Código IM)*. Madrid: AENOR.
- [5] AENOR. 1998. *UNE-EN 60076-1: Transformadores de potencia. Parte 1: Generalidades*. Madrid: AENOR.
- [6] AENOR. 1998. *UNE-EN 60076-2: Transformadores de potencia. Parte 2: Calentamiento*. Madrid: AENOR.
- [7] AENOR. 2003. *UNE-EN 50347: Motores trifásicos de inducción de aplicación general con dimensiones y potencias normalizados. Designación de carcasas de 56 a 315 y de bridas de 65 a 740*. Madrid: AENOR.
- [8] AENOR. 2003. *UNE-EN 60034-5: Máquinas eléctricas rotativas. Parte 5: Grados de protección proporcionados por el diseño integral de las máquinas eléctricas rotativas (código IP). Clasificación*. Madrid: AENOR.
- [9] AENOR. 2004. *UNE-EN 60034-14: Máquinas eléctricas rotativas. Parte 14: Vibraciones mecánicas de determinadas máquinas con alturas de eje igual o superior a 56 mm. Medición, evaluación y límites de intensidad de vibración*. Madrid: AENOR.

- [10] AENOR. 2005. *UNE-EN 60076-11: Transformadores de potencia. Parte 11: Transformadores de tipo seco*. Madrid: AENOR.
- [11] AENOR. 2006. *UNE-EN 60034-9: Máquinas eléctricas rotativas. Parte 9: Límites de ruido*. Madrid: AENOR.
- [12] AENOR. 2008. *UNE-EN 60034-8: Máquinas eléctricas rotativas. Parte 8: Marcas de los bornes y sentido de giro*. Madrid: AENOR.
- [13] AENOR. 2008. *UNE-EN 60085: Aislamiento eléctrico. Evaluación y designación térmica*. Madrid: AENOR.
- [14] AENOR. 2009. *UNE-EN 60034-2-1: Máquinas eléctricas rotativas. Parte 2-1: Métodos normalizados para la determinación de las pérdidas y del rendimiento a partir de ensayos (excepto máquinas para vehículos de tracción)*. Madrid: AENOR.
- [15] AENOR. 2010. *UNE-EN 60034-30: Máquinas eléctricas rotativas. Parte 30: Clases de rendimiento para los motores trifásicos de inducción de jaula de velocidad única (código IE)*. Madrid: AENOR.
- [16] AENOR. 2011. *UNE-EN 60034-1: Máquinas eléctricas rotativas. Parte 1: Características asignadas y características de funcionamiento*. Madrid: AENOR.
- [17] CHAPMAN. 2005. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [18] CORRALES MARTÍN, J. 1982. *Cálculo industrial de máquinas eléctricas. Tomo I: Fundamentos de cálculo*. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores.
- [19] CORTES, M. 1970. *Curso moderno de máquinas eléctricas rotativas. Tomo I: La máquina eléctrica en general*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados.
- [20] FAURE BENITO. 2000. *Máquinas y accionamientos eléctricos*. Madrid: Colegio oficial de ingenieros navales y oceánicos.
- [21] FITZGERALD, KINGSLEY Y UMANS. 2004. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [22] FRAILE MORA, J. 2008. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [23] GURRUTXAGA, J. A. 1985. *El fenómeno electromagnético (varios tomos)*. Santander: Dpto. de publicaciones de la E.T.S.I.C.C.P. de Santander.
- [24] IVANOV-SMOLENSKI. 1984. *Máquinas eléctricas. Tomo I*. Moscú: Editorial Mir.
- [25] KOSTENKO y PIOTROVSKI. 1979. *Máquinas eléctricas. Tomo II*. Moscú: Editorial Mir.
- [26] RODRÍGUEZ POZUETA, M.A. 2009. *Campo magnético en el entrehierro de las máquinas eléctricas*. Universidad de Cantabria (España). <http://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/campo%20magn%20entrehierro%20Web.pdf>
- [27] RODRÍGUEZ POZUETA, M.A. 2010. *F.e.m.s inducidas en los bobinados de las máquinas eléctricas*. UNICAN: Universidad de Cantabria (España). <http://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/f.e.m.%20inducida%20Calculo.pdf>
- [28] SANZ FEITO. 2002. *Máquinas eléctricas*. Madrid: Pearson Educación.
- [29] SERRANO IRIBARNEGARAY. 1989. *Fundamentos de máquinas eléctricas rotativas*. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores.