

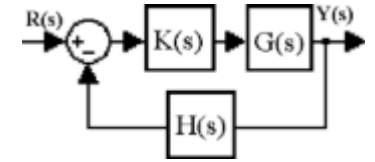


# Control Automático



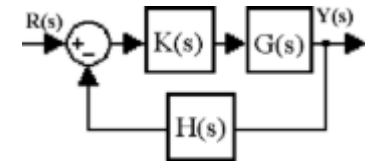
Introducción

# Contenido



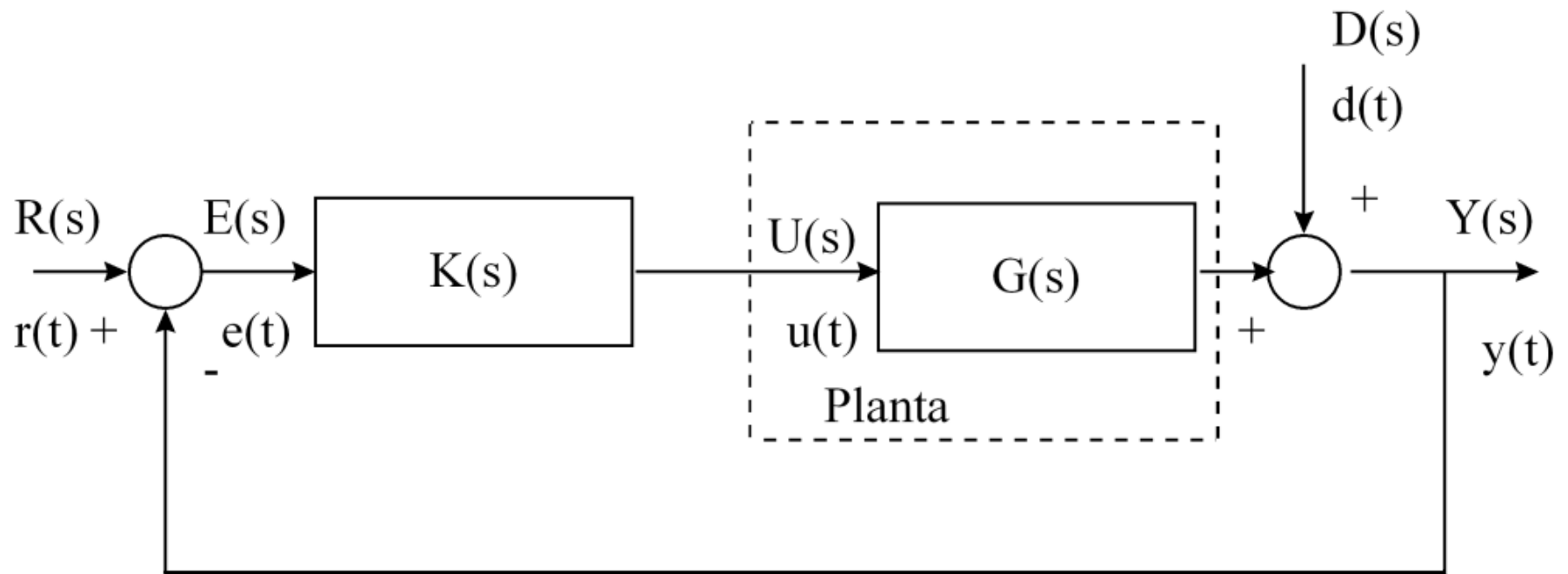
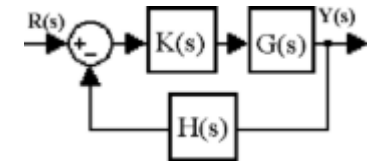
- ¿Qué es control automático?
- Tareas y objetivos del control automático
- Estructuras de los circuitos de regulación
- Tipos de regulación
- Efecto de las perturbaciones y el ruido
- Vista general a los procedimientos de diseño
- Diseño asistido por computador

# ¿Qué es control automático?



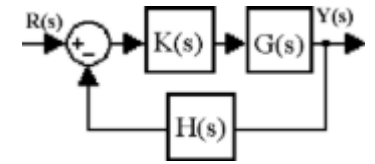
- La respuesta será construida con las respuestas dadas por los estudiantes en la clase.

# Circuito general de regulación



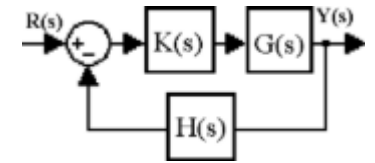
$$G_R(s) = \frac{K(s)G(s)}{1 + K(s)G(s)} \quad G_D(s) = \frac{1}{1 + K(s)G(s)} \quad G_R(s) + G_D(s) = 1$$

# Objetivos del control automático



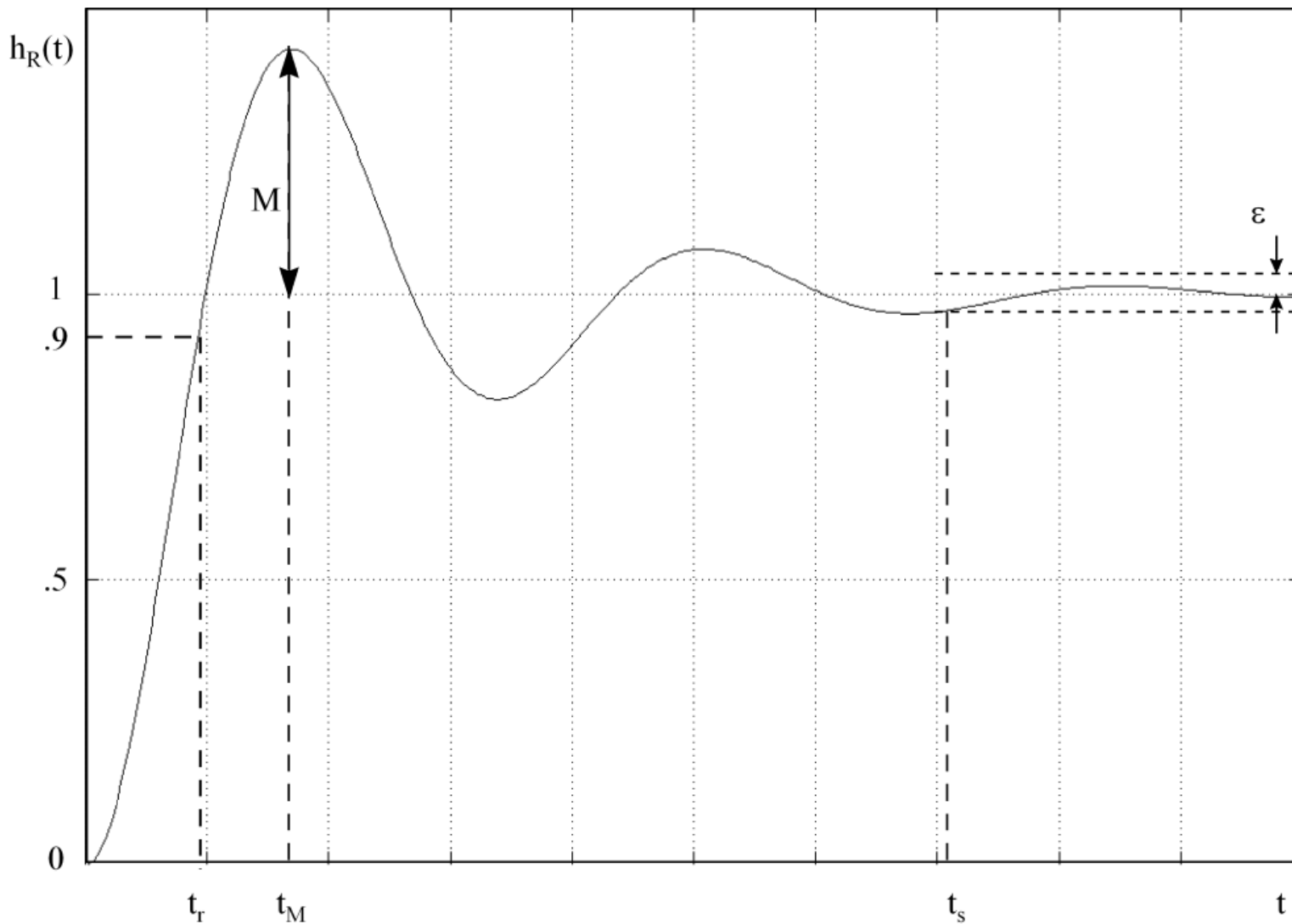
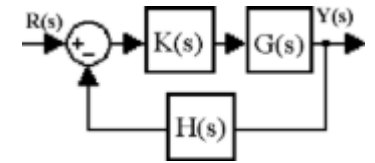
- Estabilidad
  - El sistema en lazo cerrado debe ser estable
- Comportamiento estático: Compensación de perturbaciones y seguimiento de la entrada de referencia
  - Para las clases de entradas de referencia y perturbación dadas, la salida debe seguir asintóticamente la entrada de referencia
- Comportamiento dinámico
  - Satisfacer los requisitos de los principales parámetros dinámicos durante el transitorio: el tiempo de subida ( $t_r$ ), el sobreimpulso máximo ( $M_p$ ) y el tiempo de estabilización ( $t_s$ )

# Tareas del control automático

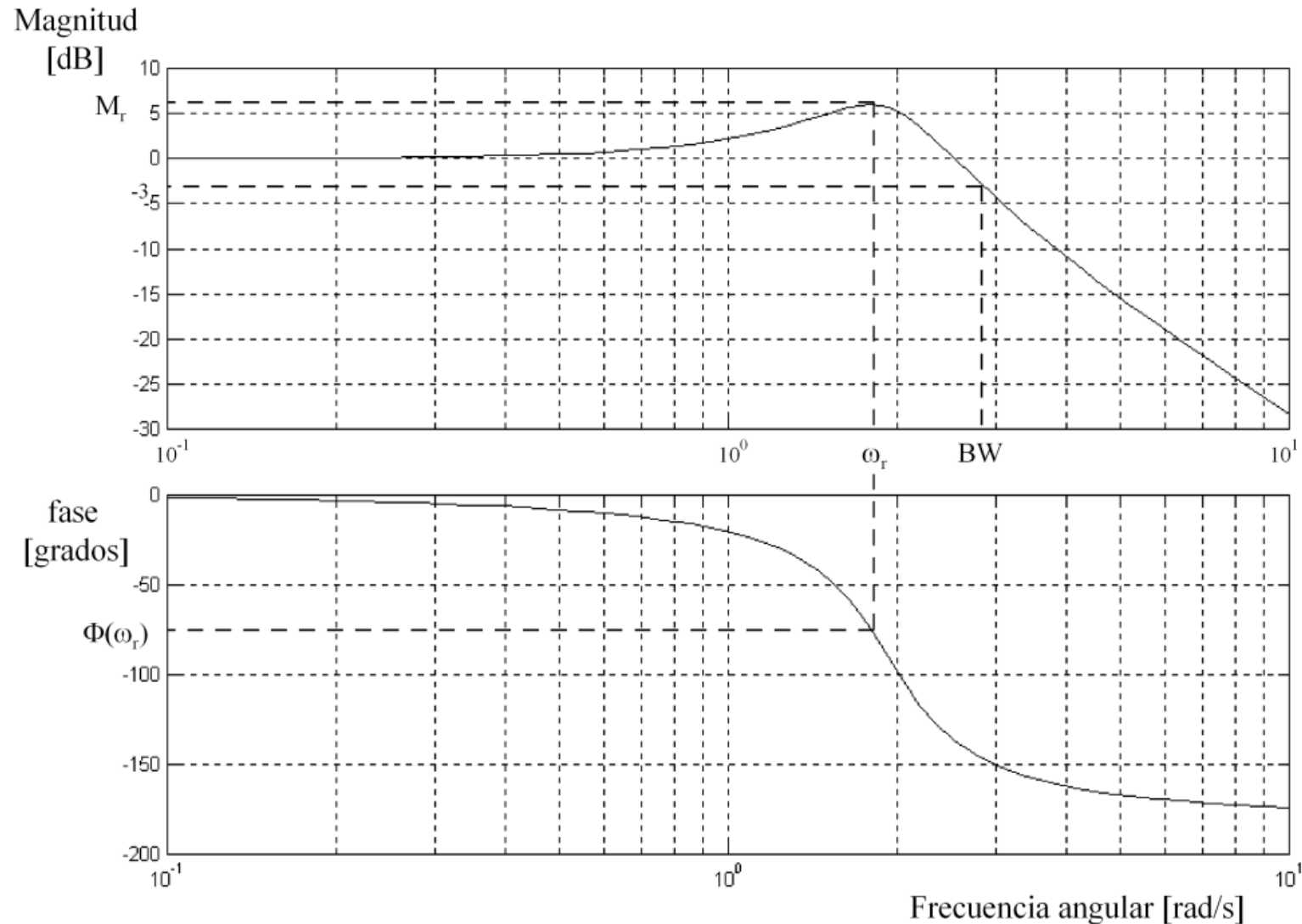
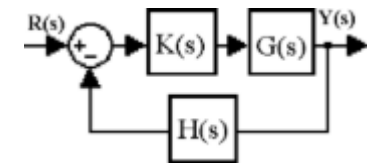


- Ajustar el sistema para lograr estabilidad y un comportamiento dinámico deseado: tiempo de subida, tiempo de estabilización, sobreimpulso
- Lograr que el sistema tenga un comportamiento estático adecuado: error de estado estacionario, rechazo de perturbaciones

# Parámetros importantes de la respuesta ante un escalón

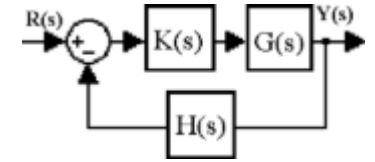


# Parámetros de la respuesta de frecuencia de lazo cerrado



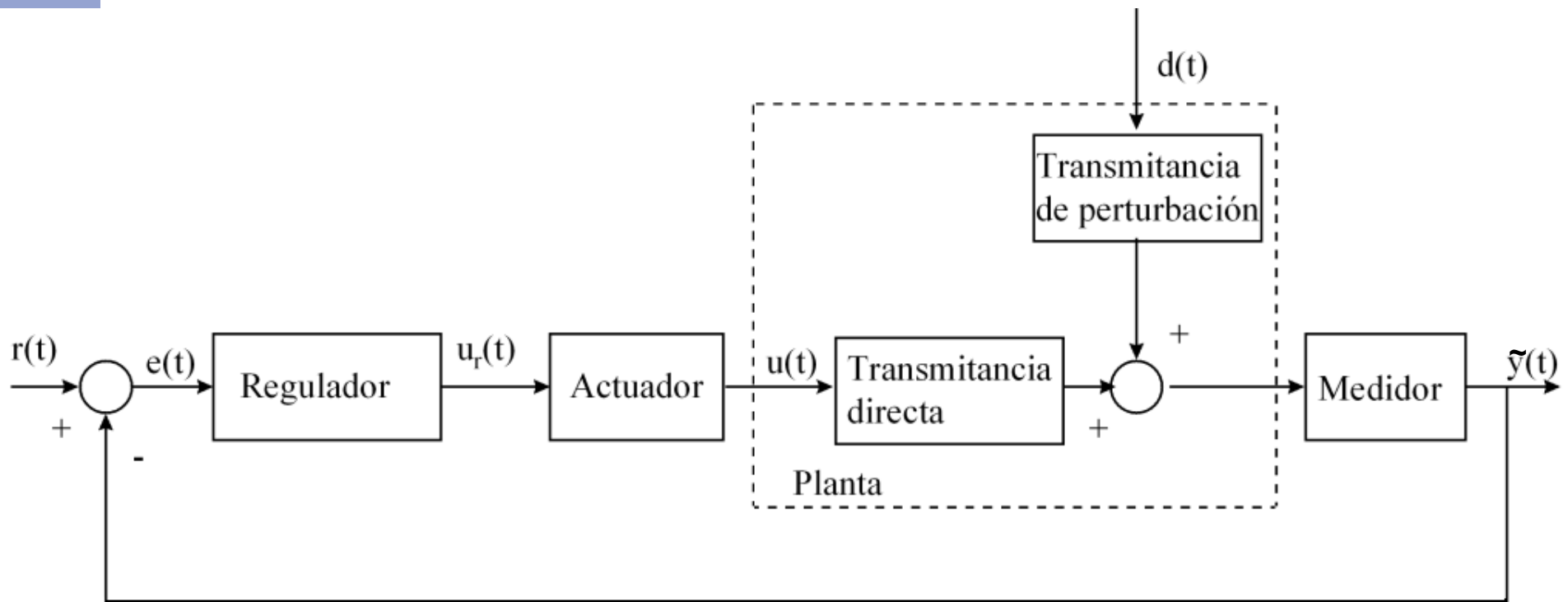
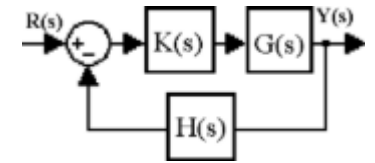


# Tipos de regulación

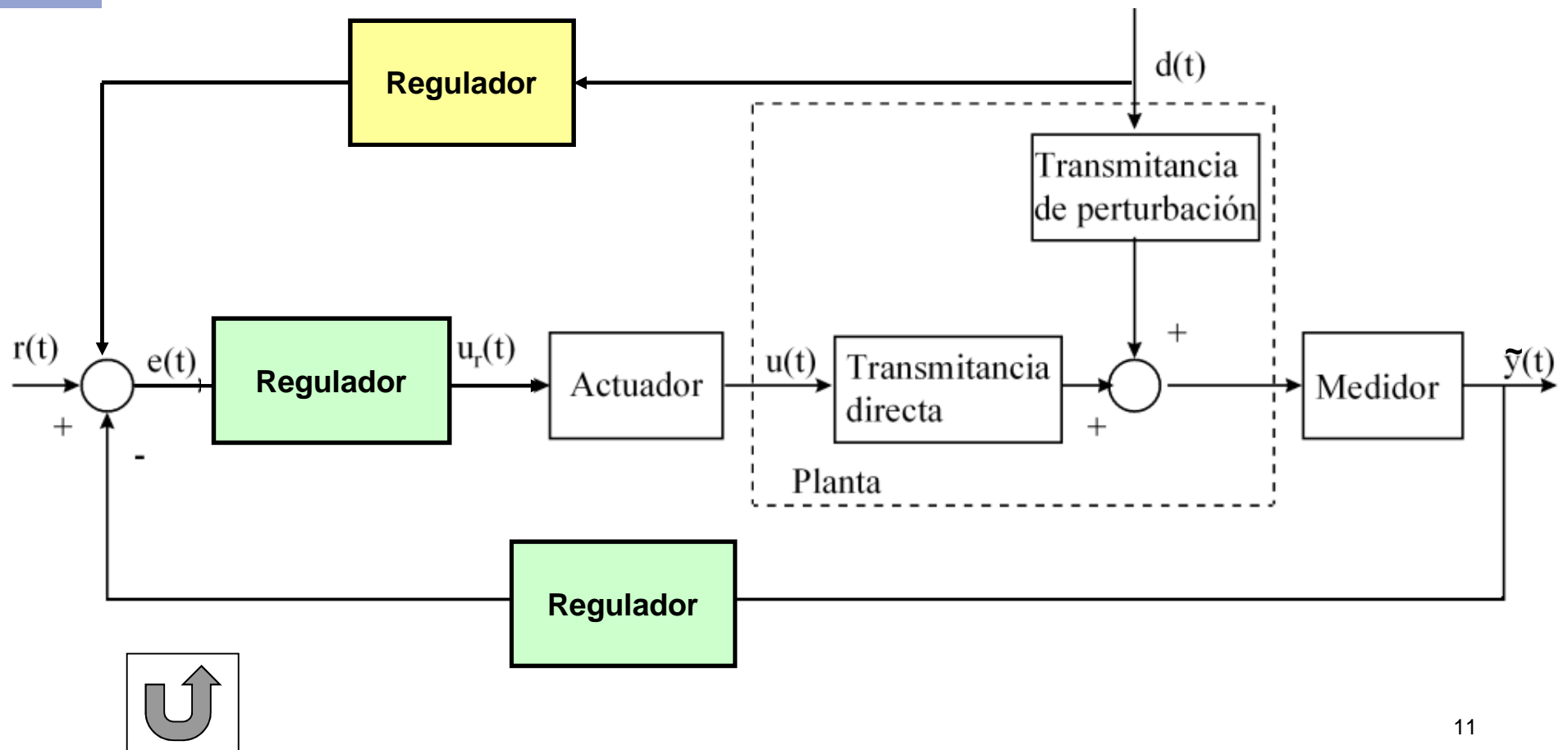
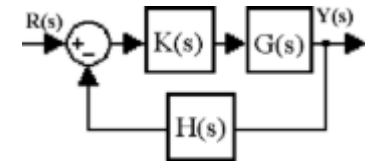


- Dependiendo de cuáles exigencias al circuito de regulación son las que más lo influyen se distingue entre:
  - La regulación de valor fijo o regulación de perturbación
  - La regulación de seguimiento

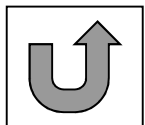
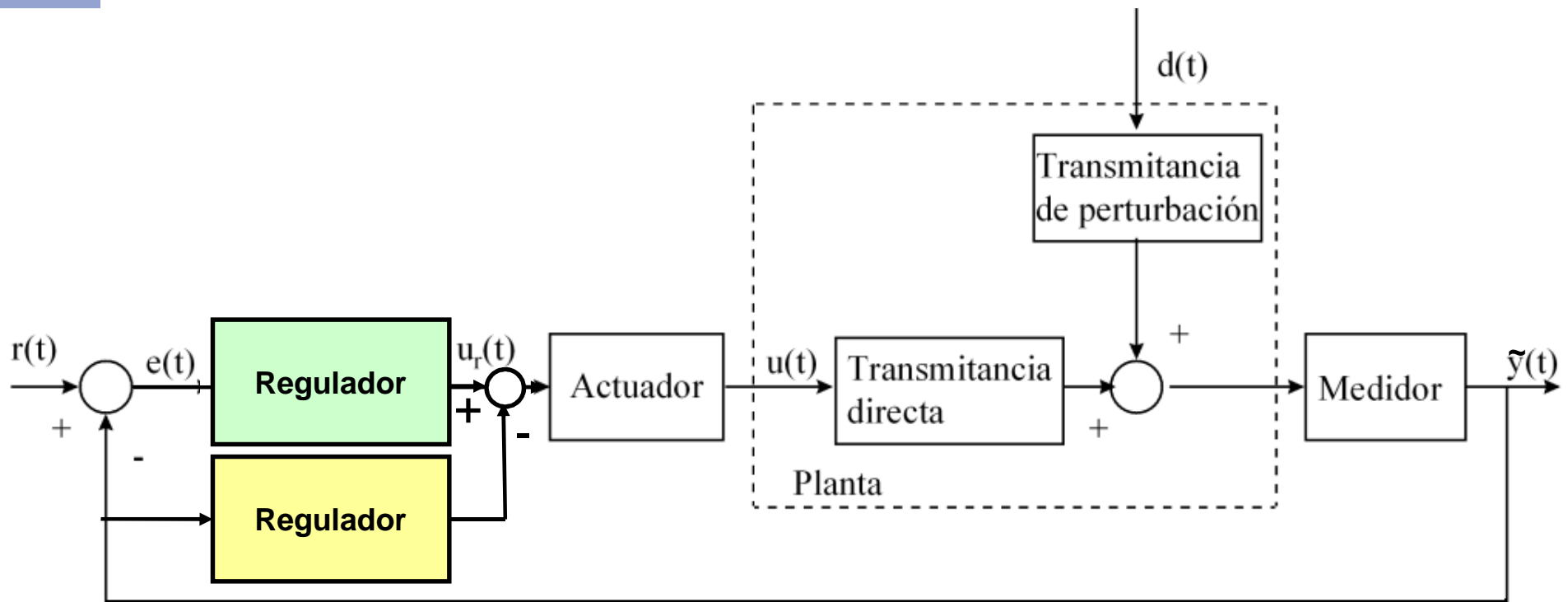
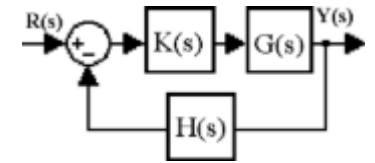
# Estructura ampliada del circuito de regulación



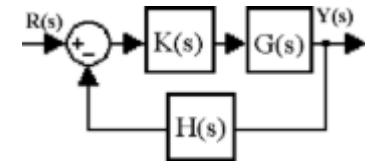
# Otras estructuras para el circuito de regulación



# Otras estructuras para el circuito de regulación

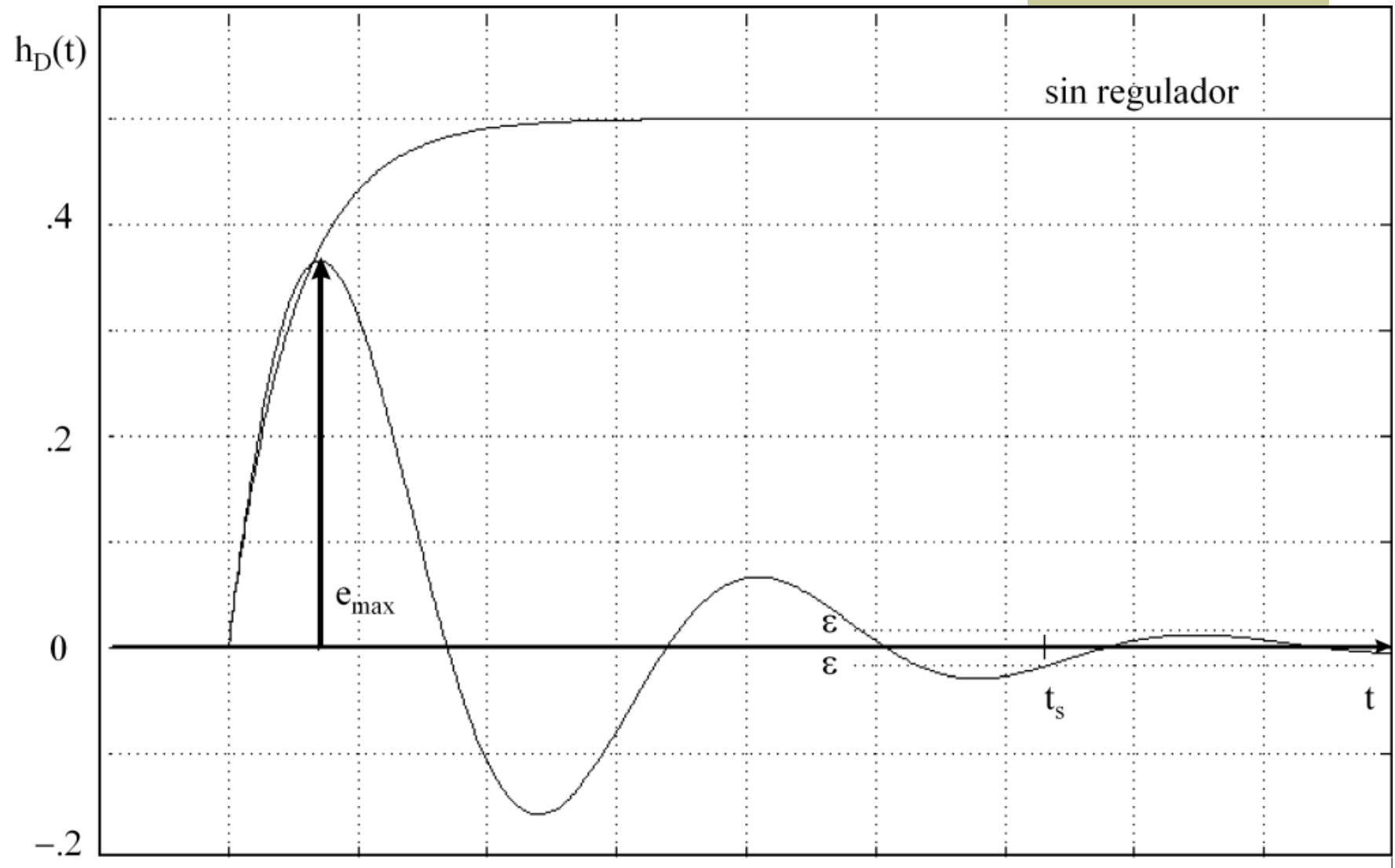
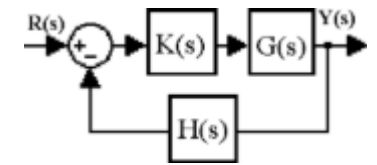


# La regulación de valor fijo o regulación de perturbación

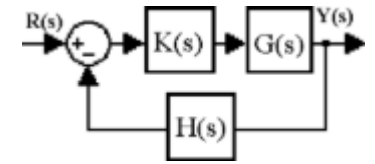


- Se calcula el regulador para una entrada de referencia constante y con miras a una compensación de la perturbación
- La salida debe permanecer constante ante un valor constante de la referencia ( $r(t) = \text{constante}$ ); a pesar que el lazo de regulación sea perturbado desde fuera

# Respuesta de un sistema ante una perturbación

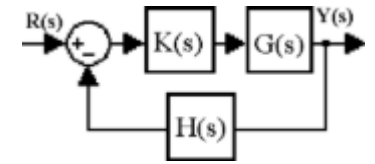


# Regulación de seguimiento



- El seguimiento de la salida ante una trayectoria de la entrada de referencia  $r(t)$  es la parte más importante de la regulación
- Se parte de que las perturbaciones son pequeñas
- Estas perturbaciones influyen la salida y deben ser compensadas por la regulación; aunque no juegan un papel importante en la selección del regulador

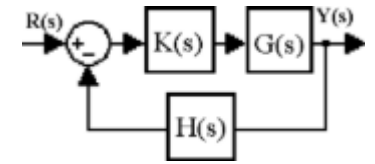
# Restricciones y libertades en el desarrollo del regulador



- Selección de la estructura de regulación
- Selección de la estructura del regulador
- Selección de los parámetros del regulador

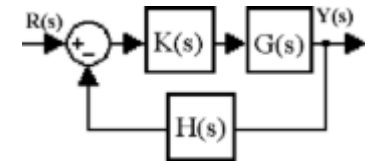


# Selección de la estructura de regulación



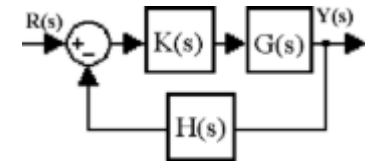
- Establecer cuales acoples de señales deben ser establecidas por el regulador
  - Identificar cuál es la salida a regular y cuál es la entrada de referencia
  - Definir la estructura del circuito de regulación, cuántos **grados de libertad** debe tener.
- Partiremos de aquí en adelante del circuito general de regulación

# Selección de la estructura del regulador



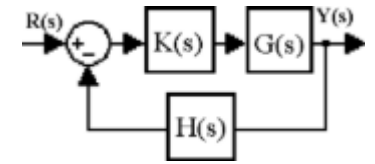
- Decidir cuál regulador debe ser utilizado. Es importante decidir si se va a utilizar un regulador complejo (ej: realimentación de estado con observador) o si los tipos de reguladores más simples son suficientes para la solución de la tarea
- La selección depende de los requisitos o especificaciones de diseño y de las propiedades del circuito de regulación. Se habla de síntesis del regulador

# Selección de los parámetros del regulador



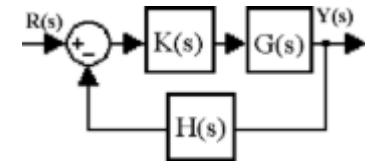
- Los parámetros del regulador se escogen de tal forma que los requisitos exigidos al circuito de regulación se obtengan
- Se habla de cálculo o diseño del regulador

# Dificultades para la solución del problema de regulación



- Las exigencias del diseño y especialmente las exigencias dinámicas son muy variadas
- No basta un único procedimiento; sino, que deben ser desarrollados una cantidad de procedimientos múltiples
- Los grados de libertad de los reguladores con los cuales la dinámica del lazo de regulación puede ser influenciada son limitados

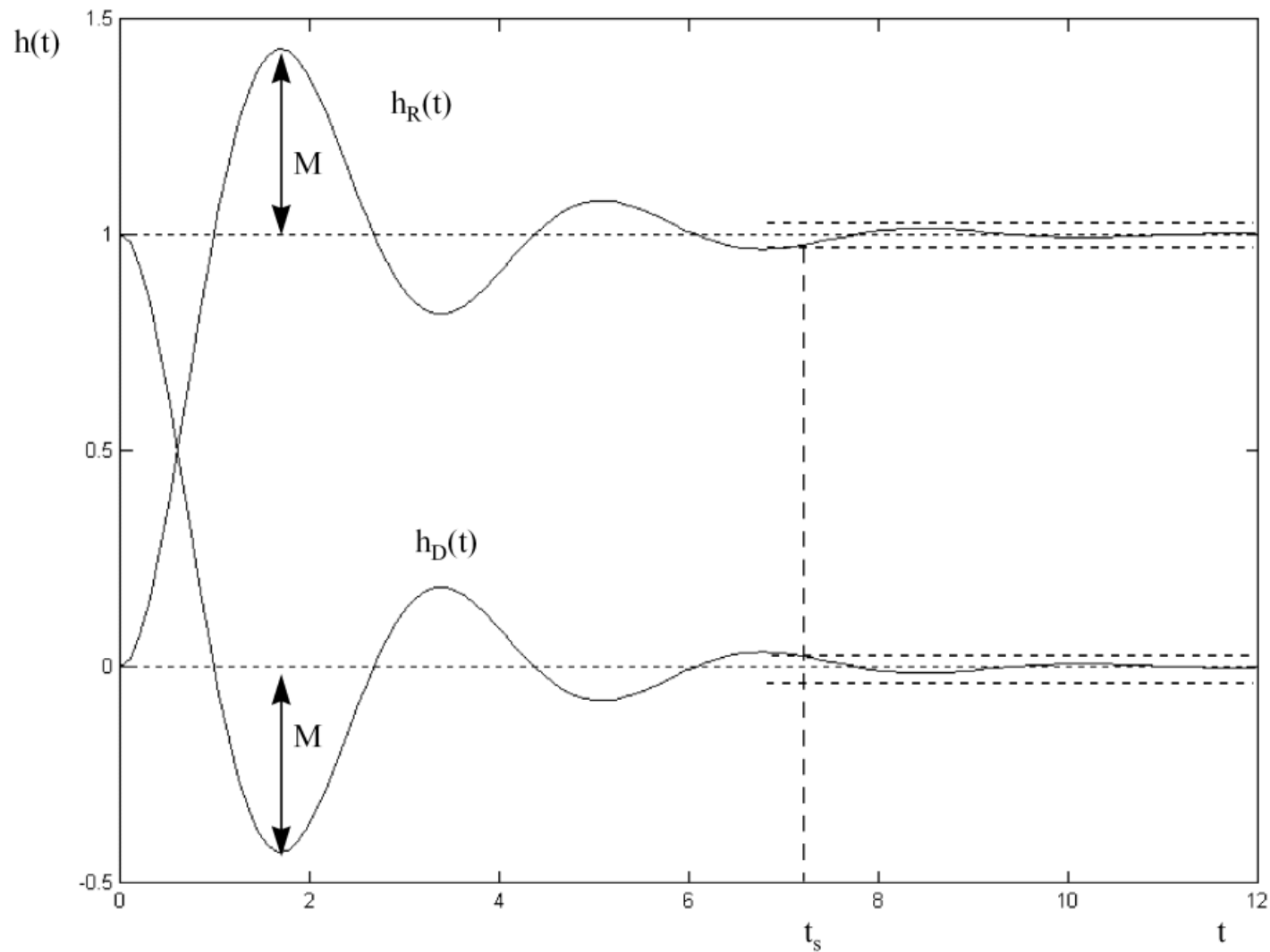
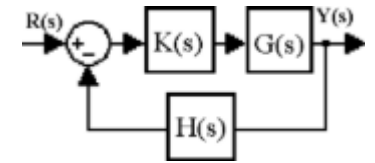
# Influencia de las perturbaciones y el ruido



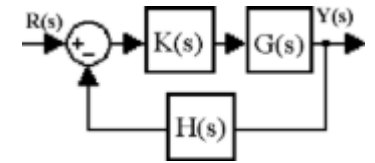
$$T_{ER}(s) = \frac{1}{1 + G_O(s)} = \frac{1}{1 + K(s)G(s)} = G_D(s)$$

- El error de estado estacionario del sistema para la entrada de referencia es igual al error de estado estacionario producido por la entrada de perturbación.
- Esto significa que si se diseña un controlador para minimizar o eliminar el error de estado estacionario para la entrada de referencia o lazo directo, automáticamente se elimina el error de estado estacionario para la perturbación

# Respuestas ante escalón en la ent. de referencia y perturbación



# Perturbaciones a la salida de la planta



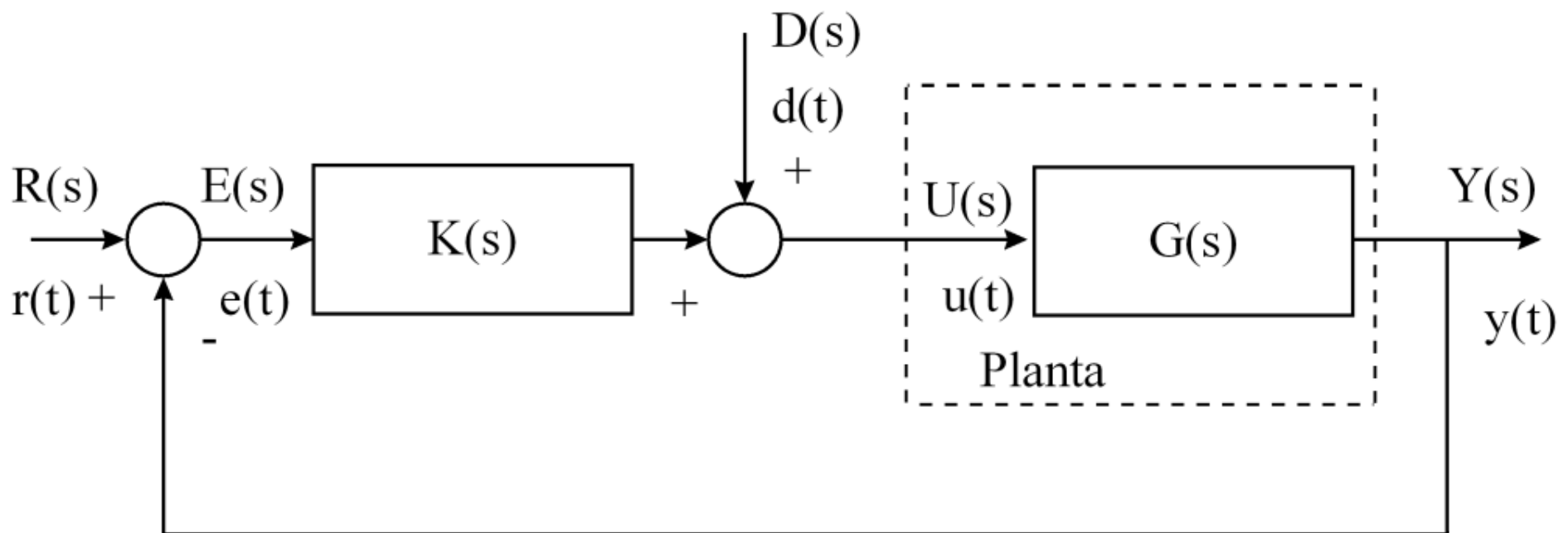
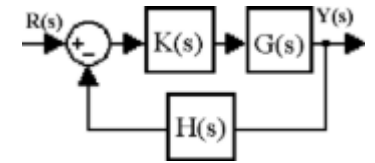
- Sustituimos  $G(s) = N(s)/M(s)$   $K(s) = P(s)/Q(s)$

$$G_D(s) = \frac{1}{1 + K(s)G(s)}$$

$$G_D(s) = \frac{M(s)Q(s)}{M(s)Q(s) + N(s)P(s)}$$

- Para tener un sistema tipo 1 debe de haber un polo en el origen en la función de lazo abierto  $G_o(s) = K(s)G(s)$ . Hasta aquí no tiene importancia si el polo en el origen lo provee la planta  $G(s)$  o el controlador  $K(s)$

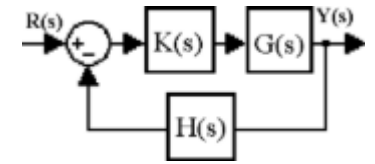
# Sistema con perturbación a la entrada de la planta



$$G_D(s) = \frac{G(s)}{1 + K(s)G(s)}$$



# Perturbación en la entrada de la planta



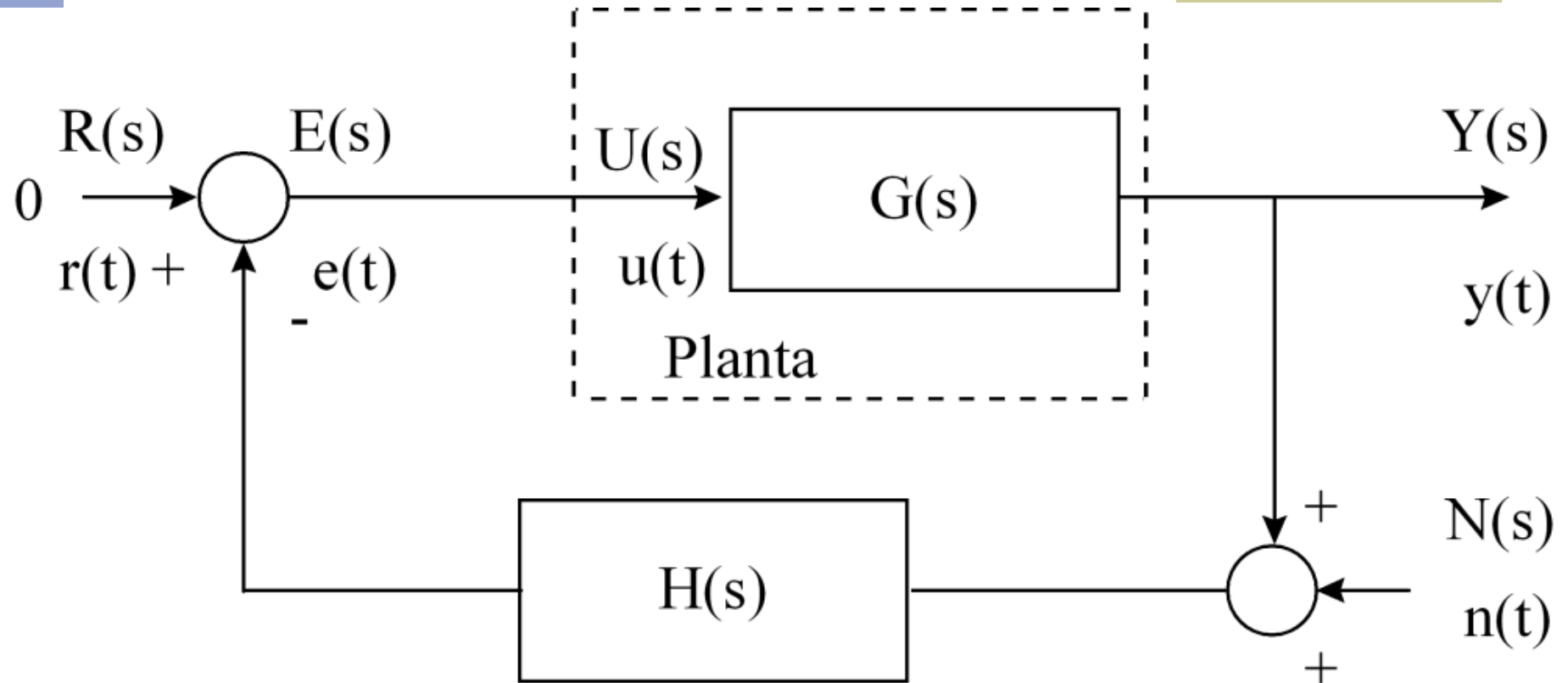
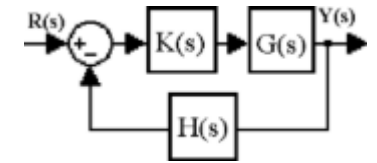
$$G_D(s) = \frac{G(s)}{1 + K(s)G(s)}$$

- Al sustituir  $G(s) = N(s)/M(s)$ ,  $K(s) = P(s)/Q(s)$

$$G_D(s) = \frac{\boxed{N(s)Q(s)}}{M(s)Q(s) + N(s)P(s)}$$

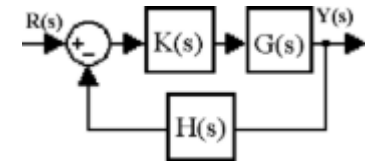
- Para tener un sistema tipo 1 con esta configuración es necesario el controlador  $K(s)$  tenga un polo en el origen

# Ruido aditivo en la realimentación de la salida



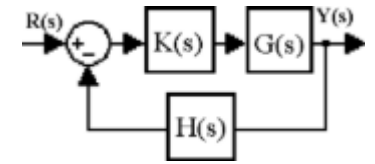
$$G_N(s) = \frac{Y(s)}{N(s)} = \frac{-G(s)H(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

# Ruido aditivo en la realimentación de la salida



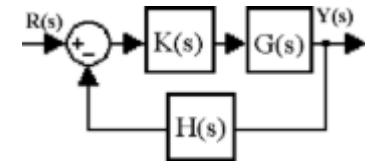
- Para disminuir el ruido a la salida producido por el sensor, se debe de mantener en un valor pequeño la ganancia de lazo
- Normalmente se requiere una ganancia de lazo grande para reducir las perturbaciones o reducir la sensibilidad ante las variaciones de los parámetros de la planta. Por lo tanto debe de establecerse un compromiso para la ganancia de lazo
- Normalmente se pretende tener una ganancia de lazo grande para bajas frecuencias y una ganancia de lazo pequeña para altas frecuencias

# Vista general de los procedimientos de diseño



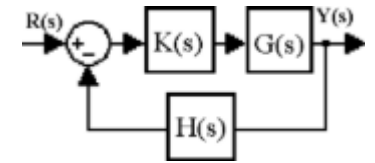
- Hay una gran cantidad de procedimientos de diseño debido a que por las condiciones de frontera prácticas para la solución del problema de regulación, existen diferentes condiciones y objetivos.
- Los procedimientos individuales se diferencian en sus exigencias acerca del conocimiento del lazo de regulación y en las exigencias más importantes al lazo de regulación.

# Procedimientos de diseño



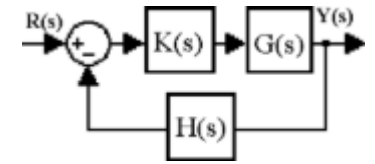
- Reglas de ajuste Heurísticas
- Diseño por ubicación de polos
  - Diseño con el lugar de las raíces
  - Realimentación de estado
- Diseño del regulador a partir de la respuesta de frecuencia de lazo abierto
- Optimización de parámetros del regulador

# Procedimiento de ajuste heurístico (1)



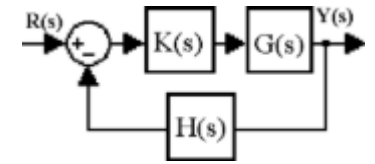
- No se dispone de ningún modelo de la planta y se busca un regulador, el cual debe satisfacer exigencias débiles de regulación
- El regulador se conecta en el lazo de regulación y con ayuda de experimentos se procede a buscar los parámetros de ajuste adecuados del regulador
- Los experimentos sirven por un lado para conocer propiedades dinámicas importantes de la planta y por otro lado para evaluar el comportamiento del lazo de regulación con los parámetros del regulador escogidos

# Procedimiento de ajuste heurístico (2)



- Las condiciones para este procedimiento son que la planta sea estable y que se pueda experimentar con ella
- La ventaja del ajuste del regulador consiste en que no se requiere un modelo exacto de la planta y con ello no es necesario el paso del modelado. Ejemplo: métodos de Ziegler-Nichols.

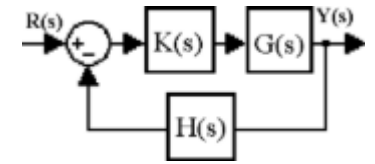
# Diseño del regulador por ubicación de polos (1)



- Las principales características dinámicas del lazo de regulación pueden inferirse de la posición de los polos y ceros
- A través de una selección adecuada de los parámetros del regulador, se influncian los valores propios de la matriz del sistema (**A**), o equivalentemente la ubicación de los polos de la función de transferencia de lazo cerrado

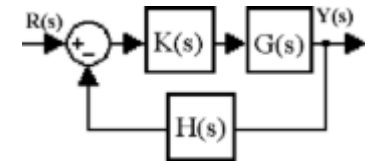


# Diseño del regulador por ubicación de polos (2)



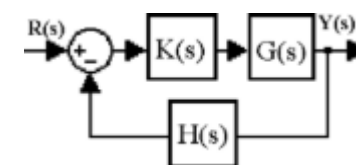
- Estos procedimientos parten del modelo en variables de estado o de la función de transferencia de la planta
- Por lo general incluyen procedimientos de cálculo sistemáticos a partir de los cuales se pueden determinar los parámetros del regulador

# Diseño del regulador por ubicación de polos (3)

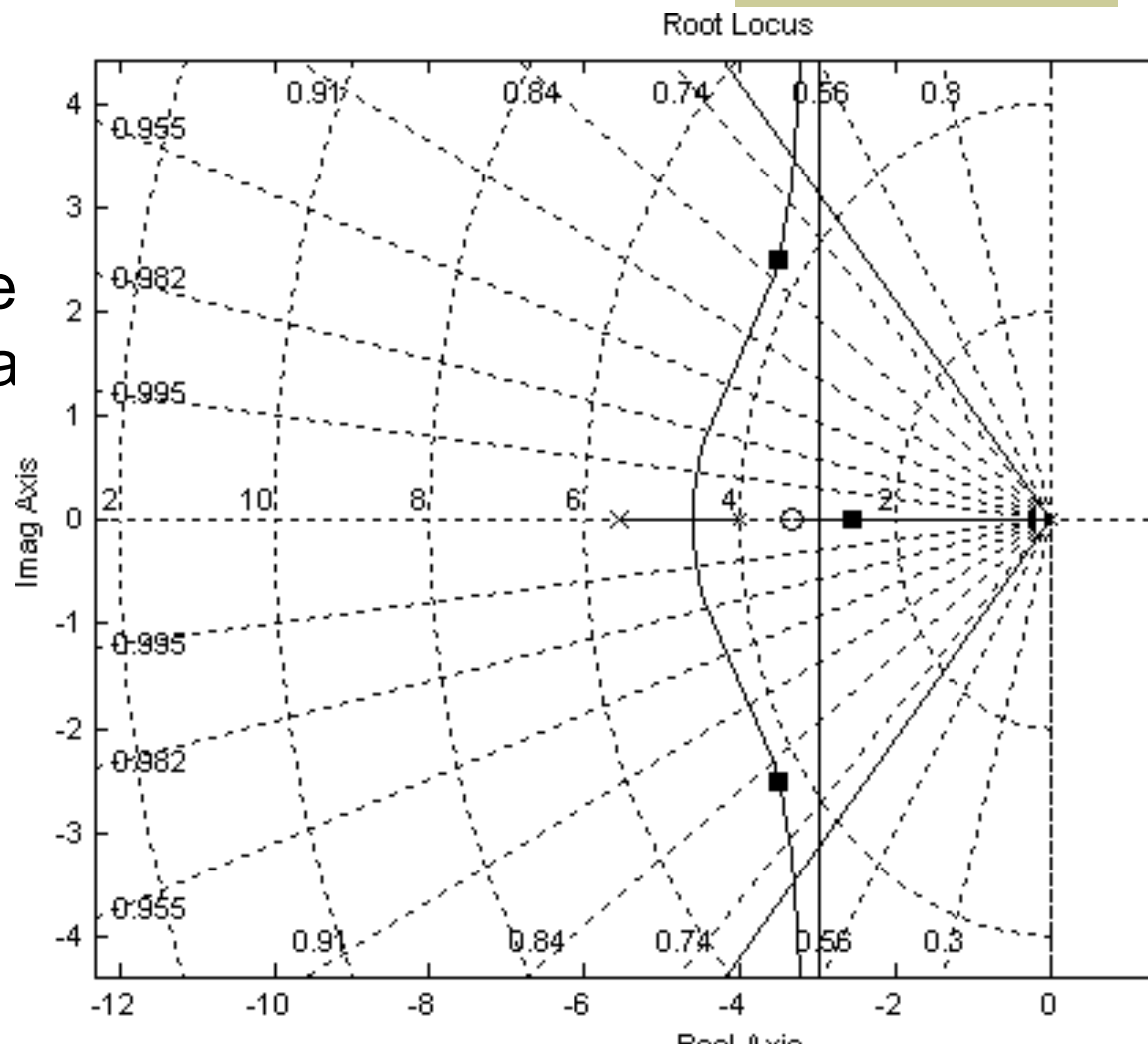


- Como la relación entre los valores propios (polos) predefinidos para el lazo cerrado y las exigencias dinámicas (a partir del problema de regulación) no son exactas, se añade a la determinación de los parámetros del regulador una simulación del lazo cerrado como verificación
- Si las exigencias no son llenadas satisfactoriamente; se itera hasta lograrlo

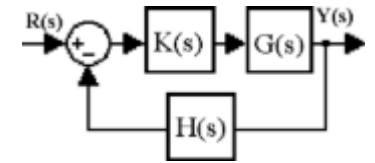
# Diseño del regulador en el lugar de las raíces



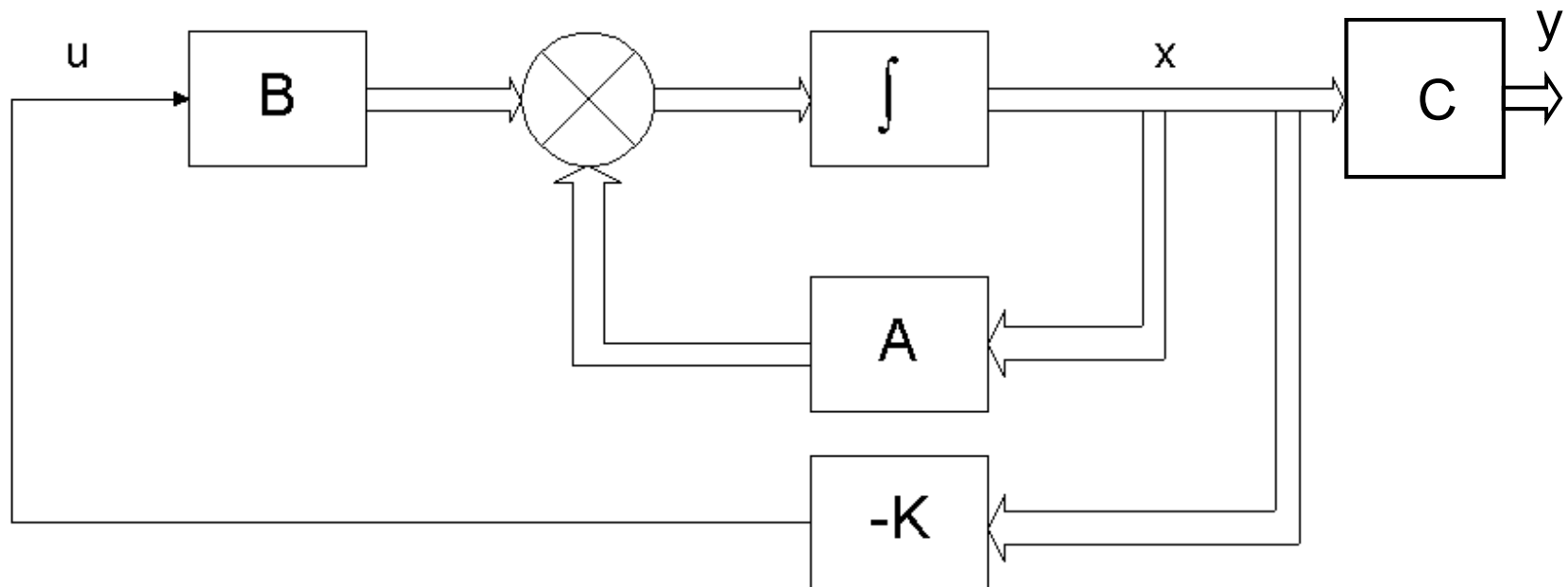
Ejemplo de compensador de adelanto que mueve el lugar de las raíces hacia la izquierda para que los polos dominantes se encuentren en el área deseada.



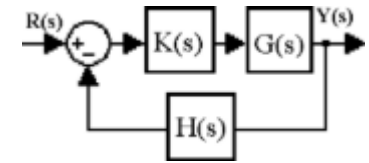
# Realimentación de estado



Se realimentan los estados usando una matriz constante  $\mathbf{K}$ . Esto modifica los valores propios (polos) del sistema.



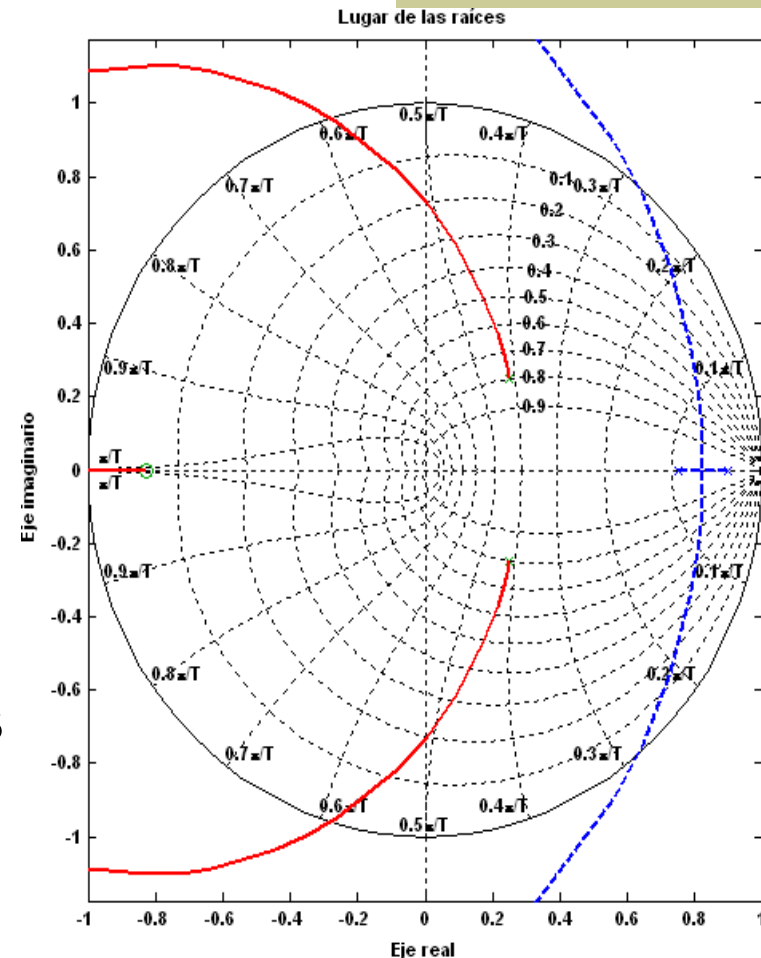
# Realimentación de estado (2)



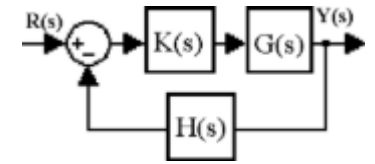
- Los polos del sistema se desplazan (hacia la izquierda) por efecto de la realimentación de estado con la matriz constante  $K$ , que produce un nuevo sistema con:

$$\tilde{A} = (A - BK)$$

- Que posee valores propios diferentes que  $A$ .

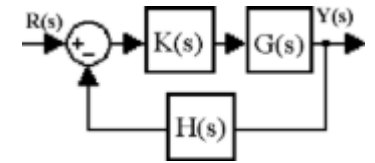


# Diseño a partir de la respuesta de frecuencia de lazo abierto

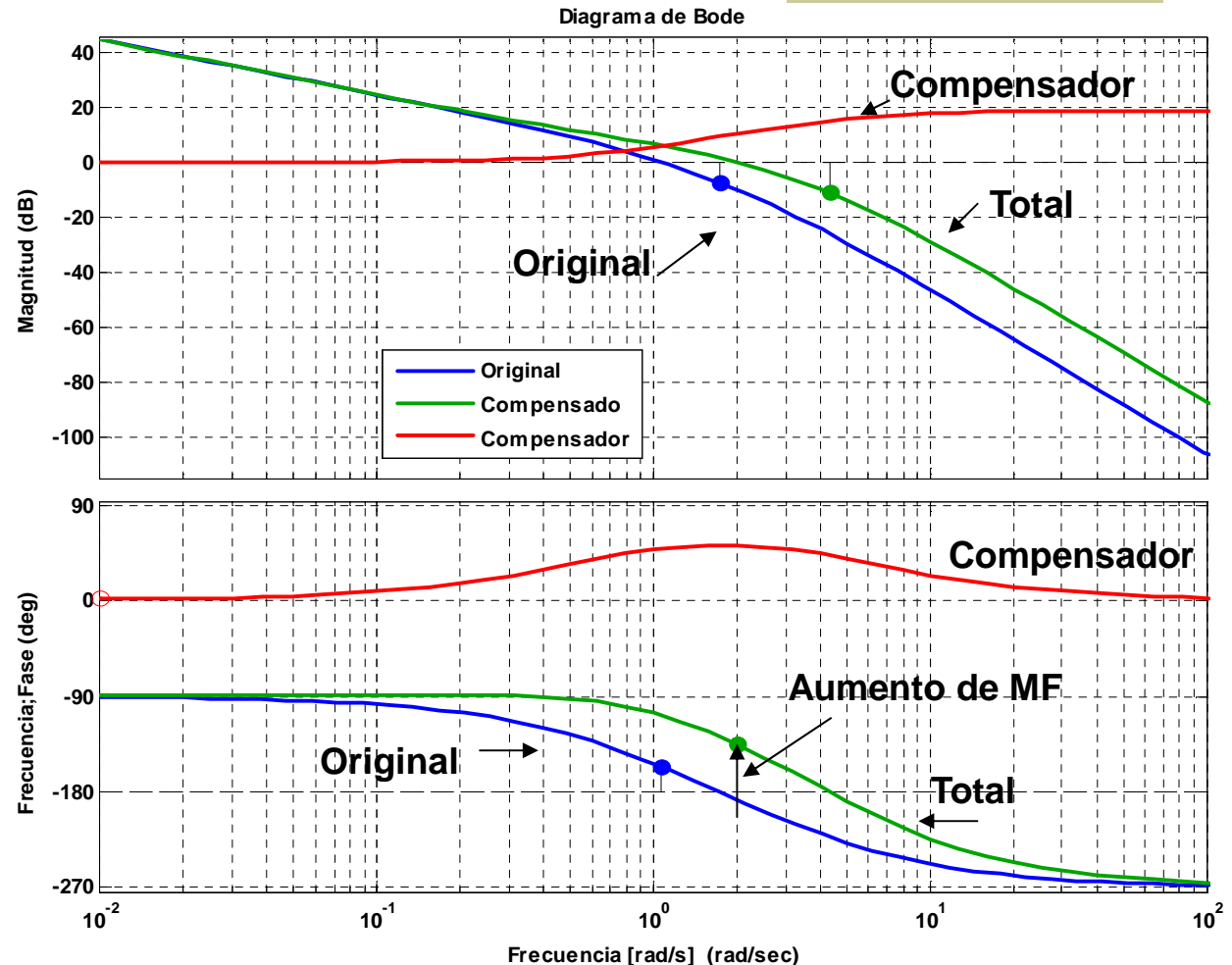


- Procedimiento fundamentado en influenciar la respuesta de frecuencia o la curva de lugar de la función de transferencia de lazo abierto para lograr un comportamiento de lazo cerrado deseado
- Las características de frecuencia del regulador son determinadas a partir de la comparación entre la respuesta de frecuencia de la planta en lazo abierto y la respuesta de frecuencia deseada

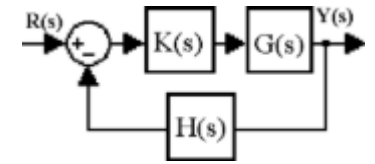
# Diseño a partir de la respuesta de frecuencia de lazo abierto (2)



Ejemplo de un compensador de adelanto que suma una fase positiva a la fase del sistema y aumenta así el margen de fase para el sistema.



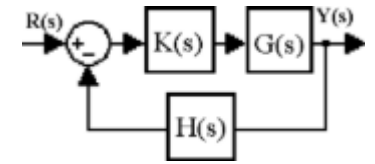
# Optimización de parámetros del regulador (1)



- Si las exigencias al lazo regulado son especificadas a través de una función de calidad; entonces, puede formularse el problema de regulación como un problema de optimización
- Así es deseable por ejemplo que el error promedio en el tiempo sea muy pequeño; por lo que las desviaciones grandes serán penalizadas más fuertemente que las desviaciones pequeñas



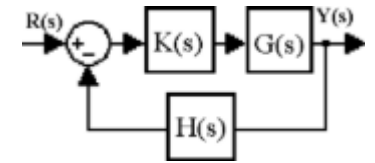
# Optimización de parámetros del regulador (2)



$$I = \int_0^{\infty} |e^2(t)| dt$$

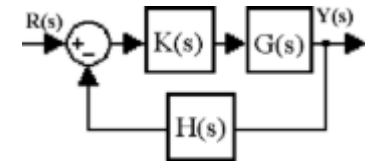
- Al valor de  $I$  se le conoce como **Área cuadrática de regulación**
- Depende, dada una planta y elegida la estructura del regulador, de los parámetros utilizados para el regulador
- El objetivo del procedimiento de diseño es hacer lo más pequeño posible el valor del criterio de calidad

# Diseño asistido por computador



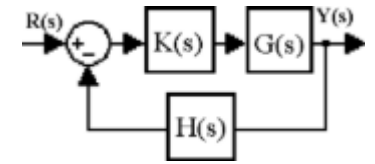
- La solución del problema de regulación abarca muchos pasos parcialmente iterativos, en los cuales uno o varios procedimientos deben ser escogidos y aplicados de entre una gran cantidad de posibilidades
- El objetivo del diseño asistido por computador es hacer que el computador ejecute la mayor cantidad de pasos posibles
- El problema de diseño se reparte entre el diseñador y la computadora para ser solucionado
- Algunos programas adecuados para esta tarea son Matlab/Simulink, LabView y Octave.

# Son tareas del computador



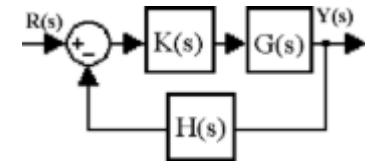
- La realización de operaciones numéricas y la solución de problemas de búsqueda
- La administración de los datos que contienen el modelo de la planta, el regulador y el lazo cerrado de regulación obtenido
- La presentación gráfica de los resultados del diseño; por ejemplo, la presentación gráfica de la respuesta ante la entrada de referencia

# Son tareas del diseñador



- La selección del próximo paso de diseño a seguir, el procedimiento o algoritmo
- La evaluación de los resultados del diseño con relación a las exigencias propuestas
- La decisión acerca de la continuación del diseño

# Referencias



- [1] Ogata, Katsuhiko. „**Ingeniería de Control Moderna**“, Pearson, Prentice Hall, 2003, 4ª Ed., Madrid.
- [2] Dorf, Richard, Bishop Robert. „**Sistemas de control moderno**“, 10ª Ed., Prentice Hall, 2005, España.