CÁLCULO DE LA POTENCIA DE LOS MOTORES

Existen fórmulas sencillas que nos facilitan la elección de un motor, en función de la máxima potencia que se pretende desarrollar, esto da lugar a que para el servicio normal resulte una potencia exagerada, ya que el valor máximo se requiere raramente.

Claro que hay que preveer la potencia con amplitud para eliminar averías por calentamiento exagerado, pero también hay que tener en cuenta que el precio del motor resulta mayor cuanto mayor sea la potencia y que las dificultades de regulación también aumentan al aumentar la potencia. Por todo esto la determinación de la potencia deberá ser lo más exacta posible.

No escogeremos el motor en función de la potencia máxima a desarrollar sino de acuerdo con el término medio del valor de la carga. La carga máxima solo la utilizaremos como comprobación de que el motor escogido tiene un par motor suficiente para los casos en que la carga pueda alcanzar su valor máximo.

Antes de determinar la potencia debe escogerse el **tipo de motor en función del tipo de servicio** que vaya a realizar; el primer paso en la elección del motor consistirá en determinar si el motor debe ser: abierto protegido o cerrado.

1. **Construcción abierta:** es más barata y tiene la ventaja de una fácil conservación ya que inducido, cojinetes y escobillas son fácilmente accesibles. El módulo de inercia es mínimo. Estos motores no se pueden utilizar ni en intemperie ni en atmósferas poco favorables (húmedas o polvorientas).

2. **Construcción protegida:** mismas ventajas que la construcción abierta, se suele proteger a los motores contra goteo, se pueden emplear en intemperie si la protección contra la lluvia es total incluso suponiendo una dirección de lluvia casi horizontal.

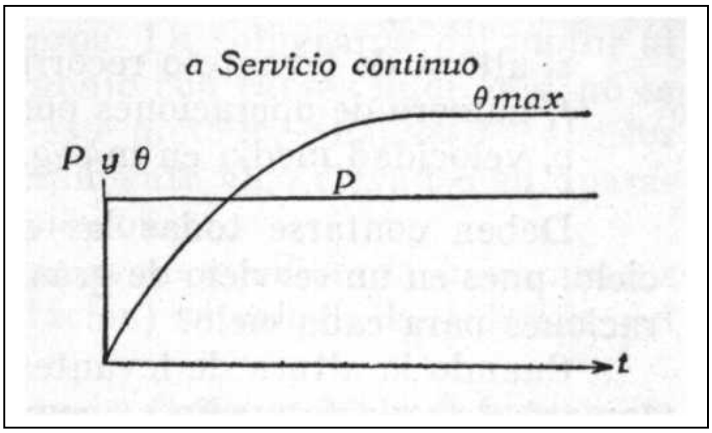
3. **Construcción cerrada:** ideales para intemperie o interiores con atmósferas desfavorables (polvorientas, húmedas o cargadas de ácidos), lugares donde puedan tener lugar proyecciones de agua u objetos o siempre que se requiera una construcción especialmente robusta.

Para la **elección del motor** deberá también tenerse en cuenta el número de revoluciones, habrá que elegir velocidades normales de serie, las velocidades anormales encarecen la instalación y dificultan posteriormente las sustituciones. Como regla general la potencia de un motor es tanto más grande cuanto mayor sea el número de revoluciones.

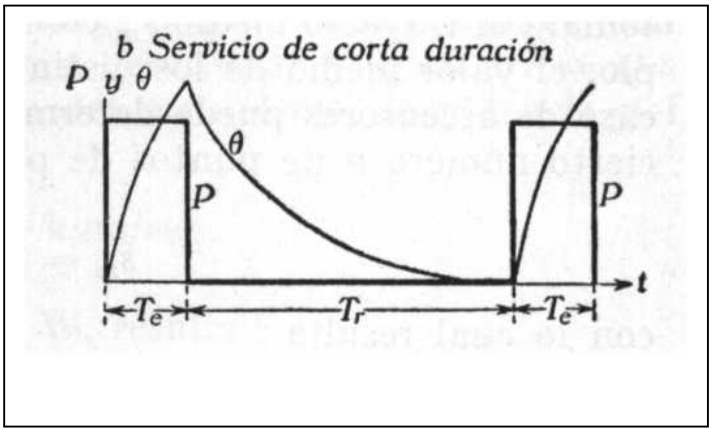
Para la **elección del tamaño** de los motores deberá tenerse en cuenta el tipo de servicio que van a realizar, según la normativa para máquinas eléctricas, se distinguen las tres formas de trabajo siguientes:

Dpto. Ing. Eléctrica y Energética
Universidad de Cantabria
Gerardo Díez Cagigal
telef: 942 20 13 84

1. **Servicio permanente o continuo:** El motor está funcionando constantemente o por lo menos durante algunas horas con plena carga, alcanzando así su temperatura final, T_{max}. Esta temperatura no debe sobrepasar el límite fijado por la normativa.



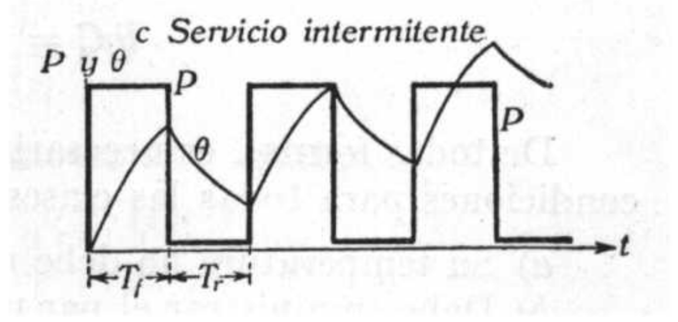
2. **Servicio de corta duración:** La carga actúa con toda intensidad durante un corto tiempo, a este estado le sigue una marcha en vacío o la desconexión, que da tiempo al enfriamiento del motor. La potencia nominal en este tipo de servicio será aquella que puede suministrar el motor durante el tiempo convenido sin calentamiento excesivo (Por ejemplo 50 Kw. en 15 min.).



3. **Servicio intermitente:** Alternan el tiempo de funcionamiento que llamaremos $\mathbf{t_f}$, y el tiempo de reposo que llamaremos $\mathbf{t_r}$, el tiempo de ciclo que llamaremos

Dpto. Ing. Eléctrica y Energética
Universidad de Cantabria
Gerardo Díez Cagigal
telef: 942 20 13 84

$\mathbf{t_c}$, será la suma de ambos ($\mathbf{t_c= t_f+ t_r}$), dicho $\mathbf{t_c}$ no debe sobrepasar de un tiempo **t** que permita al motor enfriarse completamente, de esta forma la temperatura va aumentando escalonadamente hasta el valor final que tardará mas tiempo en alcanzarse que en el régimen continuo.



En este tipo de servicio una magnitud muy importante es el tiempo de conexión **TC,** que nos da la relación entre el tiempo de funcionamiento y el tiempo de ciclo.

$$TC = \frac{t_f}{t_f + t_r} * 100 \quad (\%)$$

El valor exacto de TC solo puede determinarse mediante un diagrama de trabajo. Para aparatos de elevación puede aproximarse el valor de TC con la siguiente fórmula:

$$TC = \frac{f \cdot s}{36 \cdot v}$$

siendo:

s, altura de elevación o recorrido en m. en cada ciclo.

f, número de operaciones por hora.

v, velocidad media en m/seg.

Deben contarse todas las operaciones realizadas durante cada ciclo, así por ejemplo en un servicio de grúa se estarán efectuando varias operaciones por cada ciclo.

Cuando la altura de elevación o la longitud del trayecto varían, se toma $\mathbf{s_m}$ (trayecto medio) como valor de **s**; en las grúas por ejemplo $\mathbf{s_m}$ será el valor medio de los distintos

Dpto. Ing. Eléctrica y Energética
Universidad de Cantabria
Gerardo Díez Cagigal
telef: 942 20 13 84

levantes durante un ciclo, en el caso de ascensores puede determinarse aproximadamente $\mathbf{s_m}$ para un cierto número **n** de puntos de parada, mediante la fórmula:

$$s_m = \frac{n \cdot s}{2 \cdot (n-1)}$$

con lo cual resulta:

$$TC = \frac{f \cdot n \cdot s}{72 \cdot v \cdot (n-1)}$$

El motor para todas las clases de servicio debe cumplir siempre que:

- Su temperatura nunca debe rebasar la fijada por los reglamentos.
- Debe suministrar el par motor requerido por el dispositivo que se pretende accionar.

Según el reglamento:

- **UN MOTOR PARA SERVICIO CONTINUO**
  Debe suministrar un par máximo: $M_{max}=1,6*M_n$
- **UN MOTOR PARA SERVICIO INTERMITENTE**
  Debe suministrar un par máximo: $M_{max}=2*M_n$

PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA POTENCIA DEL MOTOR

\- exactitud +

a. Cálculo de la potencia para plena carga.
b. Determinación de la potencia mediante diagrama de trabajo teórico o normalizado.
c. Determinación de la potencia mediante diagrama de trabajo exacto.

Estos procedimientos están ordenados según el grado de exactitud de los resultados.

Dpto. Ing. Eléctrica y Energética
Universidad de Cantabria
Gerardo Díez Cagigal
telef: 942 20 13 84

a. CÁLCULO DE LA POTENCIA DEL MOTOR PARA PLENA CARGA

No es un método muy preciso, haciendo una comparación con otros métodos más exactos de determinación de la potencia, se observa que con este método se obtienen valores elevados en aparatos de elevación y algo escasos en vehículos (traslación).

A.1. APARATOS DE ELEVACIÓN SIN CONTRAPESO

El problema que se plantea es el de elevar una carga de **Q [Kg.]**, desplazándose con una velocidad de **v [m/seg.];** la potencia que debe desarrollar la máquina en esta situación es $P = Q \cdot v$ **[Kg m/seg.]**. Si llamamos ηal rendimiento de la máquina, la potencia del motor se puede escribir como:

$$P = \frac{Q \cdot v}{\eta} \quad [Kg \cdot m / seg]$$

como 1 **[Kg m/seg.]** equivale a 9,81 **[w.]**, resulta:

$$P = \frac{Q \cdot v}{102 \cdot \eta} \quad [Kw.]$$

el par motor será igual a:

$$P = M \cdot n \qquad\qquad P = M \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot n$$

$$M = \frac{P}{n \cdot \frac{\pi}{30}} \quad [Nw \cdot m.] = \frac{P}{n \cdot \left(\frac{\pi}{30} \cdot 9{,}81 \right)} \quad [m \cdot Kg.]$$

$$M = 975 \cdot \frac{P}{n} \quad [m \cdot Kg.] = 9{,}55 \cdot \frac{Q \cdot v}{n \cdot \eta} \quad [m \cdot Kg.]$$

donde **P** es la potencia del motor en [Kw.] y **n** es la velocidad de giro en [r.p.m.]

A.2. APARATOS DE ELEVACIÓN CON CARGA EQUILIBRADA

Ascensores por ejemplo, en los que la carga aparece equilibrada con otra que se denomina contrapeso.

Potencia del motor: $P = \frac{Q \cdot v}{102 \cdot \eta} \cdot (1 - a)$

Dpto. Ing. Eléctrica y Energética
Universidad de Cantabria
Gerardo Díez Cagigal
telef: 942 20 13 84

Par motor: $M = 9{,}55 \cdot \dfrac{Q \cdot v}{n \cdot \eta} \cdot (1 - a)$

siendo $a = \dfrac{G_1 - G}{Q}$ el factor de equilibrado de la carga.

G_1: representa el contrapeso.

G: representa el peso muerto del lado de la carga (en un ascensor, el peso de la cabina + el marco de suspensión).

A.3. MECANISMO DE TRASLACIÓN

Siendo **G** el peso total de las masas en movimiento y **R** $\left[\dfrac{Kg}{Kg}\right]$ la resistencia de rodamiento, el esfuerzo de tracción necesario, será igual a:

$$\mathrm{F_t} = \mathrm{G} \cdot \mathrm{R} \quad [Kg.]$$

Suponiendo una velocidad de desplazamiento **v [m/seg.]**, se obtienen las fórmulas siguientes:

Potencia del motor: $P = \dfrac{F_t \cdot v}{102 \cdot \eta} \quad [Kw.]$

Par motor: $M = 975 \cdot \dfrac{P}{n} = 9{,}55 \cdot \dfrac{F_t \cdot v}{n \cdot \eta} \quad [m \cdot Kg.]$

Después de calcular la Potencia y el par del motor con las fórmulas anteriores, queda comprobar si la potencia del motor es suficiente para las máximas condiciones de carga; por ejemplo habría que comprobar el par de arranque para una carga de prueba.

Ejemplo

Sea una carga de 1000 Kg. que debe ser elevada con una velocidad v=1 [m/seg.]. El rendimiento del mecanismo es η=0,85 y la velocidad de giro es de n=850 r.p.m. Calcular la potencia y el par que desarrollará el motor.

Potencia: $P = \dfrac{Q \cdot v}{102 \cdot \eta} = \dfrac{1000 \cdot 1}{102 \cdot 0{,}85} = 11{,}5 \quad [Kw.]$

Dpto. Ing. Eléctrica y Energética
Universidad de Cantabria
Gerardo Díez Cagigal
telef: 942 20 13 84

Par motor: $$M = 9{,}55 \cdot \frac{Q \cdot v}{n \cdot \eta} = 9{,}55 \cdot \frac{1000 \cdot 1}{850 \cdot 0{,}85} = 13{,}2 \ \left[m \cdot Kg. \right]$$

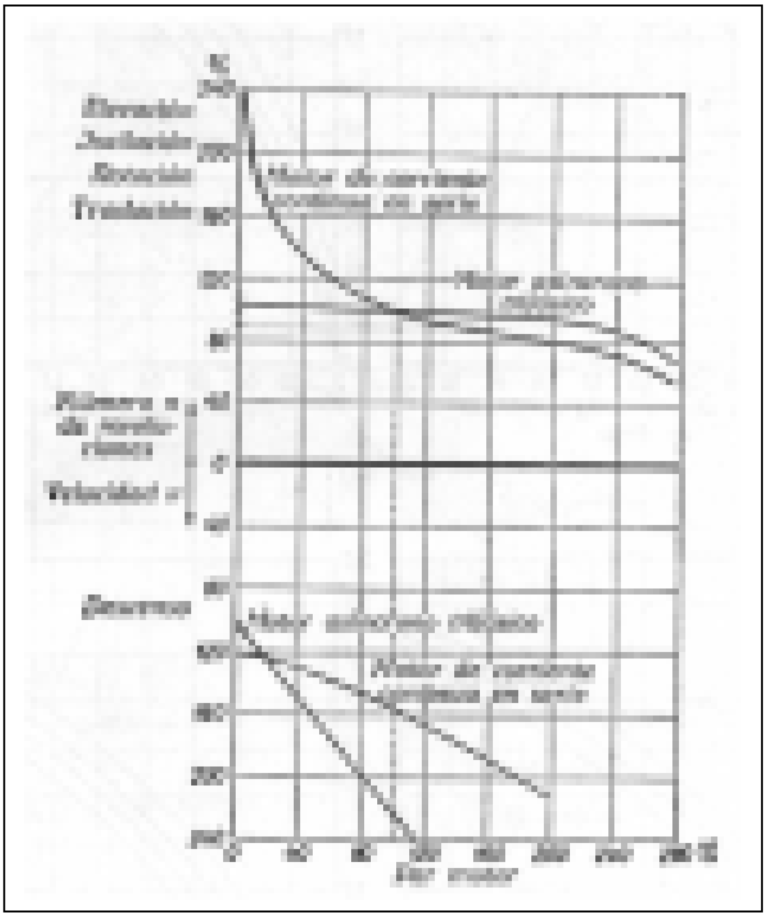
b. CÁLCULO DE LA POTENCIA DEL MOTOR TOMANDO COMO BASE UN DIAGRAMA DE TRABAJO TEÓRICO O NORMALIZADO

Este método se suele utilizar para mecanismos de elevación y de traslación de grúas, eligiendo la aceleración (que dará lugar a la elección el motor) con arreglo a los siguientes supuestos:

a. El frenado se efectúa siempre desconectando el aparato de mando, o sea, siempre con frenado mecánico, de forma que el motor queda sin corriente.

b. Para la aceleración de las masas se supone el doble del par nominal.

c. Las curvas de velocidades son las de la figura inferior y corresponden a la mayor parte de los tipos de motores tanto para corriente continua como para alterna trifásica.



Dpto. Ing. Eléctrica y Energética
Universidad de Cantabria
Gerardo Díez Cagigal
telef: 942 20 13 84

d. Se han considerado recorridos iguales para la elevación y el descenso de la carga, para el cálculo se necesita además la relación **α** entre cargas.

$$\alpha = \frac{Par \quad motor \quad para: \ (elevación \ \ ó \ \ desplazamiento \ \ de \ \ la \ \ carga)}{Par \quad motor \quad para: \ (elev. \ \ ó \ \ desplaz. \ \ de \ \ la \ \ carga \ + \ carga \ \ en \ \ vacío)}$$

La carga en vacío estará constituida por el gancho, la cuchara, el recipiente de carga, etc. La aceleración está representada por un factor **ε** que tiene en cuenta el efecto de las masas. El valor de **ε** puede ser determinado por la fórmula siguiente:

$$\varepsilon = \frac{0{,}28}{1000} * \frac{\sum GD^2 \cdot n^2 \cdot \eta}{Q \cdot s}$$

Como estamos utilizando la carga **Q** debemos suponer que hablamos de un movimiento de elevación, en el caso de que el movimiento fuera de traslación, se sustituirá la carga **Q** por el esfuerzo de tracción $\mathrm{F_t} = \mathrm{G \cdot R}$ que es función de la resistencia de rodamiento.

Una vez determinado **ε,** debemos entrar en las curvas de **γ** constante para la determinación del tamaño del motor; estas curvas que aparecen en la página siguiente, corresponden: las dos superiores a un movimiento de elevación y las dos inferiores a un movimiento de traslación. Debemos deducir el coeficiente **γ** que nos permitirá calcular el par motor suficiente desde el punto de vista del calentamiento, así como de la potencia media en función de las siguientes fórmulas:

$$M = 9{,}55 \cdot \frac{Q \cdot v}{n \cdot \eta} \cdot \gamma \quad [m \cdot Kg.]$$

$$P = \frac{Q \cdot v}{102 \cdot \eta} \cdot \gamma \quad [Kw.]$$

Estas fórmulas únicamente se distinguen de las anteriormente vistas en el factor de corrección **γ,** dicho factor aparece en el eje de ordenadas de las curvas de la figura que aparece en la hoja siguiente**.**

Dpto. Ing. Eléctrica y Energética
Universidad de Cantabria
Gerardo Díez Cagigal
telef: 942 20 13 84

(Entramos en las curvas con el valor de **ε** en el eje de abcisas (x) nos desplazamos hasta la curva de **α** y obtenemos el valor de **γ** sobre el eje de ordenadas (y).)

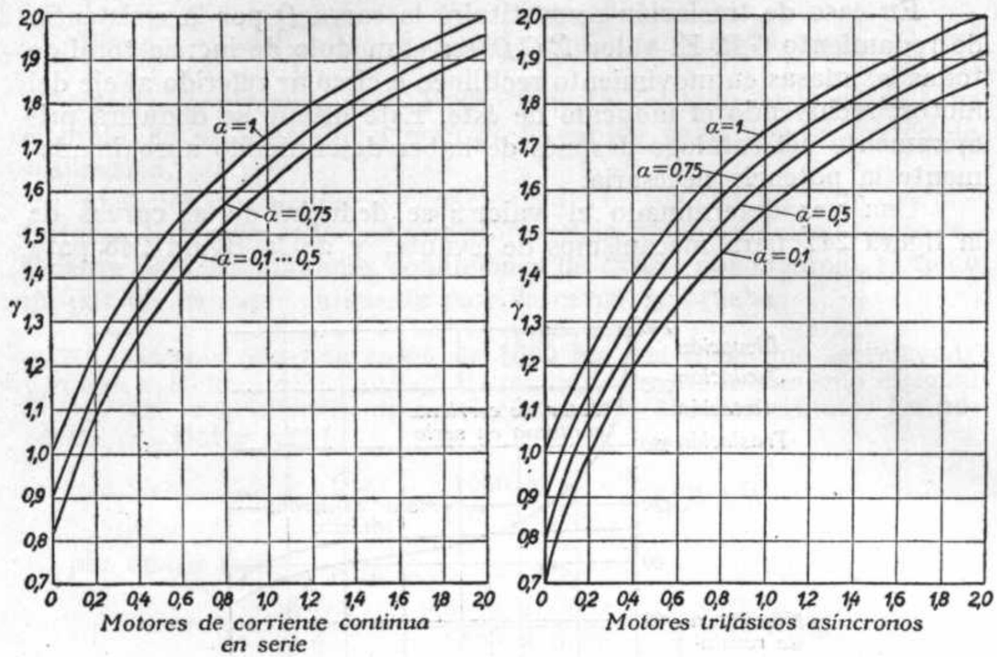
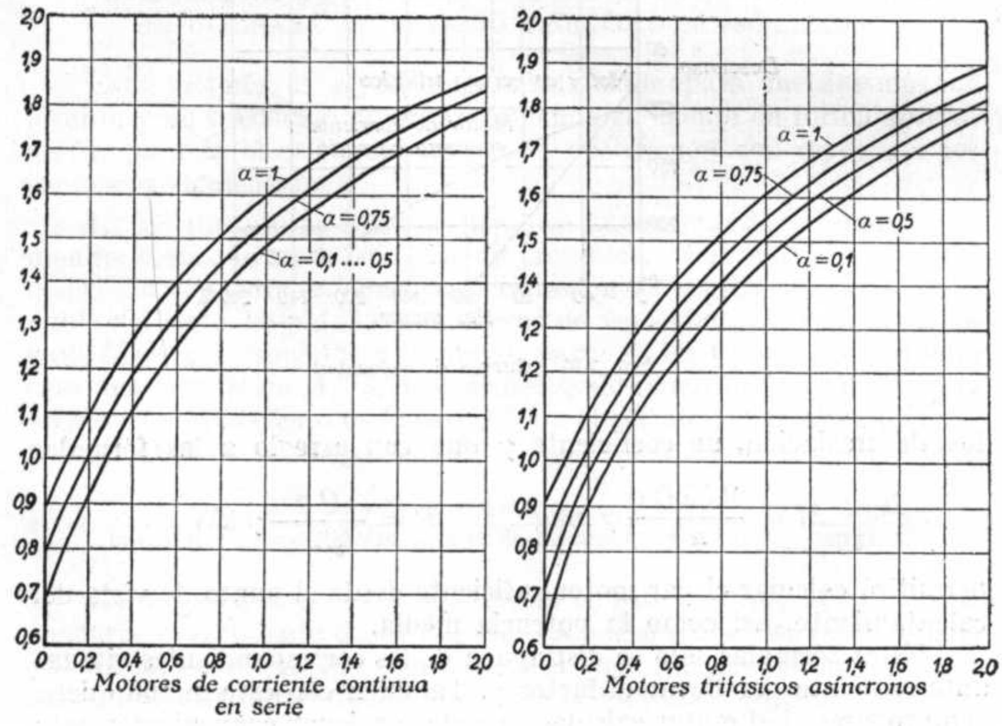


FIG. 247



Dpto. Ing. Eléctrica y Energética
Universidad de Cantabria
Gerardo Díez Cagigal
telef: 942 20 13 84

c. CÁLCULO DE LA POTENCIA DEL MOTOR PARTIENDO DE UN DIAGRAMA DE TRABAJO EXACTO

Es sin duda el procedimiento más exacto, ya que tenemos en cuenta todos los factores que influyen en el diagrama de trabajo.

El diagrama de trabajo se suele dividir en cuatro partes:

a. Diagrama de velocidad.

b. Diagrama de recorrido.

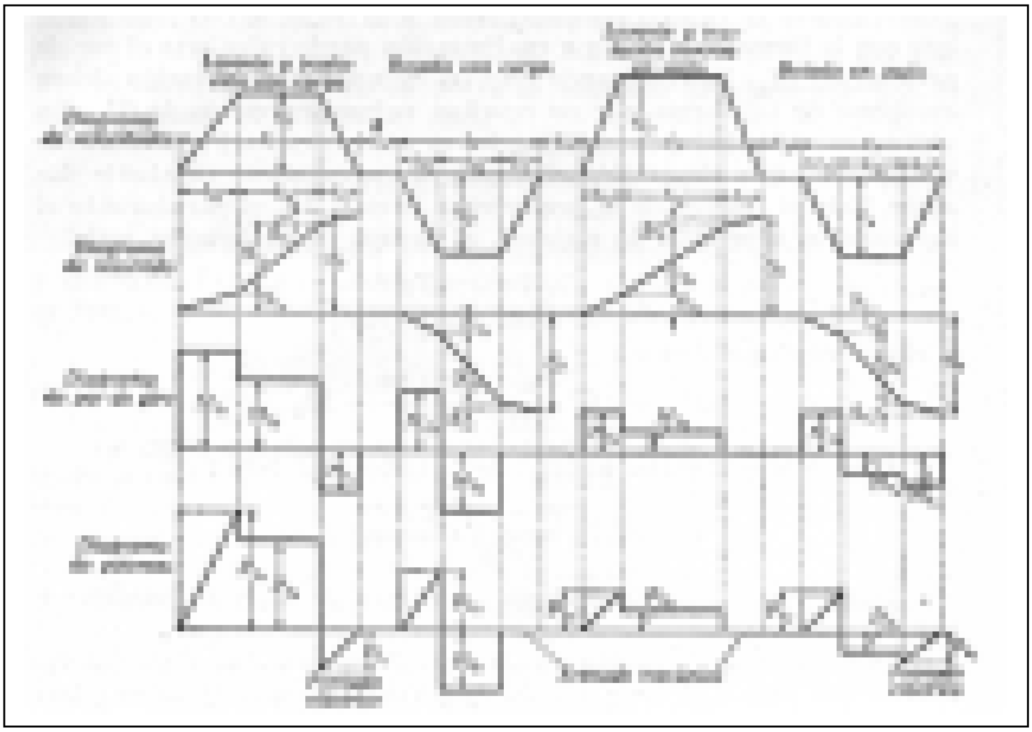
c. Diagrama de par.

d. Diagrama de potencia.

Vamos a explicar el procedimiento refiriéndonos a un **motor de elevación**. El funcionamiento de un motor de elevación tiene cuatro momentos diferentes:

Motor de elevación
1. Elevación con carga.
2. Bajada con carga.
3. Elevación en vacío.
4. Bajada en vacío.

No tienen por que darse siempre los cuatro estados, puede faltar alguno parcialmente o en su totalidad.



Dpto. Ing. Eléctrica y Energética
Universidad de Cantabria
Gerardo Díez Cagigal
telef: 942 20 13 84

Para un **mecanismo de traslación** sólo pueden presentarse dos estados:

Mecanismo de traslación
1. Desplazamiento con carga
2. Desplazamiento en vacío

Fig-249

Veamos un ejemplo, que posteriormente pasaremos a comentar.

Ejemplo

Trazar el diagrama de funcionamiento de un motor de corriente continua serie, utilizado en un mecanismo de elevación, determinar también el tiempo relativo de conexión (TC), determinar también el par motor medio y la potencia media del motor. Considerar que en el servicio tanto la elevación como la bajada se realizan con plena carga de Q=1000 Kg.; considerar que la velocidad a mecanismo lanzado o velocidad de régimen es de v_b=1 m/seg. La altura de elevación será de 5 m. El mecanismo rinde el 80 % cuando a plena carga gira a n=1000 r.p.m. se conoce el módulo total de inercia que vale ΣGD^2=5 Kg m^2.

Datos:

Q=1000 Kg.	η=0,8
v_b=1 m/seg.	n=1000 r.p.m.
s=5 m.	ΣGD^2=5 Kg m^2.

Vamos a denominar con:

Subíndice ($_a$): periodo de aceleración
Subíndice ($_b$): mecanismo lanzado
Subíndice ($_c$): periodo de deceleración

1. Elevación de la carga.

Marcha a velocidad de régimen ó a mecanismo lanzado.

Par $$M_{1b} = 9{,}55 \cdot \frac{Q \cdot v}{n \cdot \eta} = 9{,}55 \cdot \frac{1000 \cdot 1}{0{,}8 \cdot 1000} = 12 \quad [m \cdot Kg.]$$

Potencia $$P_{1b} = \frac{Q \cdot v}{102 \cdot \eta} = \frac{1000 \cdot 1}{102 \cdot 0{,}8} = 12{,}25 \quad [Kw.]; \text{ ó } P_{1b} = \frac{M \cdot n}{975} = \frac{12 \cdot 1000}{975} = 12{,}25 \quad [Kw.]$$

Suponemos un par acelerador de 1,5 veces.

$$M_a = 1{,}5 \cdot M_{1b} = 1{,}5 \cdot 12 = 18 \quad [m \cdot Kg.]$$

Según la curva de revoluciones de la fig-246, en este caso el número de revoluciones desciende hasta el 90%⇒900 r.p.m.; puesto que el par motor en el arranque es 150% del par nominal (1,5 veces el par nominal).

Dpto. Ing. Eléctrica y Energética
Universidad de Cantabria
Gerardo Díez Cagigal
telef: 942 20 13 84

$$t_{1a} = 2{,}67 \cdot \frac{n}{1000} \cdot \frac{\sum GD^2}{M_{1a} - M_{1b}} = 2{,}67 \cdot \frac{900}{1000} \cdot \frac{5}{18-12} = 2{,}1 \;\; [seg.]$$

el recorrido de aceleración:

$$s_{1a} = \frac{v_{1b}}{2} \cdot t_{1a} = \frac{1}{2} \cdot 2{,}1 = 1{,}05 \;\; [m.]$$

La potencia de punta durante la aceleración es igual a:

$$P_{1a} = 2{,}74 \cdot \left(\frac{n}{1000}\right)^2 \cdot \frac{\sum GD^2}{t_{1a}} + P_{1b} = 2{,}74 \cdot \left(\frac{900}{1000}\right)^2 \cdot \frac{5}{2{,}07} + 12{,}25 = 17{,}6 \;\; [Kw.]$$

Suponiendo un tiempo de deceleración, t_{1c}=2 seg., nos calculamos el espacio de frenado:

$$s_{1c} = \frac{v_{1b}}{2} \cdot t_{1c} = \frac{1}{2} \cdot 2 = 1 \;\; [m.]$$

El espacio recorrido a mecanismo lanzado será:

$$s_{1b} = s - s_{1a} - s_{1c} = 5 - 1{,}05 - 1 = 2{,}95 \;\; [m.]$$

y el tiempo tardado en recorrer este espacio a mecanismo lanzado:

$$t_{1b} = \frac{s_{1b}}{v_{1b}} = \frac{2{,}9}{1} = 2{,}9 \;\; [seg.]$$

El tiempo total para la elevación de la carga será:

$$t_1 = t_{1a} + t_{1b} + t_{1c} = 2{,}1 + 2{,}9 + 2 = 7 \;\; [seg.]$$

2. Bajada de la carga.

Marcha a velocidad de régimen ó a mecanismo lanzado.

Par $$M_{2b} = -9{,}55 \cdot \frac{Q \cdot v}{n} \cdot \eta = -9{,}55 \cdot \frac{1000 \cdot 1}{1000} \cdot 0{,}8 = -7{,}65 \;\; [m \cdot Kg.]$$

Potencia $$P_{2b} = -\frac{M_{2b} \cdot n}{975} = -\frac{7{,}65 \cdot 1000}{975} = 7{,}85 \;\; [Kw.]$$

Dpto. Ing. Eléctrica y Energética
Universidad de Cantabria
Gerardo Díez Cagigal
telef: 942 20 13 84

Fijamos en 1 seg. el tiempo de aceleración $\mathbf{t_{2a}}$, el par de giro correspondiente, será:

$$M_{2a} = 2{,}67 \cdot \frac{n}{1000} \cdot \frac{\sum GD^2}{t_{2a}} - M_{2b} = 2{,}67 \cdot \frac{1000}{1000} \cdot \frac{5}{1} - 7{,}65 = 5{,}7 \quad [m \cdot kg.]$$

Potencia de aceleración:

$$P_{2a} = \frac{M_{2a} \cdot n}{975} = -\frac{5{,}71 \cdot 1000}{975} = 5{,}86 \quad [Kw.]$$

el recorrido de aceleración:

$$s_{2a} = \frac{v_{2b}}{2} \cdot t_{2a} = \frac{1}{2} \cdot 1 = 0{,}5 \quad [m.]$$

Con un par máximo de deceleración de:

$$M_{2c} = 1{,}5 \cdot \eta \cdot M_{1b} = 1{,}5 \cdot 0{,}8 \cdot 12 = 14{,}4 \quad [m \cdot kg.]$$

Seobtiene un periodo de deceleración de:

$$t_{2c} = 2{,}67 \cdot \frac{n}{1000} \cdot \frac{\sum GD^2}{M_{2b} - M_{2c}} = 2{,}67 \cdot \frac{1000}{1000} \cdot \frac{5}{14{,}4 - 7{,}64} - 7{,}65 = 1{,}3 \quad [seg.]$$

Calculamos el recorrido de frenado:

$$s_{2c} = \frac{v_{2b}}{2} \cdot t_{2c} = \frac{1}{2} \cdot 1{,}3 = 0{,}65 \quad [m.]$$

El espacio recorrido a mecanismo lanzado o marcha en régimen será:

$$s_{2b} = s - s_{2a} - s_{2c} = 5 - 0{,}5 - 0{,}65 = 3{,}85 \quad [m.]$$

y el tiempo tardado en recorrer este espacio a mecanismo lanzado:

$$t_{2b} = \frac{s_{2b}}{v_{2b}} = \frac{3{,}85}{1} = 3{,}85 \quad [seg.]$$

El tiempo total necesario para la bajada de la carga será:

$$t_2 = t_{2a} + t_{2b} + t_{2c} = 1 + 3{,}85 + 1{,}3 = 6{,}15 \quad [seg.]$$

El diagrama de trabajo será el siguiente:

Dpto. Ing. Eléctrica y Energética
Universidad de Cantabria
Gerardo Díez Cagigal
telef: 942 20 13 84

Determinación del coeficiente TC (tiempo relativo de conexión)

Por el diagrama de trabajo exacto, puede determinarse el valor exacto de TC partiendo delos tiempos de conexión y de desconexión:

$$TC = 100 \cdot \frac{\sum tiempo \quad de \quad conexión}{tiempo \quad total \quad de \quad ciclo(t_{conexión} + pausas)}$$

Los tiempos de frenado mecánico se cuentan como pausa, mientras que los de frenado electrico deben considerarse como de conexión.

En el ejemplo anterior:

Tiempo total de conexión: 5,1+6,15=11,25 seg.

Tiempo total de ciclo: 26,2 seg.

$$TC = 100 \cdot \frac{11,25}{26,2} = 43\%$$

Determinación media del par:

$$M_m = \sqrt{\frac{M_{1a}^2 \cdot t_{1a} + M_{1b}^2 \cdot t_{1b} + M_{1c}^2 \cdot t_{1c} + M_{2a}^2 \cdot t_{2a} + M_{2b}^2 \cdot t_{2b} + M_{2c}^2 \cdot t_{2c}}{t_1 + t_2 + ...}}$$

$$M_{1c} = 0$$

$$M_m = \sqrt{\frac{18^2 \cdot 2,1 + 12^2 \cdot 2,9 + 5,71^2 \cdot 1 + 7,65^2 \cdot 3,85 + 15,86^2 \cdot 1,3}{26,1}} = 8,02 \quad [m \cdot kg]$$

La potencia media será:

$$P_m = \frac{M_m \cdot n}{975} = -\frac{8,02 \cdot 1000}{975} = 8,24 \quad [Kw.]$$

Conclusión.

Deberemos buscar en los catálogos un motor con una potencia de 8,24 kW. capaz de desarrollar un par de 8,02 [m kg.] a una velocidad de 1000 r.p.m. contando con un coeficiente de tiempo de conexión TC=43 %.

Dpto. Ing. Eléctrica y Energética
Universidad de Cantabria
Gerardo Díez Cagigal
telef: 942 20 13 84