

## PÉRDIDAS Y CALENTAMIENTO EN MÁQUINAS ELÉCTRICAS

### 6.1 Introducción

En todo proceso de transformación de la energía, se produce una diferencia entre la potencia que entrega el equipo para su utilización (Potencia útil), y la potencia que absorbe (Potencia absorbida). Esta diferencia se conoce con el nombre de “pérdidas”. El flujo de energía se muestra en la figura 6.1.

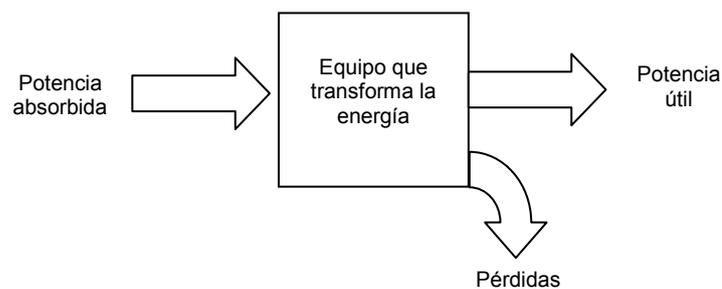


Figura 6.1 Flujo de energía

### 6.2 Pérdidas

Las mismas las podemos clasificar de acuerdo a su origen, de acuerdo al siguiente esquema:

#### Pérdidas eléctricas

Las máquinas eléctricas están formadas por circuitos eléctricos y o circuitos magnéticos. Los circuitos eléctricos se realizan mediante conductores de aluminio o cobre, los cuales presentan una resistencia eléctrica, la cual depende del material, su longitud y su sección de acuerdo a la siguiente expresión:

$$R = \rho \cdot L/S \quad [\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}]$$

Siendo:  $\rho$  : la resistividad cuyo valor a 20 °C es de 0,017 [ $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ] para el cobre y 0,0283 [ $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ] para el aluminio

L: la longitud del conductor [m]

S: la sección del conductor [ $\text{mm}^2$ ]

La resistencia cuando los conductores están trenzados, es superior debido a que la longitud real de los hilos es mayor que la del cable.

El valor de la resistencia varía con la temperatura de acuerdo a la siguiente expresión:

$$R_t = R_{20} (1 + \alpha \Delta t)$$

Siendo:  $R_t$  : La resistencia a la temperatura de trabajo [ $\Omega$ ]

$R_{20}$  : La resistencia a 20 °C [ $\Omega$ ]

$\alpha$  : Coeficiente de variación de la resistencia con la temperatura, cuyo valor es 0,004.

$\Delta t$ : Diferencia de temperatura con respecto a 20 °C

Los valores analizados de resistencia corresponden a mediciones con corriente continua.

Si la medición se efectúa con corriente alterna, el valor es un poco superior, debido a lo que se conoce como efecto piel (Skin). La densidad de corriente se incrementa hacia la superficie del conductor, debido a que las líneas de inducción magnética en el interior del conductor, causan una fuerza electromotriz inducida, la cual hace circular una corriente que se opone a la causa que la origina.

Este aumento de la resistencia, depende de la frecuencia de trabajo, siendo su aumento despreciable para frecuencias industriales (50 Hertz), salvo en conductores de gran sección en las cuales dicho incremento puede ser importante. (Mayor de 500 mm<sup>2</sup>).

Al circular corriente por los conductores que conforman los circuitos eléctricos de las máquinas, sobre la resistencia óhmica de los mismos se desarrolla potencia que se convierte en calor por efecto "Joule". Dado que estas potencias no se pueden aprovechar, se las considera como pérdidas que se denomina "pérdidas en el cobre" y cuyo valor se puede obtener como:

$$p_{Cu} = \sum R_i \cdot i_i^2$$

Tomando la sumatoria para tener en cuenta las pérdidas en todos los circuitos que compongan la máquina en cuestión.

## **Pérdidas mecánicas**

Este tipo de pérdidas se produce en aquellas máquinas que tienen partes en movimiento, y se deben a:

### **Rozamientos en los cojinetes de apoyo del rotor**

La parte en movimiento de las máquinas eléctricas reciben el nombre de rotor, y debido a la fricción entre el sistema en movimiento y la parte fija en el sistema de apoyo, se produce calor.

### **Rozamientos de las escobillas sobre el colector ó anillos**

El pasaje de corriente desde una parte fija a una móvil en las máquinas eléctricas se obtiene a través de anillos rozantes ó escobillas sobre un colector, produciéndose calor debido a la fricción.

**Rozamiento de las partes móviles**

La fricción con el aire que rodea a las máquinas, de las partes que se encuentran en movimiento, produce también calor.

**Potencia absorbida por el sistema de ventilación**

Las máquinas cuentan con un sistema de paletas adosadas al eje a los efectos de extraer el calor de las mismas, la potencia que utilizan para impulsar el aire se la considera una pérdida.

El conjunto de pérdidas analizado es función de la velocidad de rotación, dependiendo en forma directa las 3 primeras y en forma cúbica las de ventilación, lo cual se puede expresar de la siguiente forma:

$$p_m = k_1 \omega + k_2 \omega^3$$

**Pérdidas magnéticas**

Estas pérdidas son las debidas a las corrientes parásitas o de Foucault, y las de histéresis, las cuales se analizaron en el estudio de circuitos magnéticos, y cuyos valores están dados por las siguientes expresiones:

$$p_F = K_F \cdot f^2 \cdot B_{\max}^2 \text{ [w/Kg]}$$

$$p_H = K_H \cdot f \cdot B_{\max}^2 \text{ [w/Kg]}$$

La suma de estas pérdidas se las llama pérdidas en el hierro o pérdidas en el núcleo, siendo las mismas proporcionales a la inducción máxima o también al flujo magnético máximo, para una máquina ya construida, ya que la frecuencia y las dimensiones geométricas están definidas.

Por lo tanto si la tensión y frecuencia de trabajo de la máquina en cuestión están determinadas, estas pérdidas son constantes, no dependiendo de la potencia que esté entregando la misma, ya que la relación entre la tensión aplicada a una máquina eléctrica y el flujo máximo está dado por la siguiente expresión:

$$U = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{\max}$$

Donde:

U : tensión aplicada [V]

f : frecuencia de la red [Hz]

N : número de espiras de la bobina que se alimenta

$\Phi_{\max}$  : flujo magnético máximo [Wb]

El conjunto de pérdidas se obtiene de lo que se conoce como pérdidas específicas, las cuales se obtienen mediante un ensayo de un material magnético a una frecuencia de 50 Hz y con una inducción de 1 Tesla.

Las pérdidas con otro valor de inducción y frecuencia se pueden obtener en forma aproximada de la siguiente expresión:

$$p = p_0 \frac{f}{f_0} \frac{B_{\max}^2}{B_{0\max}^2}$$

Donde:  $p_0$  : Pérdidas específicas a una frecuencia de 50 Hz y una inducción de 1 T [w/Kg]

$f_0$  : Frecuencia de 50 Hz

$f$  : Frecuencia a la que se quieren determinar las pérdidas específicas

$B_{máx}^2$  : Inducción a la que se quieren determinar las pérdidas específicas

$B_{0máx}^2$  : Inducción de 1T

## Pérdidas totales

El conjunto de las pérdidas analizadas son las pérdidas totales de las máquinas eléctricas, las cuales las podemos clasificar en pérdidas fijas ó constantes, las cuales no dependen de la potencia que esté entregando la máquina en cuestión y que son las pérdidas en el hierro y las mecánicas (ya que la velocidad de los equipos permanece prácticamente constante con el estado de carga de los mismos), y las pérdidas variables, como ser las pérdidas en el cobre, las cuales dependen de la carga que entregan en forma cuadrática con la misma.

$$p_{\text{totales}} = p_{\text{Fijas}} + p_{\text{variables}} = (p_{Fe} + p_m) + p_{Cu}$$

Dado que las máquinas eléctricas trabajan con una tensión de alimentación fija (depende de la red de suministro eléctrico), la potencia que entregan las mismas es función de la corriente, o sea que:

$$S = 1,73. U. I = k_1. I \quad [\text{VA}] \text{ Sistemas trifásicos}$$

$$S = U. I = k_2. I \quad [\text{VA}] \text{ Sistemas monofásicos}$$

En la figura 6.2 se observa la gráfica en la que podemos ver la variación de las pérdidas en función de la "carga" o de la corriente.

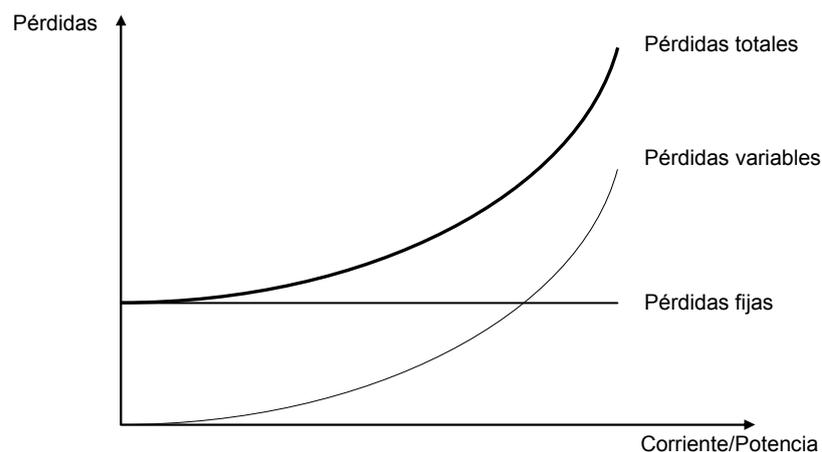


Figura 6.2 Variación de las pérdidas en función de la carga de la máquina

### 6.3 Rendimiento

Se define como rendimiento de un equipo a la relación entre la potencia (activa) que entrega (potencia útil) a la potencia (activa) que absorbe (potencia absorbida), que en forma porcentual está dada por la siguiente expresión:

$$\eta_{\%} = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{absorbida}}} 100$$

De aquí definiremos dos formas de indicar el rendimiento:

- Rendimiento medido: es aquel que se calcula por medio de la medición de la potencia activa entregada y la potencia activa absorbida, cuya expresión es la que vimos:

$$\eta_{\%} = \frac{P_{\text{entregada}}}{P_{\text{absorbida}}} 100$$

En este caso, si el rendimiento tiene un valor elevado, los errores cometidos por los instrumentos, pueden llegar a dar un resultado mayor a 100, si el error del instrumento que mide potencia entregada es en mas y el que mide potencia absorbida es en menos

- Rendimiento calculado: es aquel cuyo cálculo se efectúa mediante la obtención de las pérdidas de la máquina y el mismo es más exacto, ya que el error cometido es en un solo sentido, siendo las expresiones utilizadas las siguientes:

$$\eta_{\%} = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{útil}} + \text{pérdidas}} 100$$

$$\eta_{\%} = \frac{P_{\text{absorbida}} - \text{pérdidas}}{P_{\text{absorbida}}} 100$$

#### Factor de carga

Se define el factor de carga de una máquina como la relación entre la potencia aparente que está entregando, a la potencia aparente nominal de la misma.

$$\text{Factor de carga} = f_c = \frac{S}{S_N} = \frac{U_N \cdot I}{U_N \cdot I_N} = \frac{I}{I_N}$$

Utilizando el factor de carga obtenemos:

$$S = S_N \cdot f_C$$

$$I = I_N \cdot f_C$$

$$P_N = S_N \cdot \cos \varphi$$

$$P = S_N \cdot f_C \cdot \cos \varphi$$

$$p_{CuN} = R \cdot I_N^2$$

$$p_{Cu} = R \cdot I^2$$

$$p_{Cu} = f_C^2 \cdot p_{CuN}$$

Luego el rendimiento nos queda expresado en función del factor de carga como:

$$\eta\% = \frac{S_N \cdot f_C \cdot \cos \varphi}{S_N \cdot f_C \cdot \cos \varphi + p_F + f_C^2 \cdot p_{CuN}} 100$$

La curva típica del rendimiento de una máquina en función de la carga o del factor de carga es la que se muestra en la figura 6.3

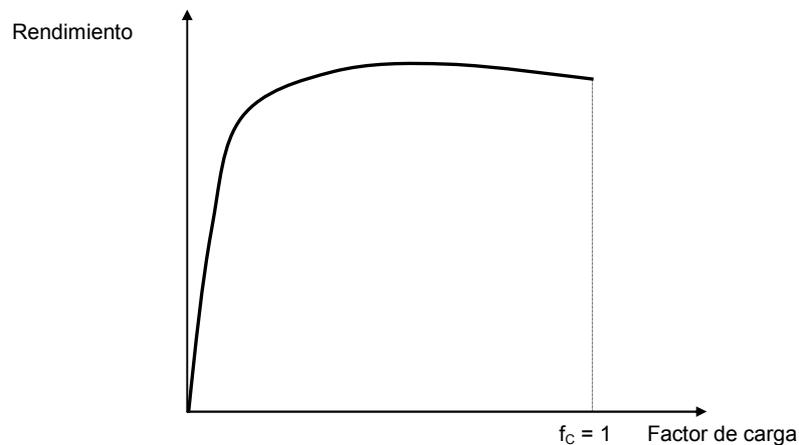


Figura 6.3 Curva del rendimiento de una máquina en función de la carga

Vemos que la curva crece, pasa por un valor máximo y luego decrece. El valor máximo se produce para un estado de carga que se puede obtener, derivando la expresión del rendimiento con respecto al factor de carga e igualando a cero.

Su valor se produce cuando las pérdidas fijas son iguales a las pérdidas variables, o sea:

$$p_F = f_{C\eta\max}^2 \cdot p_{CuN} \quad \text{Con lo cual el factor de carga está dado por:}$$

$$f_{C\eta\max} = \sqrt{\frac{p_F}{p_{CuN}}}$$

## 6.4 Calentamiento y enfriamiento de las máquinas eléctricas

### Calentamiento

Las pérdidas de energía de cualquier máquina se convierten en calor, originándole una elevación de la temperatura que depende de la capacidad de absorción de calor, de los distintos materiales que la componen, así como la facilidad con que el calor puede ser conducido, radiado ó disipado de cualquier otra forma.

La temperatura se mantendrá estacionaria cuando la proporción en que se genera y se disipa el calor sea el mismo.

La temperatura alcanzada por las diversas partes de una máquina es variada, ya que depende del material, y la facilidad de enfriamiento, por lo tanto el estudio se efectúa como si la máquina fuera un cuerpo homogéneo, o sea como un solo material con características resultantes al promedio de todas las características de las diversas partes intervinientes.

Si tenemos una máquina, la cual se encuentra a la temperatura del ambiente que la rodea, y la ponemos en funcionamiento, las pérdidas originadas, generan una cantidad de calor, que ocasionan que el cuerpo eleve su temperatura y además como entre la superficie externa del mismo y el medio ambiente se presenta un salto de temperatura, el mismo ocasiona una disipación de calor hacia el ambiente.

Este proceso continua hasta que la máquina toma una temperatura tal que todo el calor generado por las pérdidas es emitido hacia el medio ambiente, siendo esta la temperatura de "régimen" o de "servicio".

La ecuación diferencial de equilibrio está dada por:

$$dQ = q \cdot dt = G \cdot c \cdot d\theta + S \cdot h \cdot \theta \cdot dt$$

En la misma cada término representa:

$dQ$  : Es la cantidad de calor originado por las pérdidas [Kcal]

$q$  : Calor aportado por las pérdidas en la unidad de tiempo [Kcal/s]

$dt$  : Intervalo de tiempo considerado [s]

$G$  : Peso total del cuerpo [Kg]

$c$  : Calor específico del cuerpo [Kcal/Kg. °C]

$d\theta$  : Incremento de la temperatura en el intervalo de tiempo considerado [°C]

$S$  : Superficie emisora del cuerpo [ $m^2$ ]

$h$  : Coeficiente de emisión del cuerpo [Kcal/s .  $m^2$  . °C]

$\theta$  : Sobreelevación de la temperatura con respecto a la temperatura ambiente [°C]

$\theta_L$  : Sobreelevación máxima de la temperatura con respecto a la temperatura ambiente [°C]

$t_a$  : Temperatura ambiente [°C]

$t_L$  : temperatura límite del cuerpo [°C]

$G \cdot c \cdot d\theta$  representa la cantidad de calor que incrementa la temperatura del cuerpo

$S \cdot h \cdot \theta \cdot dt$  representa la cantidad de calor eliminado al ambiente

El proceso es tal que la máquina estando en funcionamiento, debido a sus pérdidas, va elevando su temperatura interna y además transfiere al medio ambiente parte del calor generado.

En un intervalo de tiempo "dt" las pérdidas habrán entregado una cantidad de calor "dQ = q · dt", de la cual una parte incrementa la temperatura del cuerpo en una cantidad "dθ" y otra parte sale al ambiente.

Cuando se alcanza la temperatura de régimen todo el calor se elimina al ambiente, con lo que se cumple:

$$d\theta = 0 \quad \text{y} \quad \theta = \theta_L \quad \text{con lo cual nos queda:}$$

$$q \cdot dt = S \cdot h \cdot \theta_L \cdot dt$$

$$\theta_L = \frac{q}{S \cdot h}$$

De aquí surge que la **sobreelevación máxima con respecto a la temperatura ambiente es proporcional a las pérdidas.**

Para resolver la ecuación diferencial, dividamos los términos de la misma por "S · h".

$$\frac{q}{S \cdot h} dt = \frac{G \cdot c}{S \cdot h} d\theta + \theta dt$$

Llamaremos al término :  $\frac{G \cdot c}{S \cdot h} = T$  Constante de tiempo [s]

Reemplazando nos queda:

$$\theta_L dt = T \cdot d\theta + \theta \cdot dt$$

$$dt = \frac{T}{\theta_L - \theta} d\theta \quad \text{Resolviendo :}$$

$$t = -T \ln (\theta_L - \theta) + \text{Cte}$$

Para obtener la constante, tomemos las condiciones iniciales que son:  $t = 0 \quad \theta = 0$ , con lo que nos queda:

$$\text{Cte} = T \ln \theta_L \quad \text{y reemplazando:}$$

$$t = -T \ln (\theta_L - \theta) + T \ln \theta_L$$



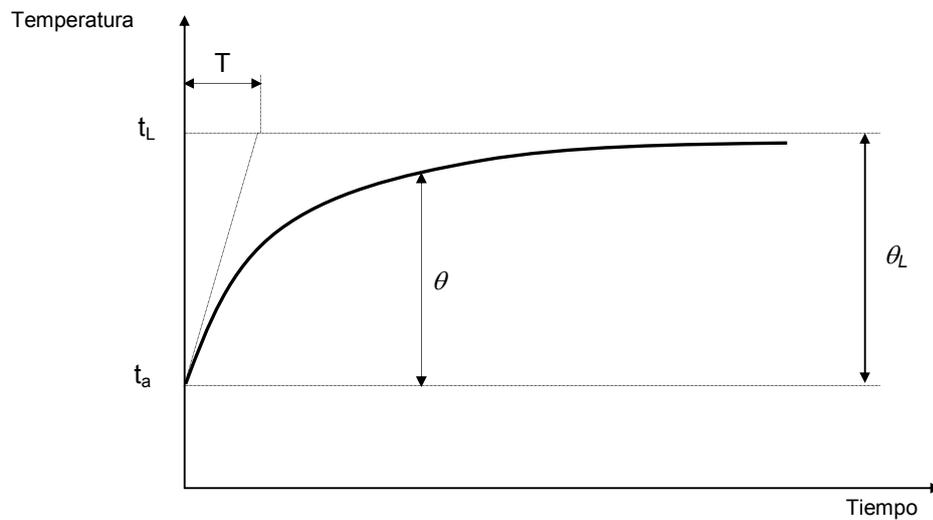


Figura 6.5 Determinación gráfica de la constante de tiempo

## Enfriamiento

Admitiendo que la máquina se encuentra a temperatura máxima y en ese momento se la desconecta, la misma dejará de producir pérdidas, por lo tanto se cumple:

$$0 = G \cdot c \cdot d\theta + S \cdot h \cdot \theta \cdot dt$$

$$dt = \frac{G \cdot c}{S \cdot h} \frac{d\theta}{\theta} = -T \frac{d\theta}{\theta}$$

$$t = -T \ln \theta + \text{cte}$$

$$\text{Para } t = 0 \quad \theta = \theta_L$$

$$\text{Cte} = T \ln \theta_L$$

$$t = -T \ln \theta + T \ln \theta_L$$

$$t = T \ln \frac{\theta_L}{\theta}$$

$$\theta = \theta_L e^{-\frac{t}{T}}$$

En la figura 6.6 se observa la curva característica

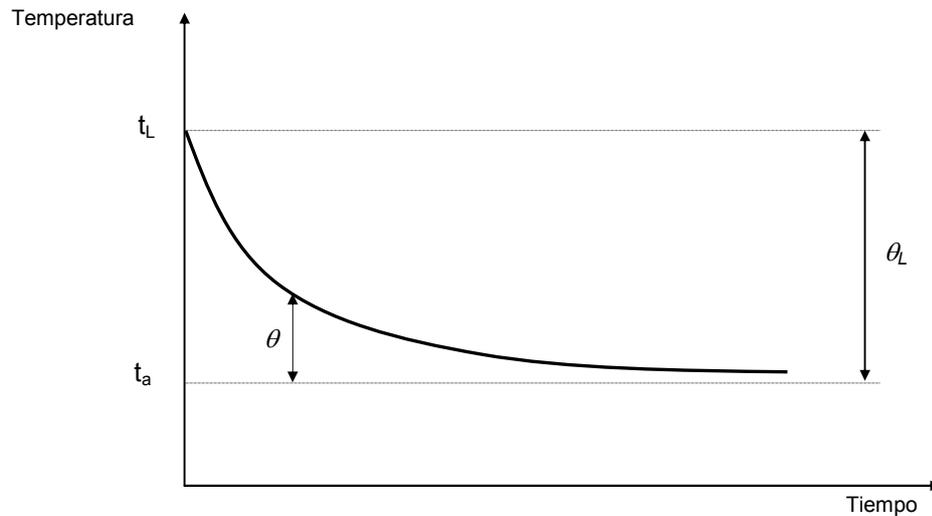


Figura 6.6 Curva de enfriamiento de una máquina

## 6.5 Temperatura límite

La temperatura máxima a que puede llegar una máquina está condicionada por el material aislante de la misma, ya que sobrepasando la temperatura de trabajo del aislante, el mismo se degrada y pierde sus propiedades aislantes y por lo tanto se acorta la vida útil, o bien se destruye si la temperatura toma un valor muy alto.

Luego podemos definir la temperatura límite, como la máxima temperatura que puede soportar el aislamiento de una máquina en forma continua sin perjudicarse.

La norma IRAM 2180, indica los límites de temperatura de los distintos aislantes eléctricos que se emplean en la práctica.

## 6.6 Potencia nominal

Es la potencia que la máquina puede desarrollar, cuando la tensión, corriente, velocidad, clase de servicio, etc., son las nominales, o sea aquella para las cuales fue construida, sin que la sobre elevación de la temperatura en sus diversos órganos, alcance o sobrepase, sus correspondientes temperaturas límites.

## 6.7 Tipo de servicio

Toda máquina puede ser empleada en diferentes formas, a saber:

### Servicio continuo

Es cuando la máquina funciona a régimen nominal durante un tiempo ilimitado, llegando la temperatura a la límite, de acuerdo a lo que se muestra en la figura 6.7

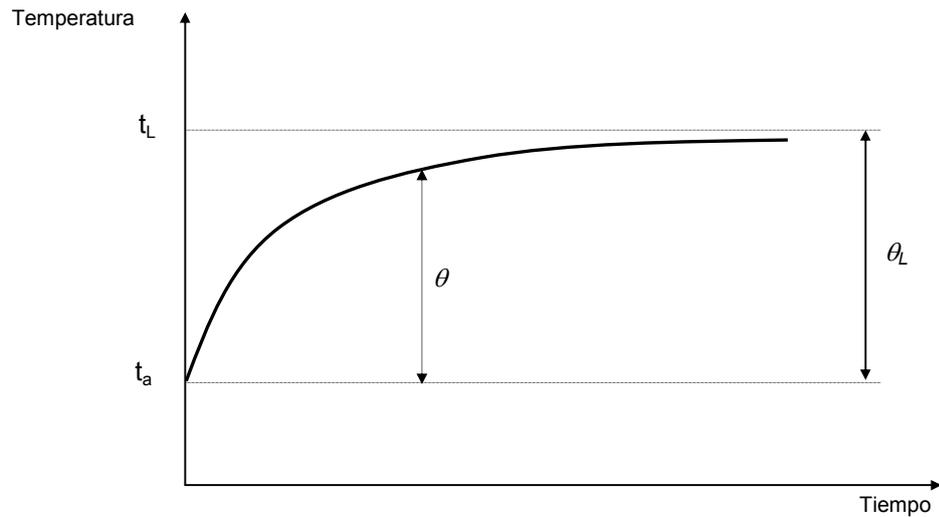


Figura 6.7 Curva de calentamiento para una máquina funcionando en servicio continuo

### Servicio temporario

Es aquel en que la máquina funciona a régimen nominal durante un lapso de tiempo determinado y durante el periodo de reposo, su temperatura desciende a la del medio ambiente, de acuerdo al gráfico de la figura 6.8.. Como ejemplo podemos tomar el motor de arranque de los automóviles.

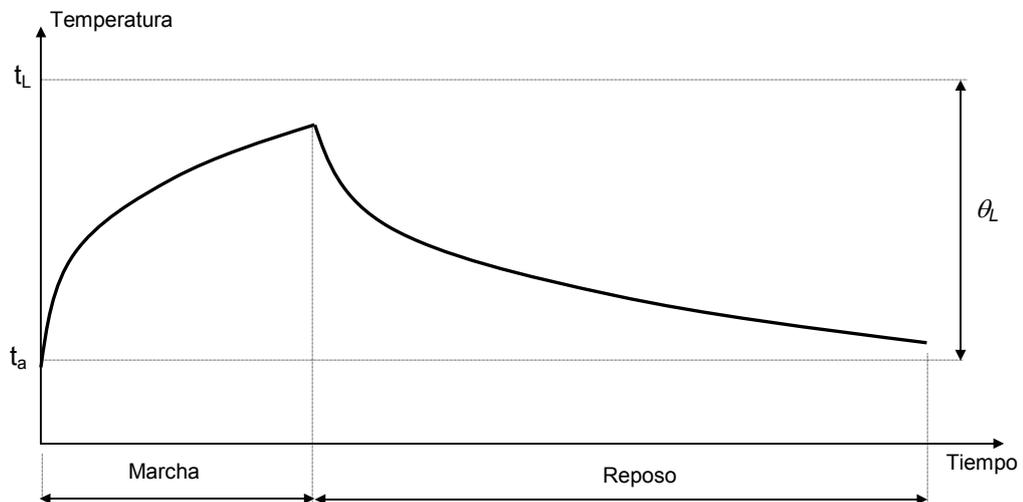


Figura 6.8 Curva de variación de la temperatura en servicio temporario

### Servicio intermitente

Es cuando la máquina funciona a régimen nominal durante un lapso determinado, seguido de un lapso de reposo, también determinado, durante el cual su temperatura no desciende a la del medio ambiente, según se observa en la figura 6.9. Como ejemplo podemos tomar el servicio de un ascensor.

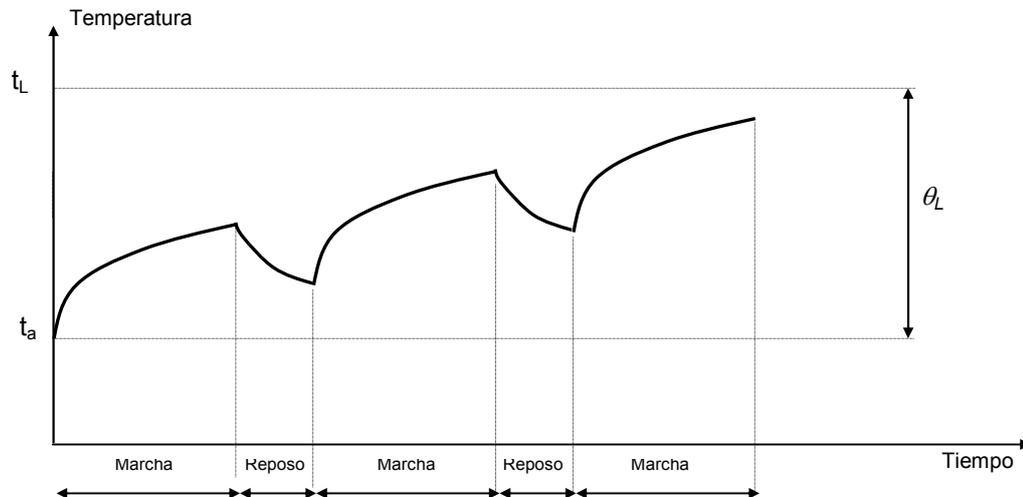


Figura 6.9 Curva de variación de temperatura para servicio intermitente

## 6.8 Sobrecarga

Las máquinas construidas para servicio continuo, pueden suministrar durante un lapso determinado, una potencia superior a la nominal sin perjudicarla, dependiendo dicho lapso, de las condiciones de trabajo anteriores al realizar la sobrecarga (Plena potencia, media potencia, vacío, etc). El lapso mencionado es tal que la máquina no llegue a superar su temperatura admisible.

Dado que en esta situación las pérdidas son superiores, el tiempo para alcanzar la temperatura límite es inferior al que tardaría la máquina en condiciones nominales.

Por ejemplo en la figura 6.10 se presenta el caso de una máquina que se sobrecarga, si la misma se encuentra a temperatura ambiente.

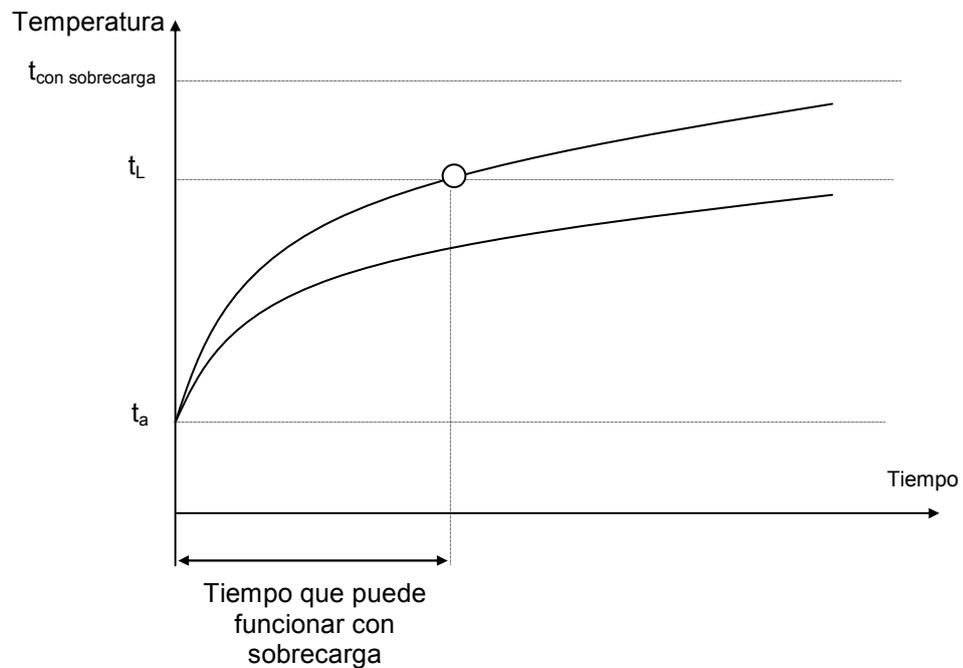


Figura 6.10 Funcionamiento con sobrecarga