

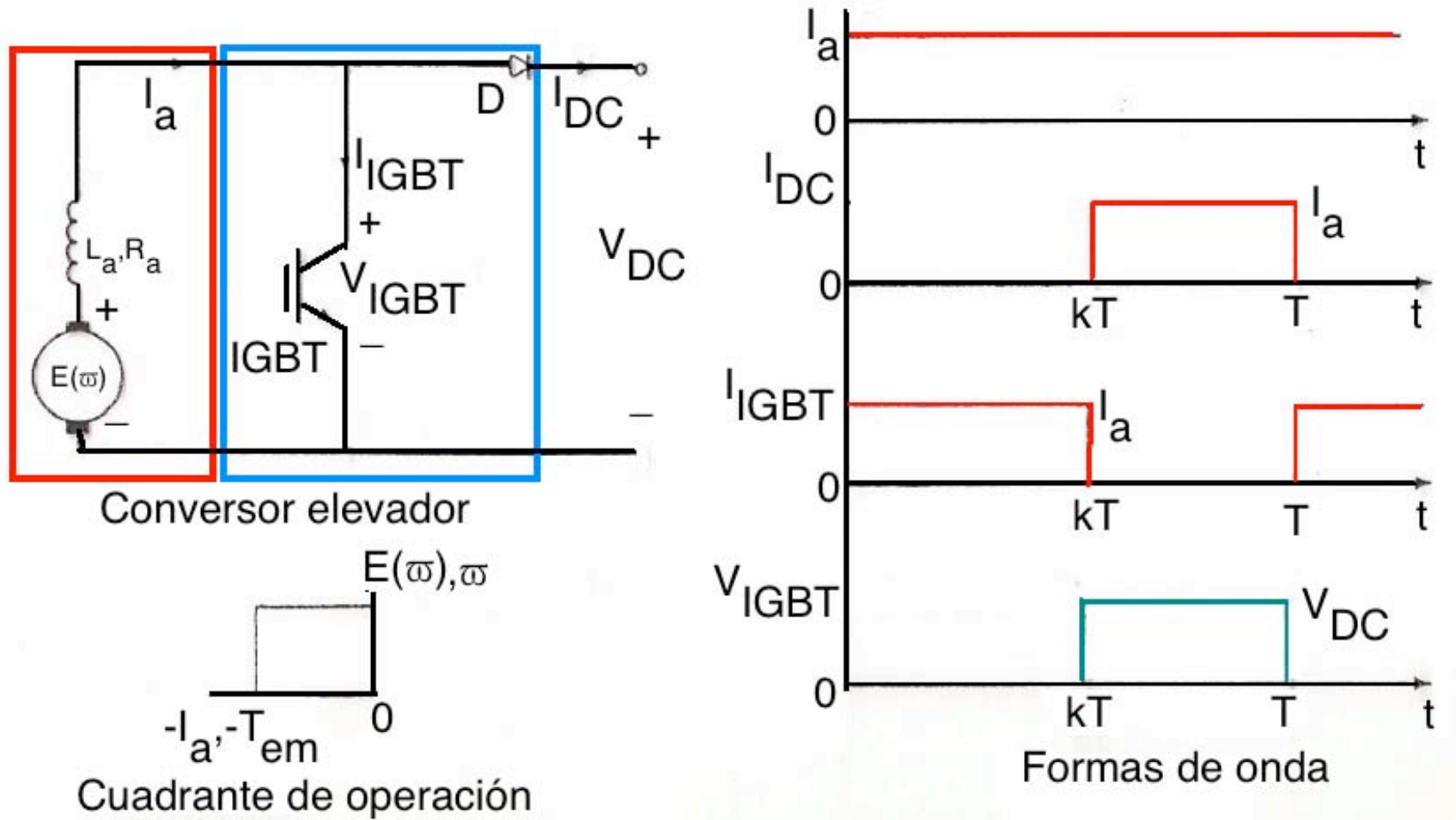
## Convertidor elevador de un cuadrante para generador DC.

Cuando se emplea como actuador para una máquina DC el regulador elevador de tensión se encarga de suministrar la tensión de oposición a la máquina cuando esta opera como generador.

En esta configuración la máquina toma energía del sistema mecánico conectado a su eje y la convierte en energía eléctrica y el regulador reductor entrega la energía eléctrica a la fuente.

El objetivo de esta operación es elevar la tensión generada en la máquina eléctrica hasta el nivel de tensión de la fuente en la que se desea recuperar la energía generada. Esto presupone que la fuente DC externa es capaz de aceptar energía.

# Análisis del actuador elevador de tensión para máquinas DC (regulador "boost").



Operando en estado estacionario, la corriente  $I_a$  crece cuando el IGBT esta conduciendo.

Si  $t_1$  es el tiempo de conducción,  $I_{a1}$  el valor inicial de la corriente en la armadura, e  $I_{a2}$  el valor final, se cumple:

$$E(\omega) = L_a \frac{I_{a2} - I_{a1}}{t_1} = L_a \frac{\Delta I_a}{t_1}$$

$$t_1 = \frac{\Delta I_a L_a}{E(\omega)}$$

Siendo  $\Delta I_{La}$  el rizado de corriente de armadura, se cumple que el rizado del par generado en el motor,  $\Delta T_{em}$ , será:

$$\Delta T_{em} = k_{\phi} \Delta I_a$$

Dependiendo de la aplicación el valor del rizado de par puede tener que estar limitado por debajo de un valor crítico; si esto es así por supuesto el actuador debe ser diseñado para asegurar que esta limitación se cumpla.

En esas condiciones, cuando el IGBT esta apagado conduce el diodo auxiliar D, y la corriente  $I_a$  se reduce. Si el intervalo de apagado es  $t_2$ , y el circuito opera en estado estacionario, la corriente final en este intervalo será igual a la inicial en el intervalo anterior, luego:

$$E(\omega) - V_{DC} = -L_a \frac{\Delta I_a}{t_2}$$

$$t_2 = \frac{\Delta I_a L_a}{E(\omega) - V_{DC}}$$

de donde, para que la operación sea cíclica:

$$\Delta I_a = \frac{[E(\omega) - V_{DC}]t_1}{L_a} = \frac{E(\omega)t_2}{L_a}$$

Si  $t_1$  y  $t_2$  se definen en función del período de repetición  $T$ , asumido constante en la aplicación, y del ciclo de trabajo  $k$  del IGBT como:

$$t_1 = kT$$

$$t_2 = (1 - k)T$$

la tensión de armadura,  $E(\omega)$  resulta:

$$V_{DC} = E(\omega) \frac{T}{t_2} = \frac{E(\omega)}{1 - k}$$

Si se considera que todos los elementos del conversor son ideales y por lo tanto sin pérdidas, las potencias son iguales en la entrada y la salida, luego:

$$P = E(\omega)I_a = V_{DC}I_{DC} = \frac{E(\omega)}{1-k}I_{DC}$$

y la corriente promedio entregada por el generador a la fuente DC es:

$$I_a = \frac{I_{DC}}{1-k}$$

Las fórmulas desarrolladas empleando la aproximación ideal para calcular tanto  $V_{DC}$  como  $I_a$  tienen como denominador el factor  $(1-k)$ ; evidentemente se presenta una inconsistencia entre las expresiones matemáticas y la realidad física, ya que en ambos casos se cumple matemáticamente que:

$$\lim V_{DC} |_{k \Rightarrow 1} = \infty$$

$$\lim I_a |_{k \Rightarrow 1} = \infty$$

lo cual es, por supuesto, físicamente imposible.

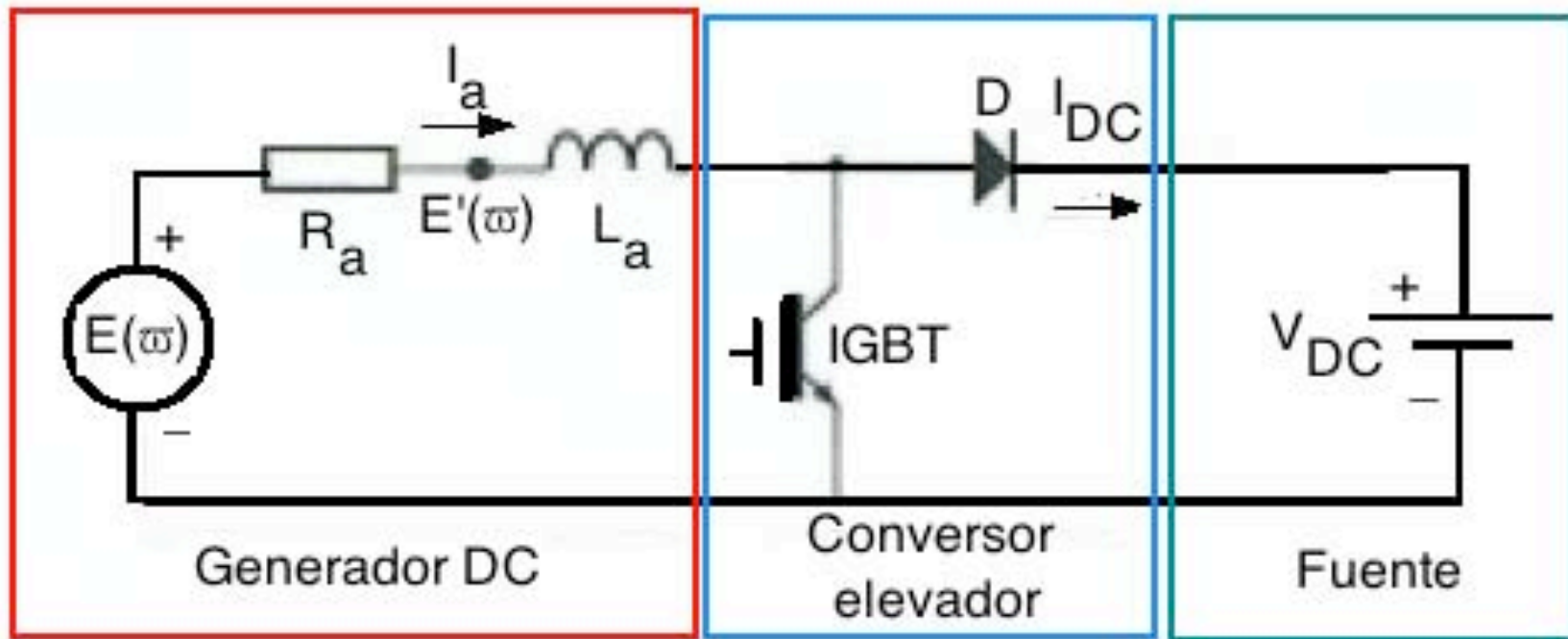
Es preciso por lo tanto introducir un mínimo de elementos no ideales en el modelo para obtener una respuesta que tenga sentido físico.



Para hacer esto se debe considerar la resistencia del circuito de armadura y un modelo más realista de la fuente  $V_{DC}$ , en el cual el valor de la resistencia equivalente  $R_{eDC}$  es:

$$R_{eDC} = \frac{V_{DC}}{I_{DC}}$$

Este elemento representa la capacidad de absorber la potencia entregada por el generador; la capacidad equivalente ofrece un camino de baja impedancia para que circule el componente de rizado de la corriente, dado que su valor no interviene en el cálculo en estado estacionario, se suele asumir infinita para simplificar.



Sistema para frenado regenerativo controlado.  
Se asume que la fuente externa es capaz de aceptar energía de la carga.

En estas condiciones la relación entre  $E(\omega)$  y  $V_{DC}$  resulta:

$$V'_{DC} = \frac{E'(\omega)}{1-k} \Rightarrow E'(\omega) = V_{DC}(1-k)$$

$$E'(\omega) = E(\omega) - R_a I_a$$

$$E(\omega) - R_a I_a = V_{DC}(1-k)$$

Donde  $I_a$  y  $E(\omega)$  son variables determinadas por el sistema mecánico y especialmente  $E(\omega)$ , que solo puede ser afectada indirectamente desde el circuito eléctrico.

Por lo tanto el proceso de frenado dinámico debe ejecutarse ajustando dinámicamente el factor  $k$  para mantener la corriente  $I_a$  en el valor necesario para producir el par de frenado requerido; en este caso la cantidad de energía recuperada es un factor secundario.

Por su parte, si el sistema esta dedicado a la producción de energía DC a partir de una fuente de energía mecánica, el conversor debe controlarse para ajustar la operación en el punto de máxima transferencia de energía, no mantener un valor específico de corriente de armadura.

El período de operación,  $T$ , puede ser expresado en función de las variables de conmutación como:

$$T = \frac{1}{f} = t_1 + t_2 = \frac{\Delta I_a L_a}{E(\omega)} + \frac{\Delta I_a L_a}{E(\omega) - V_{DC}}$$

de donde el rizado de corriente,  $\Delta I_a$  puede expresarse como:

$$\Delta I_a = \frac{[E(\omega) - V_{DC}] V_{DC}}{f L_a E(\omega)}$$

$$\Delta I_a = \frac{k V_{DC}}{f L_a}$$

El rizado de corriente es inversamente proporcional al valor de la inductancia y al de la frecuencia de conmutación.

Adicionalmente se observa que el rizado crece monótonamente con  $k$ .

Dado un valor máximo de rizado de corriente permisible en el diseño,  $\Delta I_M$ , la inductancia mínima necesaria para asegurar que el rizado sea siempre menor a igual a dicho máximo es:

$$L_m = \frac{V_{DC}}{f\Delta I_M}$$

Para asegurar que el valor de  $L_m$  dado por la ecuación anterior es efectivamente el menor técnicamente posible, debe por supuesto operarse a la frecuencia de conmutación máxima que resulte práctica con los dispositivos electrónicos que se empleen en el diseño,  $f_{mp}$ .

Conocido el valor de  $L_m$ , debe ser comparado con el de la inductancia de armadura de la máquina DC.

Si se cumple  $L_m < L_a$ , el rizado de corriente será menor que el valor máximo considerado, si por el contrario se tiene  $L_m > L_a$ , será necesario agragar una inductancia externa,  $L_e$ , que cumpla:

$$L_a + L_e \geq L_m$$

## Consideraciones de dimensionamiento de los componentes.

1.- El conmutador controlado debe ser capaz de soportar una tensión de bloqueo por lo menos igual a  $V_{DCM}$ , la máxima tensión de la fuente externa que sea posible considerando los efectos de regulación de la fuente.

Esta tensión es también la que debe soportar el diodo como tensión inversa.

En la práctica es conveniente incluir un factor de sobre dimensionamiento en la capacidad de bloqueo como factor de seguridad del diseño.



2.- La corriente pico que deben soportar tanto el diodo como el conmutador controlado,  $I_{pM}$ , viene dada por:

$$I_{pM} = I_{aM} + \frac{\Delta I_{aM}}{2}$$

donde  $I_{aM}$  es la máxima corriente de armadura considerada en el peor caso de operación del sistema con sobrecarga y  $\Delta I_{aM}$  es la máxima corriente de rizado de diseño.

Como en el caso de las tensiones, es conveniente incluir adicionalmente un factor de sobre dimensionamiento en la capacidad de manejo de corriente de los dispositivos como factor de seguridad.

## Frenado regenerativo disipativo.

Como se ha indicado, la configuración elevadora de tensión permite operar la máquina eléctrica DC como generador, convirtiendo energía mecánica en energía eléctrica y elevar la tensión de salida hasta alcanzar el valor necesario para que la energía eléctrica sea transferible a la fuente externa.

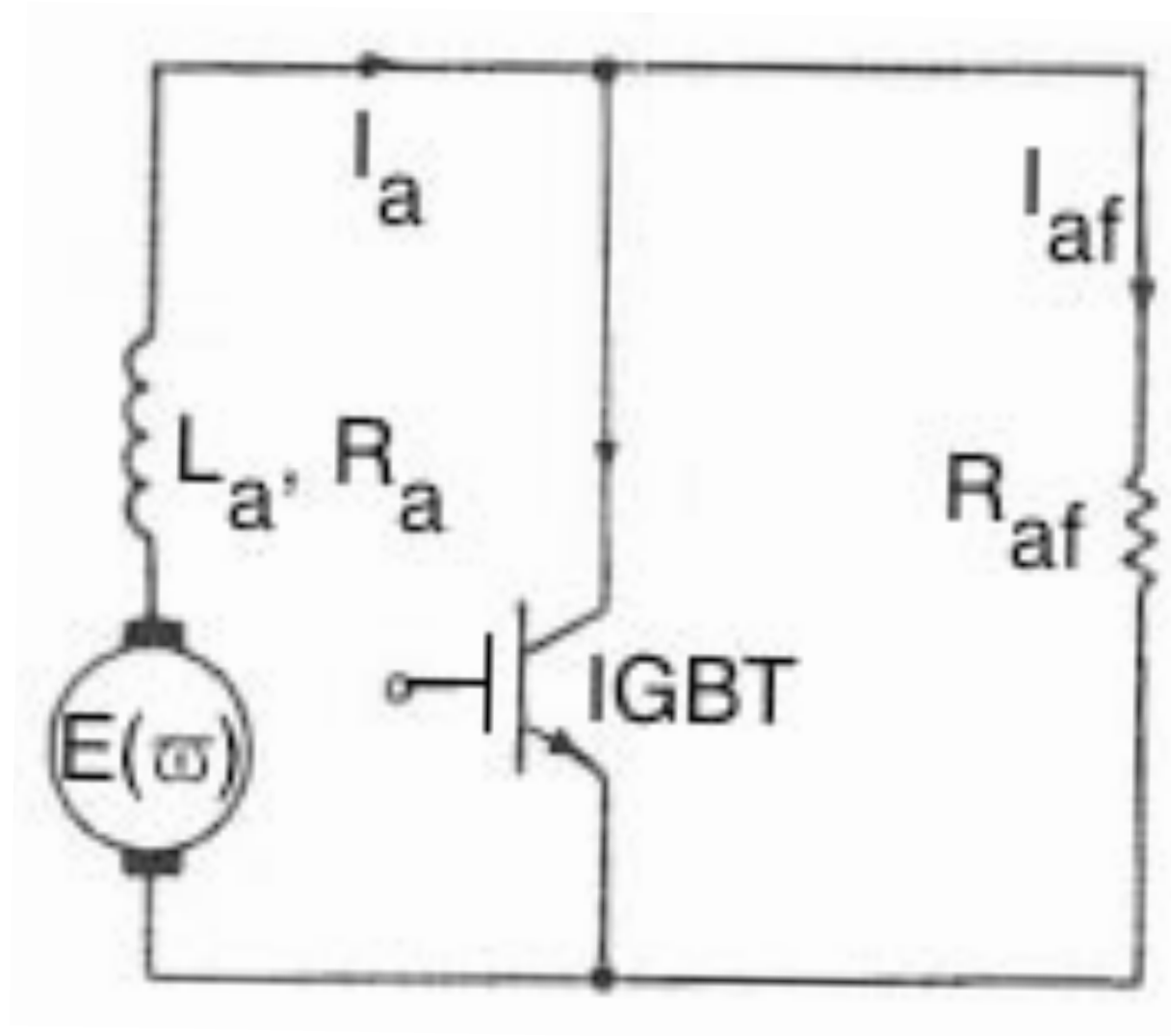
Para que este proceso sea posible es necesario que la fuente externa sea bidireccional en el flujo de energía, esto es, que sea capaz tanto de entregar como de recibir energía en sus terminales DC.

Si la fuente primaria de energía no es capaz de aceptar regeneración, la energía recuperada durante el frenado activo deberá ser disipada en una resistencia auxiliar,  $R_{af}$ .

Este es un caso muy común en sistemas de baja/media potencia, donde la energía eléctrica DC se obtiene a partir del sistema AC con un rectificador no controlado.

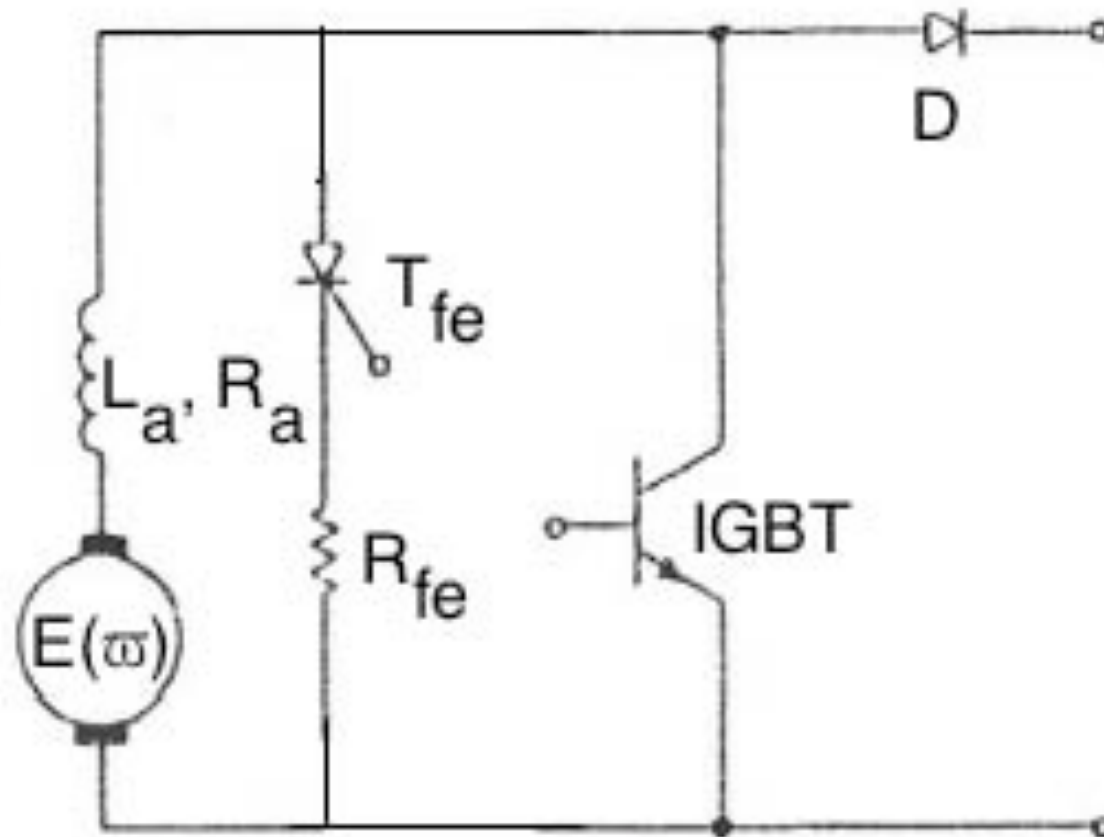
La resistencia de frenado debe dimensionarse para que sea capaz de aceptar la máxima energía de frenado sin que su temperatura sobrepase el valor crítico; para lograr esto es posible que se deba emplear enfriamiento forzado.

El circuito de frenado puede simplificarse eliminando el diodo auxiliar.



Como medida de seguridad, en sistemas críticos (por ejemplo vehículos de transporte de tracción eléctrica DC) el sistema de frenado activo regenerativo debe ser respaldado con un sistema de frenado disipativo que debe tener un lazo de control lo mas simple posible y, por supuesto, completamente independiente del resto del sistema de control y dotado de prioridad máxima.

Un circuito de este tipo puede también ser necesario cuando la fuente primaria tiene una capacidad limitada para recibir energía (por ejemplo un banco de baterías), en cuyo caso el circuito debe actuar automáticamente para impedir sobrecargar a la fuente primaria.



Sistema de frenado de emergencia como respaldo al sistema principal de frenado controlado.

En caso de emergencia, el "botón de pánico", o una señal en la vía dispara el tiristor de frenado de emergencia,  $T_{fe}$ , lo cual conecta la resistencia de frenado de emergencia,  $R_{fe}$ , en paralelo con el motor; una vez disparado  $T_{fe}$  la acción de frenado no se puede detener hasta que la corriente de armadura no sea menor que la corriente de sostenimiento del tiristor.