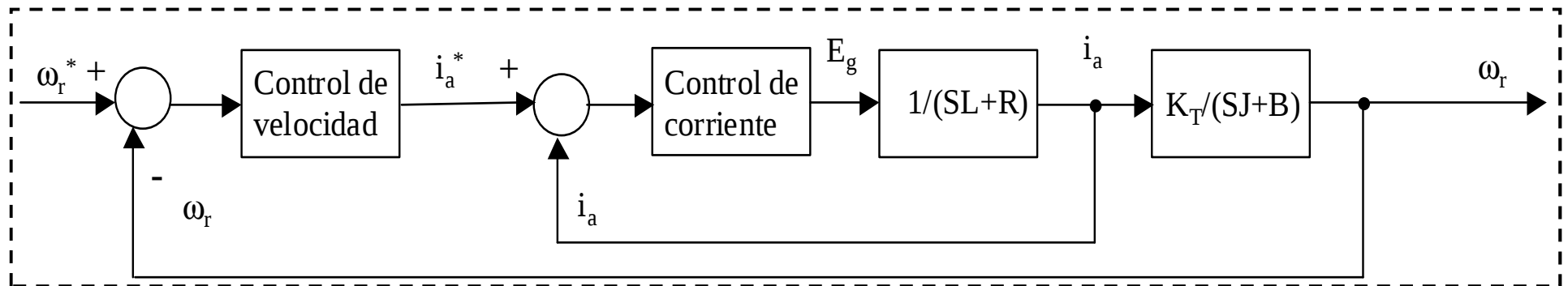
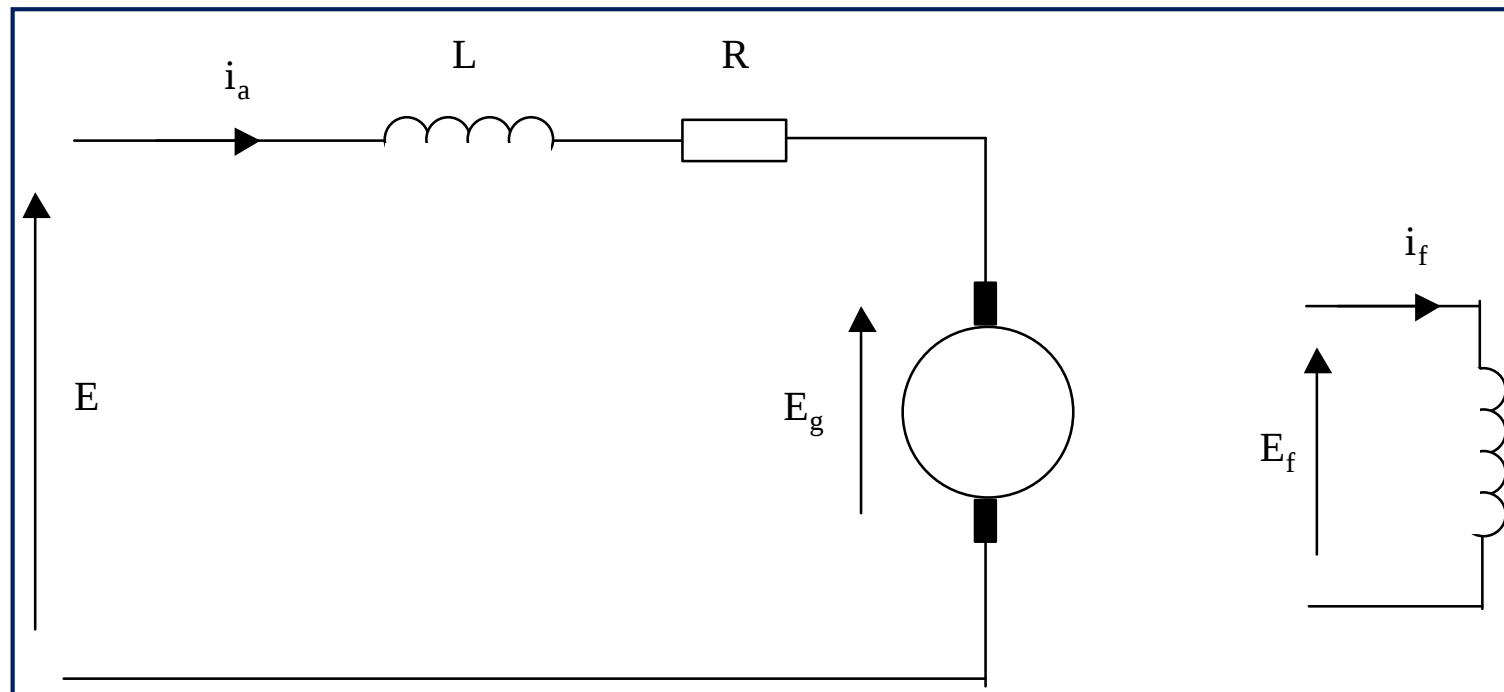


Lazos de Control Anidados

Existen algunas aplicaciones donde se necesitan lazos de control anidados. El ejemplo mas típico es el caso de controladores de máquinas eléctricas. En esta aplicación se usan habitualmente dos lazos, un lazo de velocidad externo e internamente un lazo de corriente. La siguiente figura muestra esta construcción:



La característica principal de estos esquemas de control es que el lazo interno es bastante mas rápido que el lazo externo. Por ejemplo el lazo de corriente es generalmente 10 veces mas rápido que el lazo de velocidad en un máquina. De esta forma los compensadores se pueden diseñar en forma desacoplada.



La armadura del motor se alimenta utilizando un fuente de voltaje variable E . Si se mantiene la corriente de campo i_f constante, las ecuaciones diferenciales del motor de corriente continua se escriben como:

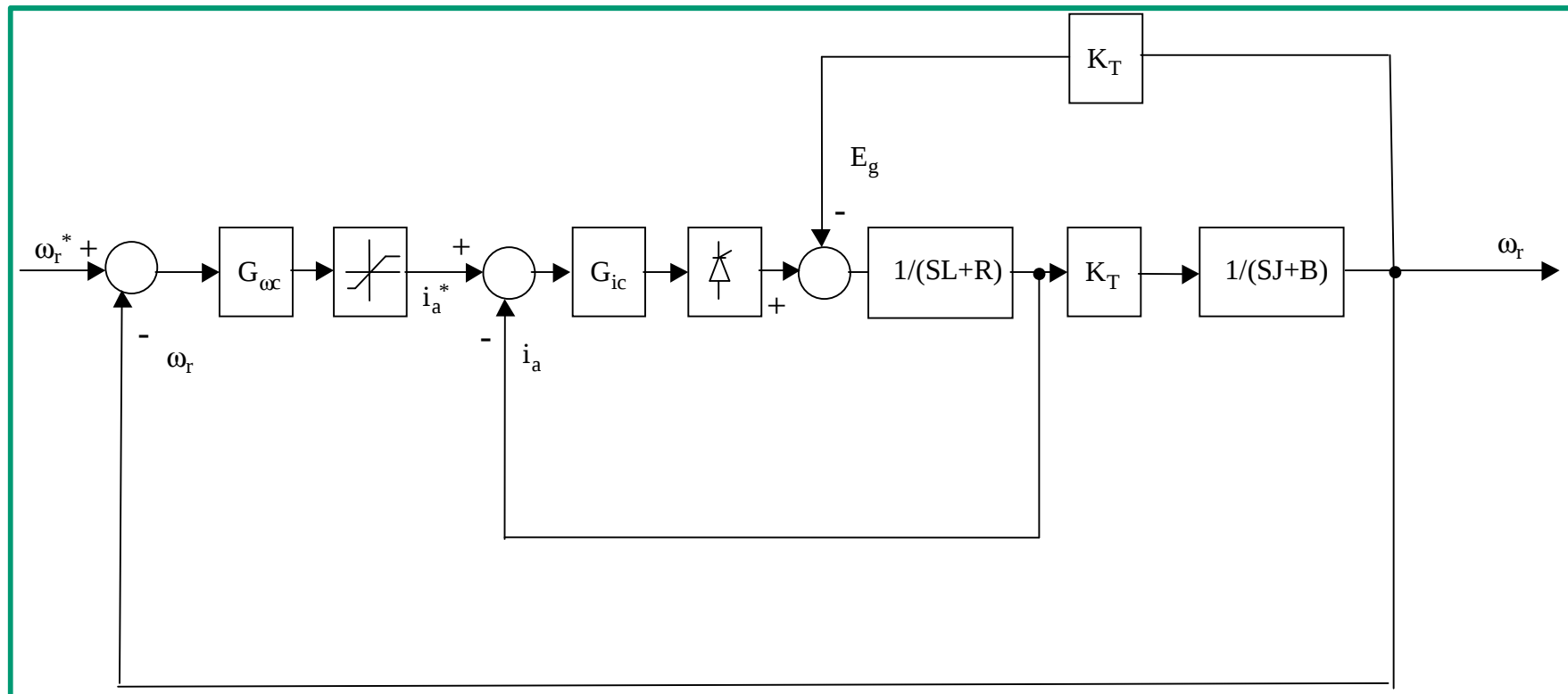
$$E_g = K_T \omega_r$$

$$E = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + K_T \omega_r$$

$$T_e = K_T i_a$$

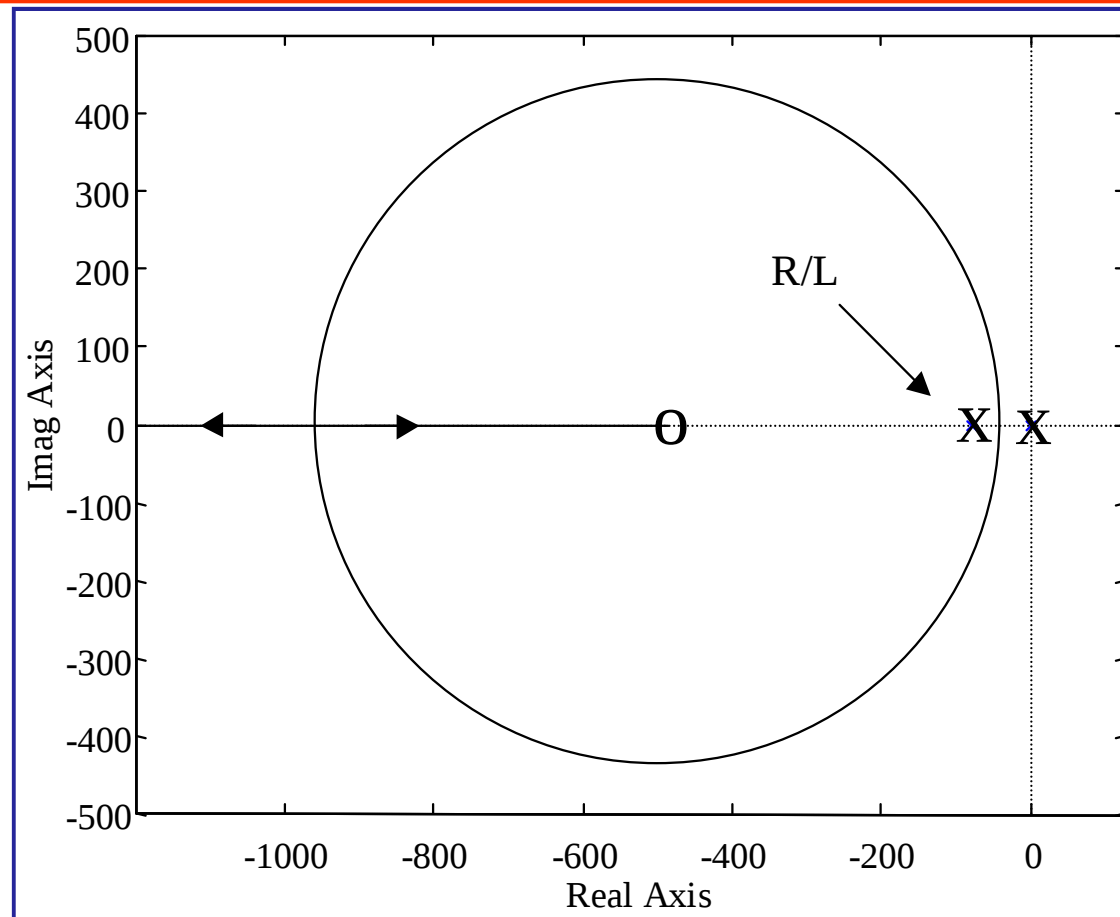
$$T_e = J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r$$

Donde K_T es una constante que depende de aspectos constructivos del motor y del flujo de operación, R y L son la resistencia e inductancia de los devanados, ω_r es la resistencia rotacional, J y B son la inercia rotacional y el coeficiente de fricción respectivamente.

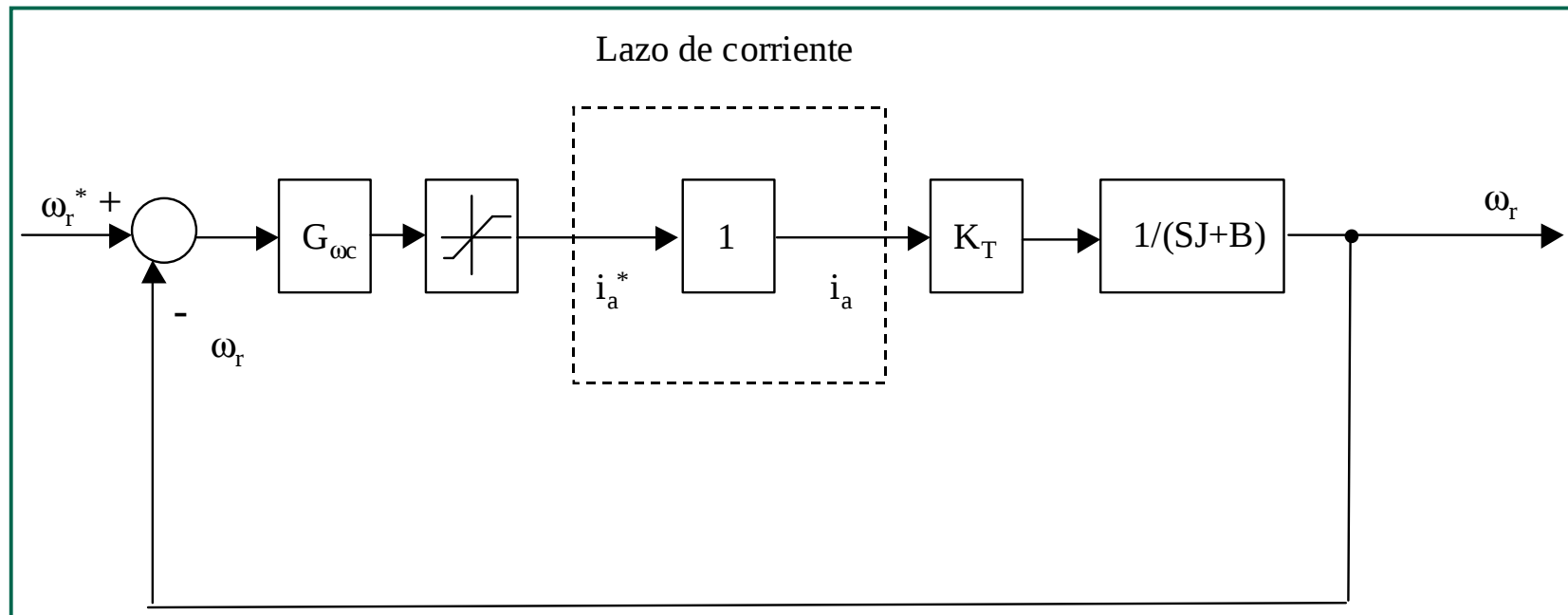


Para el diseño de los lazos de control se utiliza habitualmente una frecuencia de al menos 70 o 100Hz para el lazo de corriente y alrededor de 5Hz para el lazo de velocidad. El coeficiente de amortiguamiento utilizado es habitualmente cercano a [0.7-0.8] pero esto depende de la aplicación.

Para el diseño del lazo de corriente se considera que este es mucho mas rápido que el lazo de velocidad. Esto se justifica debido a que la constante de tiempo eléctrica L/R es mucho menor que la constante de tiempo mecánica J/B . Tomando esto en consideración se puede considerar que la realimentación $K_T \omega_r$ es una entrada constante o una perturbación externa.



El diseño del lazo de velocidad se hace considerando que el lazo de corriente es muy rápido y que además se encuentra diseñado para cero error en estado estacionario a entrada escalón. En este caso se puede considerar el lazo de corriente como un bloque de ganancia uno.



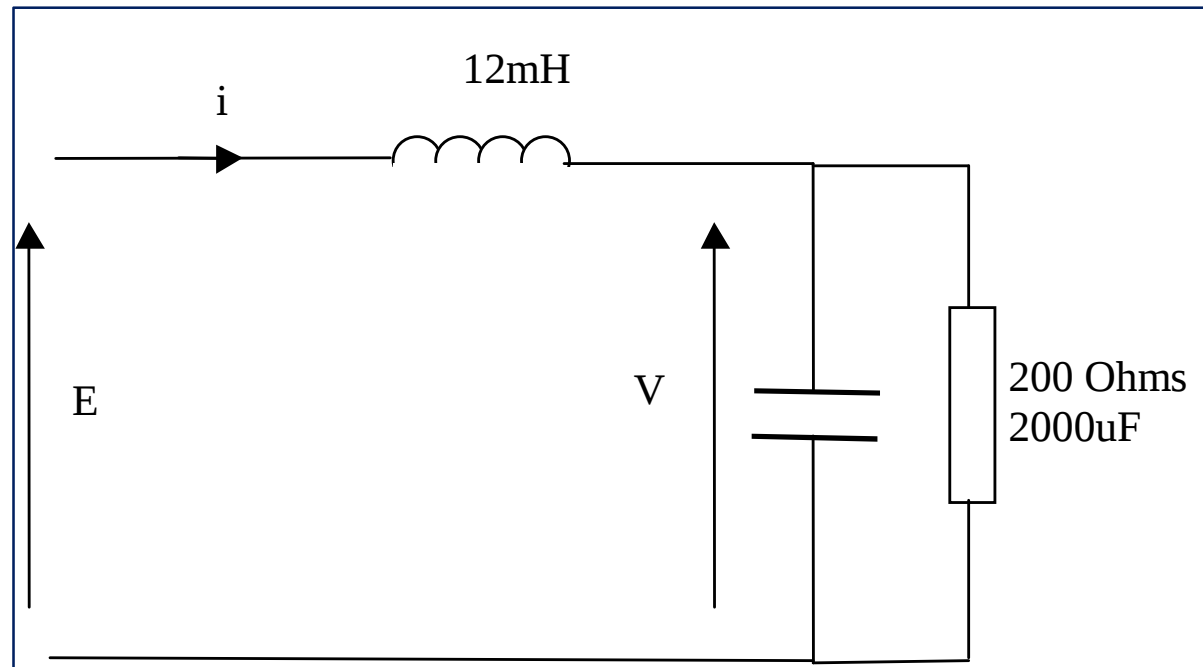
Compensación Feed-Forward

Los lazos de control son habitualmente diseñados para que los polos de lazo cerrado del sistema se encuentren en una posición adecuada, con un ancho de banda y coeficiente de amortiguamiento apropiados. Para esto normalmente se utiliza la función de transferencia salida/entrada del sistema y no se considera el efecto de las perturbaciones.

Compensación Feed-Forward

La compensación feed-forward o pre-alimentación consiste en medir las perturbaciones y utilizarlas en el controlador (en lo posible el mas rápido del sistema) para que este compense las perturbaciones evitando grandes cambios en la salida de la planta.

Por ejemplo suponiendo que se desee controlar la tensión en el condensador de la siguiente figura:

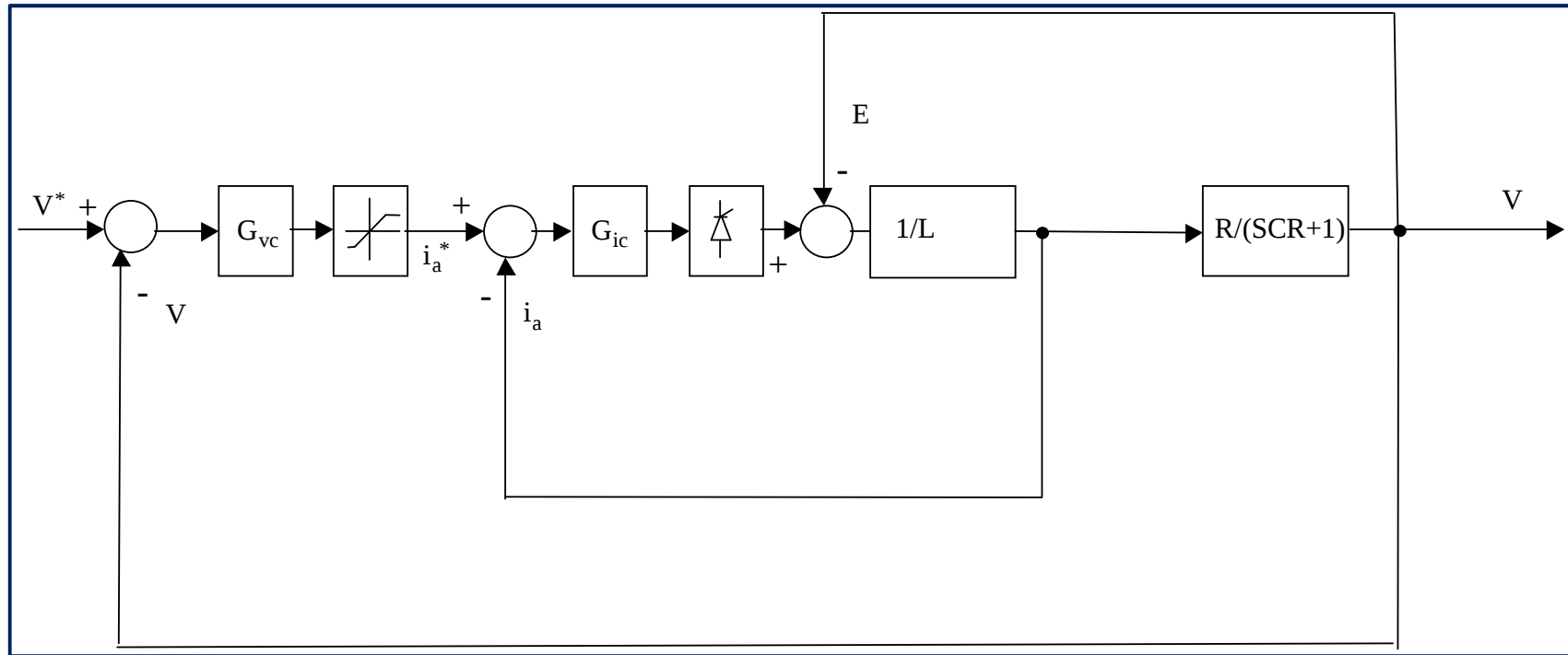


La estructura de control propuesta es la de utilizar dos lazos, uno de corriente y otro de tensión. Las ecuaciones del sistema son:

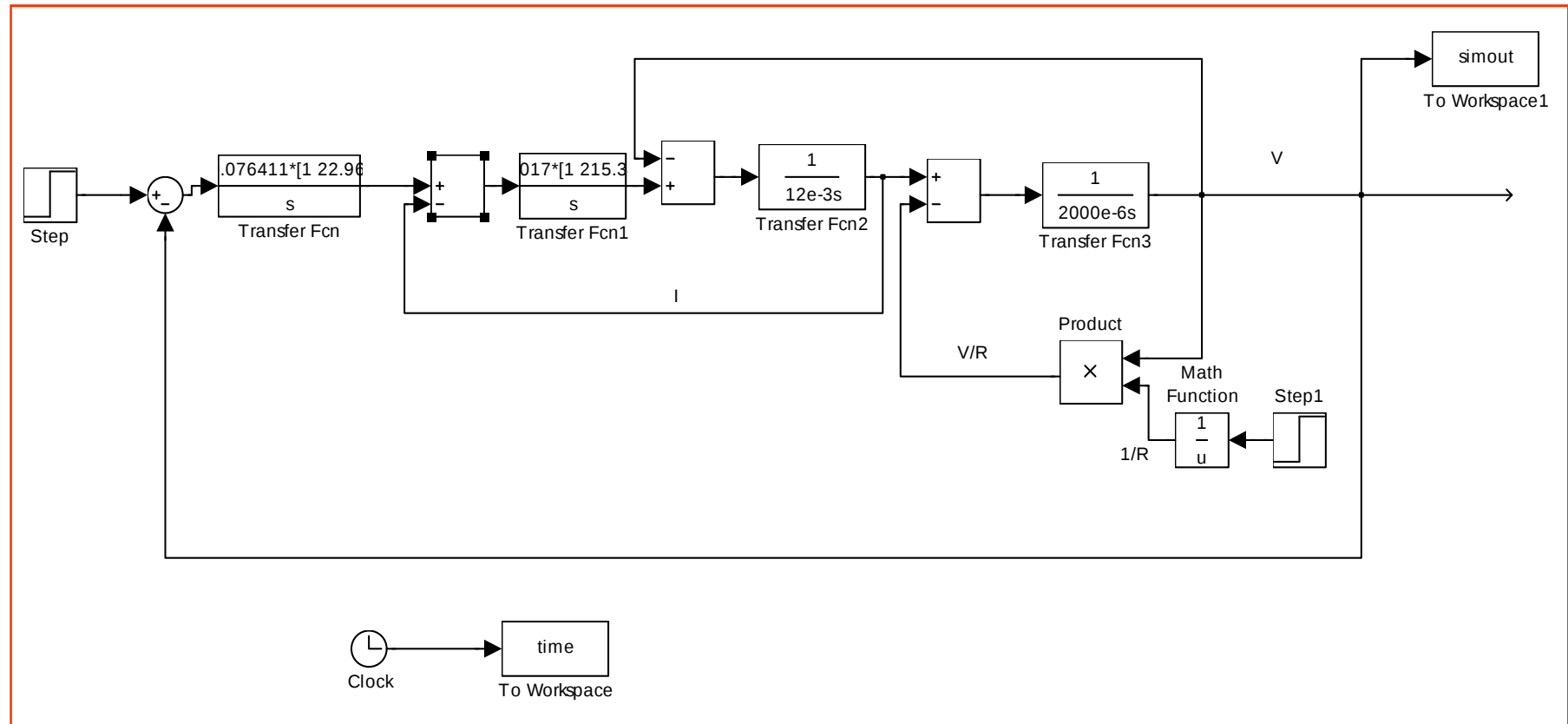
$$V = i \frac{R / Sc}{R + 1 / Sc} = i \frac{R}{1 + sCR}$$

$$i = \frac{E - V}{sL}$$

El diagrama de bloques, sin considerar compensación feed-forward, es:



Para ilustrar el efecto de la compensación feed-forward se simulará un transiente que consiste en la conexión de una resistencia en paralelo con la ya existente. El lazo de corriente se encuentra diseñado para una frecuencia natural de 300rads^{-1} mientras que el lazo de voltaje se encuentra diseñado con una frecuencia natural de 30rads^{-1} . Para ambos lazos el coeficiente de amortiguamiento es 0.707. El diagrama de bloques implementado en simulink se muestra en la siguiente figura:

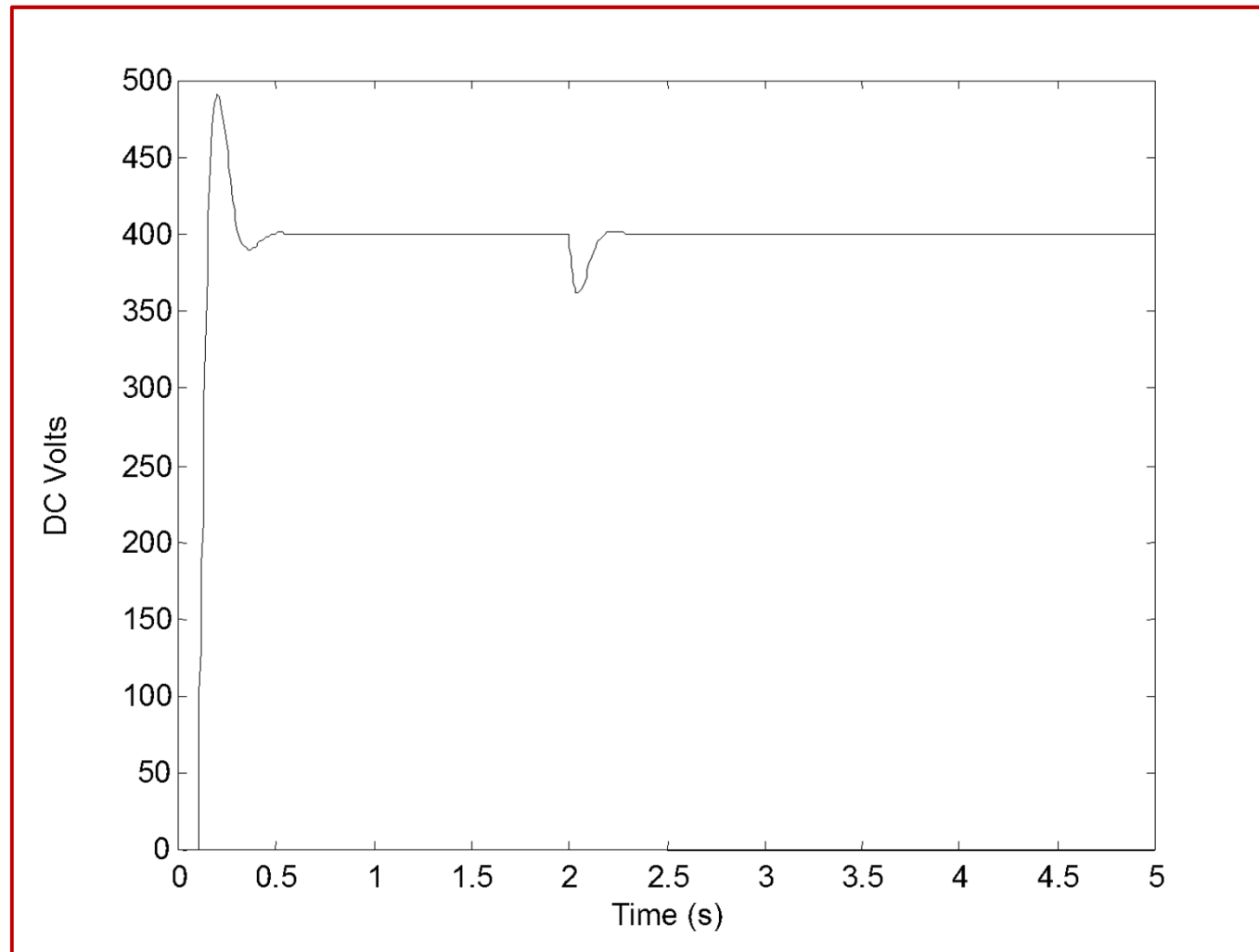


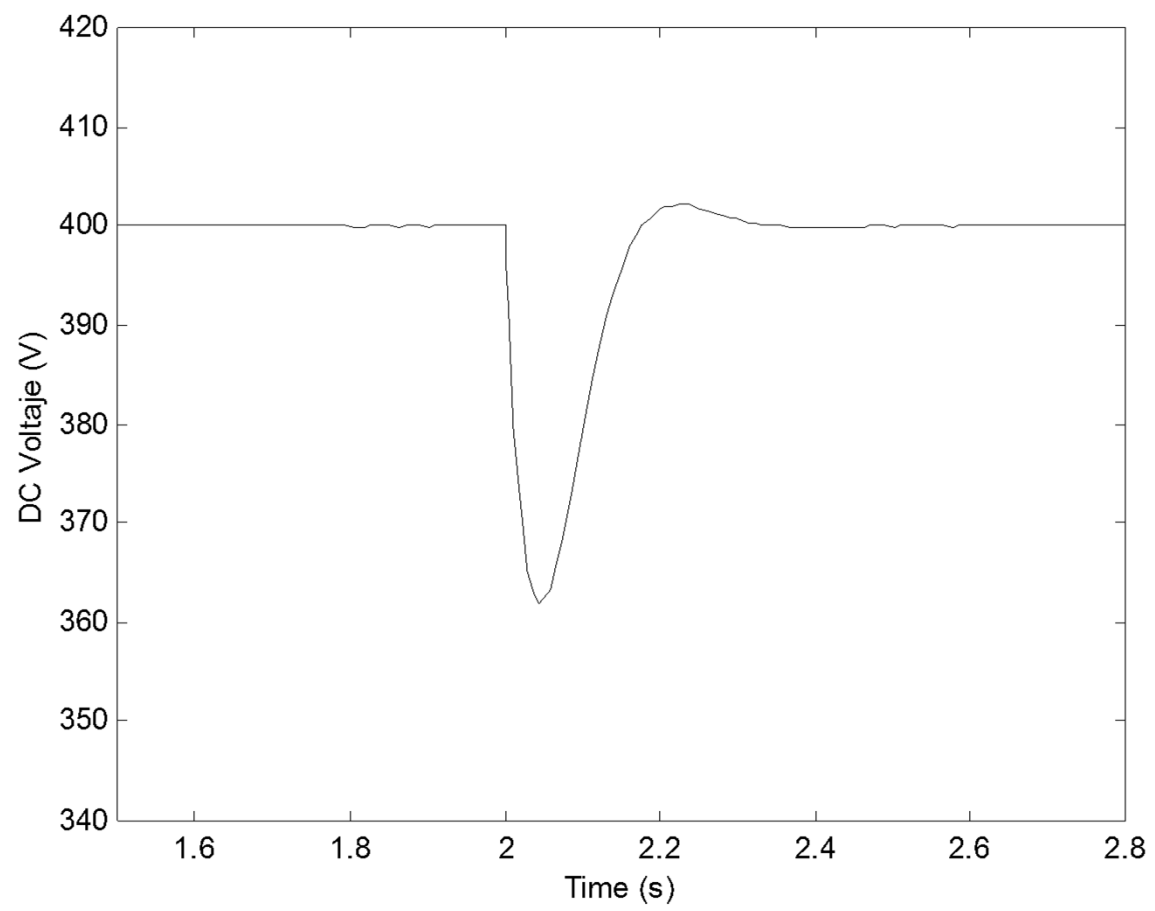
Los controladores de corriente y voltaje utilizados en la simulación son:

$$G_I = 5.0171 \frac{(s + 215.34)}{s}$$

$$G_V = 0.076411 \frac{(s + 22.96)}{s}$$

El cambio de resistencia se efectúa utilizando un multiplicador y un inversor (para obtener el valor $1/R$). La resistencia neta conectada en paralelo con el condensador cambia de 200 Ohms a 50 Ohms en $t=2\text{seg}$. La inductancia es de 12mH y la capacitancia es de 2000uF





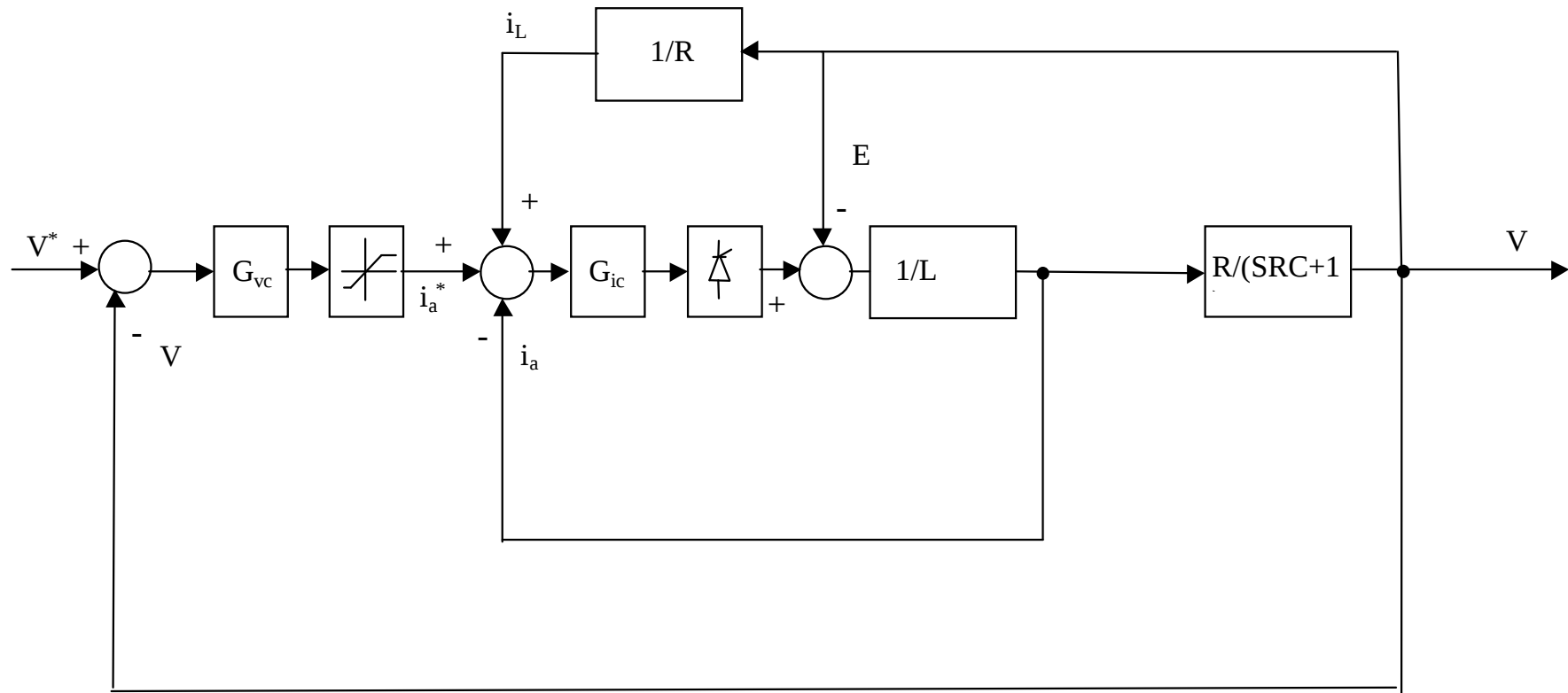
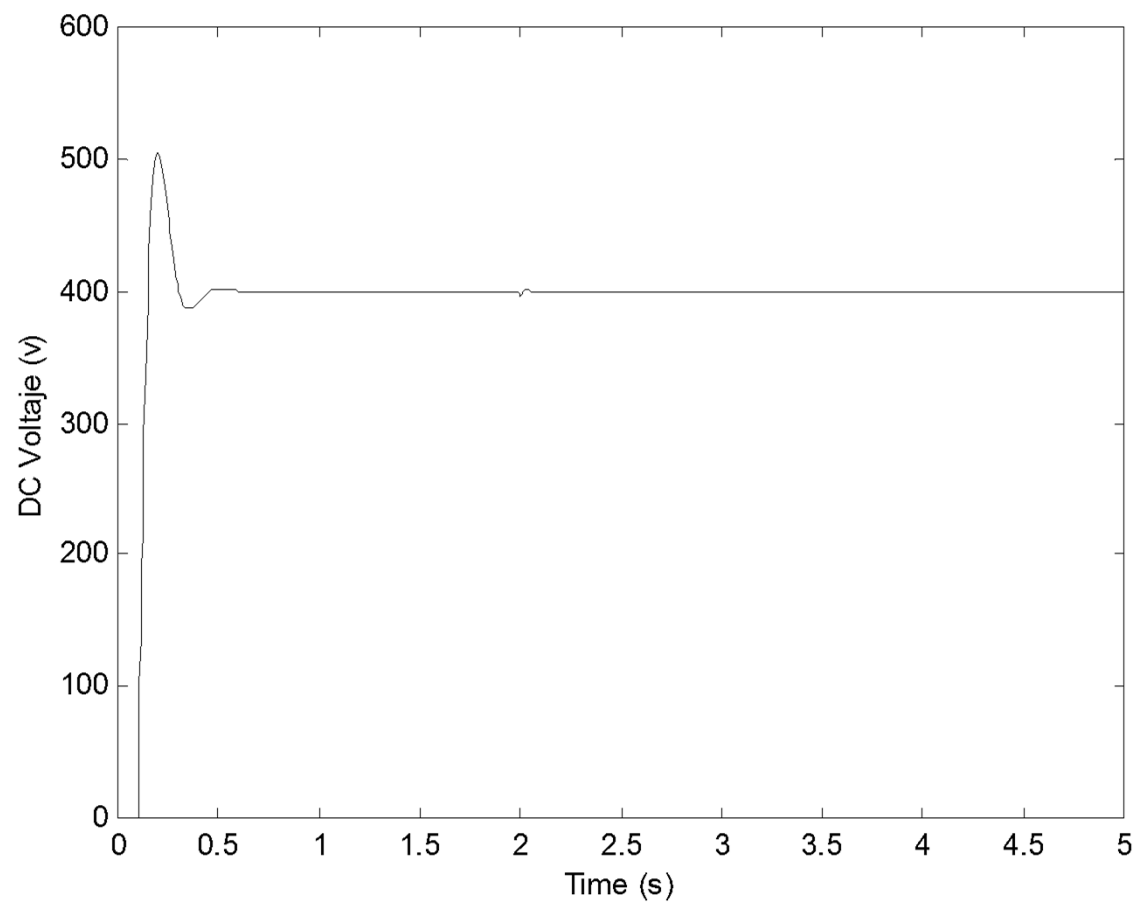
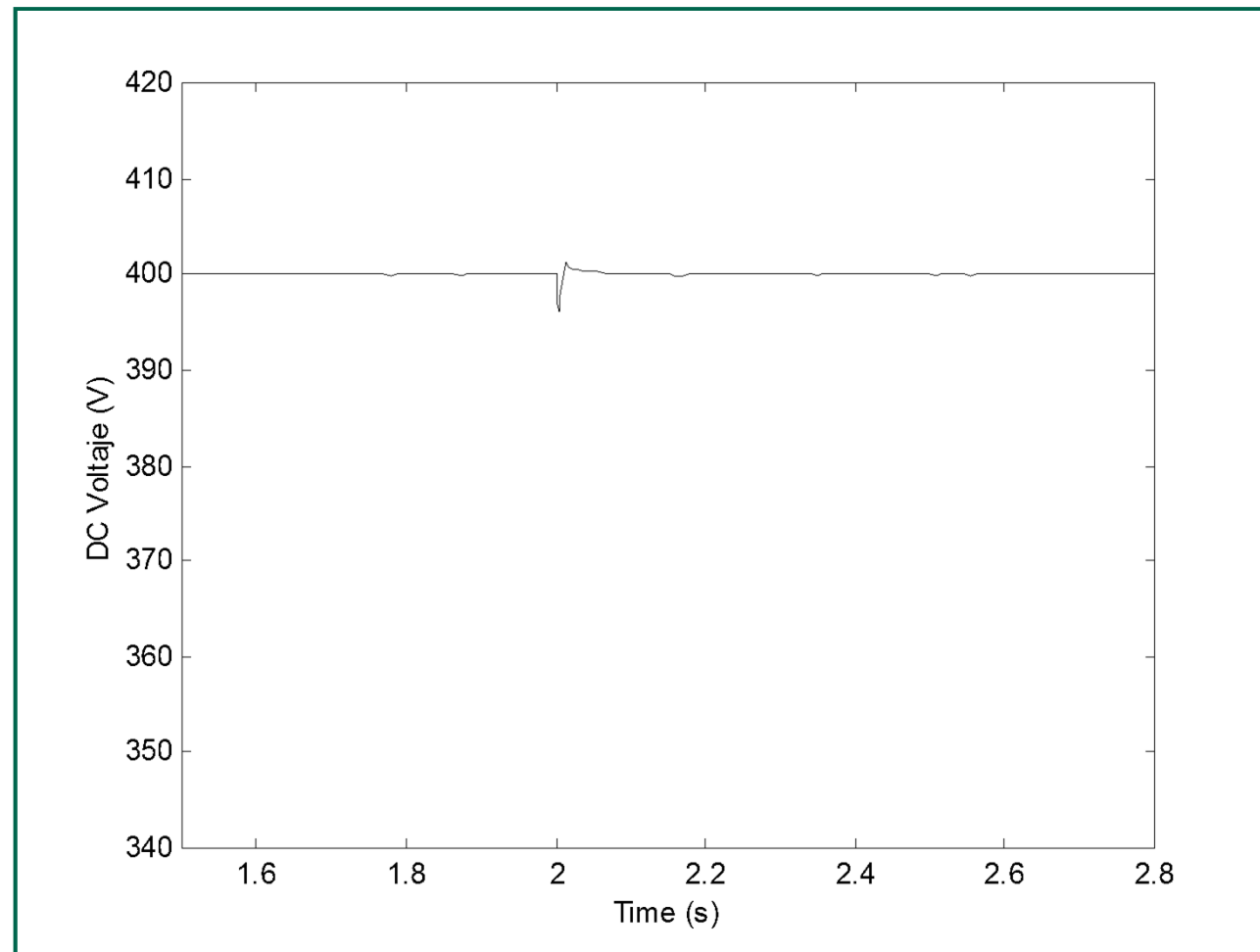


Diagrama de bloques considerando compensación feed-forward.

La figura, muestra el sistema de control con compensación feed-forward. En este caso la corriente de carga es medida y retroalimentada al lazo de corriente. De esta forma se tiene un cambio inmediato en la referencia de corriente al producirse el escalón de carga.

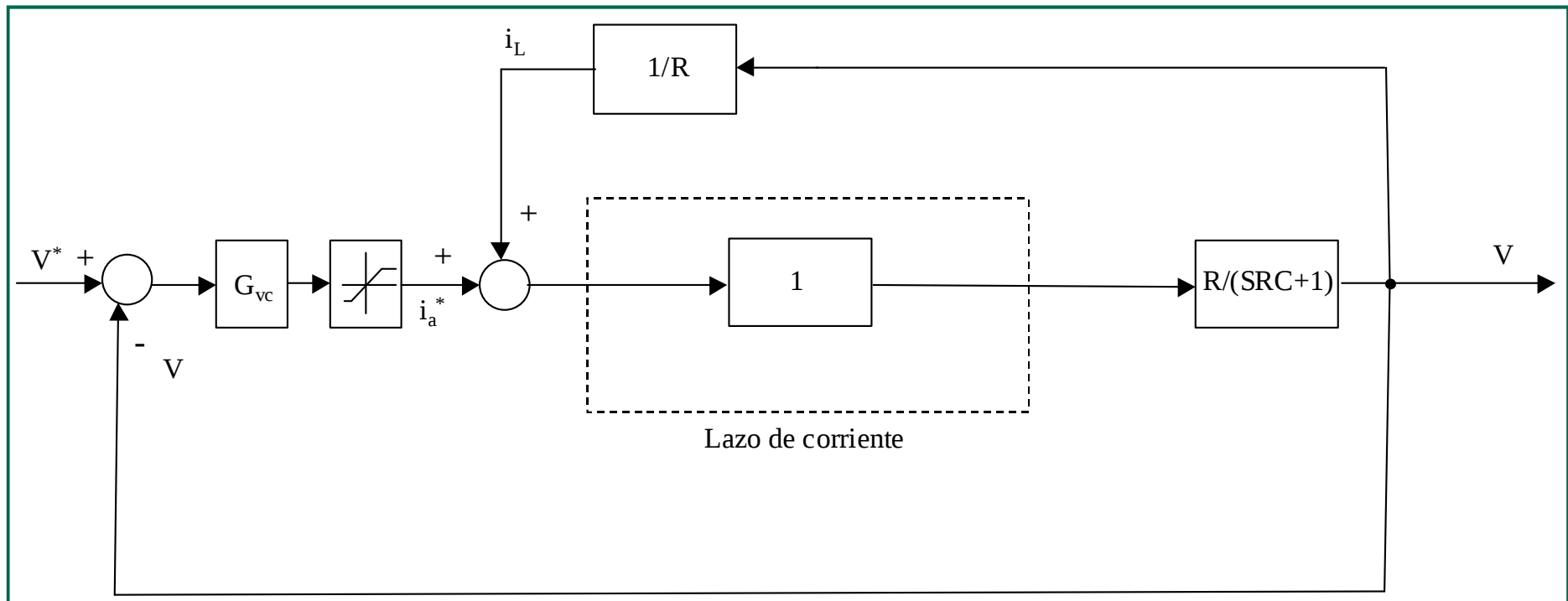
Cuando feed-forward no es considerado el efecto de la perturbación es controlado en su totalidad por el lento lazo de voltaje. En cambio cuando feed-forward es utilizado la mayor parte del esfuerzo de control es realizado por el rápido lazo de corriente.





Efecto de la compensación Feed-forward

El efecto de la compensación feed-forward puede analizarse considerando que el lazo de corriente es muy rápido y que el voltaje V es dinámicamente mas lento. De esta forma puede considerarse que el lazo de corriente tiene una función de transferencia igual a uno. El diagrama de bloques es:



$$\frac{V}{i_a^*} = \frac{\frac{R}{SRC+1}}{1 - \frac{1}{R(SRC+1)}} = \frac{\frac{R}{SRC+1}}{\frac{SRC}{SRC+1}} = \frac{1}{SC}$$

Independientemente de la magnitud del escalón, desde el punto de vista del lazo de voltaje la planta no varía. Esto porque los cambios de cargas son compensados por el lazo de corriente y no el de voltaje. En forma ideal los cambios de carga no producen ningún efecto en la salida.

Sin embargo en una implementación real el lazo de corriente tiene una función de transferencia distinta a uno y generalmente la corriente de carga debe medirse utilizándose transductores y filtros. Estos efectos combinados producen una compensación feed-forward que no es ideal.