

## CORRIENTE DE ROTOR BLOQUEADO Y CORRIENTE DE ARRANQUE NO CONTROLADO.

Si al arrancar el ciclo de trabajo se le aplica un escalón de tensión igual a la tensión nominal de operación,  $V_{an}$ , a la armadura de un motor DC alimentado en paralelo cuyo rotor está mecánicamente bloqueado y no puede girar, no se genera tensión contraelectromotriz, por lo que se tiene:

$$V_{an} = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt}$$

El valor final de la corriente de armadura,  $I_{arb}(\infty)$ , será:

$$I_{arb}(\infty) = \frac{V_{an}}{R_a} \gg I_{an} = \frac{V_{an} - E(\omega_n)}{R_a}$$

donde  $I_{arb}(\infty)$  es la corriente de armadura de rotor bloqueado,  $I_{an}$  es el valor nominal de la corriente de armadura del motor operando a su velocidad nominal,  $\omega_n$ , cuando se la aplica el voltaje de armadura nominal,  $V_{an}$ , y la carga consume el par nominal del motor,  $T_n$ .

La corriente de armadura alcanzará su valor final en unas cinco constantes de tiempo del circuito eléctrico ( $\tau_e$ ).

En un motor DC industrial, la corriente de rotor bloqueado puede ser mas de 10 veces mayor que la corriente nominal.

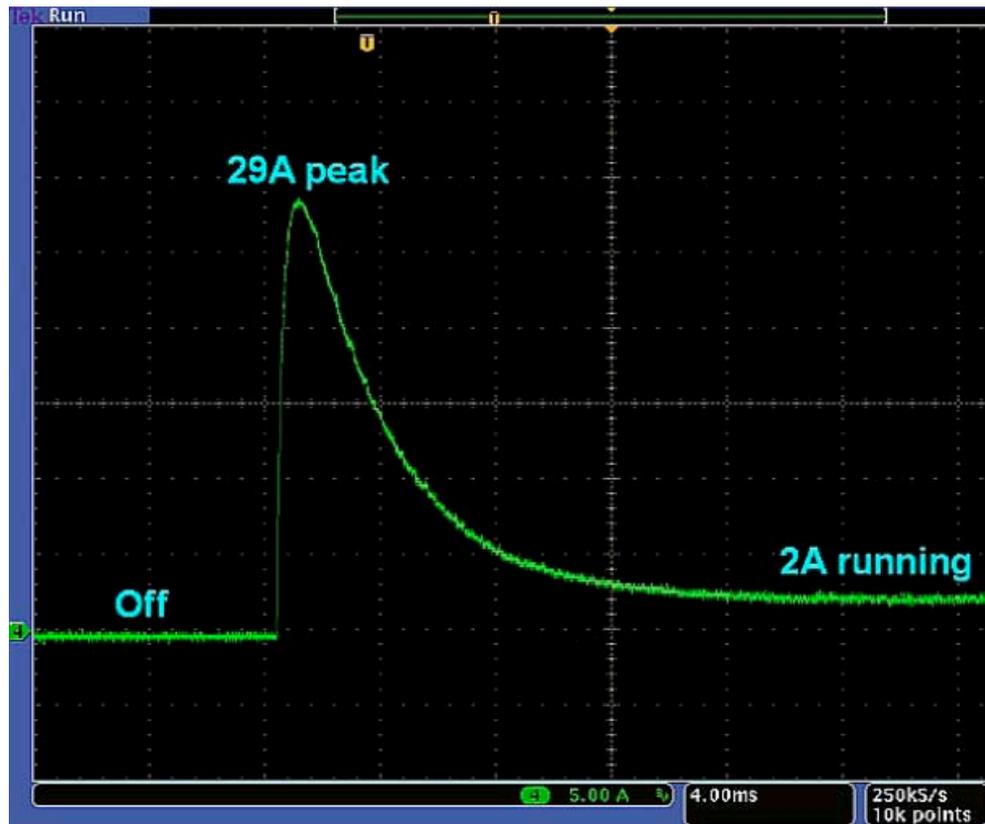
Arranque con carga mecánica de constante de tiempo elevada:

Si la constante de tiempo del sub-sistema mecánico es significativamente más larga que la del sub-sistema eléctrico (caso usual), y se arranca el motor aplicándole un escalón de tensión igual a la tensión nominal de operación, la corriente de armadura crecerá tendiendo a alcanzar el valor de corriente de rotor bloqueado durante la parte inicial del proceso de arranque, para ir reduciéndose a medida que la carga acelera.

El pico de la corriente de armadura en este caso puede ser significativamente más alto que el valor nominal y, en el peor caso, alcanzar el valor de la corriente de rotor bloqueado y permanecer en este durante cierto tiempo mientras la carga acelera.



Evolución de la corriente de armadura.  
Arranque con escalón de tensión de armadura nominal y rotor  
bloqueado. Corriente nominal del motor 2 A.



Evolución de la corriente de armadura.

Arranque con escalón de tensión de armadura nominal y carga mecánica de constante de tiempo larga. Corriente nominal 2 A.

## Efectos de la sobre-corriente de arranque.

### I.- En la máquina:

1.-Las pérdidas térmicas durante el arranque superan el valor nominal calculado por el fabricante, haciendo que la máquina se sobre-caliente. Este efecto se agrava porque la máquina está girando a una velocidad menor a la nominal (cero en el peor caso, rotor bloqueado), lo que reduce significativamente la capacidad de auto-enfriamiento de la máquina.

Por otra parte, la sobre-corriente produce un par de arranque superior al nominal, lo que tiende a acelerar el proceso de arranque si la máquina no está sobre-cargada, pero puede sobrecargar el sistema de mecánico transmisión (acoples, ejes, acoples de velocidad, etc.)

2.- La sobre-corriente puede superar la corriente límite en las escobillas, causando su destrucción por sobre-calentamiento localizado.

En general los problemas térmicos se desarrollan en una escala de tiempo relativamente lenta (la inercia térmica de la máquina es significativa), y la máquina puede tolerar arranques no controlados si estos son poco frecuentes.

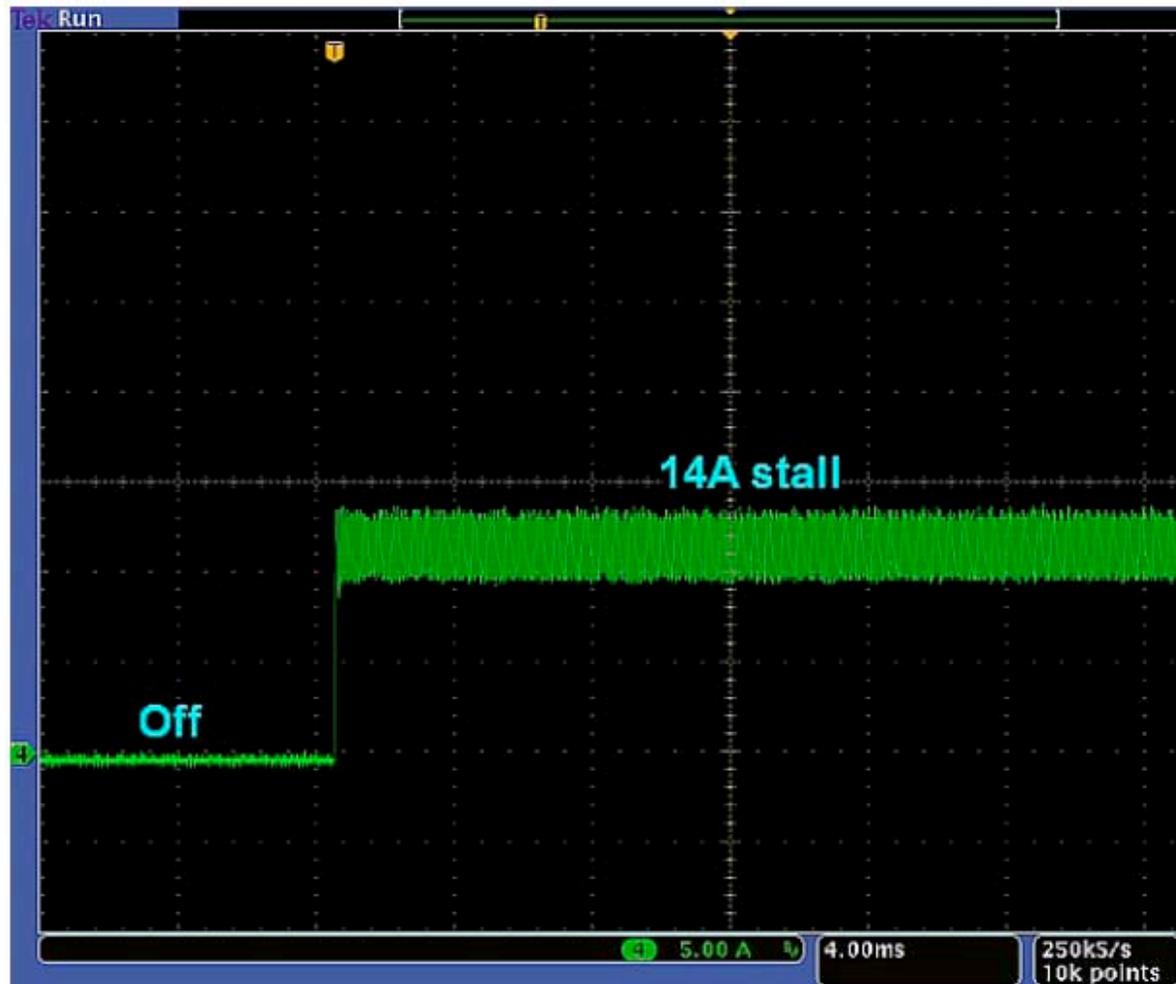
II.- En la fuente de tensión de armadura.

Los componentes electrónicos tienen una capacidad mucho mas limitada de soportar sobre-corrientes, y sus constantes de tiempo térmicas son mucho mas cortas, por lo que toda sobre-corriente transitoria tolerable por la máquina debe ser considerada como una corriente permanente desde el punto de vista de los componentes electrónicos.

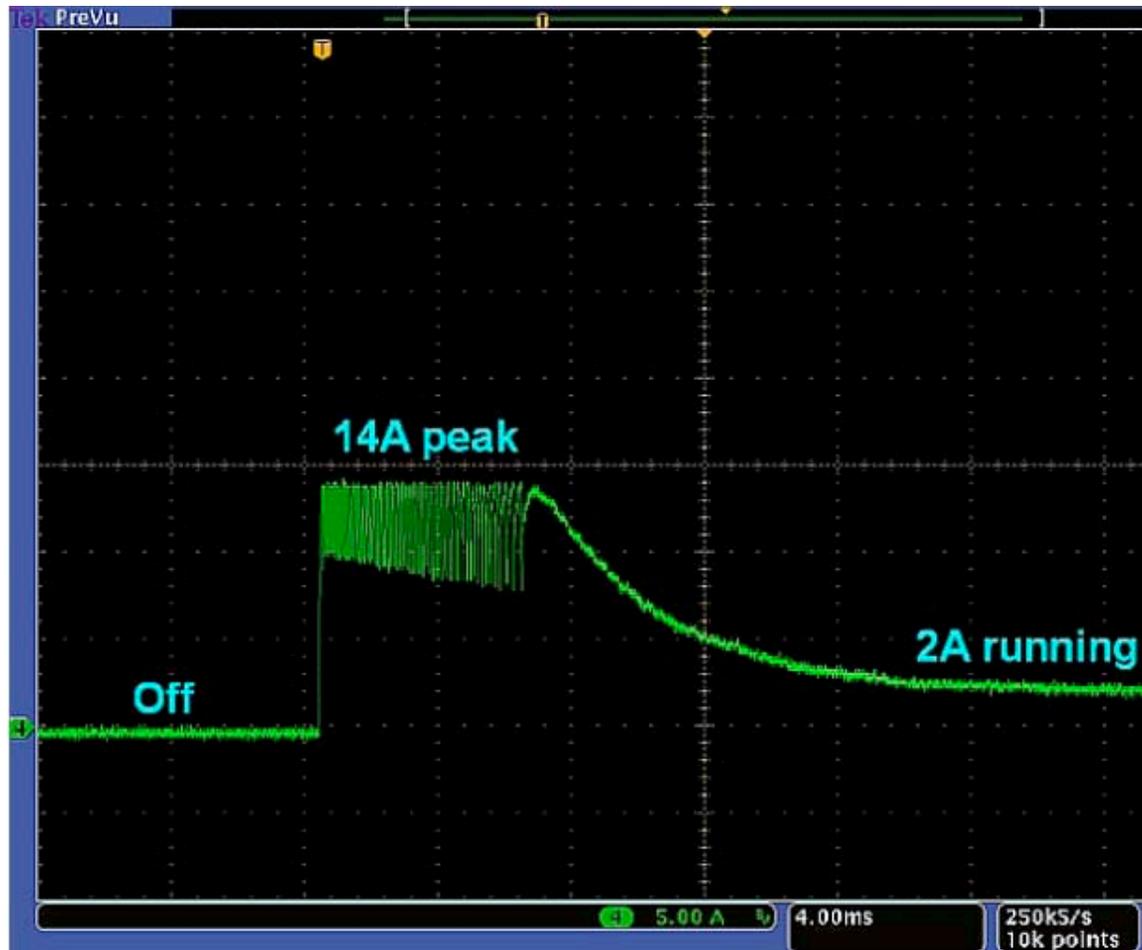
En estas condiciones el diseñador tiene dos opciones:

- 1.- Diseñar una fuente de alimentación cuya capacidad nominal sea igual o superior a la corriente de rotor bloqueado de la máquina DC, sobre-dimensionando la fuente desde 5 a más de 10 veces respecto a la corriente nominal.
- 2.- Diseñar un sistema de control capaz de mantener la corriente en su valor nominal durante todo el ciclo de operación de la máquina, asegurando así que el par nominal está disponible en todo el ciclo, sin necesidad de sobre-dimensionar las etapas electrónicas de potencia.

La primera solución es inaceptable, lo que obliga a que todo controlador para motores DC debe trabajar en lazo cerrado con realimentación y limitación de corriente para evitar situaciones potencialmente destructivas en el sistema electrónico de potencia.



Evolución de la corriente de armadura. Arranque con rotor bloqueado. Puente H con corriente limitada a 14A.



Evolución de la corriente de armadura. Arranque con carga mecánica de constante de tiempo larga. Puente H con corriente limitada a 14A. Corriente nominal 2 A.

Si la configuración del sistema mecánico requiere un par de arranque superior al par máximo necesario para el resto de la operación, puede resultar económicamente conveniente dimensionar el motor en base al par máximo de operación normal y obtener el par de arranque operando en sobrecarga transitoria, pero la etapa electrónica de potencia debe ser dimensionada considerando como corriente nominal de este bloque la sobrecorriente de arranque necesaria para proporcionar el par de arranque.

## FRENADO DINÁMICO O REGENERATIVO.

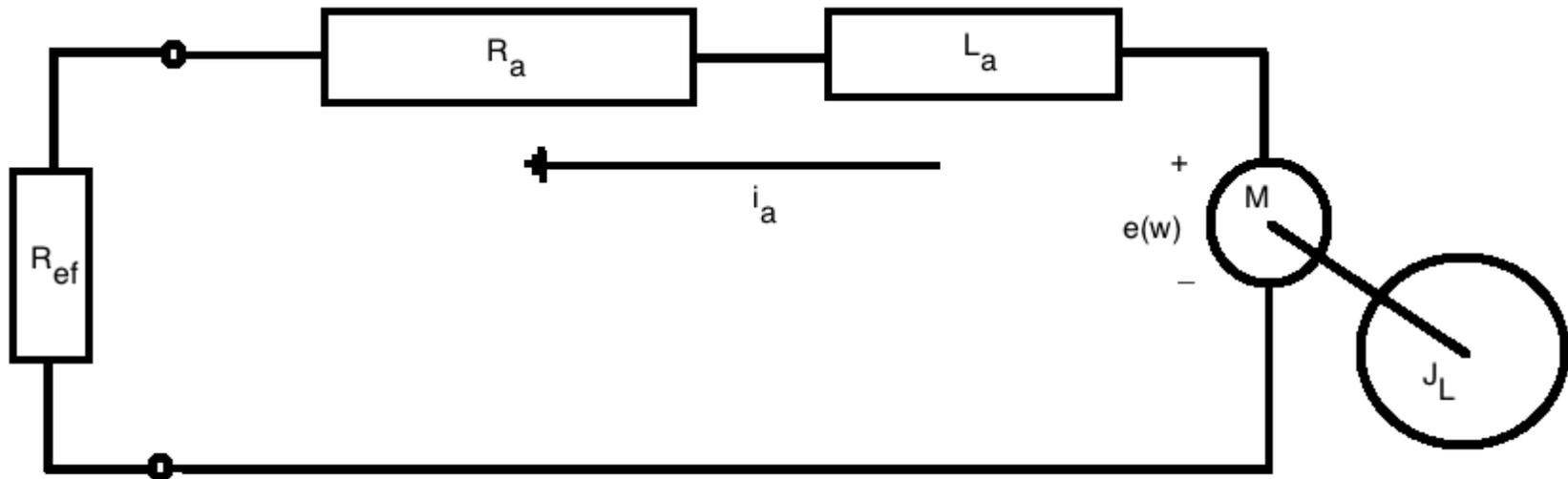
Toda máquina DC es totalmente bidireccional en lo que respecta al flujo de energía entre el puerto eléctrico de armadura y el eje motriz, por lo que si el circuito externo conectado a la armadura lo permite, es posible extraer energía del terminal eléctrico principal para convertir energía mecánica en eléctrica, lo que permite usar el motor como freno.

El frenado dinámico (o “regenerativo”) puede ser de dos tipos:

- 1.- Frenado resistivo (disipativo).
- 2.- Frenado activo (puede ser con recuperación de energía).

## 1.- Frenado resistivo:

La fuente de alimentación de armadura se reemplaza con una resistencia externa de frenado,  $R_{ef}$ , en la que se disipa la energía entregada por la fuente de voltaje contra-electro-motriz,  $E(\omega)$ .

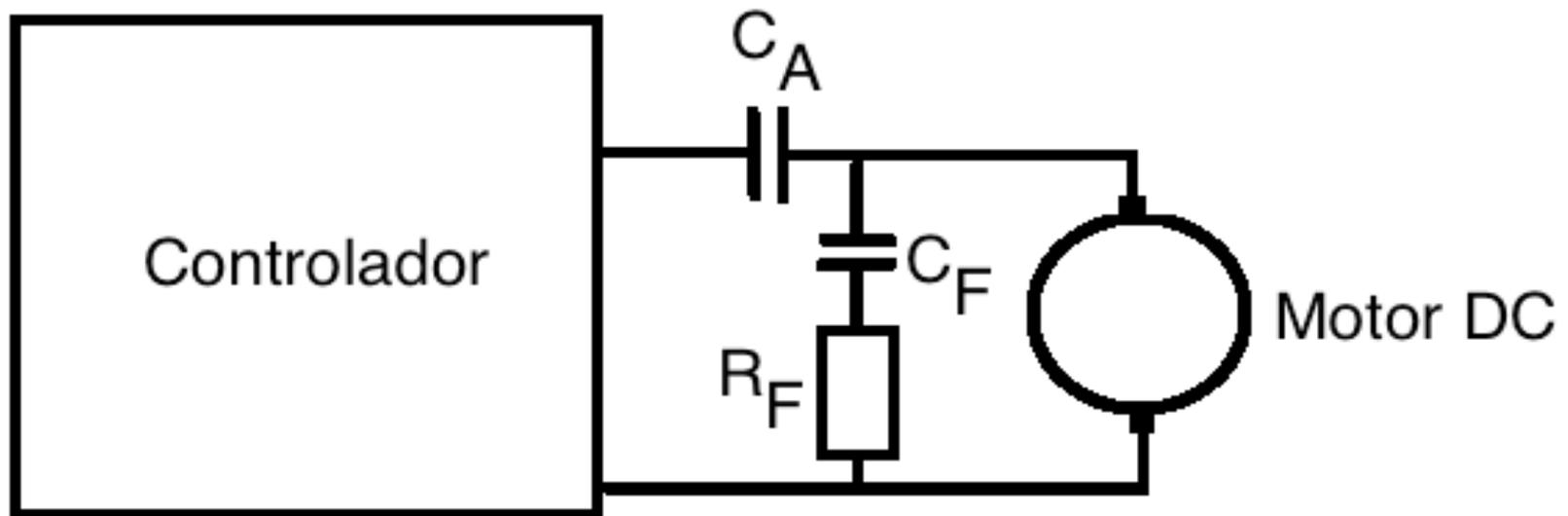


Frenado regenerativo disipativo  
(frenado resistivo)

## Proceso de frenado:

- 1.- Se lleva a cero la corriente de armadura reduciendo la tensión de armadura.
- 2.- Se desconecta la fuente de tensión de armadura y se conecta la resistencia de frenado.

La operación de conexión y desconexión de la resistencia de frenado suele hacerse con contactores electromecánicos.



Sistema de frenado resistivo con contactores.

$C_A$ : Contactor de operación.

$C_F$  Contactor de frenado

$R_F$ : Resistencia de frenado.

Los contactores deben estar controlados de forma que solo uno pueda estar cerrado en un instante determinado.

La configuración de contactores empleada para lograr el frenado disipativo puede ser aplicada como un respaldo de emergencia en caso de falla en cualquier sistema actuador para motores DC; si se emplea como sistema de frenado de emergencia, la acción de frenado de emergencia debe ser totalmente independiente del resto del sistema de control del actuador, para lo cual el contactor  $C_A$  entre el actuador y el motor deben ser del tipo “normalmente abierto”, mientras que el contactor  $C_F$  de la resistencia de frenado debe ser “normalmente cerrado”, de forma que al producirse un corte total de la energía, automáticamente se desconecte el motor del actuador y se conecte a la resistencia de frenado, asegurando la detención del móvil en el mínimo tiempo de parada de emergencia.

Ecuaciones del frenado resistivo.

$$0 = -i_a(t)(R_a + R_{ef}) - L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e(\omega)$$

$$T_{mf}(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) + T_l(t)$$

$$e(\omega) = k_\phi \omega_m(t)$$

$$T_{mf}(t) = k_\phi i_a(t)$$

## Características de operación:

- 1.- En el circuito eléctrico cambia el sentido de la corriente, pero no el de la tensión contraelectromotriz, ya que el rotor sigue girando en la misma dirección; el signo de la potencia se invierte en el terminal eléctrico, indicando que efectivamente la máquina eléctrica ahora opera como generador, entregando energía al circuito externo para que se disipe en la resistencia de frenado.
- 2.- El cambio de signo en la corriente implica un cambio de signo en el par electromagnético, que ahora se opone al movimiento.
- 3.- La solución específica del proceso de frenado depende de  $T_l(t)$ , y de los valores de  $R_a$ ,  $R_e$ ,  $L_a$ ,  $B$  y  $J$ , pero la fuerza de frenado disponible no es constante, ya que el par electromagnético cae a medida que se disipa la energía cinética de la carga y su valor no puede ser controlado.

4.- Si no existe el término de par externo de carga,  $T_1(t)$ , la ecuación de frenado es una ecuación diferencial de segundo orden, generalmente de respuesta amortiguada.

## 2.- Frenado activo.

La armadura de la máquina DC se alimenta con una fuente (o un arreglo de fuentes) que permite controlar el flujo de potencia en las dos direcciones (fuente-máquina y máquina-fuente), lo que permite operar la máquina DC como motor y como generador (freno).

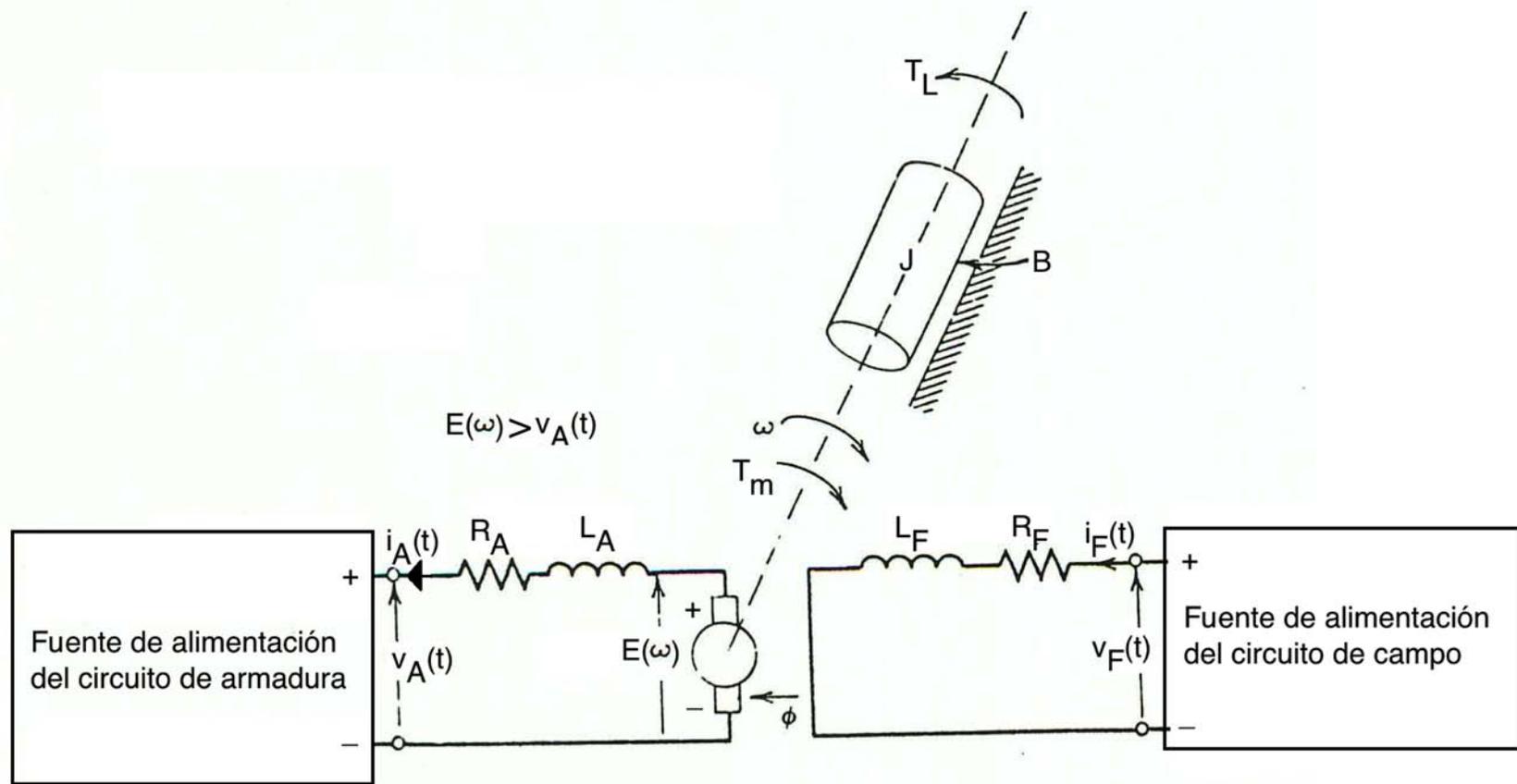


DIAGRAMA CIRCUITAL EQUIVALENTE DE UN MOTOR DC CONEXIÓN INDEPENDIENTE OPERANDO COMO FRENO REGENERATIVO.

FRENADO ACTIVO.

$$v_a(t) = -i_a(t)(R_a + R_e) - L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e(\omega)$$

$$T_{mf}(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) + T_l(t)$$

$$e(\omega) = k_\phi \omega_m(t)$$

$$T_{mf}(t) = k_\phi i_a(t)$$

## Proceso de frenado regenerativo:

1.- Se invierte la polaridad de la tensión  $V_a$ , aplicando la máxima tensión posible; la corriente de armadura sigue circulando en el sentido motriz, de la fuente a la máquina DC, que opera como motor, pero ahora la corriente de armadura esta circulando impulsada por la energía almacenada en el campo magnético de la inductancia de armadura. Parte de esta energía es recuperada por la fuente, y parte sigue siendo convertida en energía mecánica en el motor.

- 2.- Una vez que la corriente de armadura se hace cero, manteniendo la relación  $V_a < E(\omega)$  empieza a circular en sentido contrario, desde la máquina DC a la fuente; la máquina DC ha dejado de operar como motor y empieza a operar como generador (dinamo), convirtiendo energía mecánica proveniente de la carga en energía eléctrica que es recuperada por la fuente.
- 3.- La transferencia de energía se controla regulando la tensión de la fuente para mantener la corriente en su valor nominal, con lo que el proceso de frenado se realiza a par máximo.
- 4.- El frenado controlado a par constante es solo posible dentro de un rango limitado de velocidades, el cual, en primera aproximación, despreciado el efecto de  $L_a$ , viene dado por:

$$\Delta\omega = \frac{k_{\phi}\omega_i - R_a I_{af} - V_{a\min}}{k_{\phi}}$$

donde:

$\Delta\omega$  es el rango de variación de velocidad,  $\omega_i$  la velocidad inicial,  $I_{af}$  la corriente que produce el par de frenado deseado y  $V_{a\min}$  el valor de la tensión mínima de la fuente externa.

5.- El frenado activo puede ser disipativo o no disipativo. En el primer caso la energía recuperada por la fuente  $v_a$  se disipa en una resistencia, en el segundo se inyecta en el sistema de alimentación eléctrico general o se guarda en un banco de baterías para su uso posterior. La modalidad que se implemente dependerá de la topología del sistema eléctrico de alimentación empleado.