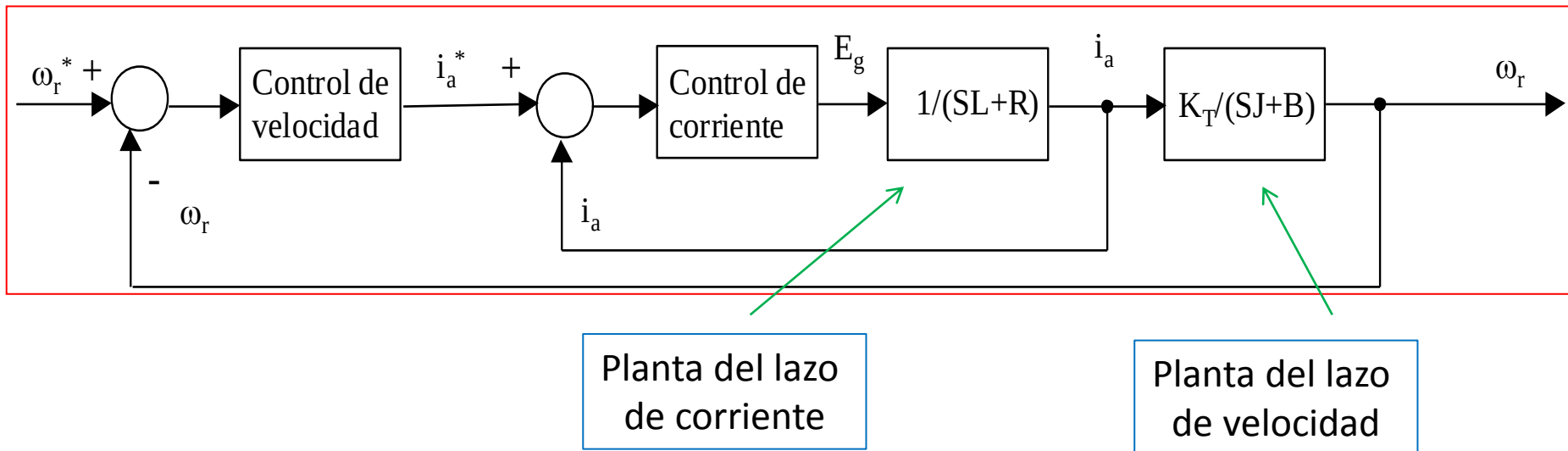


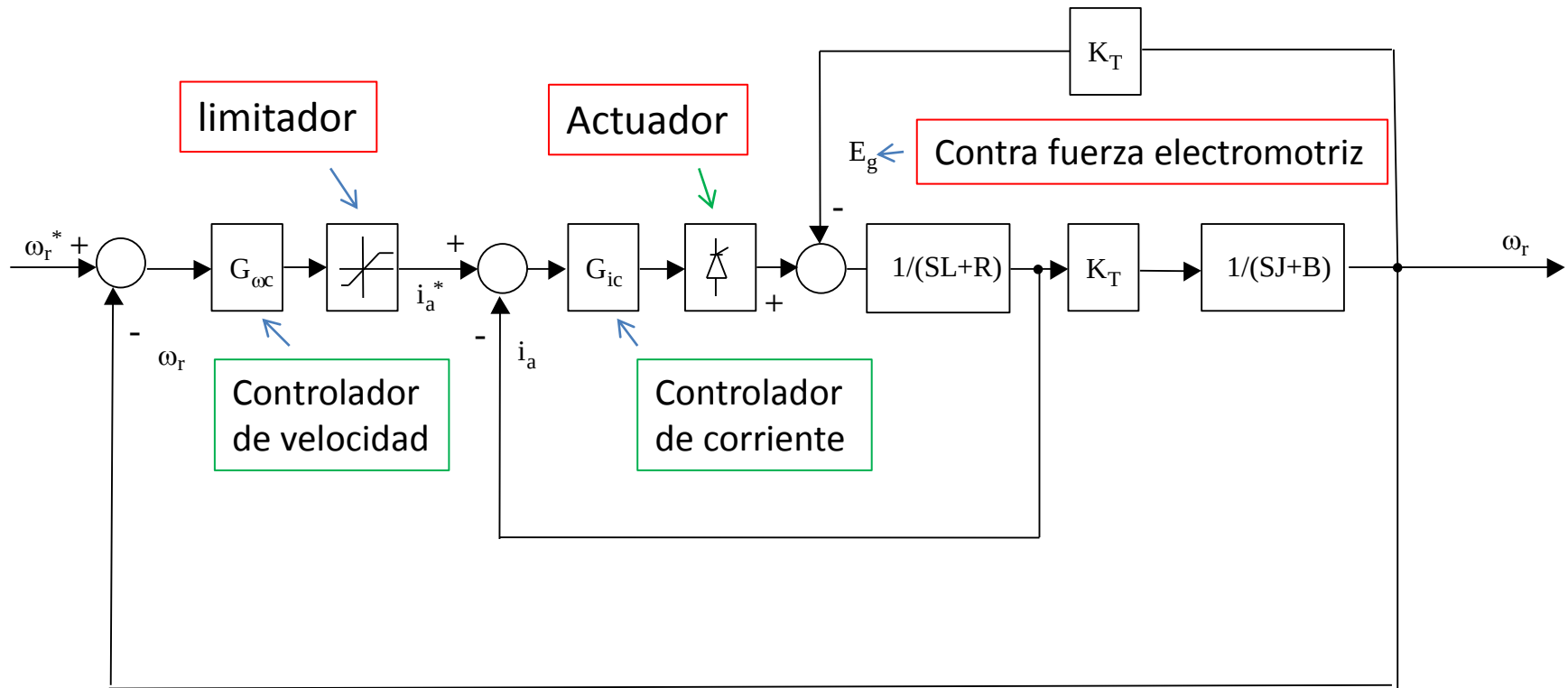
Diseño del Sistema de Control Típico para una Máquina de Corriente Continua.

Control de Lazos Anidados

Diagrama de un control genérico, similar en todas la máquinas eléctricas utilizadas como motor



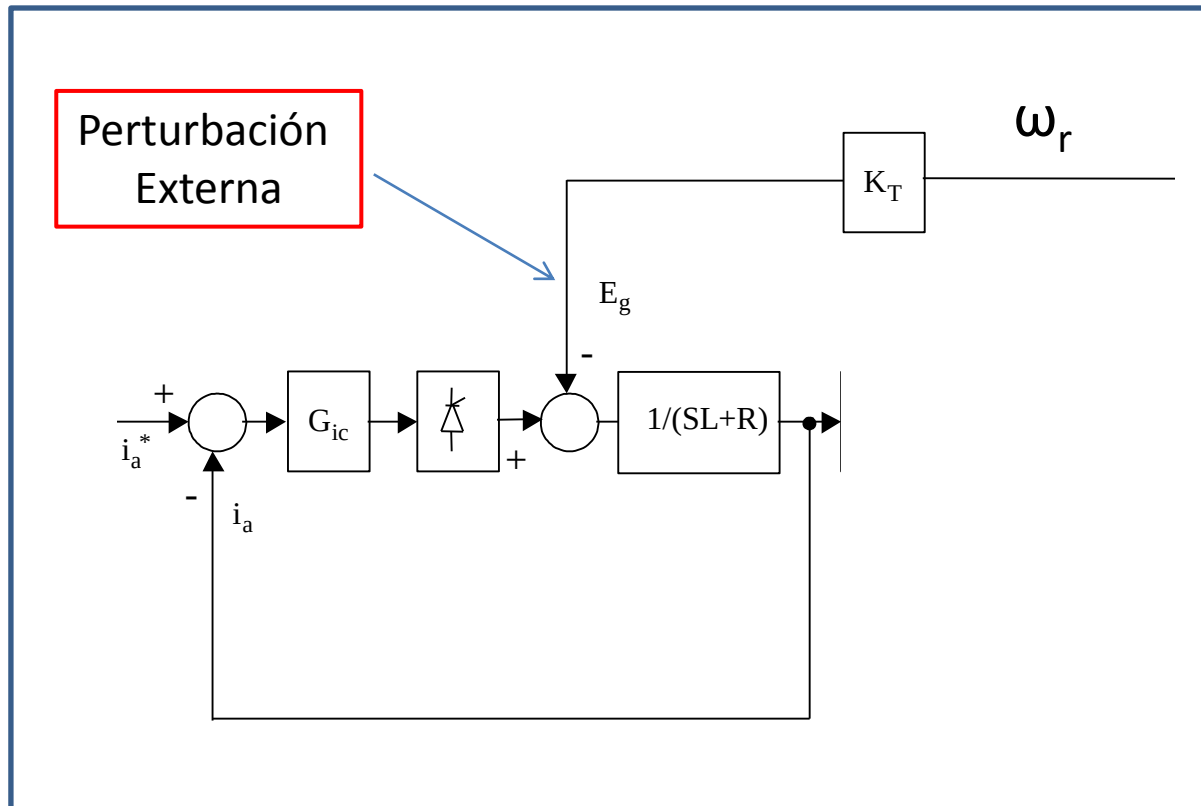
Control de la máquina de continua



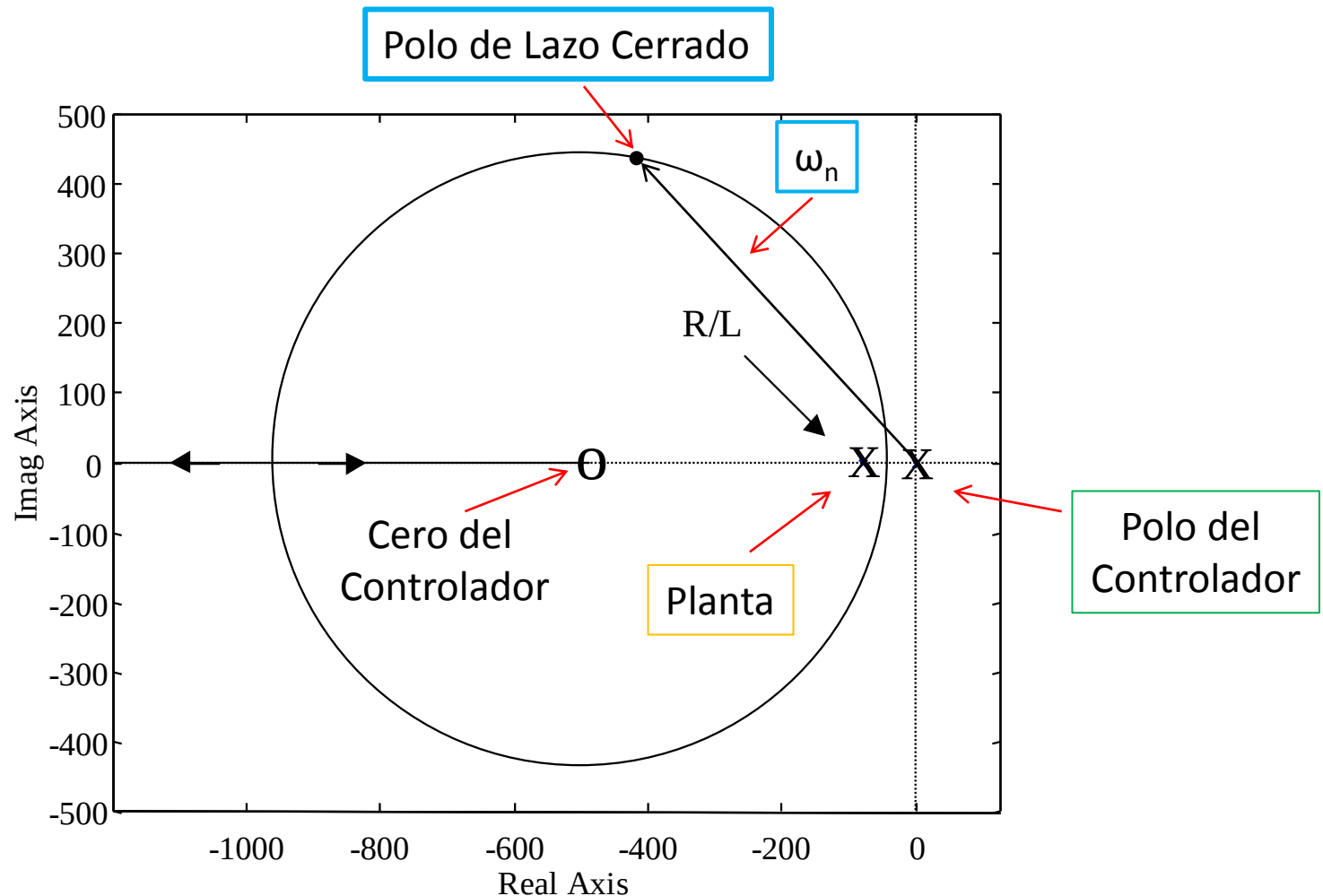
Diseño del Lazo de Corriente

- El lazo de corriente corresponde al interno, por lo tanto es de alta velocidad.
- Debido a la diferencia de magnitudes entre la constante de tiempo mecánica con la eléctrica, se puede considerar el termino $K_T \omega_r$ como una perturbación externa.

Lazo de Control Interno



Lugar de la Raíz Típico

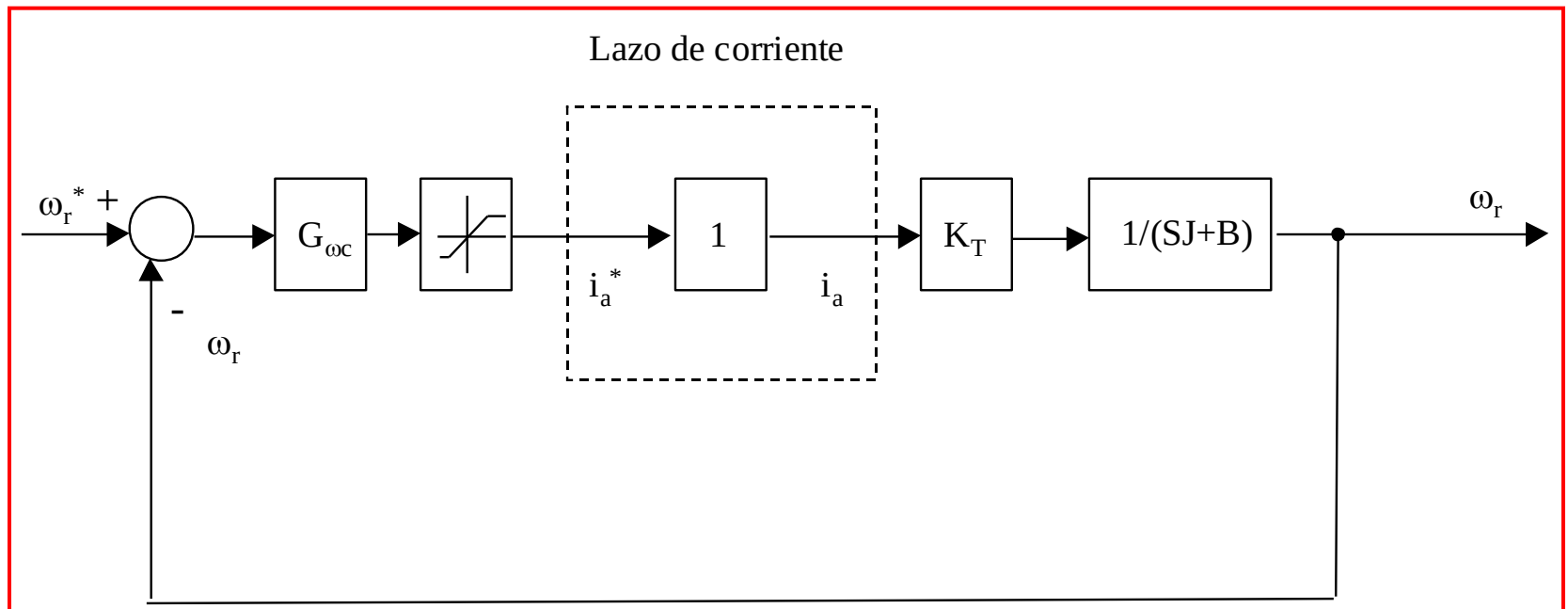


ω_n al igual que el ancho de banda, está relacionada con la velocidad del sistema

Lazo de Velocidad

- 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.
- Desde el punto de vista del lazo de velocidad, toda corriente de referencia i_a^* a la entrada del lazo de corriente aparece instantáneamente como una corriente i_a en la armadura de la máquina.

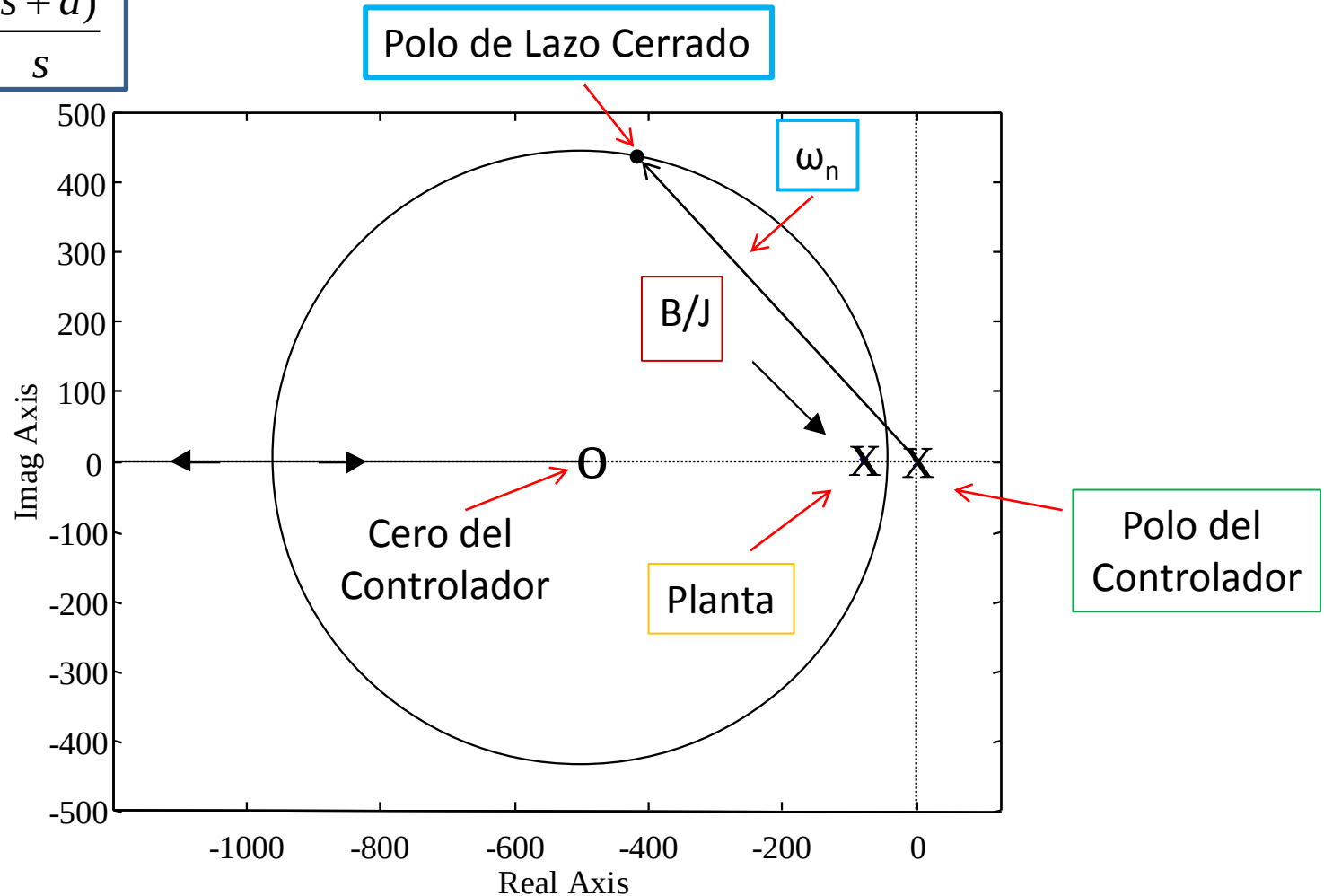
Lazo de Velocidad



Se considera ω_n lazo de velocidad ≈ 0.1 veces ω_n lazo de corriente

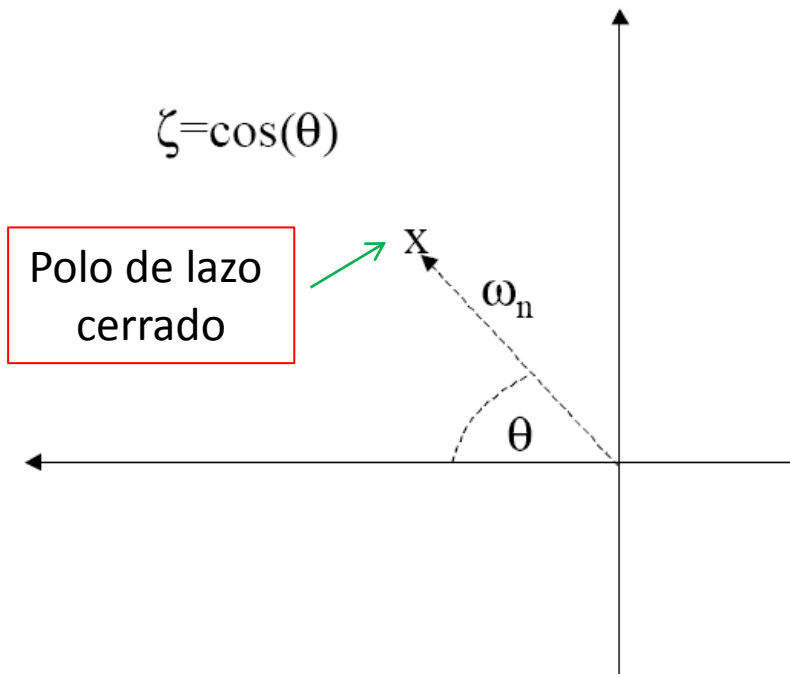
Lugar de la Raíz Típico (PI)

$$G_c(s) = K_p \frac{(s + a)}{s}$$

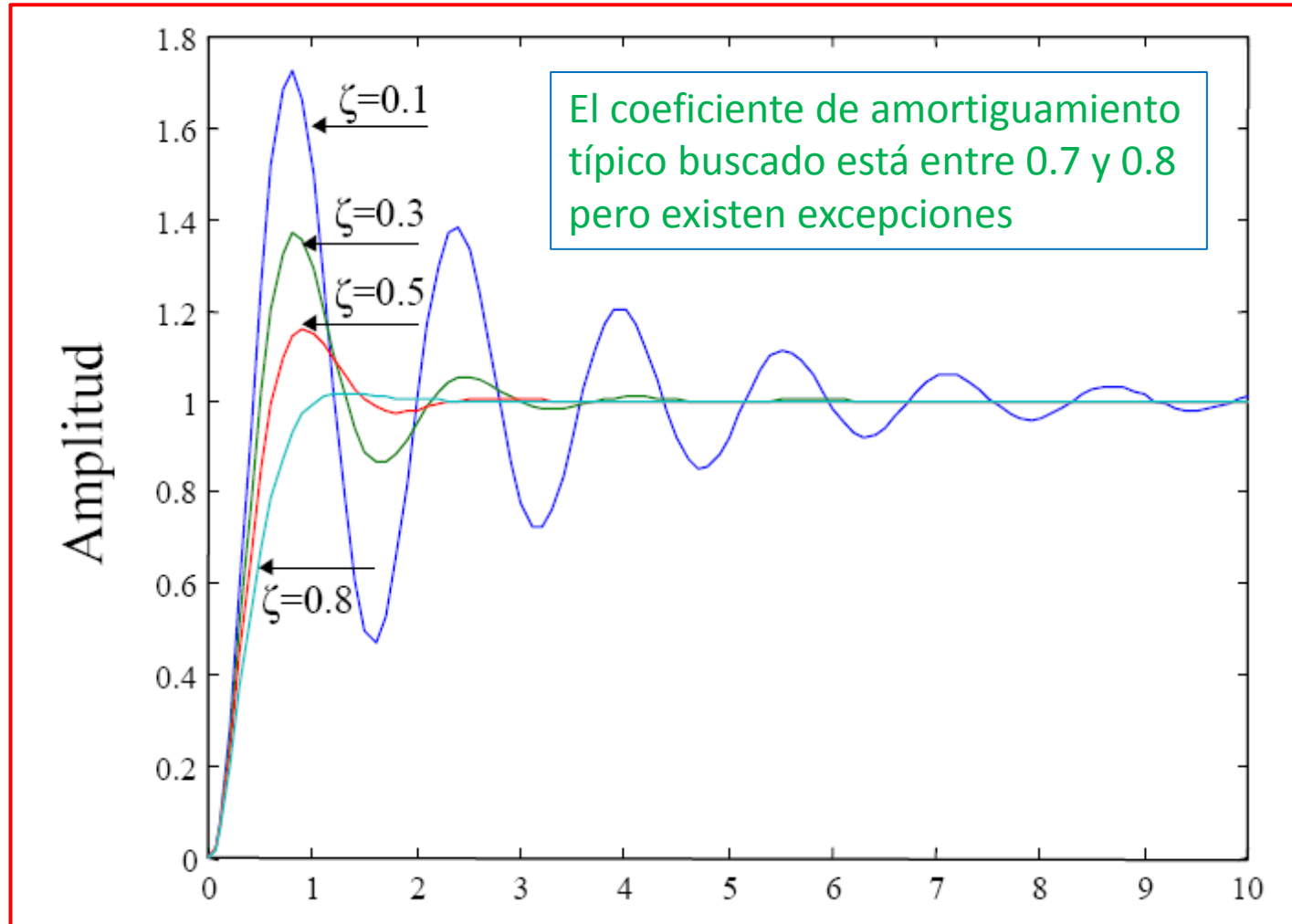


Otras Consideraciones

- Además de la frecuencia natural se debe tener en cuenta el coeficiente de amortiguamiento del polo de lazo cerrado.



Influencia del coeficiente de amortiguamiento



Antiwinding Up

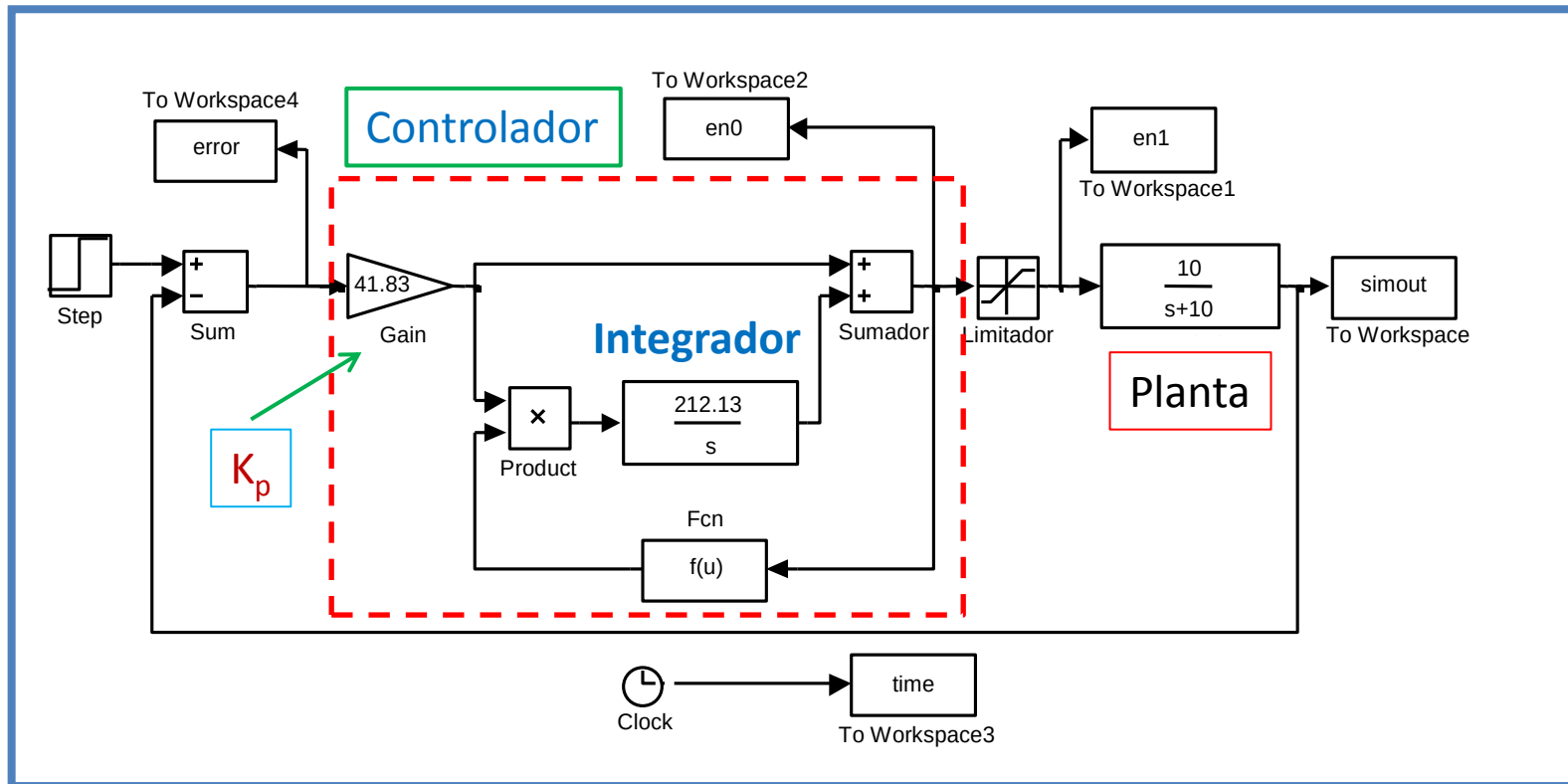
- El antiwinding-up detiene el componente integrador del PI cuando el controlador ha sobrepasado los límites del actuador.
- Ejemplo. Si el actuador es un puente de tiristores de seis pulsos alimentado con 380V, entonces el límite de voltaje a aplicar es:

$$V_t = \frac{3E_m}{\pi} = \frac{3 \times 380 \times \sqrt{2}}{\pi} \approx 514(\text{V})$$

(Sin considerar las pérdidas por conmutación)

Antiwinding Up

- Por lo tanto si el controlador demanda 1000V está fuera del rango posible.



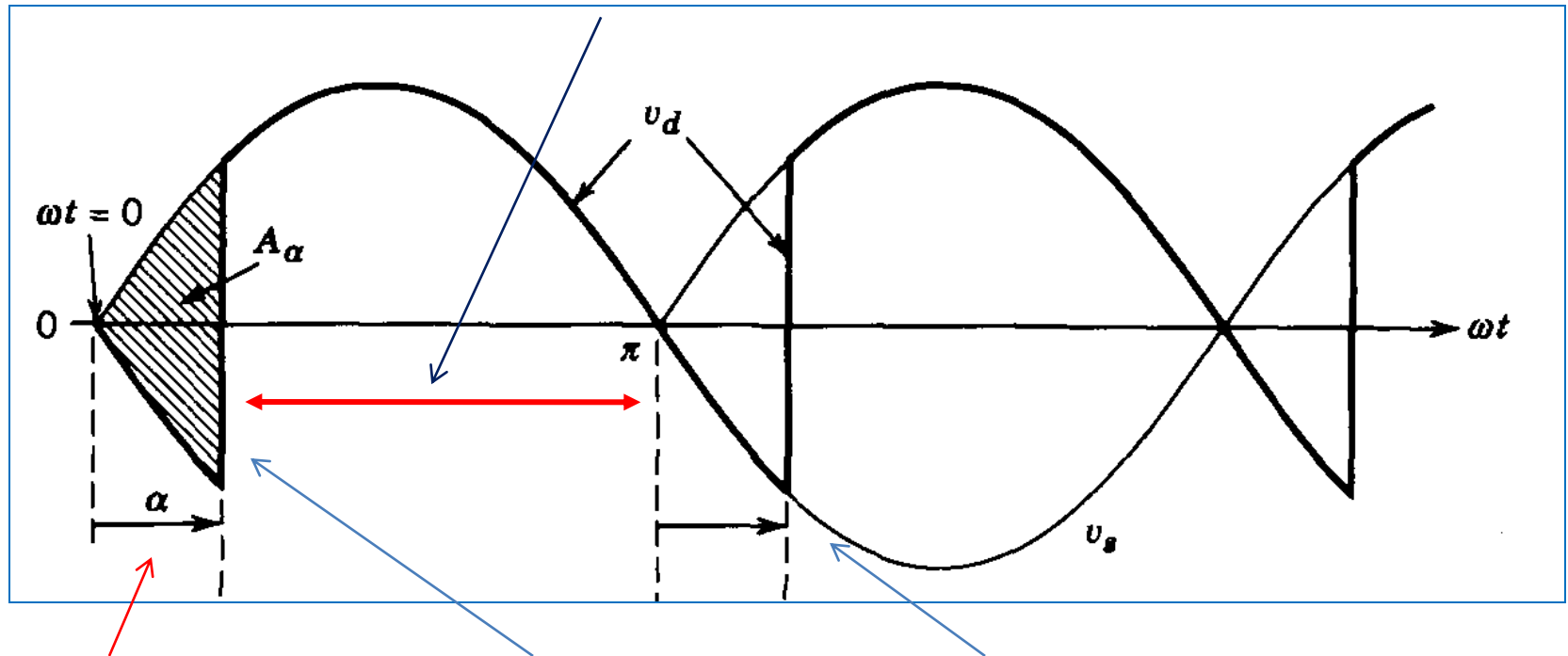
Antiwinding Up

$$f(u) = (u < \max) * (u > \min)$$

- Donde 'max' y 'min' son los límites superior e inferior del actuador respectivamente.
- La función lógica $f(u)$ detiene el integrador impidiendo el 'winding-up'.
- Esta topología es adecuada para simulación solamente. En implementación digital el anti winding-up se efectúa por software.
- En una implementación analógica se pueden utilizar diodos zeners para enclavar el voltaje a la salida de un operacional.

Retardo de Transporte

$\approx$ Tiempo Muerto



Ángulo de
Disparo
(desde controlador)

Pulso de
disparo

Nuevo
Pulso de
disparo

Retardo de transporte

- En general los dispositivos de electrónica de potencia tienen retardos asociados ya que no se puede cambiar la acción de control hasta el próximo instante de switching.
- En promedio el retardo de transporte es típicamente la mitad del período de switching. En el caso de un conversor de seis pulsos el retardo promedio es $1/(12 f_e)$ o 1.666ms a 50Hz.
- En el caso de un transistor IGBT controlado con una frecuencia de 5KHz, el retardo de transporte promedio es $1/10000$ o 0.1ms.
- Los retardos dificultan la implementación de sistemas de control de alta velocidad. Altas frecuencias de switching son mas apropiadas para este objetivo. Sin embargo esto también tiene sus inconvenientes.

Retardo de Transporte

- En general la función de transferencia del retardo es e^{-sT} donde T es el tiempo de retardo.
- En métodos de diseño en el dominio de la frecuencia, por ejemplo Bode o Nyquist, el retardo de transporte se puede considerar directamente con un módulo de 1 y una fase de $-\omega T$.
- El retardo de transporte disminuye el margen de fase debido a la fase negativa.

Retardo de Transporte

- Cuando se utiliza root-locus el retardo habitualmente se representa utilizando la representación de Padé. Por ejemplo:

$$e^{-sT} \approx \frac{1 - sT / 2}{1 + sT / 2}$$

- Además de Padé de primer orden, se puede utilizar ordenes mayores lo cual añade complejidad pero incrementa la exactitud.
- Padé permite representar el retardo como polos y ceros permitiendo considerar sus efectos al analizar el lugar de la raíz.

Implementación Digital

- Para implementar digitalmente el sistema de control, se debe representar el controlador en el plano z .
- Para esto se puede diseñar directamente en el plano z , por ejemplo utilizando root-locus digital, lo cual se encuentra fuera de los contenidos de este curso.
- Una alternativa es convertir el controlador desde ' s ' al plano z , utilizando la transformación bilineal o de Tustin.

Implementación Digital

- La transformación Bilineal es:

$$s \approx \frac{2}{T_s} \frac{(z-1)}{(z+1)}$$

- Al utilizarla en un PI analógico nos lleva a:

$$K_p \frac{(s+a)}{s} \Rightarrow \frac{K_p(aT_s+2)}{2} \frac{\left(z - \frac{(aT_s-2)}{(aT_s+2)} \right)}{z-1} = \frac{K_z(z-a_z)}{z-1}$$

PI
Analógico

Transformación
bilineal

PI
Digital

Transformación Bilineal

- La transformación Bilineal no es exacta y para conservar la dinámica del sistema, muchos autores recomiendan utilizar la bilineal con una frecuencia de muestreo varias veces superior al ancho de banda o frecuencia natural del sistema.
- En control de máquinas lo normal es utilizar la transformada bilineal cuando la frecuencia de muestreo es 15-30 veces superior a la frecuencia natural. Personalmente recomiendo al menos 20 veces.
- Se debe tener en cuenta que estas son 'recetas' que frecuentemente tienen excepciones.

Implementación Digital

- Al implementar el controlador PI en un DSP (Digital Signal Processor) u otro procesador, es frecuente separar la parte proporcional de la integral:

$$K_z \frac{(z - a_z)}{(z - 1)} = K_{pz} + K_{iz} \frac{z}{z - 1}$$

PI Digital

Parte
proporcional

Integrador
Digital

Implementación Digital

Valor anterior
de la integral

Error=y*-y; /*Referencia –señal medida*/

O1=O0+kiz*Error; /*parte integral de la salida*/

Constante
Integral

Nuevo valor
de la integral

U=O1+kpz*Error; /*salida total P+I */

Constante
proporcional

Salida al
actuador

/* Rutina antiwindind-up*/

If (U>MAX) /* Verifica límite superior*/

U=MAX; /*Limita*/

Elseif (U<MIN) /* Verifica límite inferior */

U=MIN; /*Limita*/

Else

O0=O1; /* Integra solo si no se limita la salida*/