

## CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE EL CONTROL DEL ACTUADOR

Función del controlador: Regular el movimiento de un cuerpo que se debe trasladar controladamente de una posición a otra.

El control del movimiento puede ser, según la aplicación:

I.- Control de posición.

A.- Control de la posición final (control de llegada).

B.- Control de la posición en todo momento (control de trayectoria), en uno, dos o tres ejes de coordenadas espaciales.

## II.- Control de velocidad.

C.- Control del vector velocidad (control de velocidad), en uno, dos o tres ejes de coordenadas espaciales.

## III.- Control de aceleración.

D.- Control del vector aceleración (control de aceleración), en uno, dos o tres ejes de coordenadas espaciales.

E.- Control del vector de la derivada de la aceleración (control de “jerk”), en uno, dos o tres ejes de coordenadas espaciales.

El control del jerk usualmente es indirecto, mediante un límite variable aplicado a la demanda de aceleración.

Por supuesto, es usual que en una aplicación sea necesario realizar una combinación de dos o más de los controles básicos .

Adicionalmente el actuador debe:

- 1.- Operar con la mayor eficiencia energética posible (criterio de eficiencia energética).
- 2.- Ser lo más sencillo posible (criterio de simplicidad).
- 3.-Ser lo más económico posible (criterio de economía).

Criterios de diseño para el sistema de control del actuador.

1-Mantener en todo el ciclo de operación todos los parámetros (mecánicos y eléctricos) dentro de los límites de seguridad permitidos.

2-Cero error estático en la variable final considerada (usualmente velocidad o posición).

3-Lograr “buena” respuesta dinámica, lo que implica, por lo menos:

a- Respuesta transitoria “rápida”.

b- Tiempo de estabilización “corto”.

c- Sobre paso “mínimo” (o cero).

Proceso de diseño de un controlador de posición, velocidad y aceleración.

Objetivos:

Se desea diseñar un sistema de control de posición empleando un motor DC, con el máximo rendimiento posible.

Se desea que el bloque electrónico de manejo de potencia tenga la respuesta más rápida que sea posible.

En el estado actual del arte, para cumplir con estos objetivos, tanto en aplicaciones del tipo máquinas herramienta como en robots y vehículos en los cuales se debe sincronizar acciones en varios ejes, el método considerado más efectivo en la práctica es controlar el movimiento en cada eje con un controlador dedicado.

La coordinación entre los movimientos individuales en cada eje de coordenadas, necesaria para lograr el objetivo general de control debe ser realizada por un nivel de control de mayor jerarquía, que debe calcular las trayectorias específicas en cada eje, los perfiles de velocidad y/o aceleración, los límites a los valores máximos para cada una de estas variables, la máxima potencia requerida en cada caso, el tipo de motor a emplear, los acoples necesarios, etc.

Evidentemente estos objetivos genéricos se pueden cumplir con diversas arquitecturas y múltiples técnicas de diseño de control.

A continuación se presenta el método clásico basado en una estructura de tres lazos de realimentación en cascada (aceleración, velocidad, posición), implementados con bloques de control PI (proporcional-integral), cuyas ganancias se ajustarán en base al análisis de estabilidad mediante los diagramas de Bode.

Esta metodología clásica esta basada en la experiencia práctica acumulada, y ofrece una respuesta que cumple "razonablemente" con los objetivos generales, y puede servir como referencia de comparación para los resultados que se puedan producir mediante técnicas mas modernas.

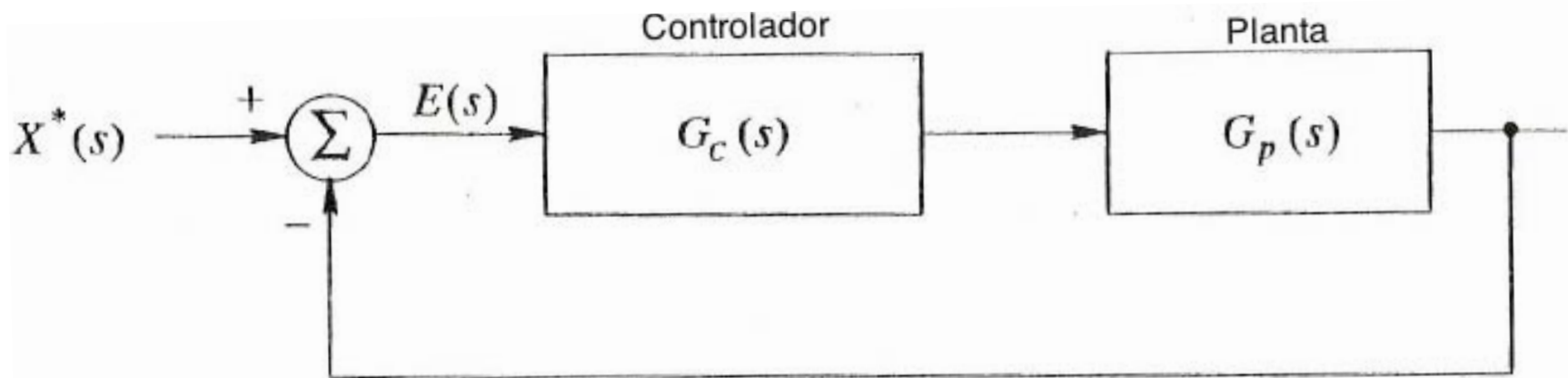
Una vez definidos por el control de alto nivel los objetivos específicos asignados en cada intervalo a cada eje individual, el proceso de diseño usando las técnicas clásicas en base al álgebra de bloques y el cálculo de estabilidad según Bode, se cumple en tres etapas:

- 1- Diseño teórico: Se considera que el sistema es lineal alrededor del punto de operación, y que los cambios de la demanda y las perturbaciones de carga son pequeños y se analiza en pequeña señal.
- 2- Simulación de la operación del controlador diseñado en condiciones de “gran señal”.
- 3- Ajuste del control en base a los resultados de la simulación (también llamado “entonar” el control).



Consideraciones generales sobre la técnica de diseño clásica.

I.- Función de transferencia en lazo cerrado.



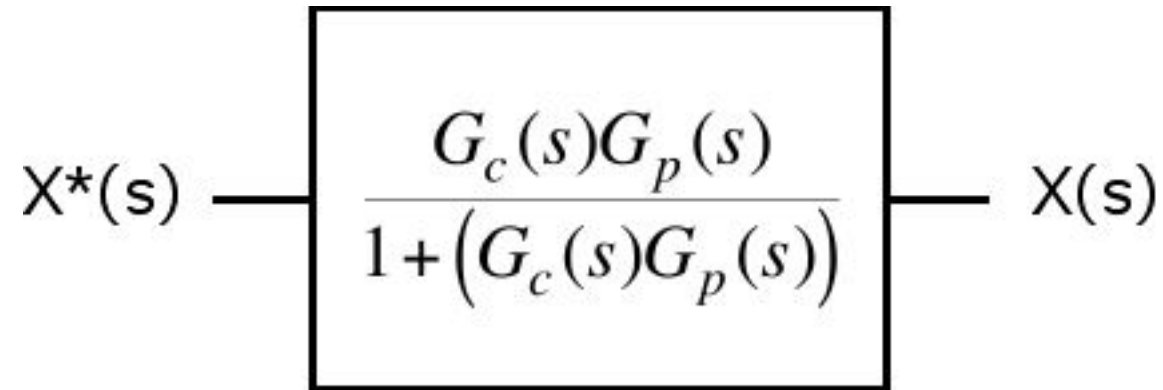
Sean  $G_C(s)$  y  $G_P(s)$  respectivamente las funciones de transferencia de un controlador y de una planta.

La función de transferencia de la conexión en cascada de ambas, en lazo abierto,  $G_{la}(s)$  es:

$$G_{la}(s) = G_c(s)G_p(s)$$

Y la función de transferencia en lazo cerrado de la cascada, con realimentación unitaria,  $G_{lc}(s)$  es:

$$G_{lc}(s) = \frac{G_{la}(s)}{1 + G_{la}(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + [G_c(s)G_p(s)]}$$



Bloque equivalente aplicando operación de realimentación.

## Frecuencia de cruce.

Referida al correspondiente diagrama de Bode, se define como “frecuencia de cruce” (crossover frequency),  $f_c$ , la frecuencia para la cual el módulo de la función de transferencia en lazo cerrado se hace unitaria, esto es, la frecuencia para la cual se cumple:

$$G_{la}(s) = 0db$$

( $\omega_c$  es la correspondiente frecuencia angular de cruce)

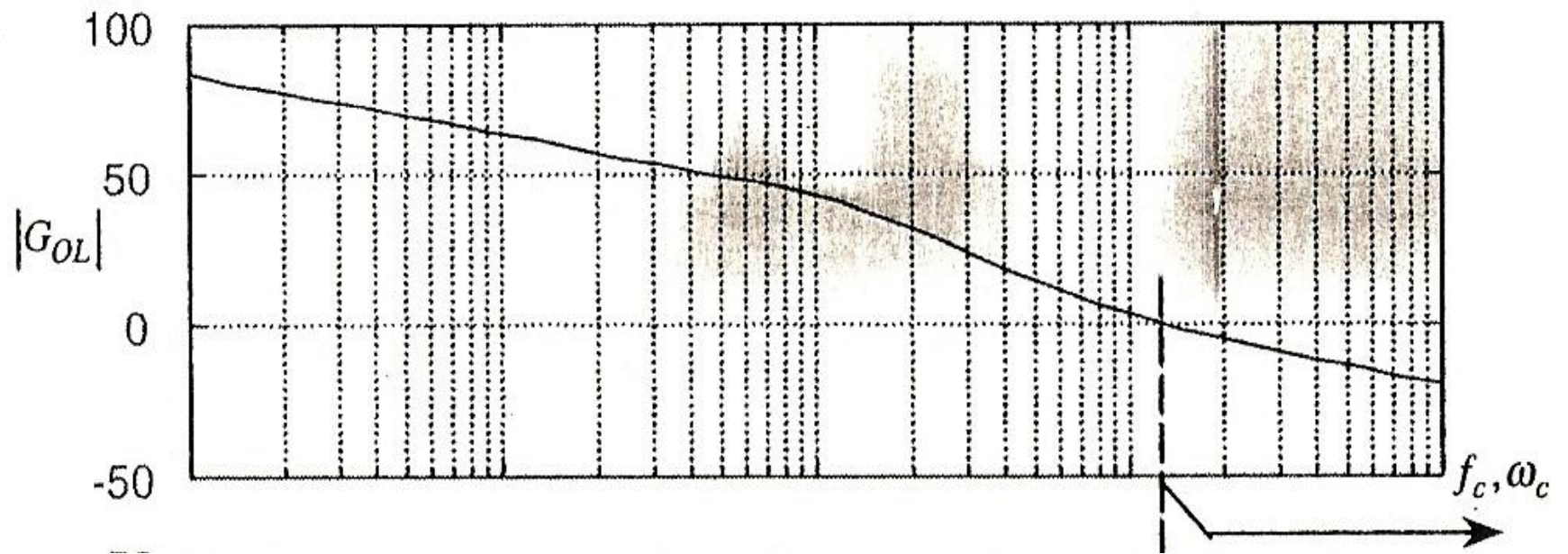


Diagrama de Bode de una función arbitraria mostrando la frecuencia de corte,  $f_c$  (ó  $\omega_c$ ).

## Margen de fase.

Referido al correspondiente diagrama de Bode, se define como Margen de Fase (MF ó PM) al retardo de fase introducido por la función de transferencia en lazo abierto del sistema considerado a la frecuencia de cruce,  $f_c$ , medido con respecto a  $-180^\circ$ , esto es:

$$MF = \phi_{la}|_{f_c} - (-180^\circ) = \phi_{la}|_{f_c} + 180^\circ$$

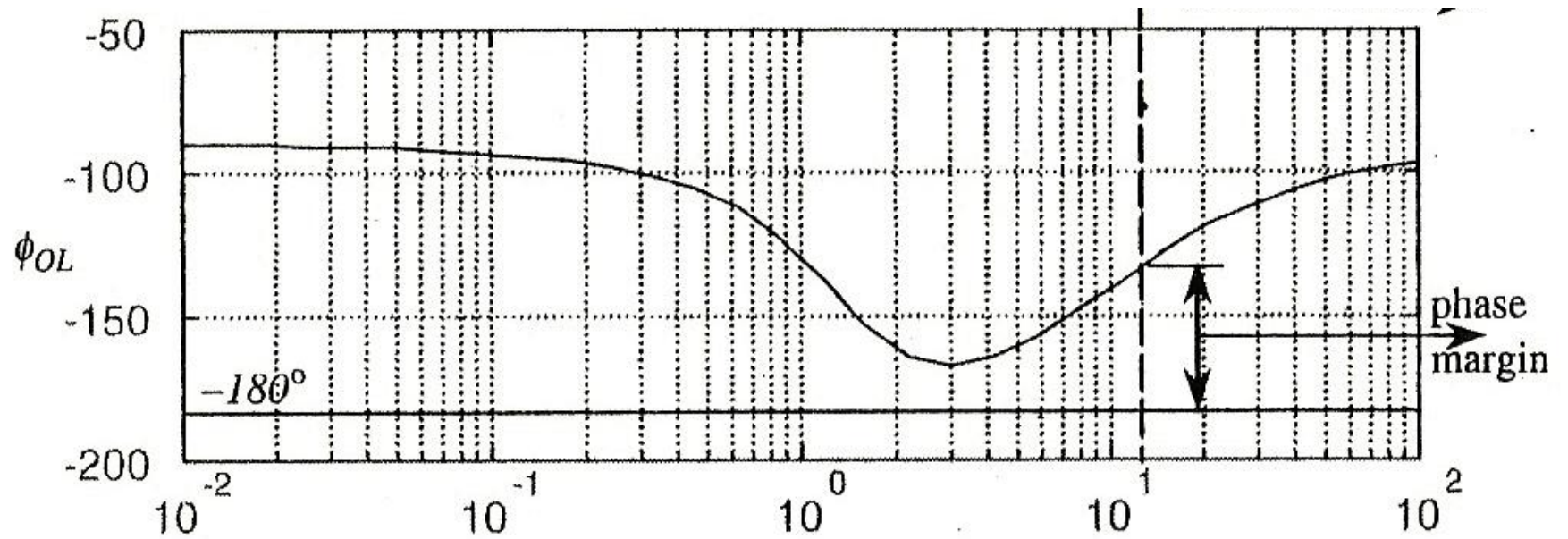
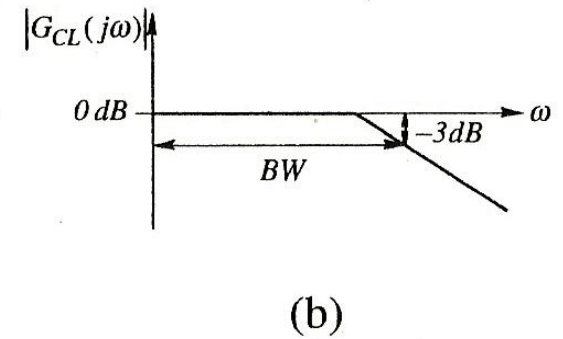
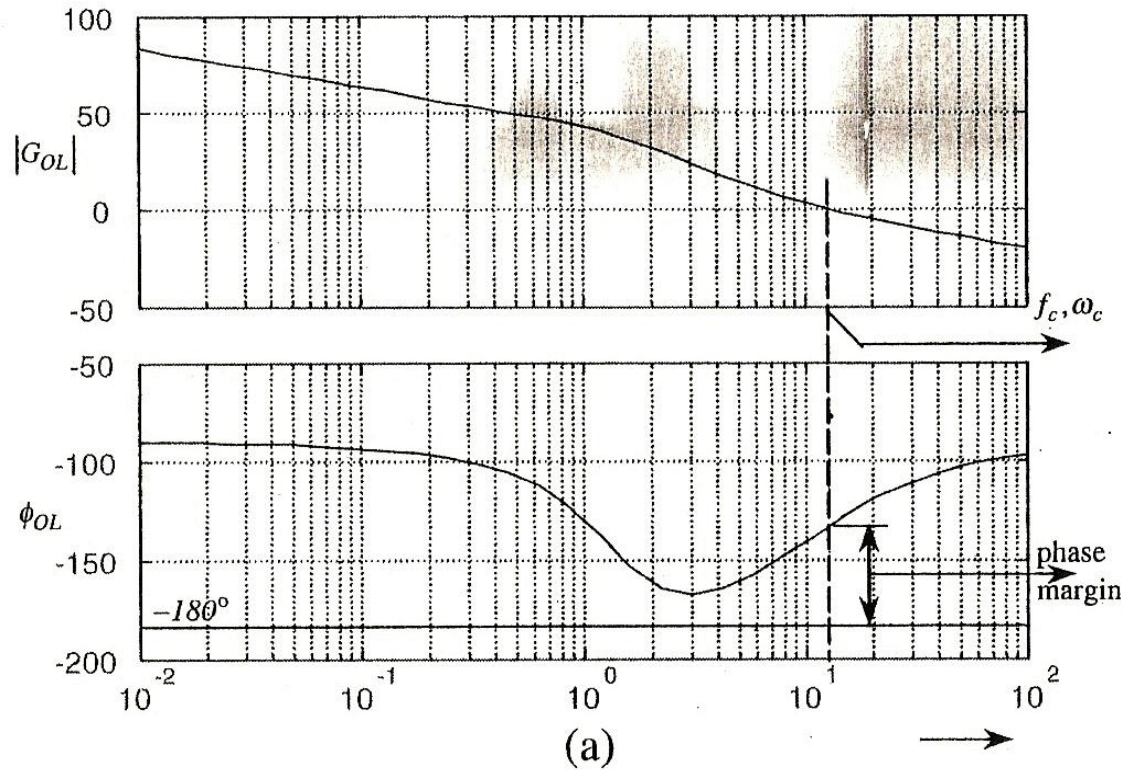


Diagrama de Bode de una función arbitraria mostrando el margen de fase.

## Implicaciones físicas:

1. Si el margen de fase es cero, el sistema es oscilante.
2. Por experiencia, para lograr una respuesta “satisfactoria”, el margen de fase debe ser superior a  $45^\circ$  y, preferiblemente, estar cercano a  $60^\circ$  (estos son valores en módulo, los MF son numéricamente negativos).

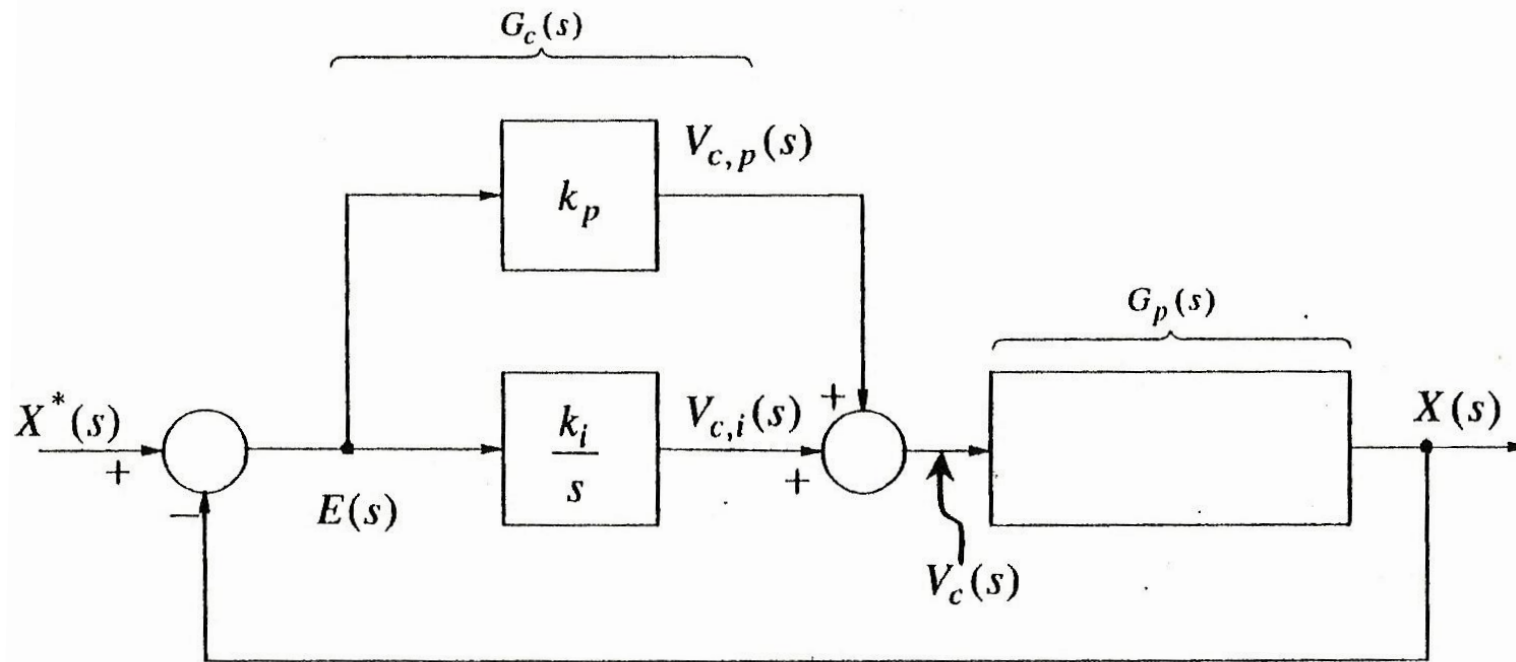




Información gráfica sobre la estabilidad del sistema.

- a) Diagrama de Bode de una función arbitraria mostrando la frecuencia de corte, y el margen de fase
- b) Definición del ancho de banda de la función arbitraria.

## Controlador Proporcional-Integral (PI)



Implementación en paralelo del controlador PI

La entrada al controlador es el error,  $E(s)$ , dado por:

$$E(s) = X^*(s) - X(s)$$

donde:

$X^*(s)$  es la entrada de referencia.

$X(s)$  es el valor de salida medido (realimentación unitaria).

Si la función de transferencia del bloque proporcional es  $k_p$ , y la del bloque integral es  $k_i/s$ , se tiene:

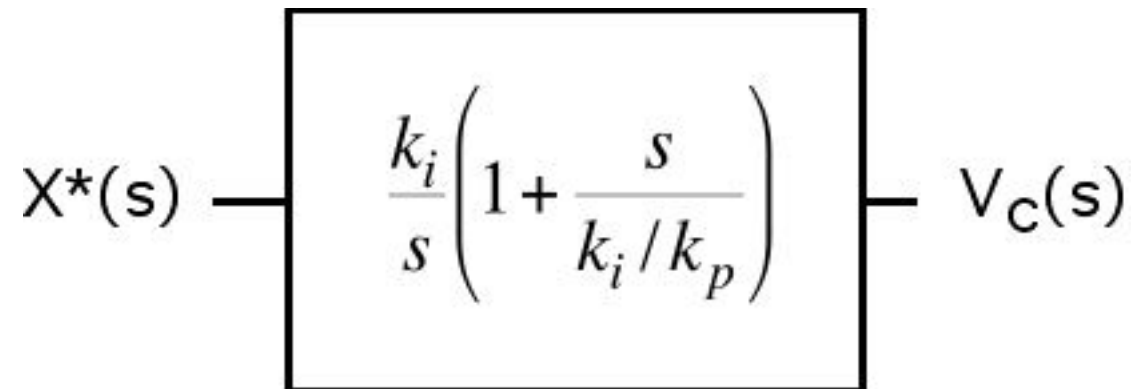
$$V_{bp}(s) = k_p E(s)$$

$$V_{bi}(s) = \frac{k_i}{s} E(s)$$

donde  $V_{bp}(s)$  y  $V_{bi}(s)$  son respectivamente las salidas de los bloques proporcional e integral

Por lo tanto, la función de transferencia del controlador PI es:

$$\frac{V_{cPI}(s)}{E(s)} = \left( k_p + \frac{k_i}{s} \right) = \frac{k_i}{s} \left( 1 + \frac{s}{k_i/k_p} \right)$$



Bloque PI equivalente

En la configuración clásica, en cada controlador de eje se emplea una arquitectura de control realimentado en cascada, con tres lazos:

- 1.-Interno: La variable nominal de realimentación es la aceleración.
- 2.- Intermedio: La variable nominal de realimentación es la velocidad.
- 3.- Externo: La variable nominal de realimentación es la posición.

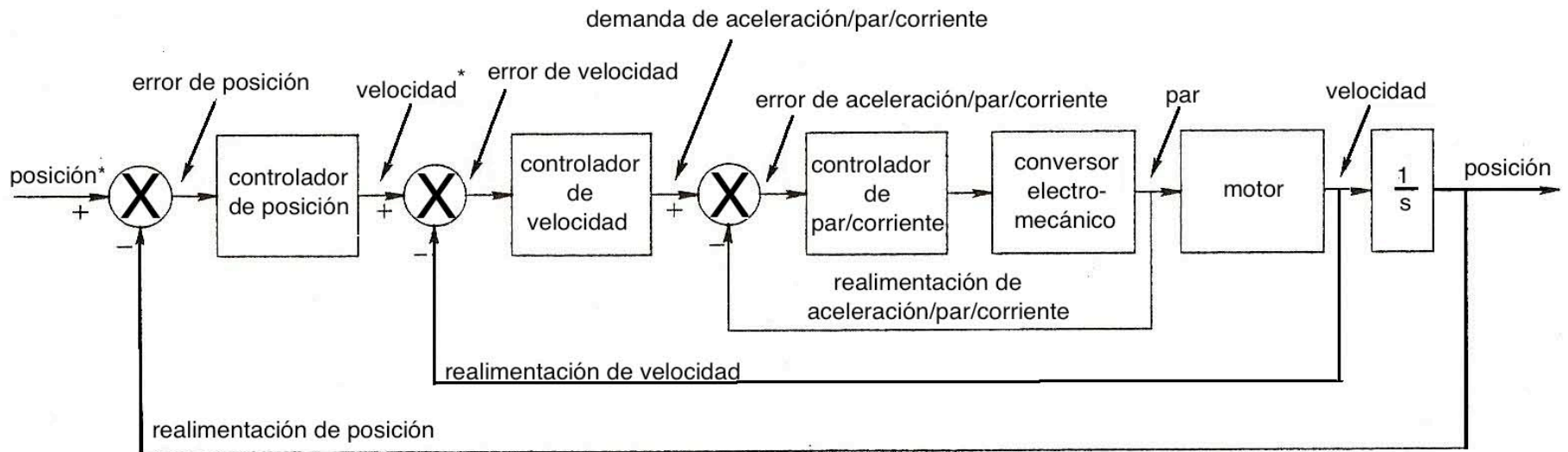
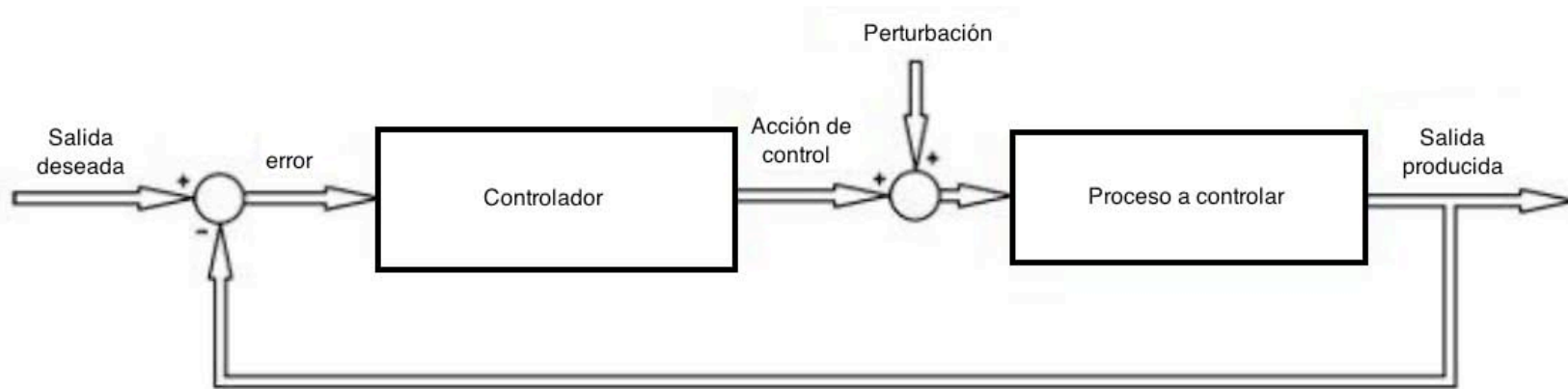


Diagrama de bloques de un controlador en cascada de tres lazos para control de aceleración, velocidad y posición.

## Efecto de las perturbaciones de carga.

La estructura clásica de tres lazos es básicamente un "control de referencia", dedicado a lograr que la salida siga de la forma mas precisa posible a los cambios en la referencia de entrada, y asume implícitamente que las perturbaciones en el sistema serán menores.

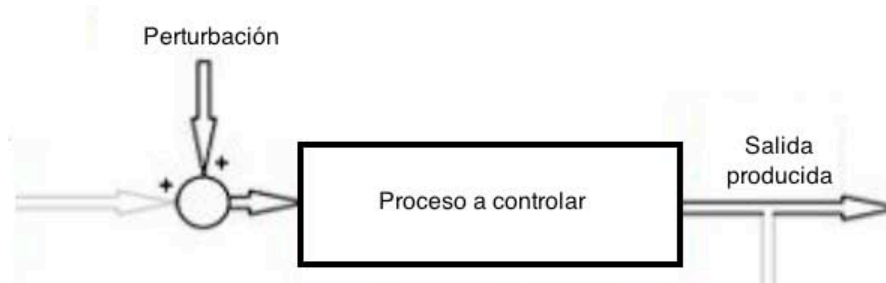
En muchos casos esto no es cierto, ya que las variaciones en el par de oposición son significativas, lo que en esta estructura puede producir cambios indeseados en la salida



Para visualizar las diferencias entre el efecto de una perturbación y el de un cambio en la referencia se debe considerar cual sería el funcionamiento instantáneo del sistema frente a un cambio en la perturbación y un cambio en la referencia.

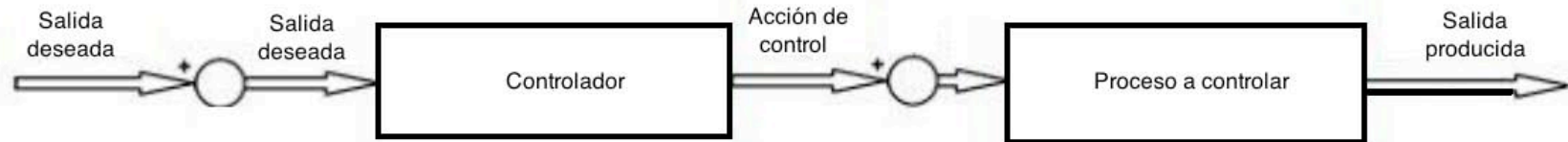


## 1.- Cambio en la perturbación.



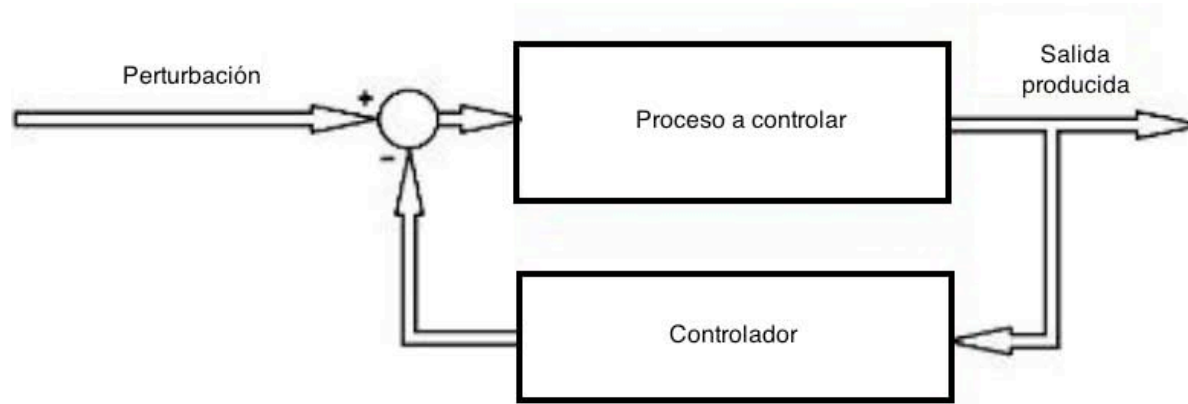
Un cambio en la perturbación produce un cambio inmediato en la entrada del proceso a controlar, que se manifiesta en la salida de la misma con el retardo de respuesta de la planta.

## 2.- Cambio en la referencia



El cambio en la referencia no produce un cambio inmediato en la entrada de la planta, este se produce cuando cambia la salida del controlador transcurrido el retardo de tiempo del mismo, de forma que el cambio en la salida de la planta ocurre con un retardo correspondiente al efecto en cascada del retardo de respuesta del controlador y el retardo de respuesta de la planta.

Si se asume que la referencia permanece constante y que ocurre una perturbación, el diagrama de control se puede re-arreglar para demostrar el efecto de la perturbación.



Este re-dibujo de la estructura de control deja claro que la perturbación debe producir su efecto sobre la salida del proceso a controlar antes de que el controlador pueda iniciar su acción de corrección.

La acción de un cambio en la referencia se puede hacer tan rápida como la de la perturbación si se elimina el retardo del controlador, pero eso requiere que el controlador solo tenga acción proporcional, por lo que siempre existirá un error en estado estacionario.

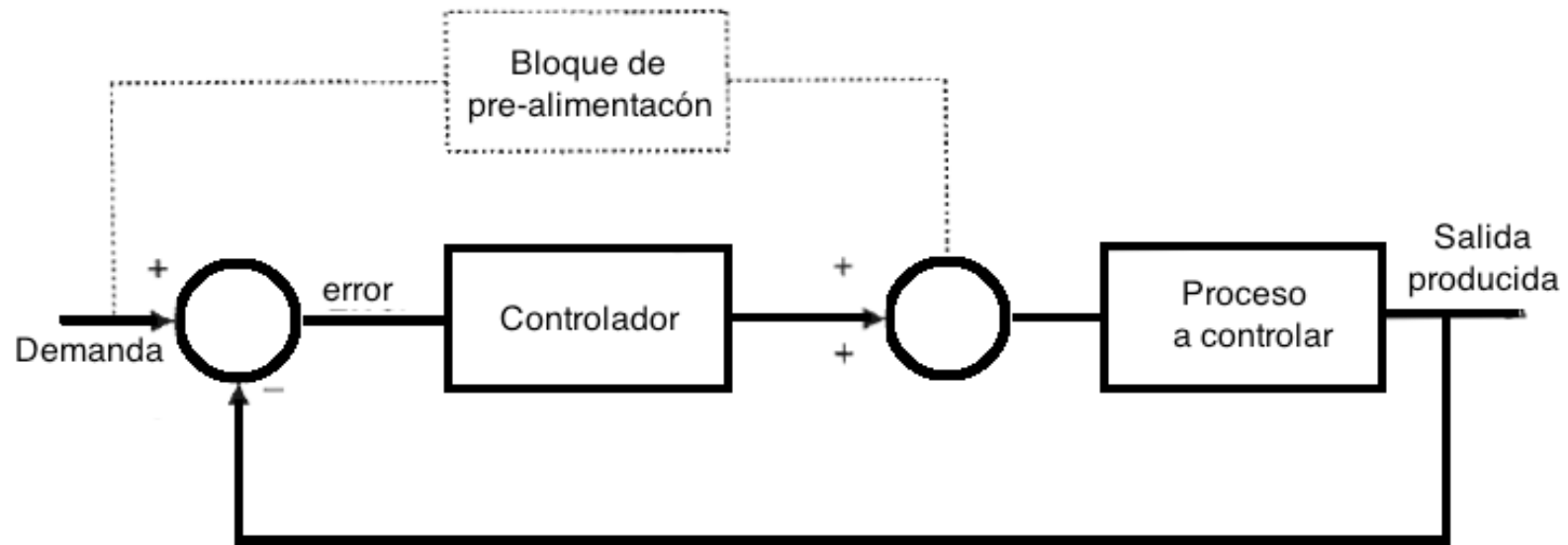
El mismo efecto se puede lograr incluyendo un elemento de tipo derivativo en el controlador, pero esta solución puede causar problemas de estabilidad en presencia de ruido y llevar a sobre-reaccionar ante los cambios de la referencia.

Por supuesto el problema del ruido puede ser compensado mediante filtrado, y el de la sobre-reacción calculando el efecto derivativo tomando en cuenta solo la derivada de la señal de salida de la planta.

Estas soluciones complican tanto el proceso de diseño como la implementación, pero deben tenerse en cuenta si el diseño inicial se muestra inadecuado durante la etapa de simulación.

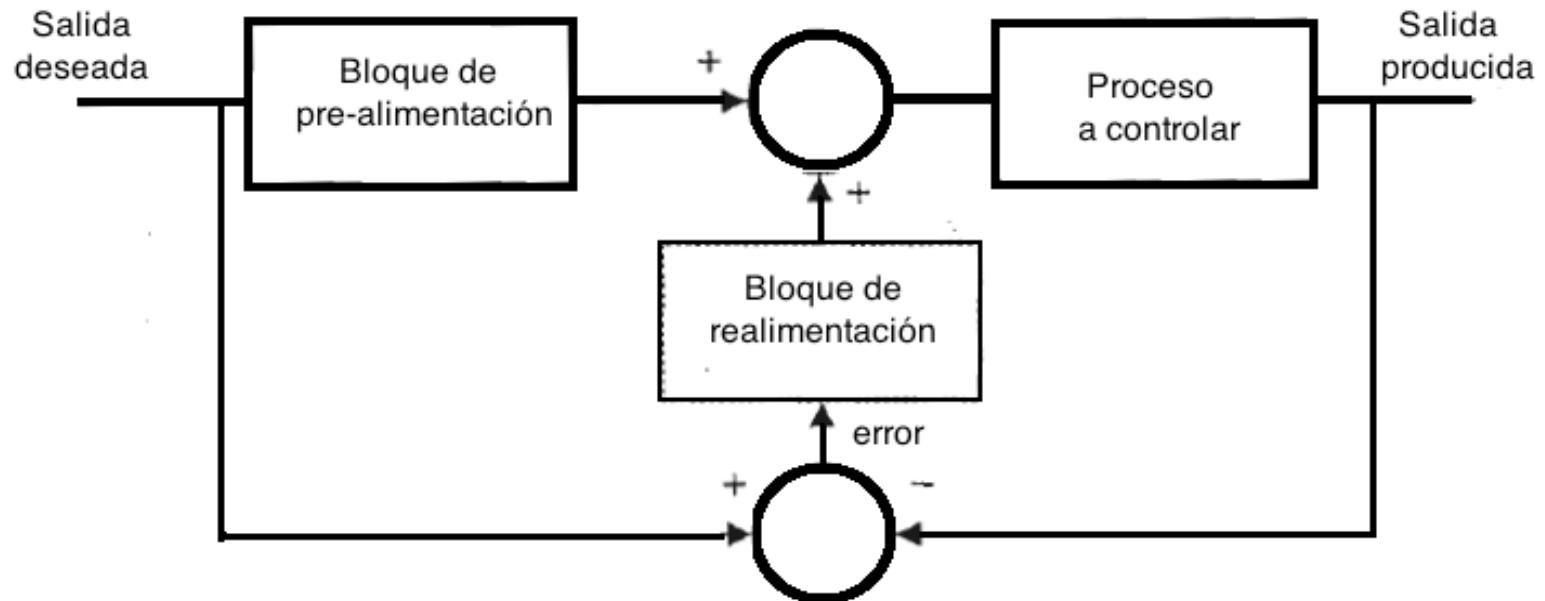
Otra alternativa es el uso de “pre-alimentación” (feedforward), en donde la señal de demanda se alimenta simultáneamente al canal tradicional del controlador realimentado, y a un bloque de pre-alimentación.

Usualmente se presenta el bloque de prealimentación como un agregado al sistema tradicional, asignándole al bloque de pre-alimentación un porcentaje bajo de la acción de control.



Sin embargo, hay proponentes de que la acción de pre-alimentación puede representar una parte considerable de la acción total de control (hasta un 95%), lo que lleva a una representación gráfica mas apropiada.

En esta interpretación la hipótesis de diseño es simple:



Si la función de transferencia del bloque de pre-alimentación,  $F(s)$  es el inverso de la función de transferencia de la planta,  $G(s)$  su producto es la unidad, y por lo tanto la salida de la planta  $Y(s)$  es idéntica a la referencia  $R(s)$ , en cuyo caso el bloque de realimentación  $D(s)$  se puede dedicar básicamente a compensar los efectos de las perturbaciones.



En un sistema de control de movimiento típico el proceso a controlar es esencialmente un sistema inercial con amortiguación viscosa, con una función de transferencia genérica del tipo:

$$G(s) = \frac{\frac{K}{\tau_m}}{s \left( s + \frac{1}{\tau_m} \right)} = \frac{K_1}{K_2 s^2 + K_3 s}$$

Su inverso resulta:

$$F(s) = \frac{K_2}{K_1} s^2 + \frac{K_3}{K_1} s$$

En términos físicos el primer término es proporcional a la aceleración deseada y el segundo a la velocidad.

El primer coeficiente,  $K_2/K_1$  es la ganancia de pre-alimentación de aceleración.

Dada la relación de Newton,  $F=Ma$ , esta ganancia es simplemente la masa del sistema en un caso de movimiento lineal, o su equivalente, la inercia rotacional en un caso de movimiento circular.

Con un razonamiento similar, el coeficiente del segundo término es la fricción viscosa del sistema.

Matemáticamente por supuesto el sistema solo ofrece una compensación perfecta si se conoce perfectamente las características del sistema de carga, y estas son totalmente invariantes.

En la práctica esto no ocurre, pero eso no invalida la configuración, solo reduce su eficacia, y esto se puede compensar mediante el lazo de realimentación convencional, o empleando técnicas de estimación de parámetros para ajustar dinámicamente el bloque de pre-alimentación.

Debe observarse además que el bloque de pre-alimentación no incluye polos, y no está incluido en un lazo de realimentación, así que no puede causar inestabilidad en la respuesta del sistema aunque el ajuste no sea perfecto.

Lo que si ocurre es que al haberse eliminado el retardo en la respuesta, cambios bruscos en la trayectoria (por ejemplo una demanda de un giro instantáneo de  $90^\circ$ ) pueden llevar a que el sistema trate de lograr una respuesta que es físicamente imposible; por supuesto esto debe ser evitado realizando una pre-programación cuidadosa de las demandas, o incluyendo los correspondientes bloques limitadores.

## Consideraciones finales:

- 1.- En el estado actual de la tecnología, en la mayoría de los casos no se considera viable medir directamente la variable aceleración, la cual se reemplaza en la práctica por la variable par; en el caso específico de las implementaciones con motores DC se hace una simplificación adicional, y se trabaja con la variable corriente de armadura, partiendo de la base de que el par generado es directamente proporcional a dicha corriente.
- 2.- Los diagramas de Bode, presentados por Hendrick Wade Bode en 1938 son una herramienta, no “La Herramienta”. Como toda herramienta, presentan limitaciones y hay situaciones en las que pueden fallar: aunque suelen ser confiables para sistemas de segundo orden, pero pueden proporcionar información errónea en sistemas de orden superior.

3.- El diseño del actuador puede ser realizado en base a otros métodos clásicos, como el diagrama de Nichols, propuesto por Nathaniel Nichols en 1947, el lugar de las raíces, propuesto por Walter Evans en 1948, o con los diversos métodos propuestos bajo la categoría general de control moderno.