

Calentamiento y enfriamiento de las máquinas eléctricas

Alfredo Álvarez García

Mayo de 2008

1 Calentamiento

La energía perdida en una máquina eléctrica durante el proceso de transformación es, como hemos dicho, una parte de la energía absorbida que no puede ser transformada.

En este sentido, abstrayendo de la energía absorbida la que se transforma en útil –y para la cuál la máquina eléctrica, termodinámicamente considerada, no es sino un canal de transmisión que no se siente afectado por ella–, podemos esquematizar el comportamiento termodinámico de la máquina como aparece en la Fig.1, en la que ponemos de manifiesto las variaciones energéticas que se producen en un periodo de tiempo corto Δt , en una máquina que está en un ambiente a temperatura θ_o .

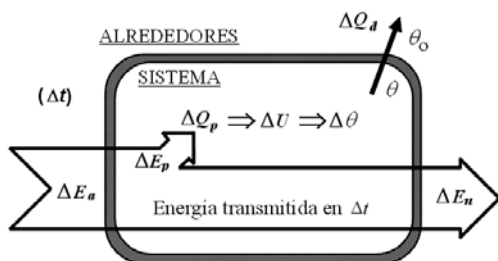


Fig. 1. Esquema termodinámico de la máquina eléctrica

La ecuación del primer principio de la termodinámica se puede escribir, con el criterio de signos señalado en la figura, como:

$$\Delta U = \Delta E_p - \Delta Q_d \quad [1]$$

en donde:

- ΔU : Aumento de la energía interna del sistema (la máquina) en un intervalo de tiempo Δt .
- ΔE_p : Energía de pérdidas recibida por el sistema durante Δt .
- ΔQ_d : Calor cedido a los alrededores (medio ambiente) durante Δt .

Toda la energía de pérdidas ΔE_p (ya sea debida a rozamientos, disipación en resistencias o pérdidas del circuito magnético) es recibida por el sistema en forma de calor. Así, el concepto *pérdidas* podría expresarse de otra manera diciendo que *es la energía que se convierte inevitablemente en calor durante el proceso de transformación*.

Si llamamos ΔQ_p a la cantidad de calor procedente de las pérdidas en Δt , la ecuación [4] puede verse como:

$$\Delta Q_p = \Delta U + \Delta Q_d, \quad [2]$$

que vista así viene a decir que del calor proveniente de las pérdidas, una parte se invierte en aumentar la energía interna de la máquina, lo que aumenta su temperatura (el proceso debe ser considerado a presión y volumen constante), y otra parte se disipa en el medio ambiente debido, precisamente, a la diferencia de temperatura establecida entre la máquina y sus alrededores (*principio cero* de la termodinámica).

Matemáticamente, los términos de la ecuación [2] se pueden expresar en función de la temperatura de la máquina y del tiempo como sigue:

$$\Delta U = M c \Delta \theta, \quad [3]$$

en donde M es la masa de la máquina y c su calor específico, y

$$\Delta Q_p = P_p \Delta t, \quad [4]$$

$$\Delta Q_d = K S (\theta - \theta_o) \Delta t, \quad [5]$$

en donde K es el *coeficiente de enfriamiento* o *coeficiente de emisión térmica* y S es la superficie de contacto entre la máquina y el ambiente.

Estas ecuaciones nos enseñan que, en un intervalo de tiempo dado, cuanto mayor es la diferencia de temperatura entre la máquina y el ambiente, mayor es el calor cedido a éste y menor,

en consecuencia, el aumento de energía interna y el consiguiente aumento de temperatura. Así, el sistema aumentará la temperatura cada vez más despacio y se alcanzará el equilibrio cuando la diferencia de temperatura entre el sistema y el ambiente sea tal que el calor disipado alcance en magnitud al que aparece por pérdidas.

El proceso general puede expresarse matemáticamente sustituyendo las eccs. [4] y [5] en [2]. Si, para ello, utilizamos la notación diferencial, queda, tras agrupar términos:

$$[P_p - K S (\theta - \theta_o)] dt = M c d\theta \quad [6]$$

que es una ecuación diferencial de variables separables en la que nos interesa sustituir P_p en función de la temperatura final θ_F que alcanzará el sistema al final del proceso. Ésta es la temperatura de equilibrio térmico. Para calcularla basta darse cuenta de que, como en el equilibrio no hay variación de la energía interna, todo el calor de pérdidas debe disiparse al ambiente (véase [2]). La temperatura final θ_F a la que se alcanza dicho equilibrio verifica (sustituyendo [4] y [5] en [2], con $\Delta U = 0$):

$$P_p = K S (\theta_F - \theta_o) \quad [7]$$

Sustituyendo [7] en [6] resulta:

$$K S [(\theta_F - \theta_o) - (\theta - \theta_o)] dt = M c d\theta,$$

y separando variables podemos escribir:

$$\frac{K S}{M c} dt = \frac{1}{\theta_F - \theta} d\theta.$$

Si llamamos:

$$\frac{M c}{K S} \equiv \tau$$

e integramos, resulta la llamada *curva de calentamiento* de la máquina que, tras calcular la constante de integración con la condición inicial de que en $t=0$ la temperatura sea θ_o , tiene la siguiente expresión:

$$\theta - \theta_o = (\theta_F - \theta_o) [1 - e^{-t/\tau}] \quad [8]$$

La Fig. 2 representa esta función, en donde τ es, naturalmente, la constante de tiempo de la curva, esto es, el tiempo que tardaría la máquina en alcanzar la temperatura máxima, si su temperatura aumentase con la rapidez que lo hace en el instante

inicial (con la misma pendiente). A esta curva se le llama *curva de calentamiento* de la máquina.

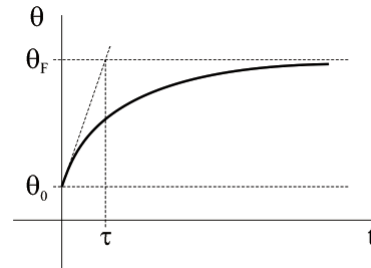


Figura 2: Curva de calentamiento de una máquina eléctrica.

A la vista de la ecuación [7] y sabiendo que las pérdidas de la máquina aumentan con la potencia entregada, podemos afirmar que la temperatura final de la máquina es tanto mayor cuanto mayor sea la carga. Esta situación se pone de manifiesto en las curvas de calentamiento de la Fig. 3.

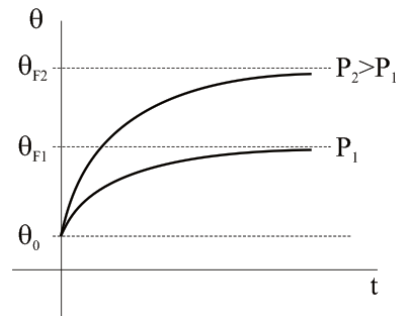


Figura 3: Curvas de calentamiento de una máquina eléctrica a diferentes potencias.

La máxima temperatura a la que la máquina puede trabajar es la temperatura de combustión de sus aislantes. A esta temperatura se le llama *temperatura límite* de la máquina y se la denota por θ_L . La carga nominal, P_n , en éste sentido, se puede redefinir como aquella que hace que la máquina alcance, funcionando *ininterrumpidamente*, la temperatura θ_L . Por tanto, θ_L será la asíntota de la curva de calentamiento correspondiente a la potencia nominal, P_n , como se ilustra en la Fig. 4. También se observa en dicha figura que una máquina puede trabajar por encima de su régimen de plena carga, es decir, en *sobrecarga* (P_2 , por ejemplo), siempre y cuando no se deje que supere su temperatura límite θ_L . En efecto, la máquina puede hacerse trabajar a potencia $P_2 > P_n$ durante un tiempo no superior a t_L , a partir del cual se quemaría.

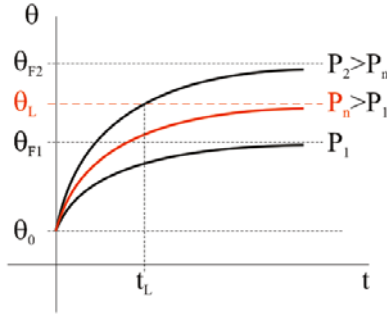


Figura 4: Límite de calentamiento de la máquina y trabajo en sobrecarga.

Cuando la máquina, por el contrario, se hace funcionar en vacío, alcanza su temperatura de funcionamiento más baja debido a que las pérdidas en este régimen son mínimas al haber desaparecido las que dependen de la carga. La temperatura de funcionamiento en vacío no tiene gran importancia en el funcionamiento de una máquina industrial normal; por otro lado, difiere de la temperatura ambiente θ_o muy poco en comparación con las temperaturas que se alcanzan con cargas altas. Por estas razones, en adelante no se hará distinción entre temperatura de vacío y temperatura ambiente, notándolas, ambas, por θ_o .

2 Enfriamiento

Cuando una máquina está trabajando a una cierta temperatura θ_i mayor que la temperatura ambiente θ_o , y es desconectada (o se deja en vacío, que para este razonamiento, como ya se ha apuntado, da lo mismo) su temperatura comenzará a descender hasta alcanzar el equilibrio térmico con el ambiente. La evolución que sigue la temperatura a lo largo del tiempo se llama *curva de enfriamiento*.

El proceso de enfriamiento se puede describir matemáticamente a partir de [2] despreciando las pérdidas:

$$\Delta U = -\Delta Q_d \quad [9]$$

Sustituyendo [3] y [5] en [9] y escribiéndola en forma diferencial, tenemos:

$$M c d\theta = -K S (\theta - \theta_o) dt.$$

Separando variables:

$$\frac{1}{\theta - \theta_o} d\theta = -\frac{K S}{M c} dt.$$

en donde, como recordamos:

$$\frac{M c}{K S} \equiv \tau$$

Si integramos con la condición inicial de que en $t = 0$ la temperatura es θ_i , obtenemos la curva de enfriamiento de la máquina:

$$\theta - \theta_o = (\theta_i - \theta_o) e^{-t/\tau}$$

El aspecto de la curva es el que se representa en la Fig. 5.

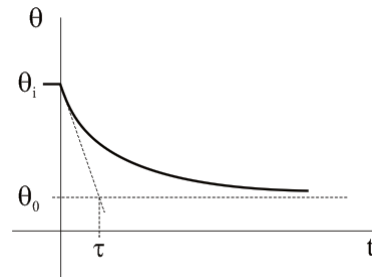


Figura 5: Curva de enfriamiento de una máquina eléctrica.

Bibliografía

Cortes Cherta, M., *Curso moderno de Máquinas Eléctricas*, Editores Técnicos Asociados, S.A., Barcelona, 1.990.