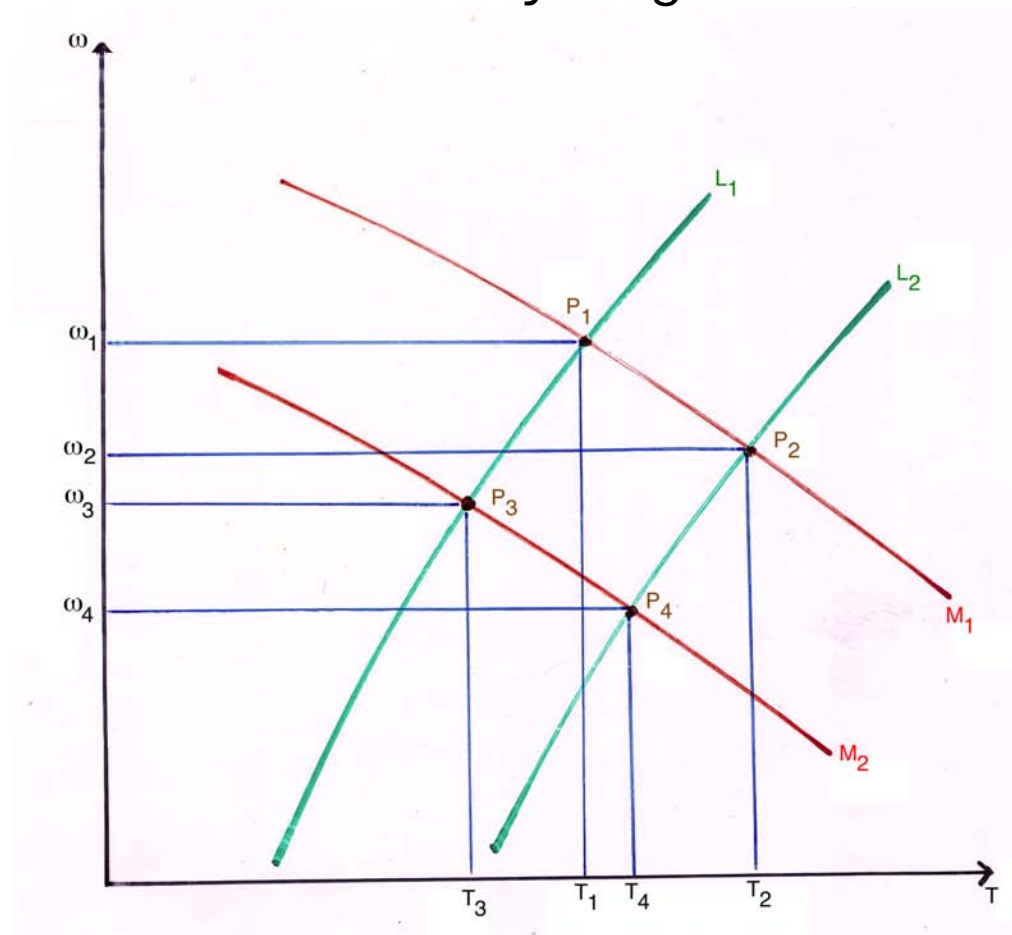


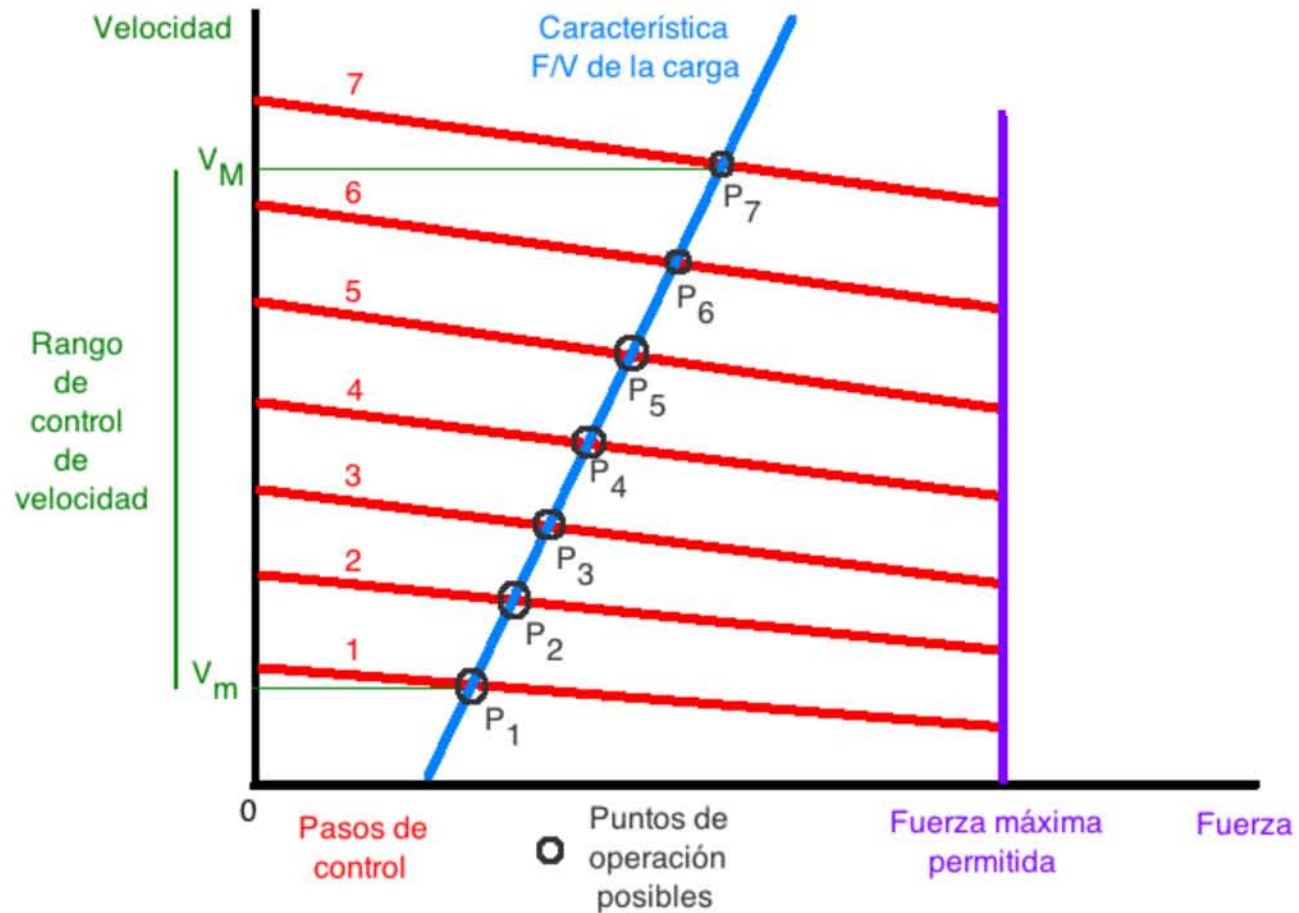
Motores y cargas



Puntos de operación estables de las cargas L_1 y L_2 con los pares motrices M_1 y M_2 .

La interacción entre una carga y su motor queda definida por el cruce de sus respectivas curvas características en el plano par/velocidad angular, o en su equivalente, el plano de fuerza/velocidad lineal.

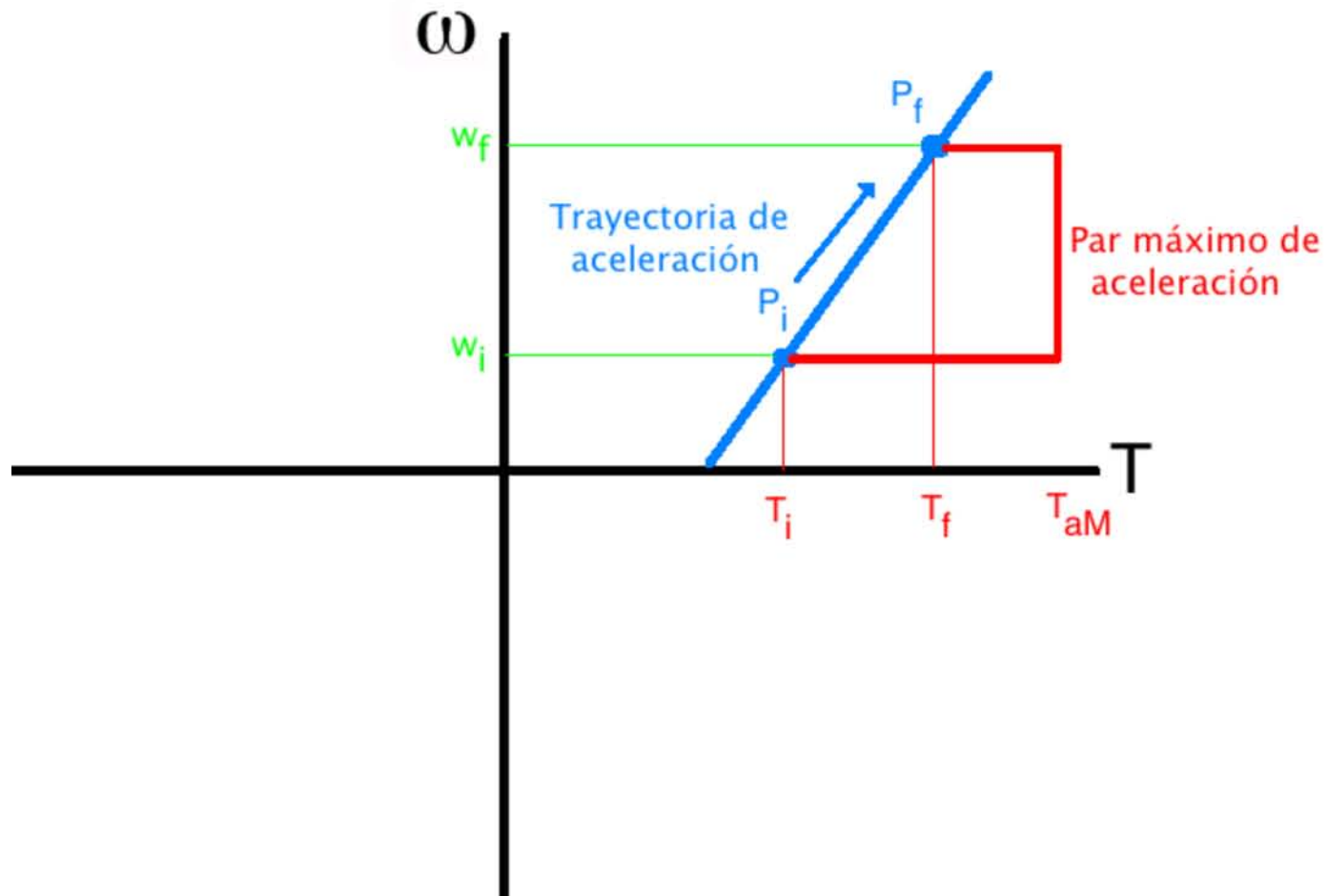
Para controlar el estado de la carga es preciso cambiar el punto de operación, lo que requiere que el motor sea controlable o, por lo menos, que exista un modo de cambiar la fuerza (o el par) que se le está transfiriendo a la carga.



Interacción motor controlable/carga:
 P1 a P7, puntos de operación estables.

Todo proceso de aceleración o frenado es iniciado y, generalmente, controlado mediante cambios en el par (o la fuerza) aplicados por el motor a la carga; los casos genéricos a considerar son aceleración y frenado sin cambiar de sentido de movimiento, y cambios de sentido de movimiento, que requieren una combinación de un frenado inicial en un sentido, hasta detener a la carga, seguido por una aceleración hasta alcanzar el nuevo punto de operación a la velocidad deseada.

Aceleración



Trayectoria de aceleración del punto P_i al P_f .

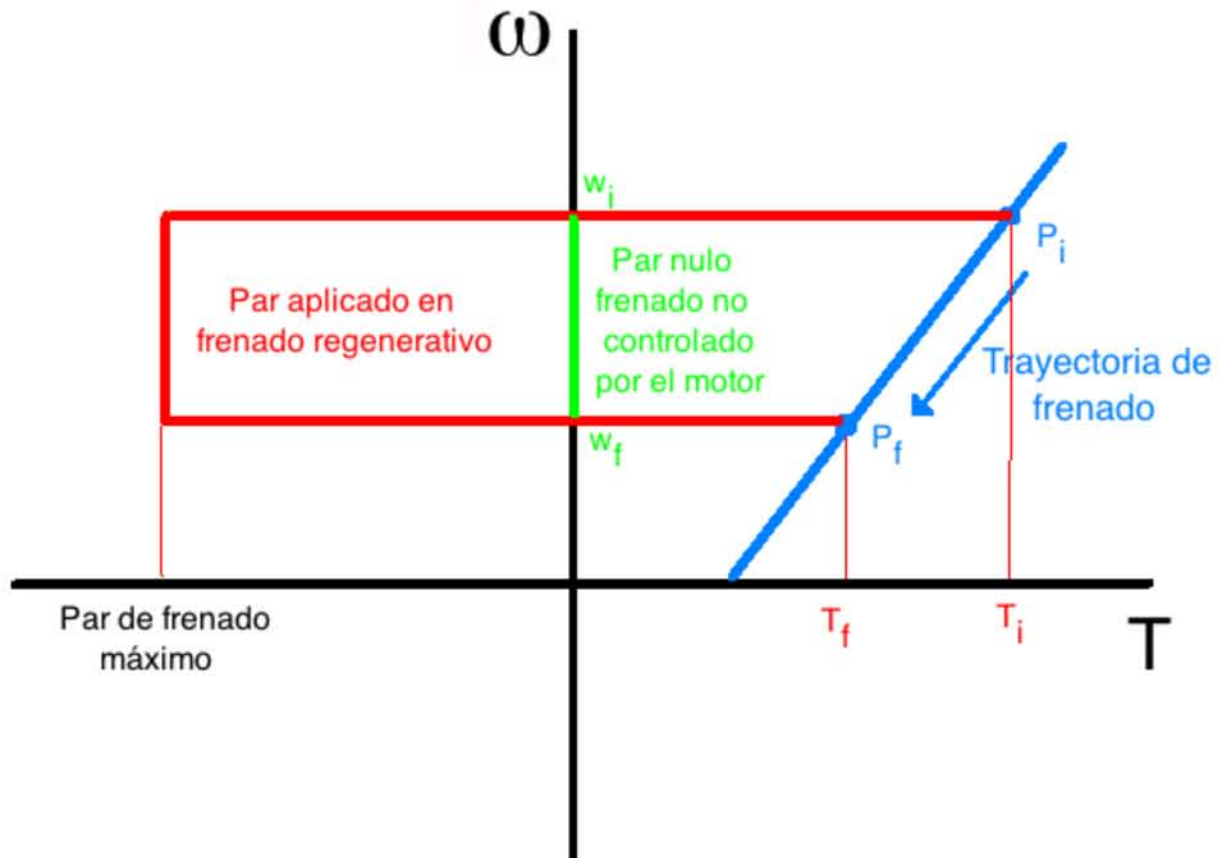
Si se quiere acelerar para pasar del estado inicial P_i , al final, P_f , el par se debe aumentar desde el valor de equilibrio inicial, T_i , por lo menos hasta el valor de equilibrio final, T_f .

En general el par de carga es una función de la velocidad $T_L(\omega)$ por lo que, para acelerar, el par motriz aplicado, $T_{ma}(\omega)$, debe cumplir durante todo el proceso de aceleración con la condición:

$$T_L(\omega) < T_{ma}(\omega) \leq T_{aM}$$

Si se desea minimizar el tiempo con que se realiza el cambio al nuevo punto de operación, el par aplicado debe ser el par máximo disponible, T_{aM} , lo que producirá la máxima aceleración posible en el sistema motor-carga que se esté considerando.

Frenado



Trayectoria de frenado del punto P_i al P_f .

Si se quiere frenar para pasar del estado inicial P_i , al final, P_f , el par se debe reducir desde el valor de equilibrio inicial, T_i , por lo menos hasta el valor de equilibrio final, T_f .

Si se desea maximizar la velocidad con que se realiza el cambio al nuevo punto de operación, el par aplicado debe ser el par máximo de frenado disponible.

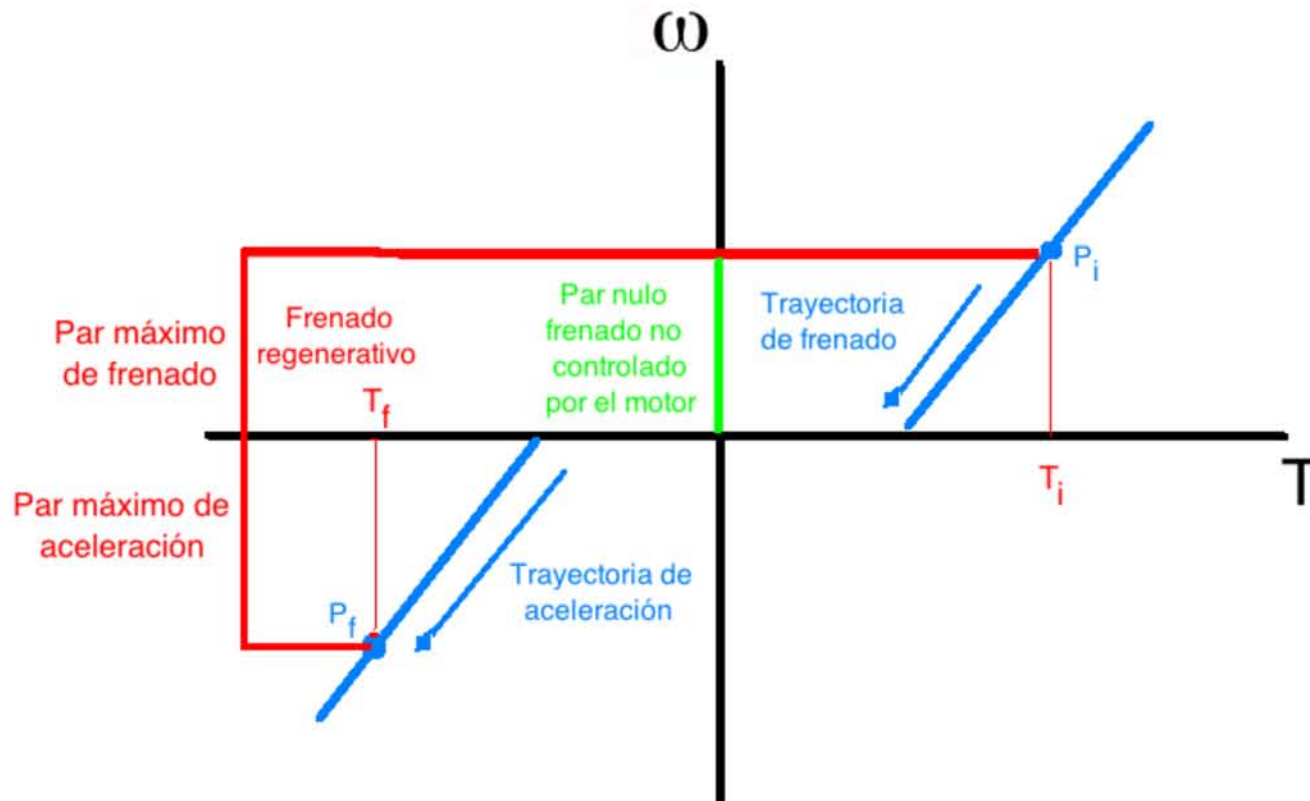
Si el motor no es capaz de regenerar, la mayor acción de frenado se logra aplicando el par nulo (efectivamente desconectando la carga del motor).

Hecho esto el motor deja de controlar la situación, la carga queda libre y la acción de frenado debe concluirse mediante un dispositivo adicional de frenado.

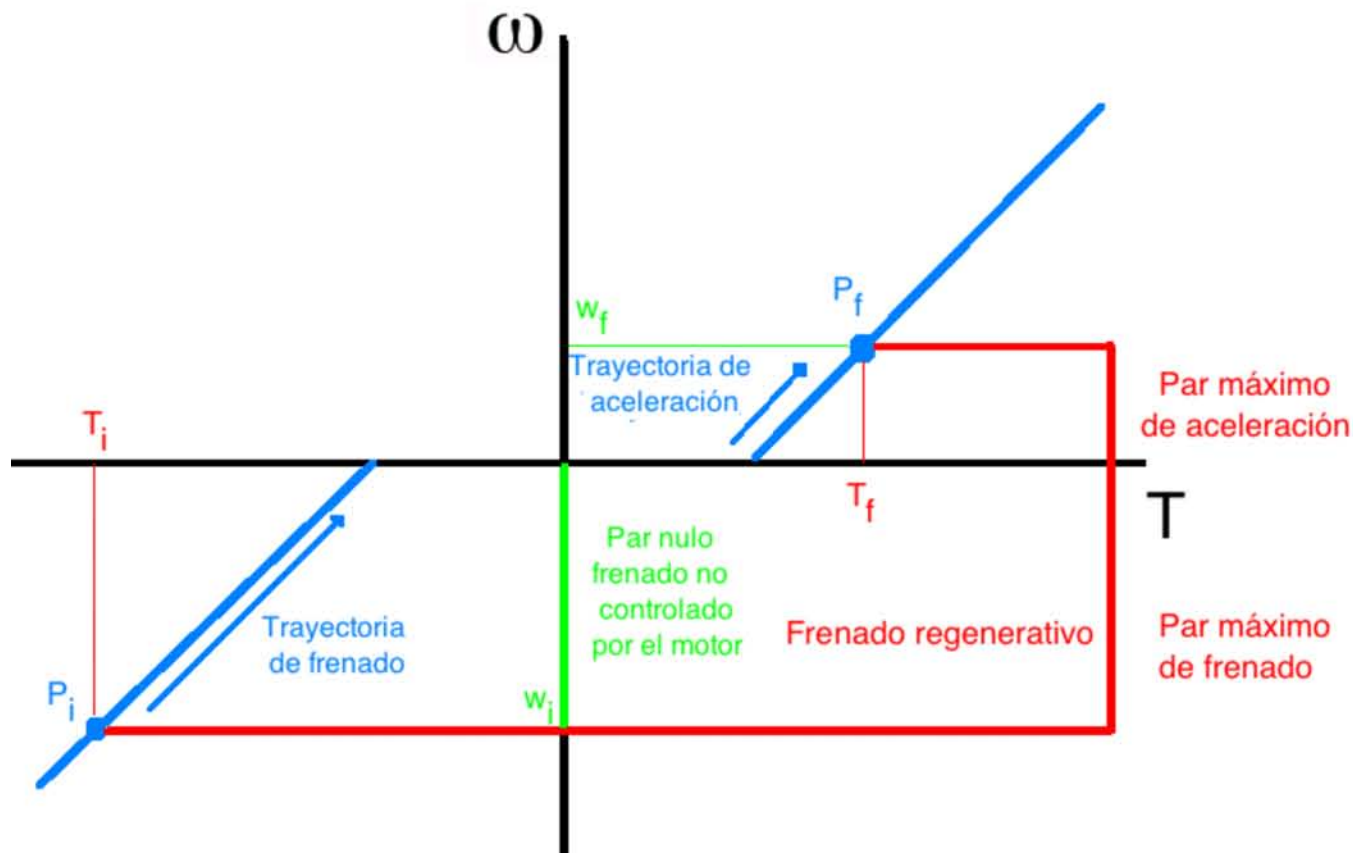
Si existe un dispositivo de frenado, o si el motor es capaz de regenerar (convertir energía cinética de la carga en otra forma de energía aprovechable), se puede maximizar la acción de frenado aplicando el máximo par de frenado. En general la acción de los frenos externos es disipativa, mientras que al regenerar con el motor se puede recuperar energía.

En general las máquinas eléctricas son capaces de regenerar, y sus pares de aceleración y frenado suelen ser iguales.

Cambio de sentido



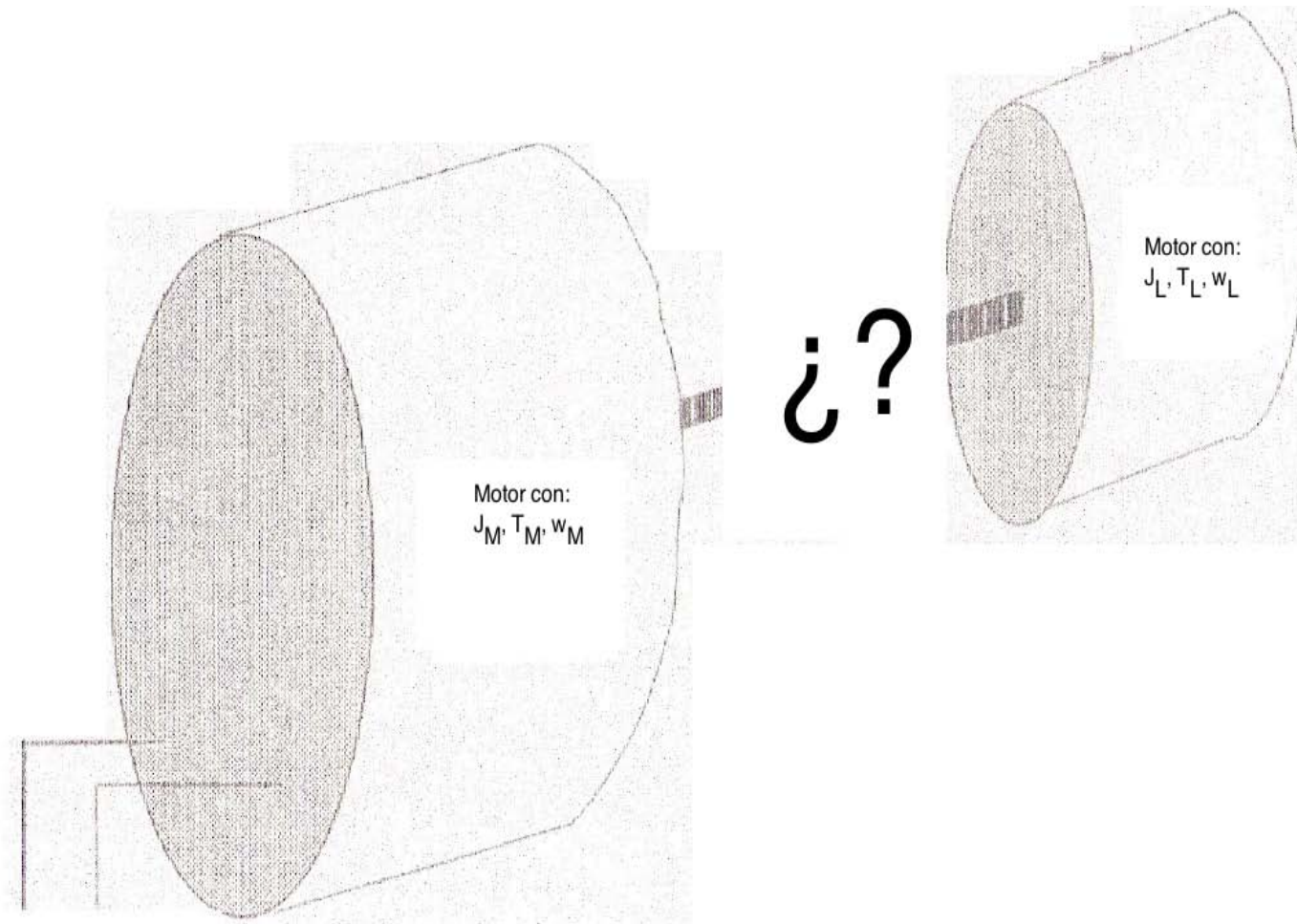
Trayectoria de frenado y aceleración del punto P_i (giro positivo) al P_f (giro negativo).



Trayectoria de frenado y aceleración del punto P_i (giro negativo) al P_f (giro positivo).

En los dos casos se procede en dos etapas: Primero una desaceleración desde la velocidad ω_i hasta cero, seguida por una aceleración desde cero hasta ω_f .

Si, como es el caso en la mayoría de los motores eléctricos, el motor puede regenerar y el par máximo de frenado regenerativo es igual al par máximo de aceleración (caso presentado en la lámina), la operación se puede realizar en el menor tiempo posible empleado ese valor máximo de par tanto en la etapa de frenado como en la de aceleración subsiguiente.



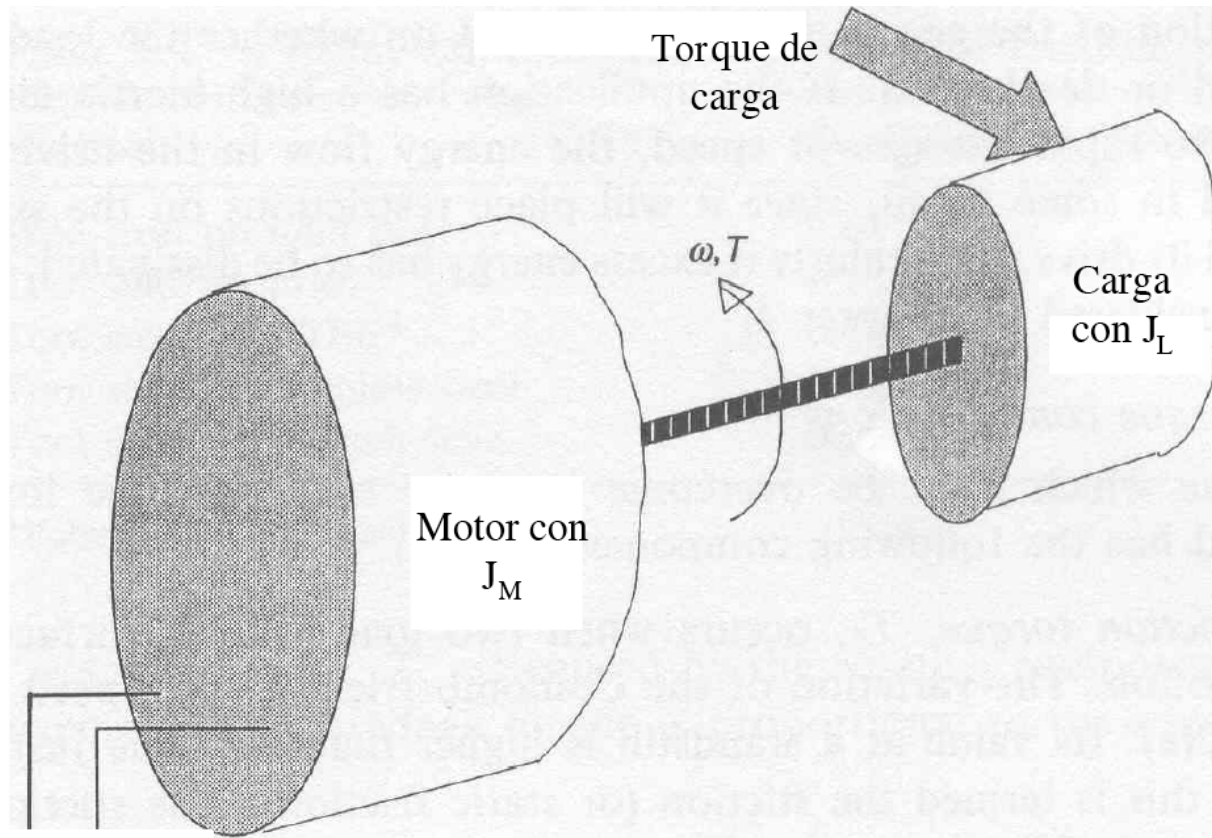
Conexión a la
fuente de energía

Conexión motor-carga

I.- Acople cuando los rangos par-velocidad del motor y la carga son compatibles.

Este es el caso mas simple: la conexión entre el motor y la carga es directa mediante un eje rígido.

Esto requiere que la velocidad nominal de operación del motor y su par nominal sean comparables con los requeridos por la carga; en este caso el diseño del acople requiere únicamente determinar el tamaño del eje para asegurar que es capaz de transmitir el par máximo requerido, con el factor de seguridad que se considere necesario sin deformarse o, mas precisamente, sin que la deformación sea mayor al valor predeterminado como aceptable.



Conexión a la
fuente de energía

Sistema motor-carga. Caso ideal

Dado que en general la impedancia mecánica del motor (su inercia rotacional y la fricción asociada con los cojinetes del motor, las relaciones energéticas de esta forma de acople son equivalentes a las de una fuente de muy baja impedancia (idealmente cero) a una carga de alta impedancia.

Para operar en acople directo el motor debe de ser capaz de producir el par deseado a velocidades relativamente bajas, lo que en general requiere el uso de motores especiales y/o a sobredimensionar el motor y no hacer uso de toda su capacidad de entregar potencia operando a alta velocidad.

Además, si el motor se opera a una velocidad significativamente mas baja que la nominal, la auto ventilación no es efectiva y se requieren métodos auxiliares de enfriamiento, lo que aumenta el costo y la complejidad de la instalación.

Dicho lo anterior, el acople directo es preferible en ciertas aplicaciones, por ejemplo en aquellas donde la existencia de un acople cambiador de velocidad puede afectar especificaciones muy estrictas de precisión de posicionamiento o de respuesta dinámica.

Adicionalmente, hay que tomar en cuenta que las cajas reductoras multietapas pueden no ser competitivas en precio, y que es difícil encontrar reductores de velocidad capaces de operar a velocidades superiores a las 5.000 ó 6.000 r.p.m.

Las máquinas eléctricas de baja velocidad están teniendo aplicación en sectores específicos, como el de los “motores en la rueda” que se están proponiendo para vehículos eléctricos en los cuales la velocidad de giro máxima está definida en función a la velocidad lineal máxima del vehículo y el diámetro de la rueda.

En este caso las ventajas son la eliminación de una gran cantidad de componentes giratorios que, además de requerir lubricación y mantenimiento, aumentan el peso y ocupan espacio en el vehículo.

También están teniendo un uso cada vez mayor como generadores en aplicaciones eólicas, donde su conexión directa al eje de la turbina eólica evita el uso de una caja elevadora de velocidad compleja y costosa.

Selección del motor.

Conocida la carga, el motor debe ser capaz de generar un par por lo menos igual al valor pico del par requerido por la carga en el peor de los casos.

Seleccionado el motor, se debe calcular el perfil de par y de potencia disipada por unidad de tiempo durante todo el ciclo de trabajo para determinar la potencia pico, la potencia promedio y los correspondientes ciclos de temperatura que debe soportar la máquina.

Si la temperatura promedio es superior a la que puede soportar la máquina tomando en cuenta el tipo de enfriamiento disponible, el motor considerado no puede ser usado, y será preciso reiniciar el ciclo de selección con un motor de mayor potencia.

El par pico, convertido en corriente, debe ser usado para dimensionar el valor pico de la corriente del convertidor que alimenta al motor, y el promedio para la correspondiente corriente promedio.

II:- Acople cuando los rangos de par-velocidad del motor y la carga no son directamente compatibles.

En muchos casos (posiblemente la mayoría) se cumple que cuando se considera un motor eléctrico (o uno de combustión interna) resulta que los rangos de operación de la carga y el motor seleccionado cumplen con las siguientes relaciones

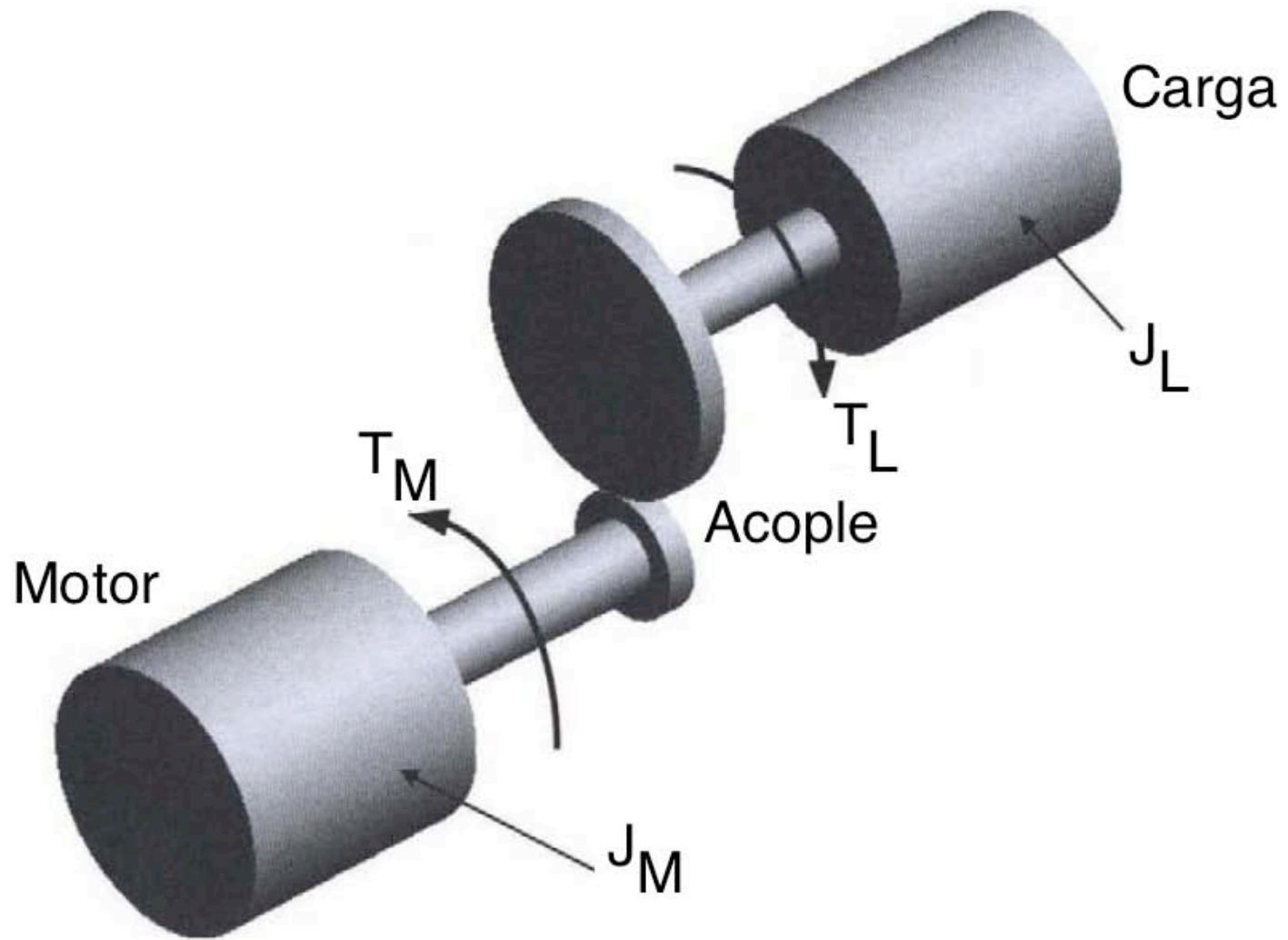
$$T_M \ll T_L$$

$$\omega_M \gg \omega_L$$

Esto es, el motor es capaz de entregar la potencia mecánica necesaria, pero operando con un par significativamente menor, a una velocidad significativamente mayor que los valores máximos requeridos en la carga.

Se precisa por lo tanto incluir en el sistema un mecanismo que permita adaptar la carga al motor, manteniendo cada uno de los dos su rango par-velocidad de operación característico.

Estos mecanismos de acople de velocidades operan como los equivalentes mecánicos a los transformadores eléctricos y, como en los sistemas eléctricos lograr la relación de acople que asegure la máxima transferencia de energía es un objetivo deseable en el diseño.



En un sistema genérico, reflejando sobre el eje de carga (eje de salida) se cumple:

$$nT_m - T_L = T_e = \dot{\omega}(J_L + n^2 J_m) + \omega(B_L + n^2 B_m)$$

donde T_e es el par de aceleración efectivo disponible, $(J_L + n^2 J_m)$ es la inercia efectiva y $(B_L + n^2 B_m)$ es la fricción efectiva.

resulta evidente que para relaciones de transferencia altas $(n^2 \gg 1)$ el efecto de la inercia rotacional y la fricción viscosa totales del eje del rotor pueden ser significativas al reflejarlas al eje de la carga.

Si para simplificar el sistema se asume que la fricción viscosa efectiva es despreciable frente a la inercia rotacional efectiva, y que no hay par de oposición, la aceleración en el eje de carga producida por el par motor reflejado es:

$$\dot{\omega} = \frac{T_m}{n(J_L + n^2 J_m)}$$

Y la aceleración disponible será máxima cuando la relación de transferencia tenga el valor óptimo, n_o dado por:

$$n_o = \sqrt{\frac{J_L}{J_m}}$$

La aceleración máxima es:

$$\dot{\omega}_M = \frac{T_m}{n_o(J_L + n_o^2 J_m)} = \frac{T_m}{n_o\left(J_L + \left(\sqrt{\frac{J_L}{J_m}}\right)^2 J_m\right)} = \frac{T_m}{n_o 2J_L}$$

Lo que ocurre porque el valor de la inercia rotacional reflejado sobre el eje de la carga, $n^2 J_m$, resulta:

$$n^2 J_m = \left(\sqrt{\frac{J_L}{J_m}}\right)^2 J_m = J_L$$

Esto es, recurriendo al símil eléctrico, la impedancia de salida del motor es igual a la de la carga y se cumple el teorema de la máxima transferencia.

El resultado se puede generalizar al caso de que exista un par T_L de oposición, usando el par efectivo disponible, T_e , y al caso genérico donde la "impedancia" (tiene componentes disipativos $(B_L + n^2 B_m)$ e inerciales $(J_L + n^2 J_m)$).

Proceso de selección del motor.

I.- Selección inicial de la relación de acople entre la velocidad del motor y la de la carga.

Asumiendo en primera aproximación un acople sin pérdidas, la potencia máxima entregada por el motor debe ser igual a la potencia máxima consumida por la carga.

Conocida la potencia máxima de carga el proceso de selección del motor mas adecuado puede seguir los siguientes pasos:

- 1.- Se preselecciona el grupo de motores que estén en la categoría de potencia máxima nominal mas cercana por arriba a la potencia pico de la carga, tomando en cuenta las pérdidas típicas del tipo de acople que se piense emplear.
- 2.- Se calcula cual es la impedancia mecánica asociada a cada motor.
- 3.- Se calcula cual es la relación de transferencia necesaria para lograr que la impedancia mecánica reflejada de la carga sobre el eje del motor sea igual a la impedancia mecánica de cada motor.
- 4.- Se calcula el punto de operación (par y velocidad) de cada motor acoplado a la carga por medio de la correspondiente relación de transferencia.

- 5.- Se eliminan del grupo todos los motores que en esas condiciones estén operando fuera de su zona nominal de operación sea por exceso de par o de velocidad.
- 6.- Si quedan candidatos, se selecciona aquel que opere con el par mas cercano a su par nominal.
- 7.- Si no queda ningún candidato, se reinicia el proceso considerando los motores que estén en la siguiente categoría de potencia.

II.- Consideraciones sobre el ciclo de trabajo.

Una vez que se ha seleccionado tentativamente un motor y una relación de transformación, se debe calcular el perfil de par y de potencia disipada por unidad de tiempo durante todo el ciclo de trabajo para determinar la potencia pico, la potencia promedio y los correspondientes ciclos de temperatura que debe soportar la máquina.

Si la temperatura promedio es superior a la que puede soportar la máquina tomando en cuenta el tipo de enfriamiento disponible, el motor considerado no puede ser usado, y será preciso reiniciar el ciclo de selección con un motor de mayor potencia.

El par pico, convertido en corriente, debe ser usado para dimensionar el valor pico de la corriente del conversor que alimenta al motor, y el promedio para la correspondiente corriente promedio.