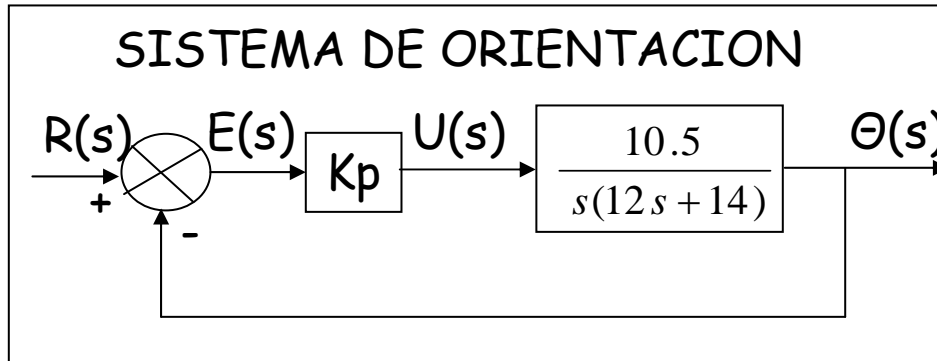


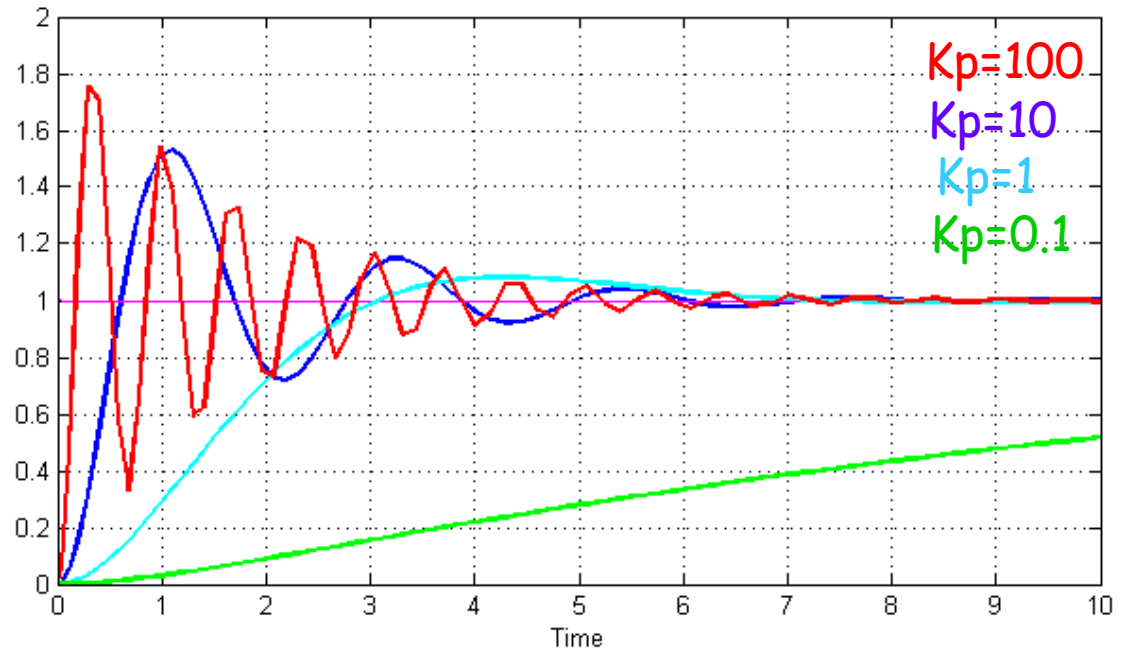
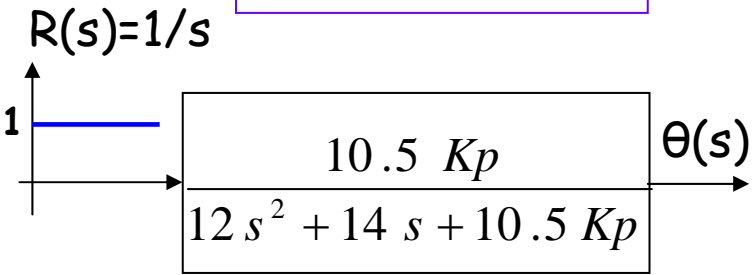
1. **Métodos de control de sistemas de orientación**
2. **Métodos de ajuste de PIDs**
3. **Estudio de las perturbaciones**
4. **Técnicas y diseño de compensadores para sistemas de orientación**

CONTROL PROPORCIONAL-(P)



- 1) Error de seguimiento=0. La antena sigue a la referencia
- 2) Al aumentar K_p aumentan las oscilaciones, al disminuir K_p la antena alcanza el ángulo deseado mas tarde

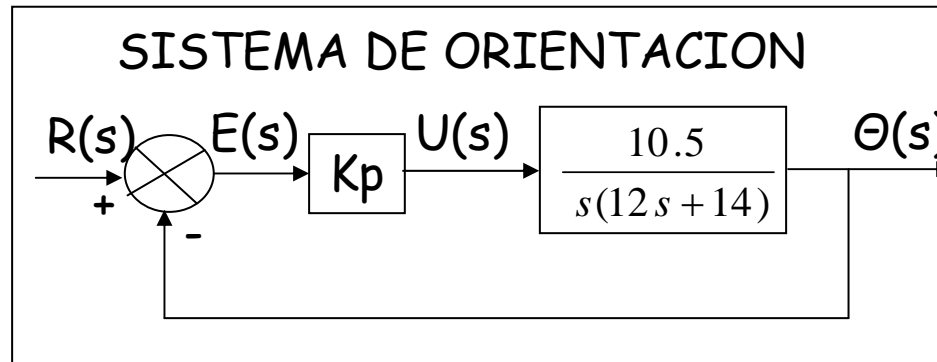
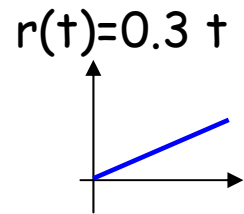
Entrada Escalón



- 1) Dibujar el lugar de las raíces
- 2) Calcular, en función de K_p : Rebose, T_1 y T_p .
- 3) Comprobar los resultados con las curvas de respuesta para cada k

EJERCICIO 1

CONTROL PROPORCIONAL-(P)

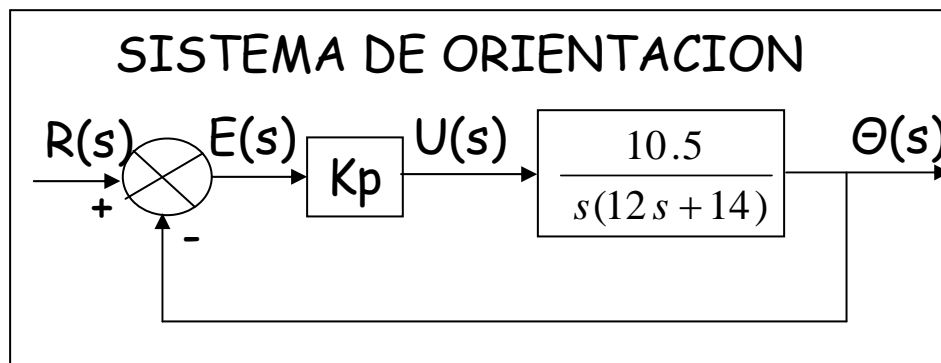
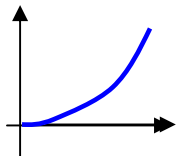


- 1) Calcular el error de seguimiento (e_{ss}) en función de K_p si la velocidad del satélite es de $w(t)=0.3 \text{ rad/s}$
- 2) Si suponemos que el ancho de banda proveniente del satélite, para que la antena no pierda señal, es de 0.1 rad y admitimos que el error máximo de seguimiento sea del 10% , calcular el valor mínimo que tiene que tener k_p
- 3) Representar gráficamente para $K_p=1$ y para el valor hallado en el apartado 2, el ángulo de posición, el error, el par motor, velocidad de la antena, la aceleración y las fuerzas de rozamiento.
- 4) Dibujar el lugar de las raíces del sistema

EJERCICIO 2

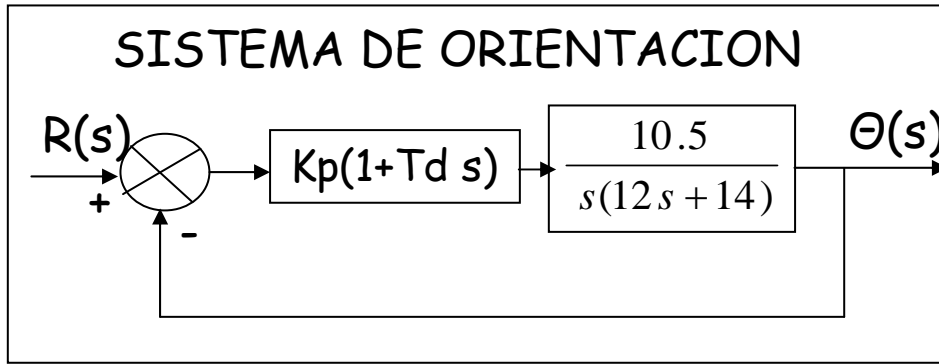
CONTROL PROPORCIONAL-(P)

$$r(t) = 0.1 t^2$$



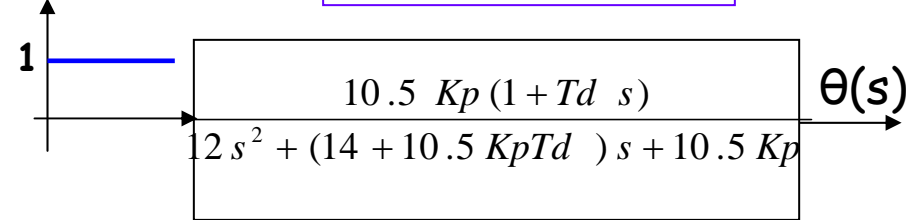
- 1) Calcular el error de seguimiento (e_{ss}) en función de K_p si la aceleración del satélite es de $\alpha = 0.1 \text{ rad/s}^2$
- 2) Si suponemos que el ancho de banda proveniente del satélite, para que la antena no pierda señal, es de 0.1 rad y admitimos que el error máximo de seguimiento sea del 10%; calcular el valor mínimo que tiene que tener K_p
- 3) Representar gráficamente para $K_p = 1$ y para el valor hallado en el apartado 2, el ángulo de posición, el error, el par motor, velocidad de la antena, la aceleración y las fuerzas de rozamiento.

CONTROL PROPORCIONAL-DERIVATIVO (PD)

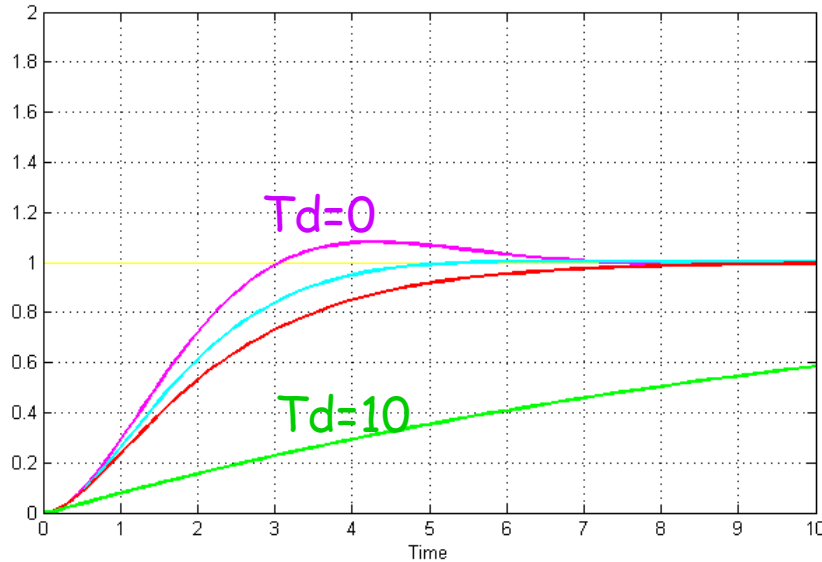


$$R(s) = 1/s$$

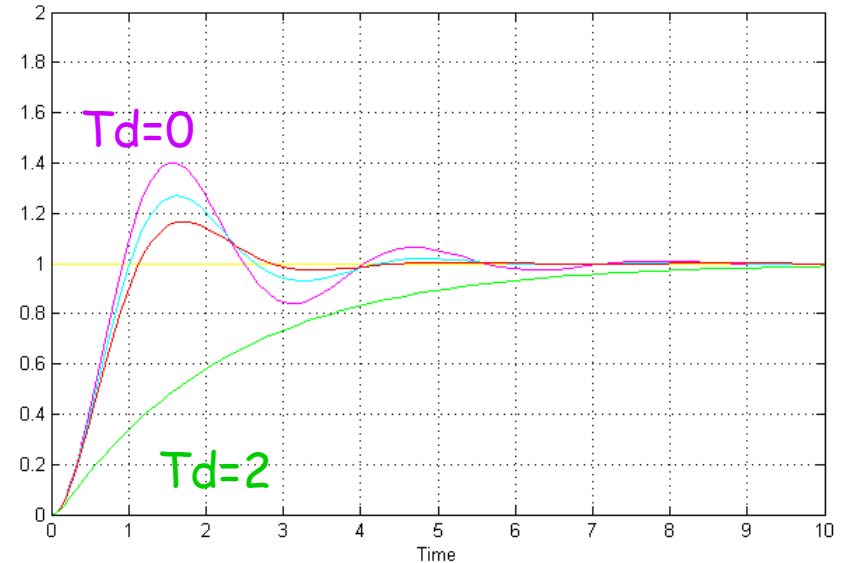
Entrada Escalón



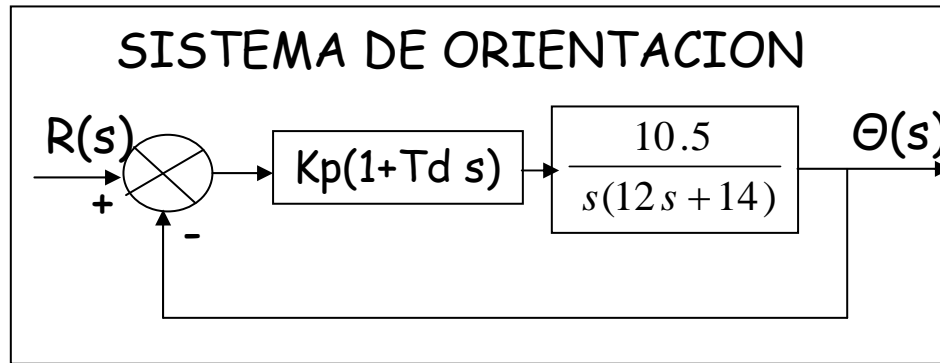
$K_p=1$



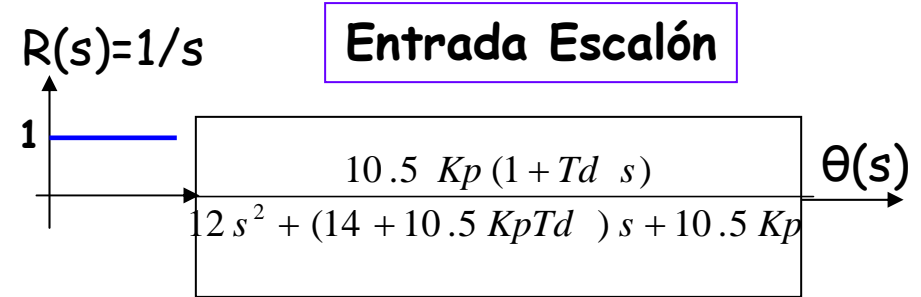
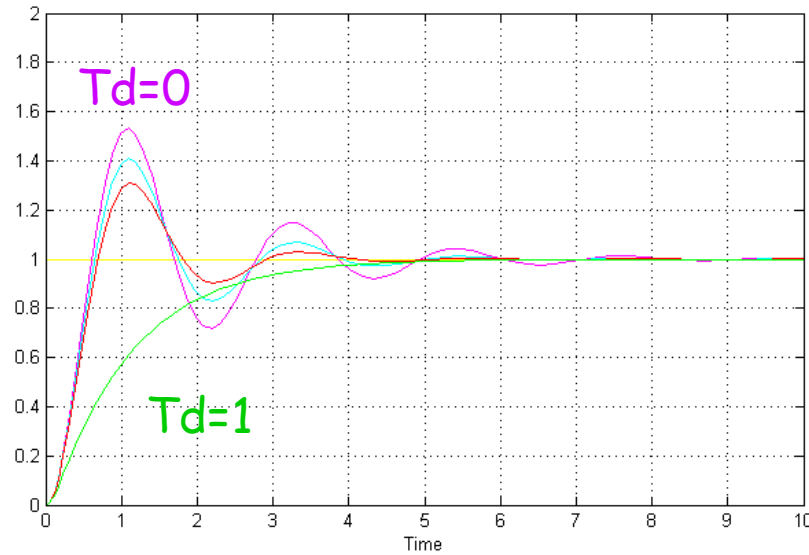
$K_p=5$



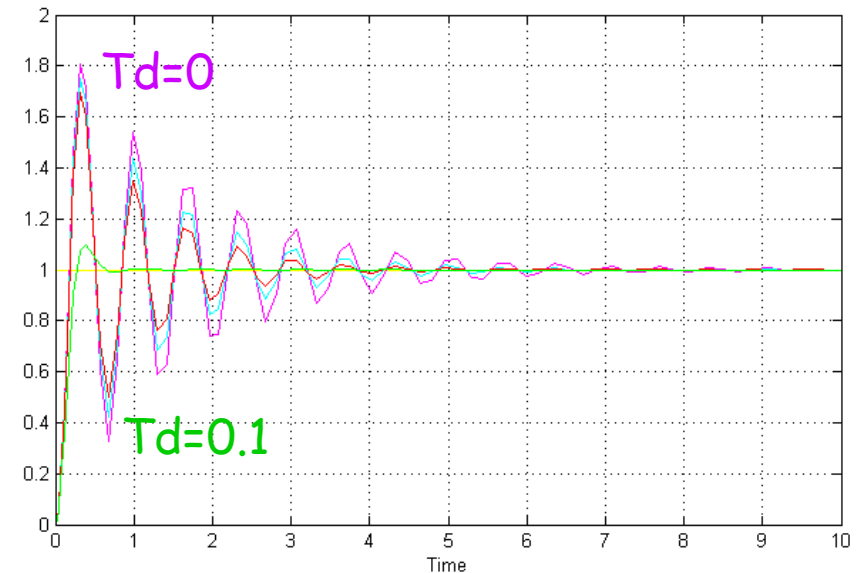
CONTROL PROPORCIONAL-DERIVATIVO (PD)



$K_p=10$

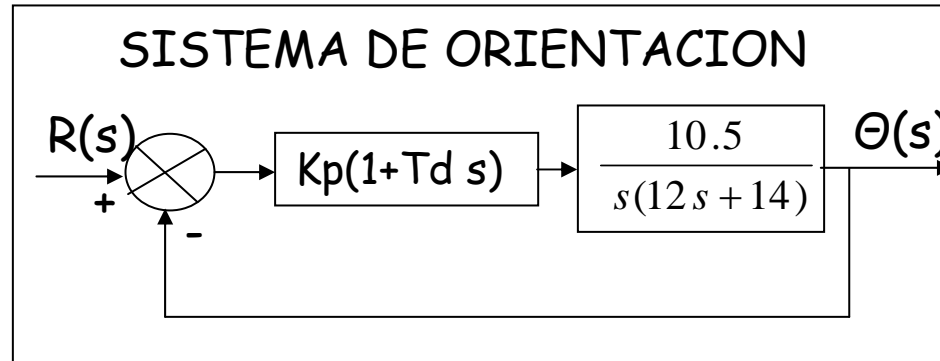
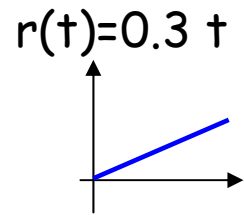


$K_p=100$



EJERCICIO 3

CONTROL PROPORCIONAL-DERIVATIVO (PD)

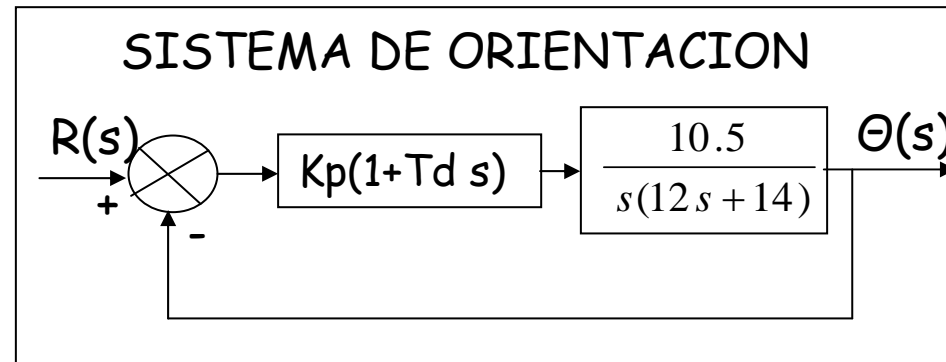
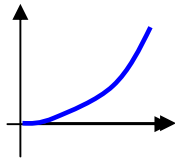


- 1) Calcular el error de seguimiento (e_{ss}) en función de K_p y de k_d si la velocidad del satélite es de $w(t) = 0.3$ rad/s. ¿Que conclusiones obtienes?
- 2) Si suponemos que el ancho de banda proveniente del satélite, para que la antena no pierda señal, es de 0.1 rad y admitimos que el error máximo de seguimiento sea del 10% , calcular el valor mínimo que tiene que tener los coeficientes del PD
- 3) Representar gráficamente para $K_p = 1$ y para el valor hallado en el apartado 2, el ángulo de posición, el error, el par motor, velocidad de la antena, la aceleración y las fuerzas de rozamiento. Comparar con el ejercicio 1
- 4) Dibujar el lugar de las raíces del sistema, considerando como parámetro variable la cte del motor ($K_m = 10.5$). Comparar con el ejercicio 1

EJERCICIO 4

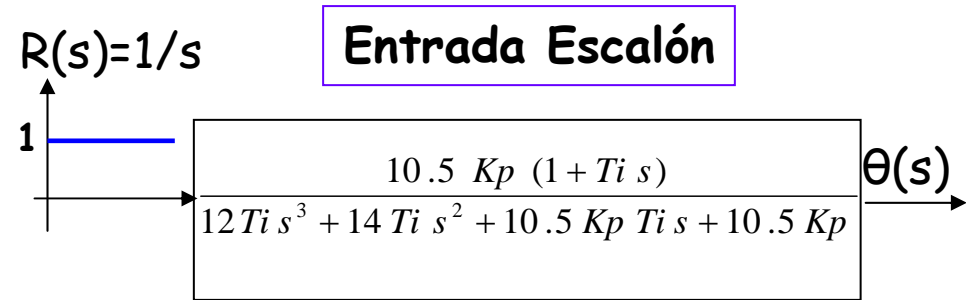
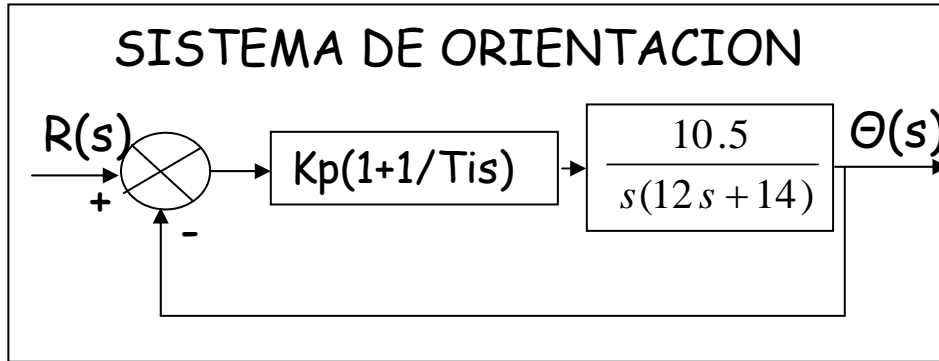
CONTROL PROPORCIONAL-DERIVATIVO (PD)

$$r(t) = 0.1 t^2$$

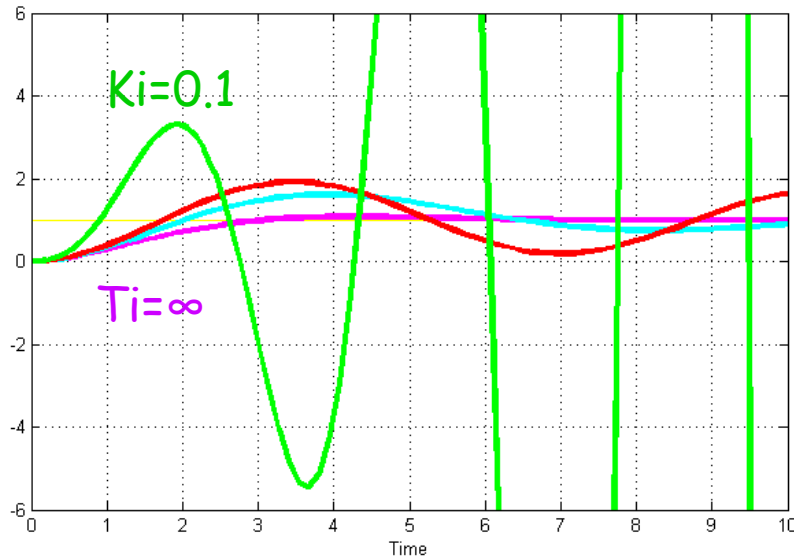


- 1) Calcular el error de seguimiento (e_{ss}) en función de K_p y de k_d si la aceleración del satélite es de $\alpha(t) = 0.1 \text{ rad/s}^2$. ¿Que conclusiones obtienes?
- 2) Si suponemos que el ancho de banda proveniente del satélite, para que la antena no pierda señal, es de 0.1 rad y admitimos que el error máximo de seguimiento sea del 10%, calcular el valor mínimo que tiene que tener los coeficientes del PD
- 3) Representar gráficamente para ($K_p=1, T_d=5$) y ($k_p=5, T_d=2$) los errores así como la posición del antena en cada caso. Comparar con el ejercicio 2

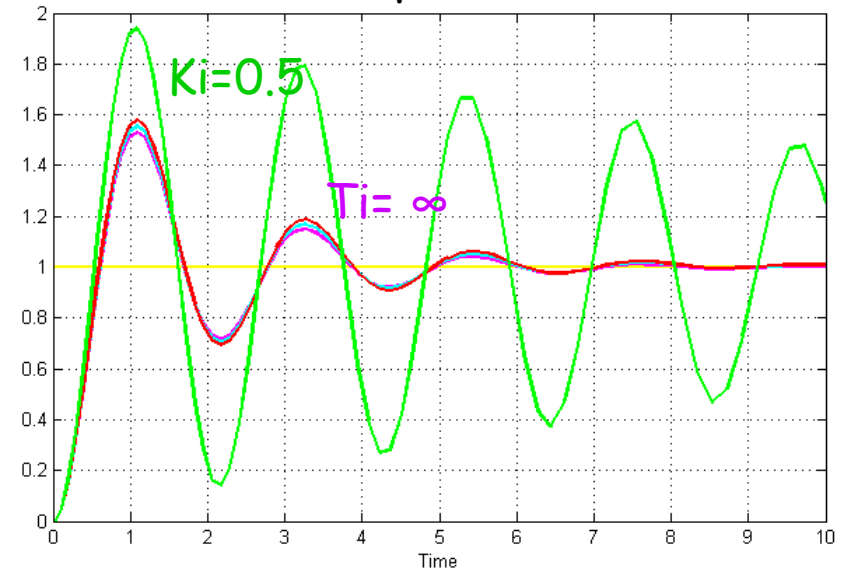
CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL (PI)



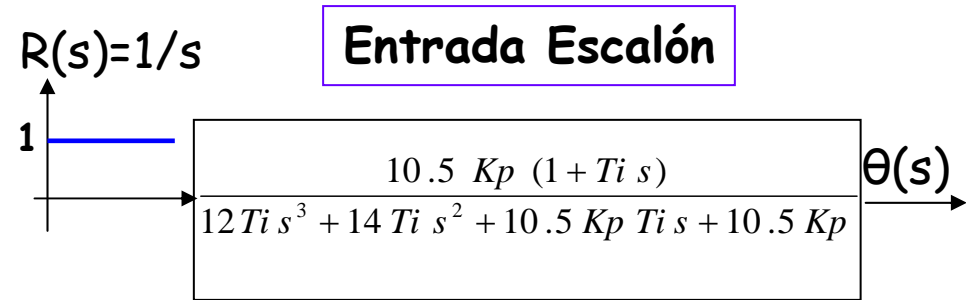
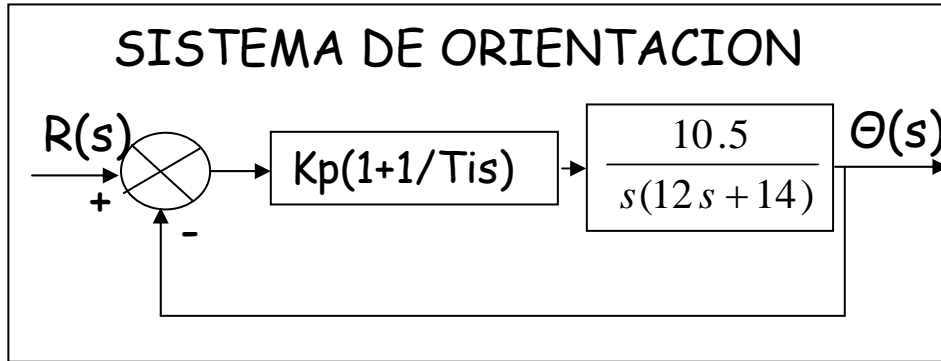
$K_p=1$



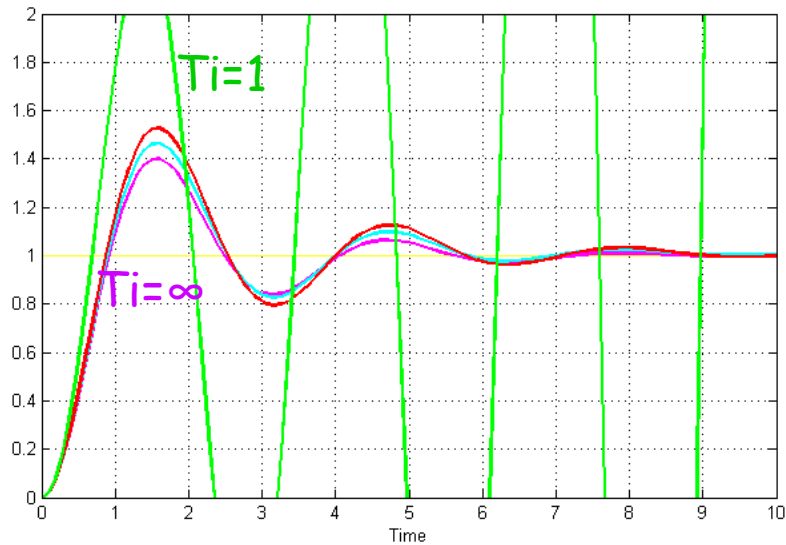
$K_p=5$



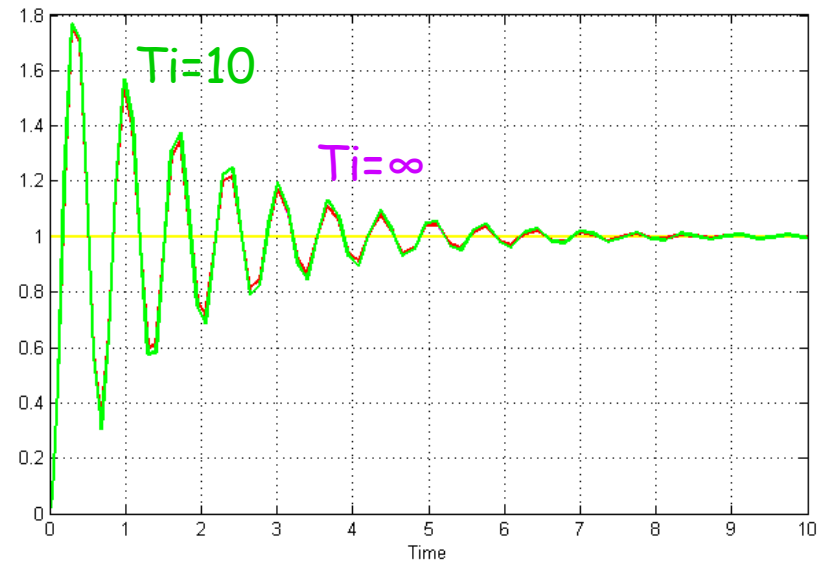
CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL (PI)



$K_p = 10$

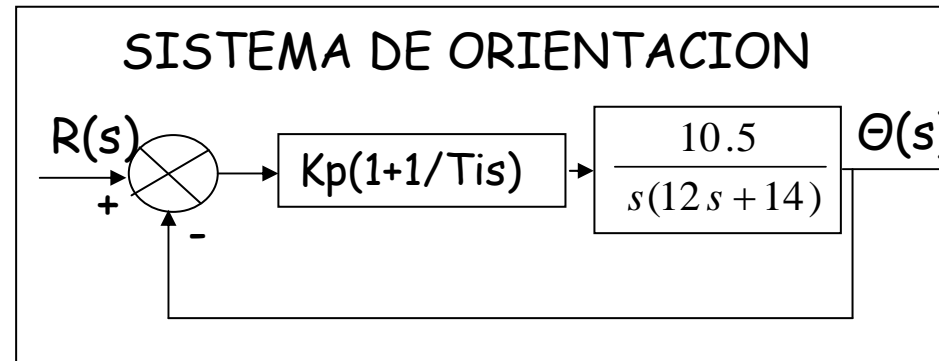
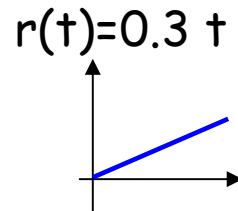


$K_p = 100$



EJERCICIO 5

CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL (PI)

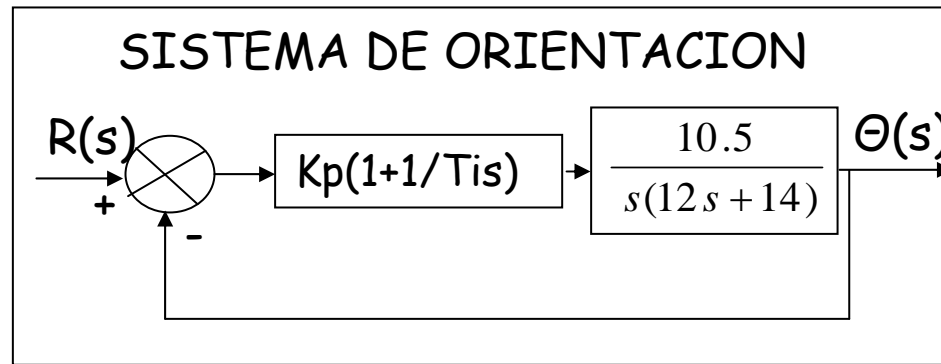
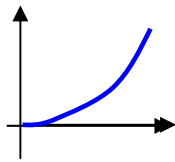


- 1) Calcular el error de seguimiento (e_{ss}) en función de K_p y de k_i si la velocidad del satélite es de $w(t) = 0.3 \text{ rad/s}$. ¿Que conclusiones obtienes?
- 2) Si suponemos que el ancho de banda proveniente del satélite, para que la antena no pierda señal, es de 0.1 rad y admitimos que el error máximo de seguimiento sea del 10%, calcular el valor mínimo que tiene que tener los coeficientes del PI
- 3) Representar gráficamente para $(K_p=1, T_i=1)$ y $(k_p=40, T_i=40)$ los errores de seguimiento en cada caso. Comparar con los ejercicios 1 y 3
- 4) Dibujar el lugar de las raíces del sistema, considerando como parámetro variable la cte del motor ($K_m=10.5$) para los dos casos. Comparar con los ejercicios 1 y 3

EJERCICIO 6

CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL (PI)

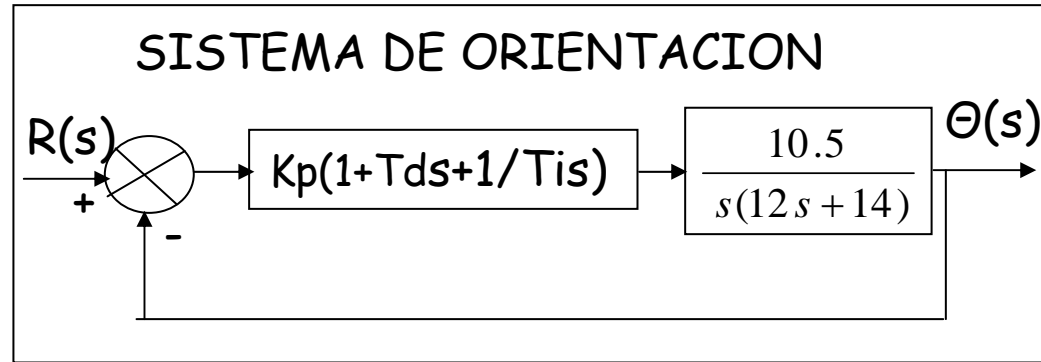
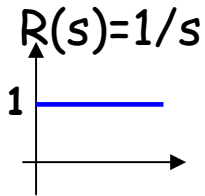
$$r(t) = 0.1 t^2$$



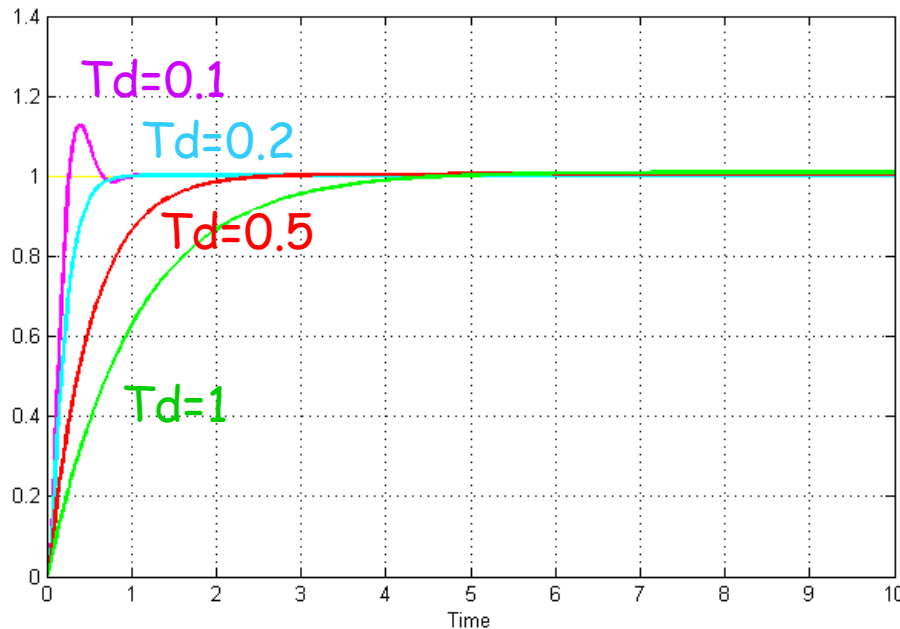
- 1) Calcular el error de seguimiento (e_{ss}) en función de K_p y de k_i si la aceleración del satélite es de $\alpha(t) = 0.1 \text{ rad/s}^2$. ¿Que conclusiones obtienes?
- 2) Si suponemos que el ancho de banda proveniente del satélite, para que la antena no pierda señal, es de 0.1 rad y admitimos que el error máximo de seguimiento sea del 10%, calcular el valor mínimo que tiene que tener los coeficientes del PI
- 3) Representar gráficamente para $(K_p=1, T_i=1)$ ($k_p=40, T_i=40$) los errores de seguimiento en cada caso. Lo mismo para $(k_p=1, T_i=0.1)$ y $(k_p=40, T_i=4)$.
- 4) Dibujar los 4 lugares de las raíces. ¿Que conclusiones obtienes?

CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO (PID)

Entrada escalón



$K_p=100, T_i=100$



Conclusiones:

- *Reúne las ventajas y desventajas de los controladores por separado.
- *El valor de cada una de las constantes determina que acción es la dominante.

- *Elimina los errores en regimen permanente
- *Ajuste de parámetros del PID



Métodos de Ziegler-Nichols

Las **técnicas de sintonización de Ziegler-Nichols** que fueron presentadas en 1942 constituyen uno de los métodos más ampliamente conocidos y utilizados para la sintonización de parámetros PID. Estas técnicas produjeron un fuerte impacto en el diseño de controladores realimentados PID ya que proporcionan una forma práctica y sistemática de sintonizar PID para mejorar su funcionamiento. Estos métodos permiten obtener los parámetros del controlador a partir de ciertos parámetros de la dinámica del proceso y su uso está ampliamente extendido en el ámbito industrial.

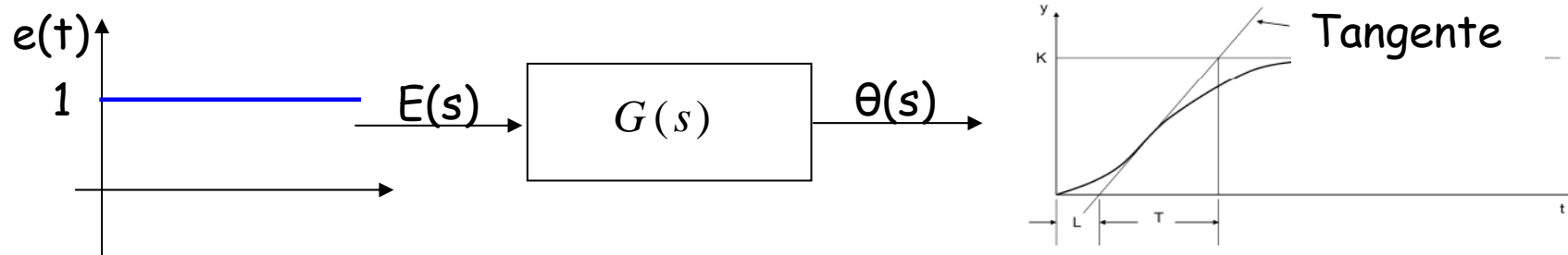
Se distinguen dos técnicas de sintonización de Ziegler-Nichols:

- 1) Método de Ziegler-Nichols I (lazo abierto)
- 2) Método de Ziegler-Nichols II (lazo cerrado)

Métodos empíricos de ajuste de PID

Método de Ziegler-Nichols I (lazo abierto)

La **primera regla de sintonización de Ziegler-Nichols** se basa en el análisis de la respuesta del sistema en lazo abierto ante una entrada escalón. Esta técnica se utiliza cuando el modelo del sistema se puede aproximar por una función de transferencia de primer orden con un retardo. Para que se pueda aplicar este método, la respuesta del sistema ante una entrada escalón debe tener forma de **S sin rebose** como la que se observa en la figura:



Sistema de 1^{er} orden

$$G(s) \approx K \frac{e^{-Ls}}{Ts + 1}$$

$$G_c(s) = Kp(1 + Td s + 1/Tis)$$

Parámetros del PID:

Control	kp	Ti	Td
P	T/L	∞	0
PI	0.9T/L	L/0.3	0
PID	1.2T/L	2L	0.5L

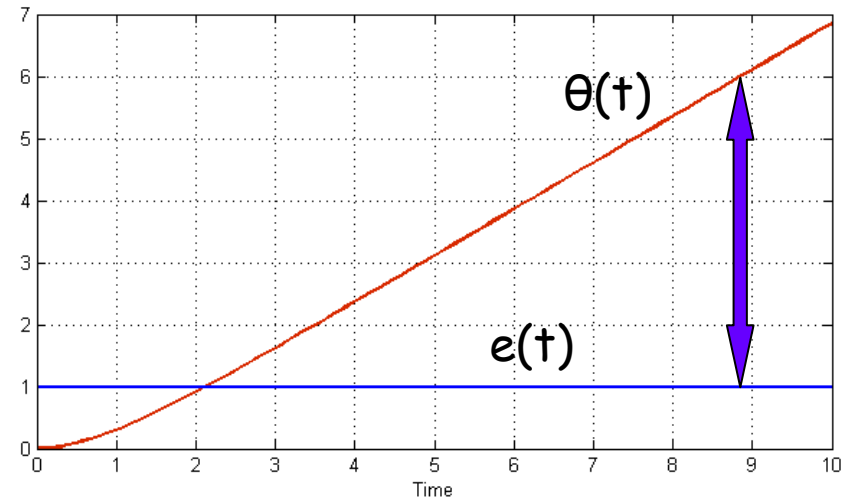
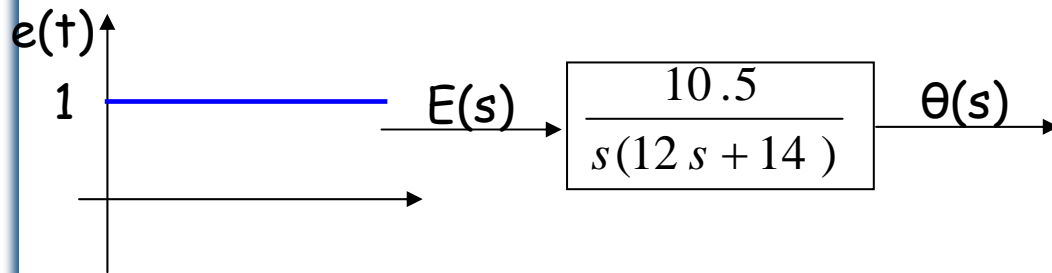
Métodos empíricos de ajuste de PID

Método de Ziegler-Nichols I (lazo abierto)

SISTEMA DE ORIENTACION

Entrada Escalón

$$E(s) = 1/s$$



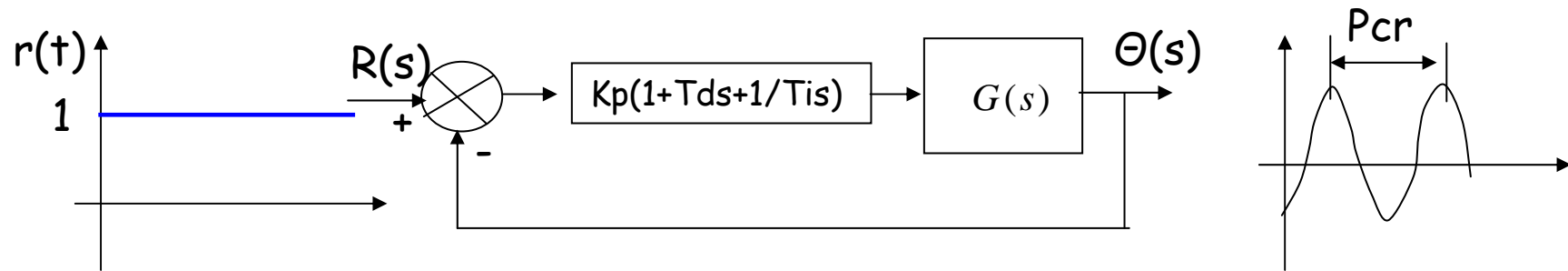
No se puede aplicar el primer método de Ziegler-Nichols debido a que la respuesta del sistema no tiende a un valor sino que aumenta progresivamente, como se puede observar en la figura.

Métodos empíricos de ajuste de PIDs

Método de Ziegler-Nichols II (lazo cerrado)

La **segunda regla de sintonización de Ziegler-Nichols** se basa en el análisis del sistema en lazo cerrado. Para aplicar esta técnica se utiliza un controlador puramente proporcional, es decir, las acciones integral y derivativa se anulan poniendo $T_i = \infty$ y $T_d = 0$.

Se aumenta lentamente el valor de la ganancia mediante un proceso iterativo hasta que el sistema empieza a reflejar oscilaciones mantenidas ante un cambio del escalón en el valor deseado como se muestra en la figura.



En este caso, los parámetros del sistema que se miden son dos:

- La ganancia crítica K_{cr} , que es la ganancia mínima para la que se consiguen esas oscilaciones.
- El periodo crítico P_{cr} , que corresponde al periodo de dichas oscilaciones.

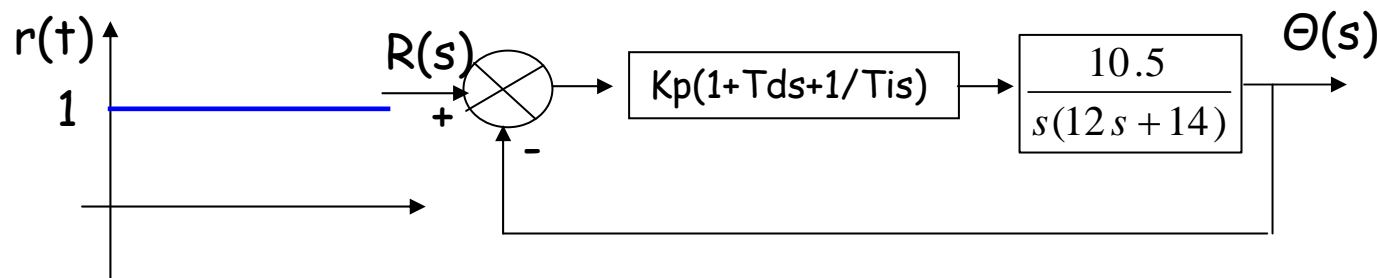
Método de Ziegler-Nichols II (lazo cerrado)

Las ecuaciones que permiten obtener los parámetros del PID mediante este método, se muestran en la siguiente tabla

Control	k_p	T_i	T_d
P	$0.5 K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45 K_{cr}$	$P_{cr}/1.2$	0
PID	$0.6 K_{cr}$	$0.5 P_{cr}$	$0.125 P_{cr}$

CUESTION 1

- 1) Analizar el lugar de las raíces del sistema (ver tema 5).
- 2) Utilizando el II método de Ziegler-Nichols ajustar los parámetros del PID, para el sistema de orientación. ¿es posible utilizar este método?



Métodos empíricos de ajuste de PID

Método de Harriot (1964) -lazo cerrado-

a) Se conecta el sistema en lazo cerrado, actuando únicamente el controlador proporcional K_p ($T_d=0$, $T_i=\infty$)

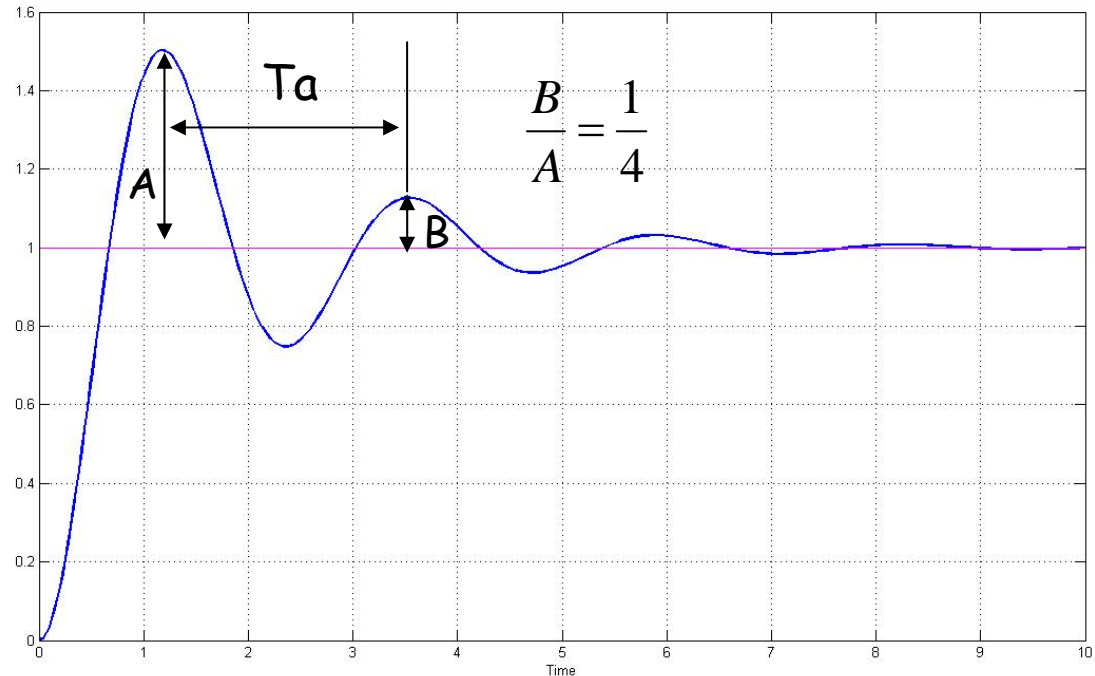
b) Aplicar una entrada escalón y ajustar la ganancia proporcional hasta conseguir la razón de amortiguamiento $1/4$

c) Tomar ese valor de K_p y medir el periodo de oscilación amortiguada T_a .

d) Calcular los parámetros derivativo e integral de la siguiente forma:

$$T_i = \frac{T_a}{6} \quad T_d = \frac{2 T_a}{3}$$

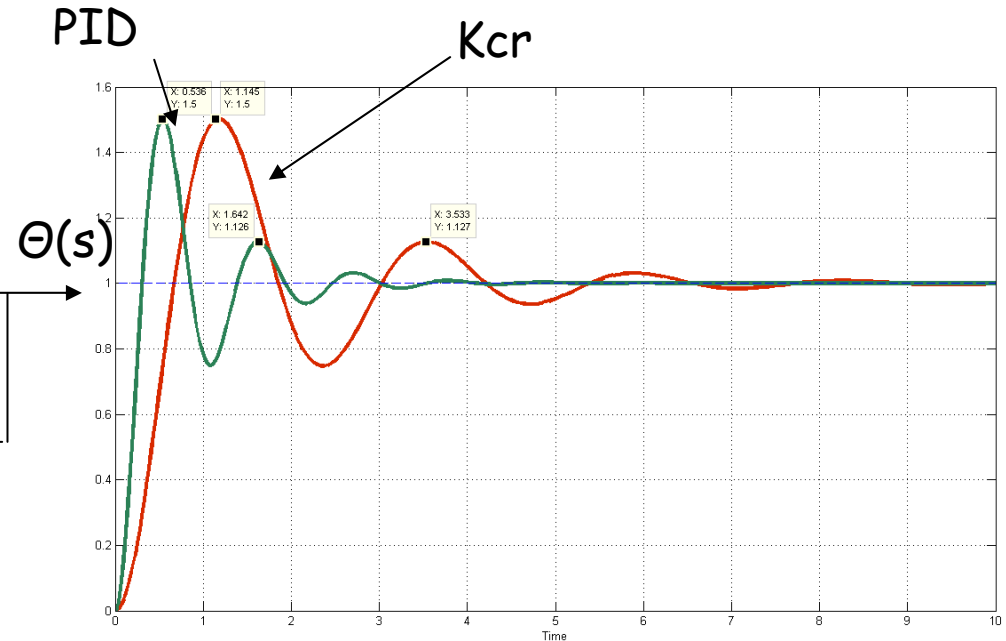
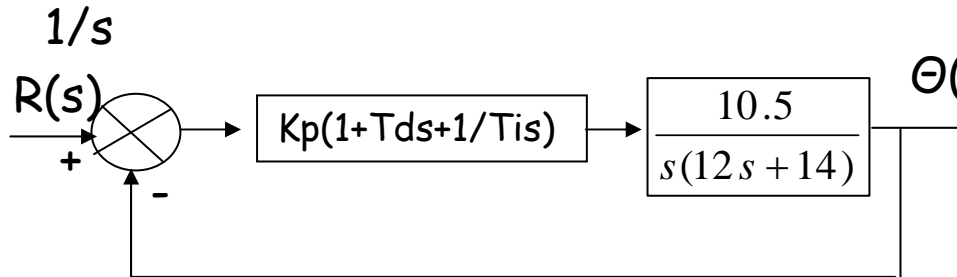
e) Finalmente la acción proporcional se ajusta (sin modificar las otras) hasta conseguir la razón de amortiguamiento $1/4$



Métodos empíricos de ajuste de PID

Método de Harriot -lazo cerrado-

SISTEMA DE ORIENTACION



CUESTION 2

- Utilizando el método de Harriot ajustar los parámetros del PID, para el sistema de orientación. Representar la respuesta del sistema para los distintos valores de los parámetros empleados.
- ¿Como seria la respuesta si la antena tuviera que seguir a un satélite que se desplaza a una velocidad de 1 rad/s ?. Representar para los dos casos (Kcr y PID)



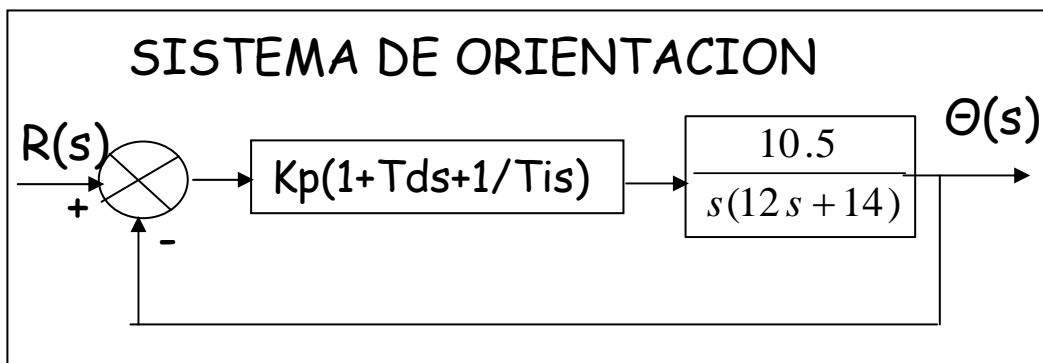
Método prueba y error (lazo cerrado)

- ❑ Se ajustan inicialmente los parámetros del PID de forma que la acción proporcional sea pequeña ($K=1$), la acción integral mínima ($T_i=\infty$) y la acción derivativa mínima ($K_d=0$)
- ❑ Se aumenta la acción proporcional hasta que aparezcan tres picos en la respuesta del sistema.
- ❑ Se aumenta la acción integral hasta anular el error en régimen permanente
- ❑ Se aumenta la acción derivativa, pudiendo suceder dos cosas:
 - a) Si la respuesta empeora se quita la acción derivativa, quedando únicamente el controlador PI.
 - b) Si la respuesta mejora (tiende a no oscilar), permitirá aumentar la ganancia proporcional y aumentar la acción integral

Método de ajuste de PID

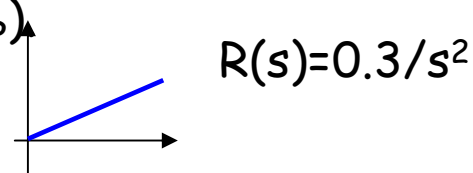
EJERCICIO 7

CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO (PID)

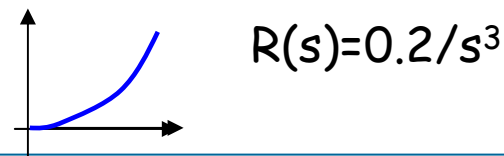


Ajustar los parámetros del PID, representando gráficamente el ángulo de posición de la antena para los siguientes dos casos y analizar los resultados en cuanto a estabilidad y error de seguimiento (Suponemos que el ancho de banda proveniente del satélite, para que la antena no pierda señal, es de 0.1 rad y admitimos que el error máximo de seguimiento sea del 10%).

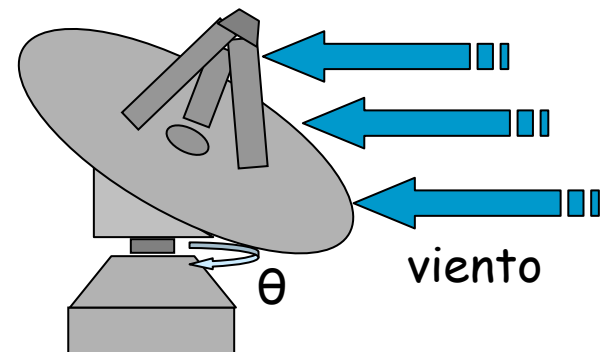
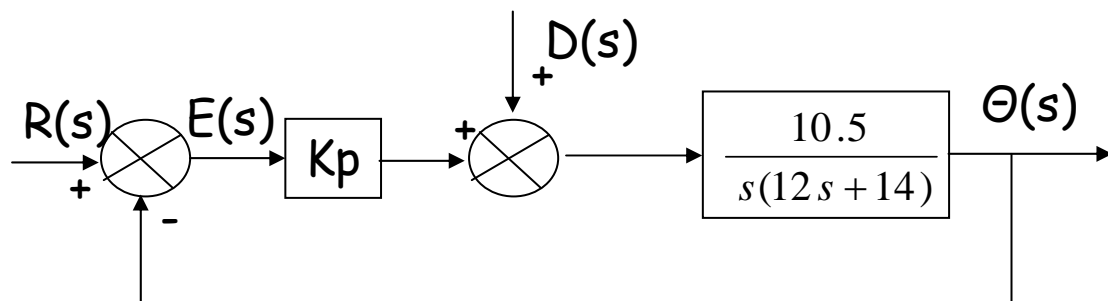
1) La velocidad de giro de la antena sea de $\omega = 0.3$ rad/s



2) La aceleración de la antena sea de $\alpha = 0.1$ rad/s²



El viento es la principal perturbación en los sistemas de orientación y seguimiento de antenas/telescopios. Una manera de representar el efecto del viento, es considerarlo como un fuerza externa ($D(s)$) dentro del diagrama de bloques, de la siguiente manera:

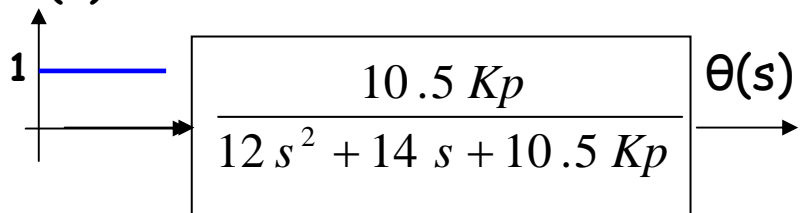


El diagrama de bloques se divide en dos: por un lado se calcula el sistema en lazo cerrado ($G_{lc} = \Theta(s) / R(s)$) considerando $D(s)=0$ y por otro se calcula la F.T ($G_d(s) = \Theta(s) / D(s)$) teniendo en cuenta la perturbación y considerando $R(s)$. Finalmente se suman los dos efectos

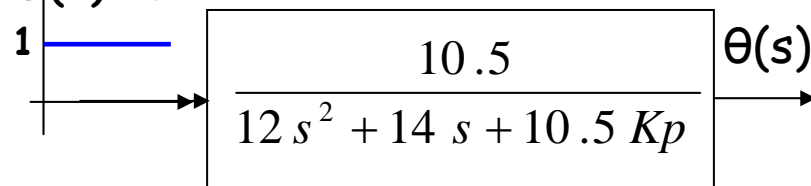
$$G_d(s) = \Theta(s) / R(s) \quad \text{-- } D(s)=0 \text{--}$$

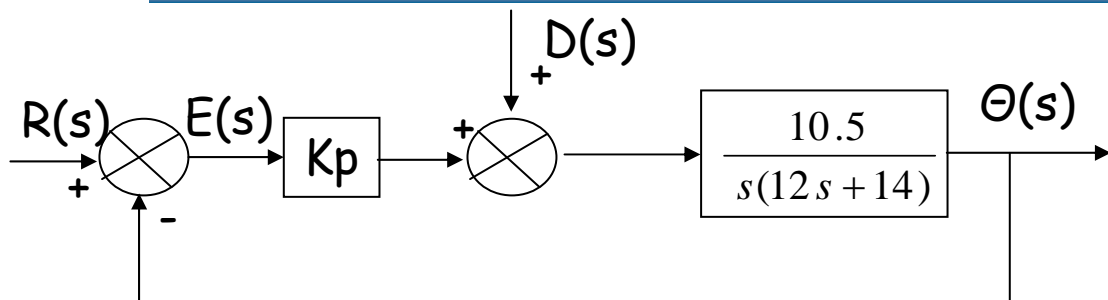
$$G_d(s) = \Theta(s) / D(s) \quad \text{-- } R(s)=0 \text{--}$$

$$R(s) = 1/s$$

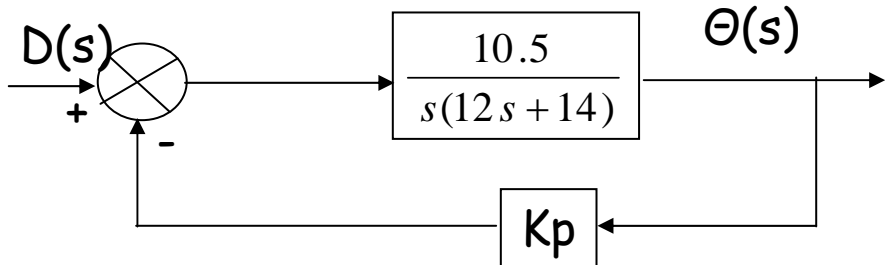
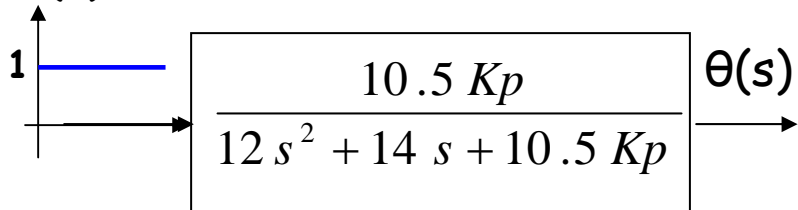


$$D(s) = 1/s$$

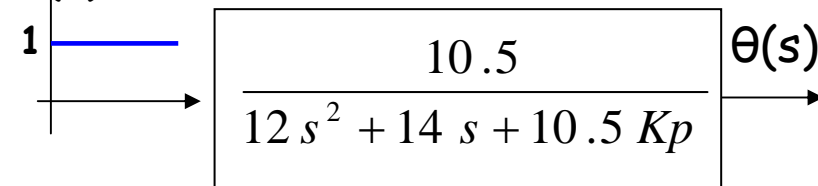




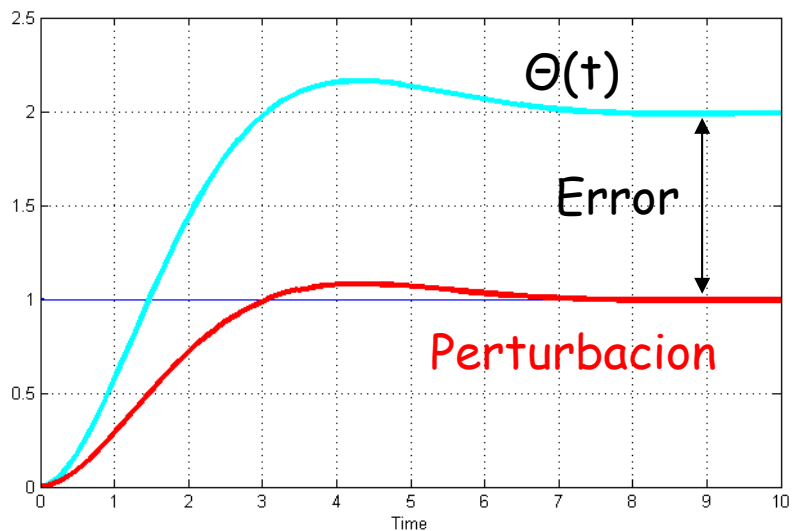
$$R(s) = 1/s$$



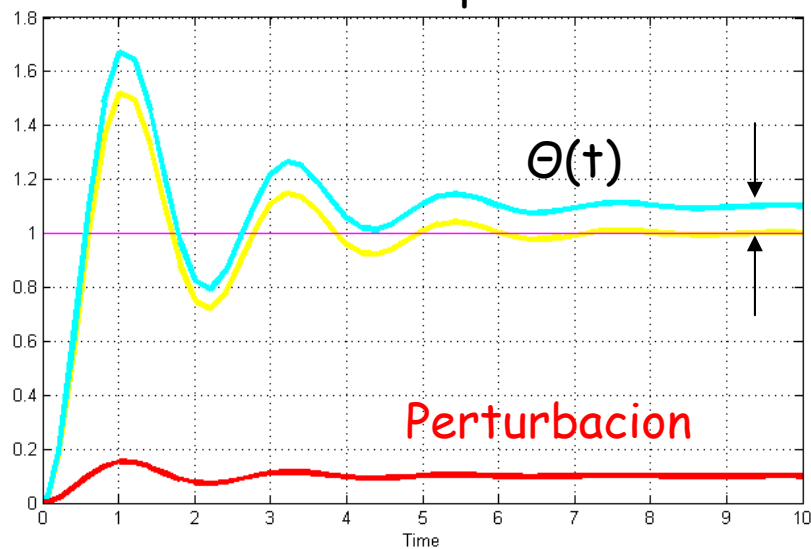
$$D(s) = 1/s$$

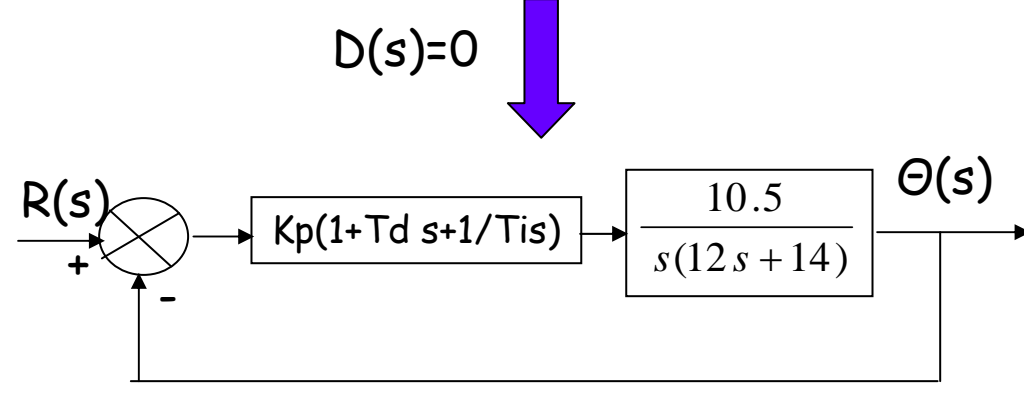
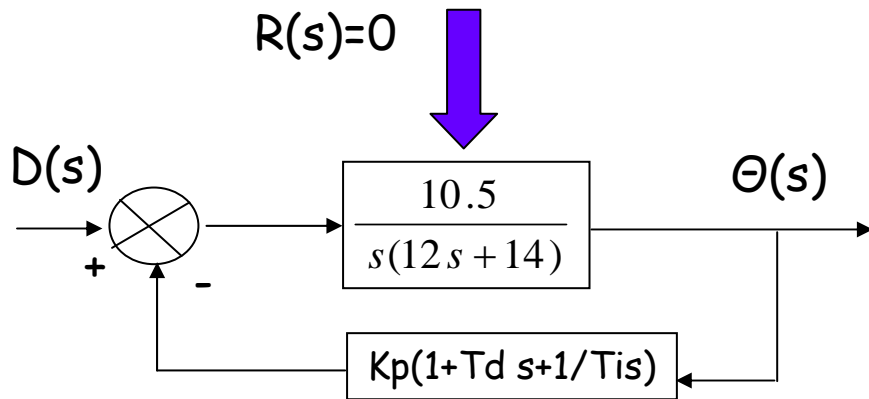
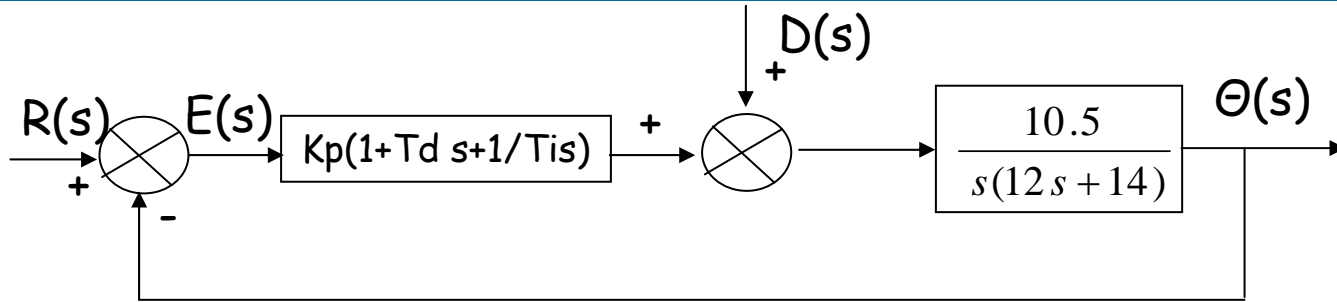


$K_p = 1$



$K_p = 10$





$$\frac{10.5 T_i s}{12 T_i s^3 + T_i(14 + 10.5 K_p T_d) s^2 + 10.5 T_i K_p s + 10.5 K_p}$$

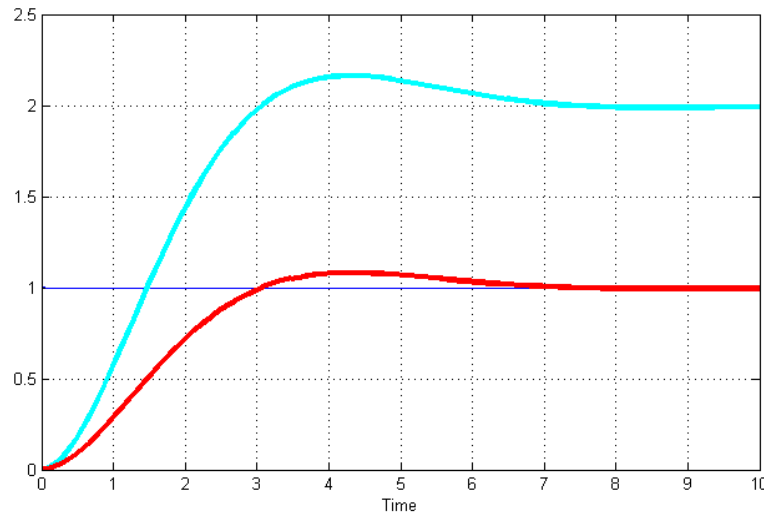
$$\frac{10.5 K_p (T_d T_i s^2 + T_i s + 1)}{12 T_i s^3 + (14 T_i + 10.5 K_p T_d T_i) s^2 + 10.5 K_p T_i s + 10.5 K_p}$$

Si existe control PI ($T_i \neq \infty$), ante la perturbación $d(t)$ el sistema reacciona anulando su efecto (valor final 0). En cambio, sigue perfectamente la referencia $r(t)$ marcada con valor final 1.

Ajuste parámetros PID: Método prueba y error

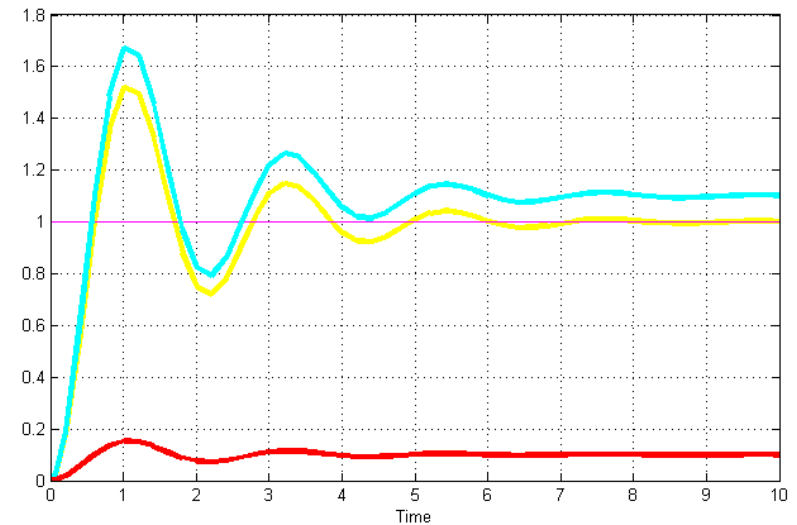
1) Se ajustan inicialmente los parámetros del PID de forma que la acción proporcional sea pequeña, la acción integral mínima y al derivativa mínima.

$$K_p=1, T_d=0, T_i=\infty$$



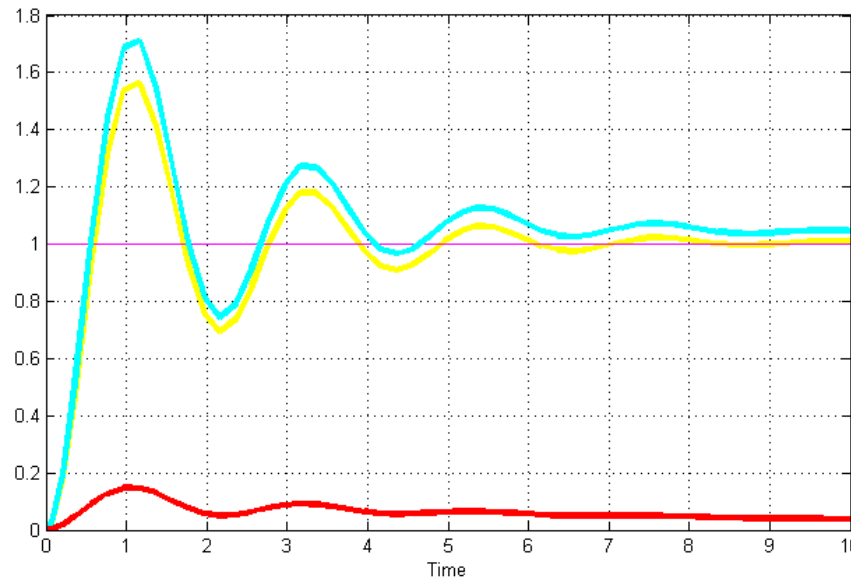
2) Se aumenta la acción proporcional hasta que aparezcan tres picos en la respuesta del sistema

$$K_p=10, T_d=0, T_i=\infty$$

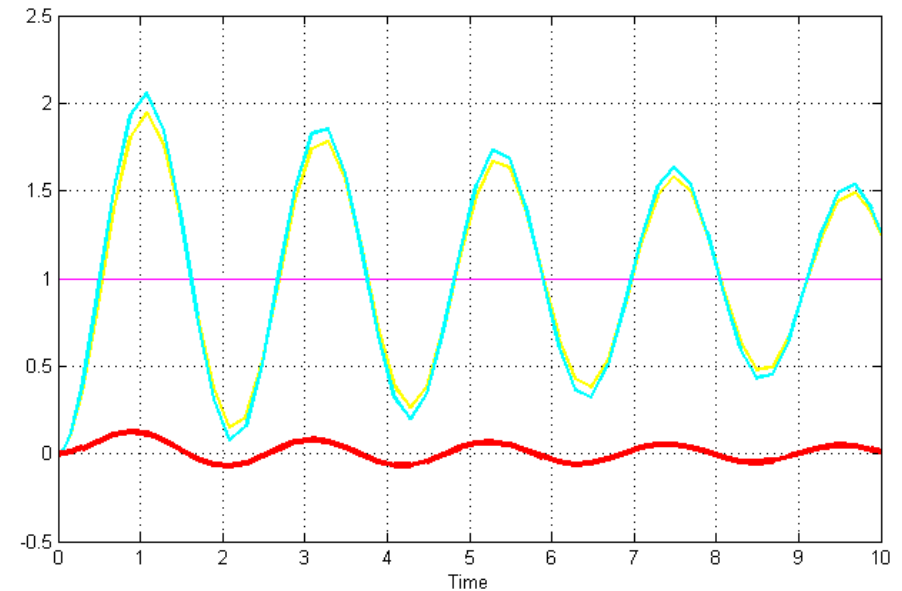


3) Se aumenta la acción integral (disminuir T_i) hasta anular el error en régimen permanente

$K_p=10, T_d=0, T_i=10$



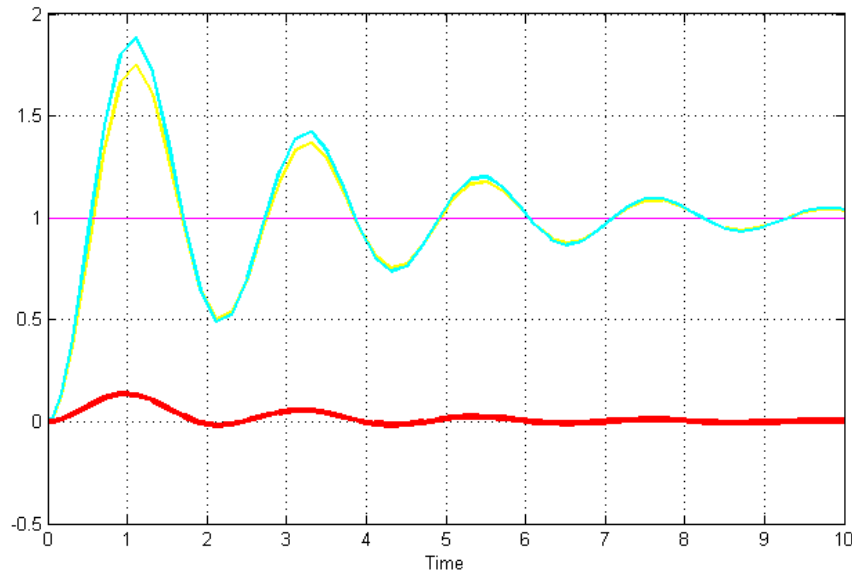
$K_p=10, T_d=0, T_i=1$



Al disminuir T_i , la posición angular de la antena sufre oscilaciones.

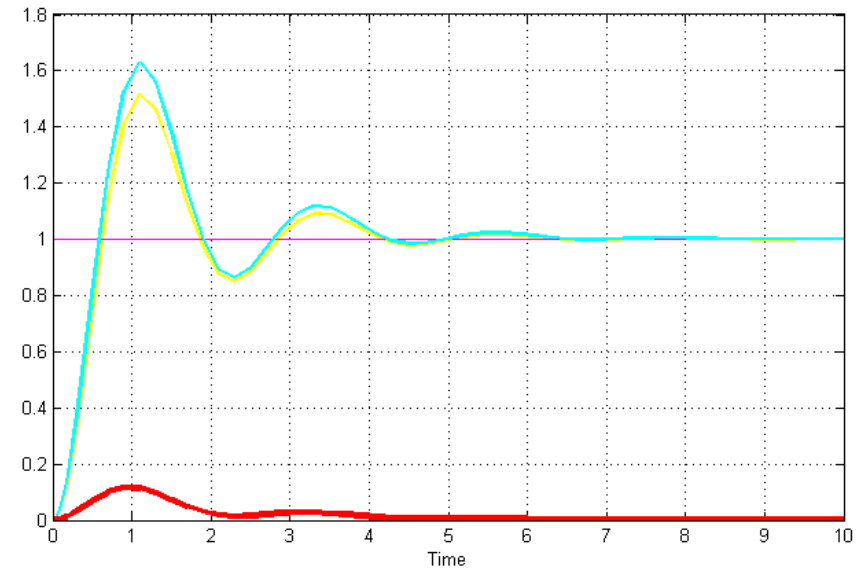
3) Disminuimos la acción integral (aumentar T_i) hasta evitar las oscilaciones

$K_p=10, T_d=0, T_i=2$



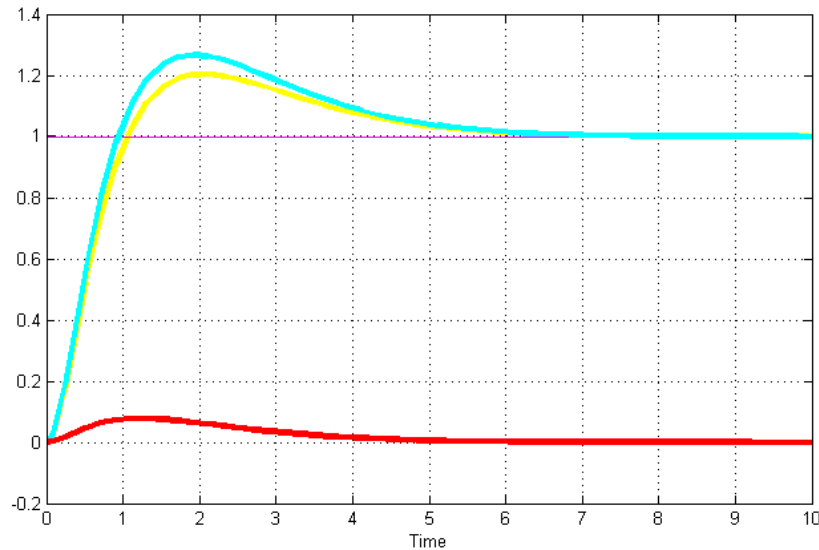
4) Se aumenta la acción derivativa

$K_p=10, T_d=0.1, T_i=2$



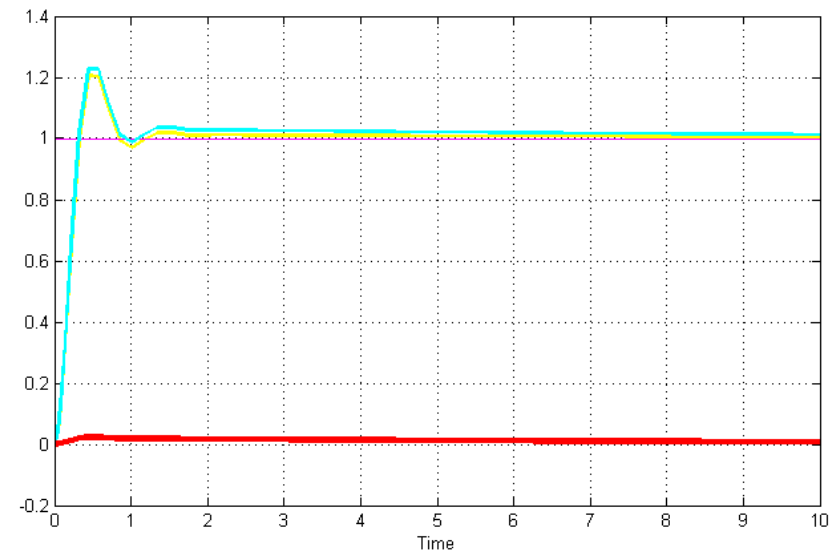
4) Se aumenta la acción derivativa

$K_p=10, T_d=0.5, T_i=2$



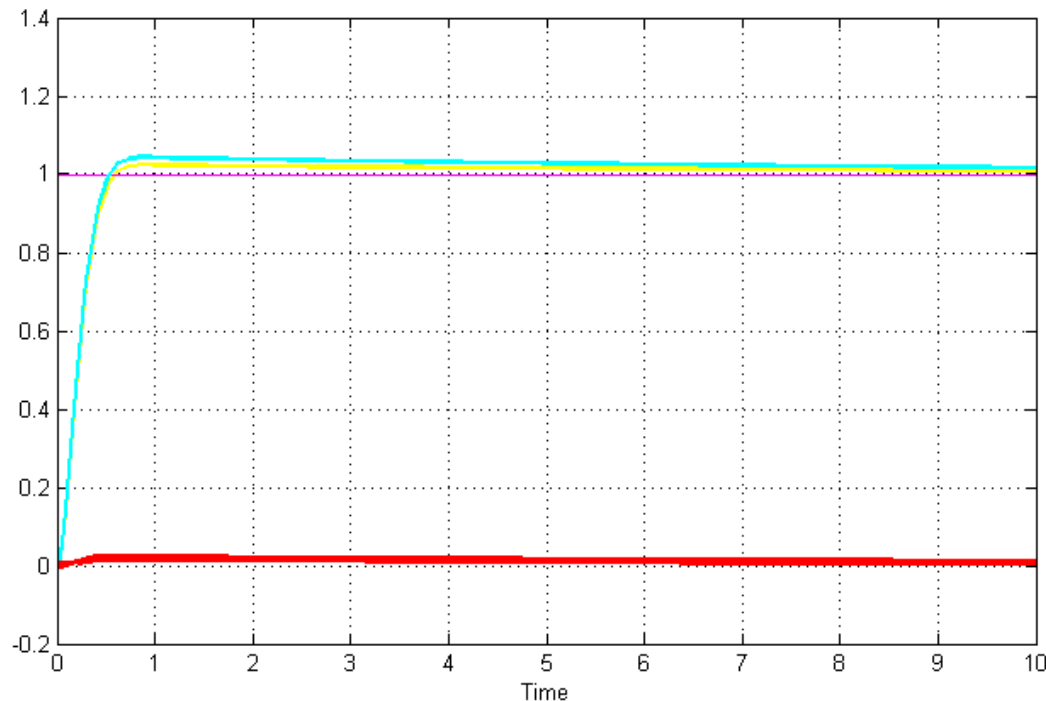
5) Se aumentan tanto la acción proporcional como la derivativa

$K_p=50, T_d=10, T_i=10$



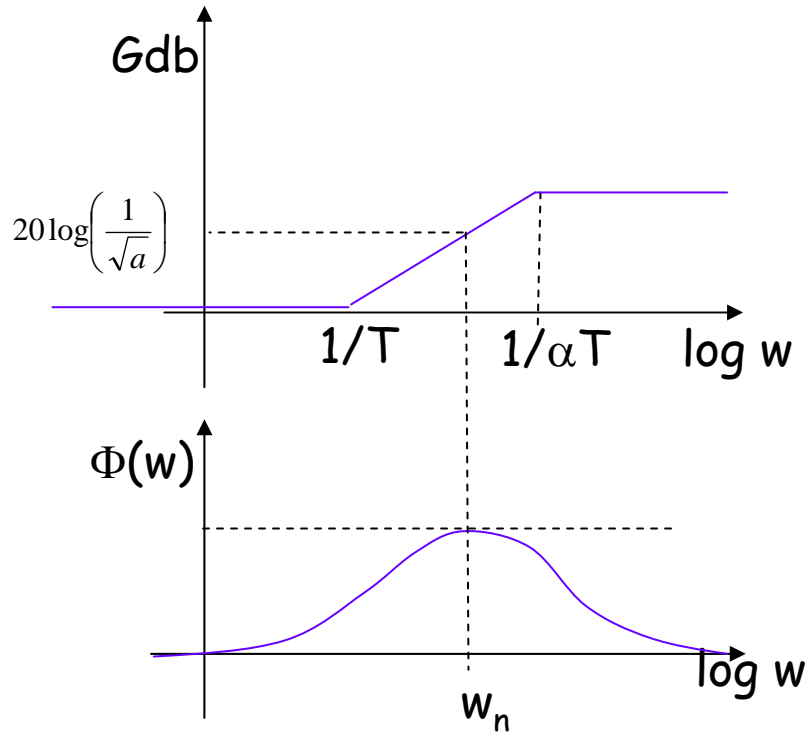
5) Aumentamos aun mas la acción derivativa

$$K_p=50, T_d=0.2, T_i=10$$



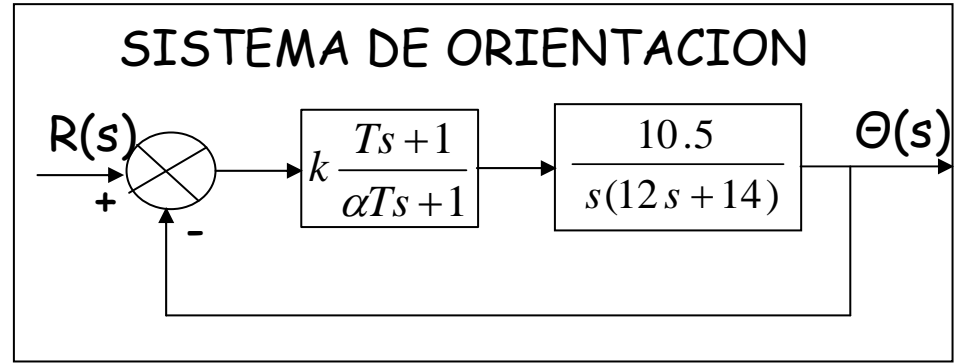
Eliminamos el error de seguimiento debido a la perturbación provocada por el viento y mejoramos el rebose o la sobre oscilación.

COMPENSACION EN ADELANTO



$$G_c(s) = k \frac{T s + 1}{\alpha T s + 1}, \quad 0 < \alpha < 1$$

$$w_n = \frac{1}{\sqrt{\alpha} T} \quad \text{sen}(\phi_m) = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha}$$



Dado el sistema de orientación, diseñar un compensador de adelanto de fase de forma que el sistema en lazo cerrado satisfaga los siguientes requerimientos:

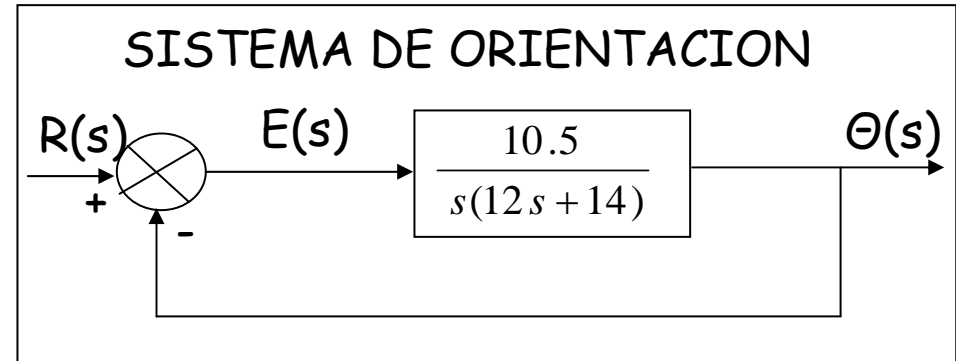
1. Constante de error estático de velocidad: $k_v = 20 \text{ s}^{-1}$
2. Margen de Fase: $M.F = 50^\circ$
3. Margen de Ganancia: $M.G \geq 10 \text{ dB}$

Se Pide:

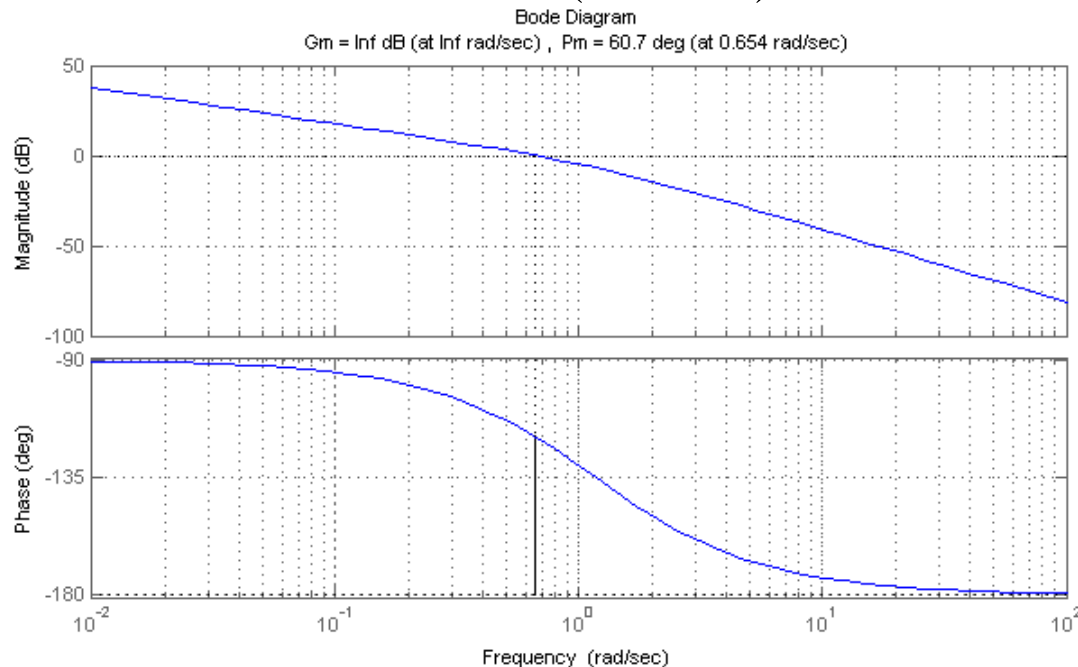
- a) Diseñar el compensador $G_c(s)$
- b) Comparar y comentar las respuestas frente a una entrada escalón unitario de los sistemas compensado y sin compensar. Representar dichas respuestas

a) Diseño del compensador

1) Comprobamos cual es el coeficiente de error de velocidad de seguimiento de la antena sin compensador, así como el Margen de Fase y de Ganancia:



$$k_v = \lim_{s \rightarrow 0} s G(s)H(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{10.5}{s(12s + 14)} = 0.75 < 20 \Rightarrow ess = \frac{1}{k_v} = 1.33 > \frac{1}{20} = 0.05$$



$$MF = 60.7 > 50^\circ \text{ (OK)}$$

$$MG = \infty \text{ (OK)}$$

Tenemos que reducir el error de seguimiento, para ello añadiremos inicialmente un control proporcional

2) Ajustamos la k para conseguir el error deseado

$$k_v = \lim_{s \rightarrow 0} s G_c(s)G(s)H(s) =$$

$$= \lim_{s \rightarrow 0} s k \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1} \frac{10.5}{s(12s + 14)} = 0.75k < 20$$

$$\Rightarrow k \leq 26.67$$

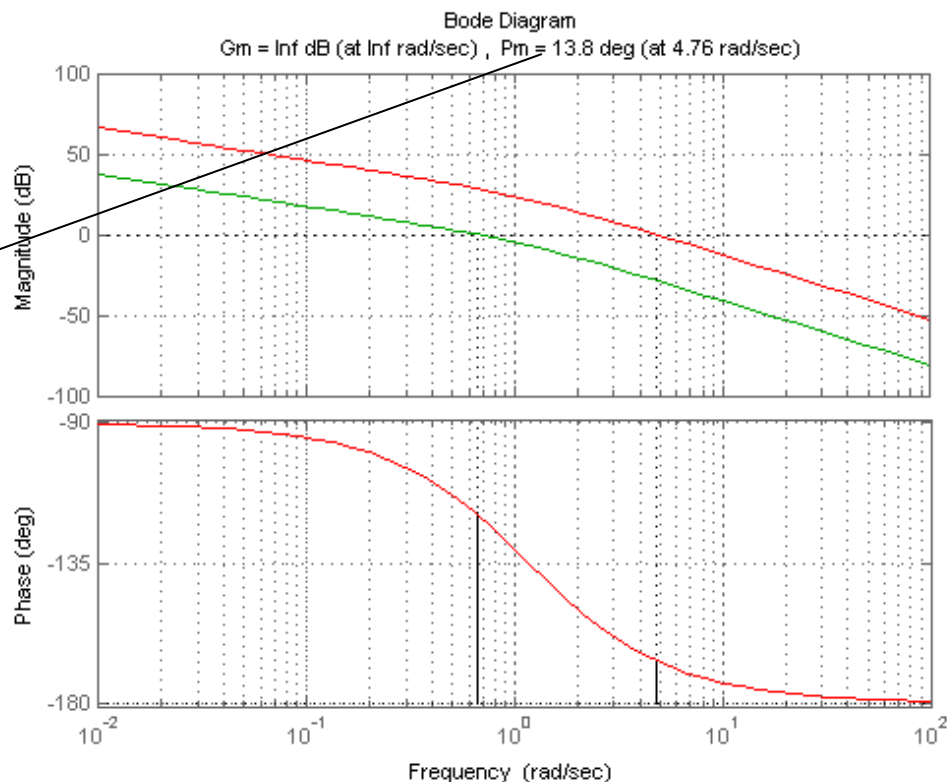
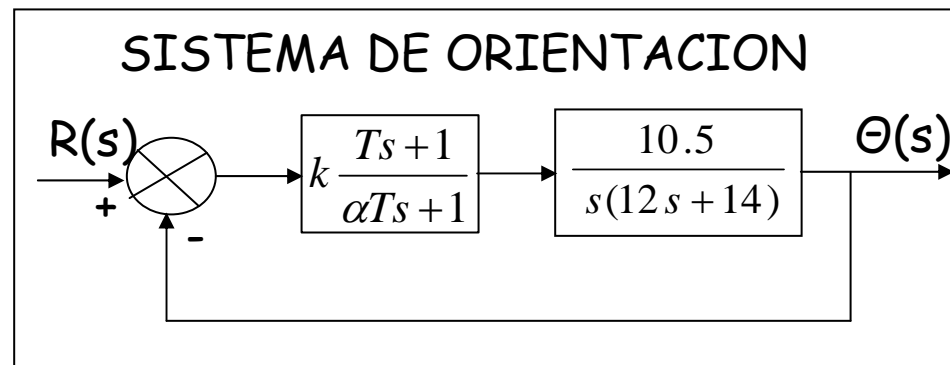
El sistema con el error corregido:

$$G_1(s) = k \frac{10.5}{s(12s + 14)} = \frac{280}{s(12s + 14)}$$

$MG = \infty$

$MF = 13.8 < 50^\circ$

Únicamente resta alcanzar el Margen de Fase requerido de 50° . Para ello, debemos calcular los valores de T y de α del compensador



3) Calculo el desfase máximo necesario:

$$\phi_m = 50 - 13.8 + 5 = 41.2 \Rightarrow$$

$$\text{sen}(41.2) = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \Rightarrow \alpha = 0.2$$

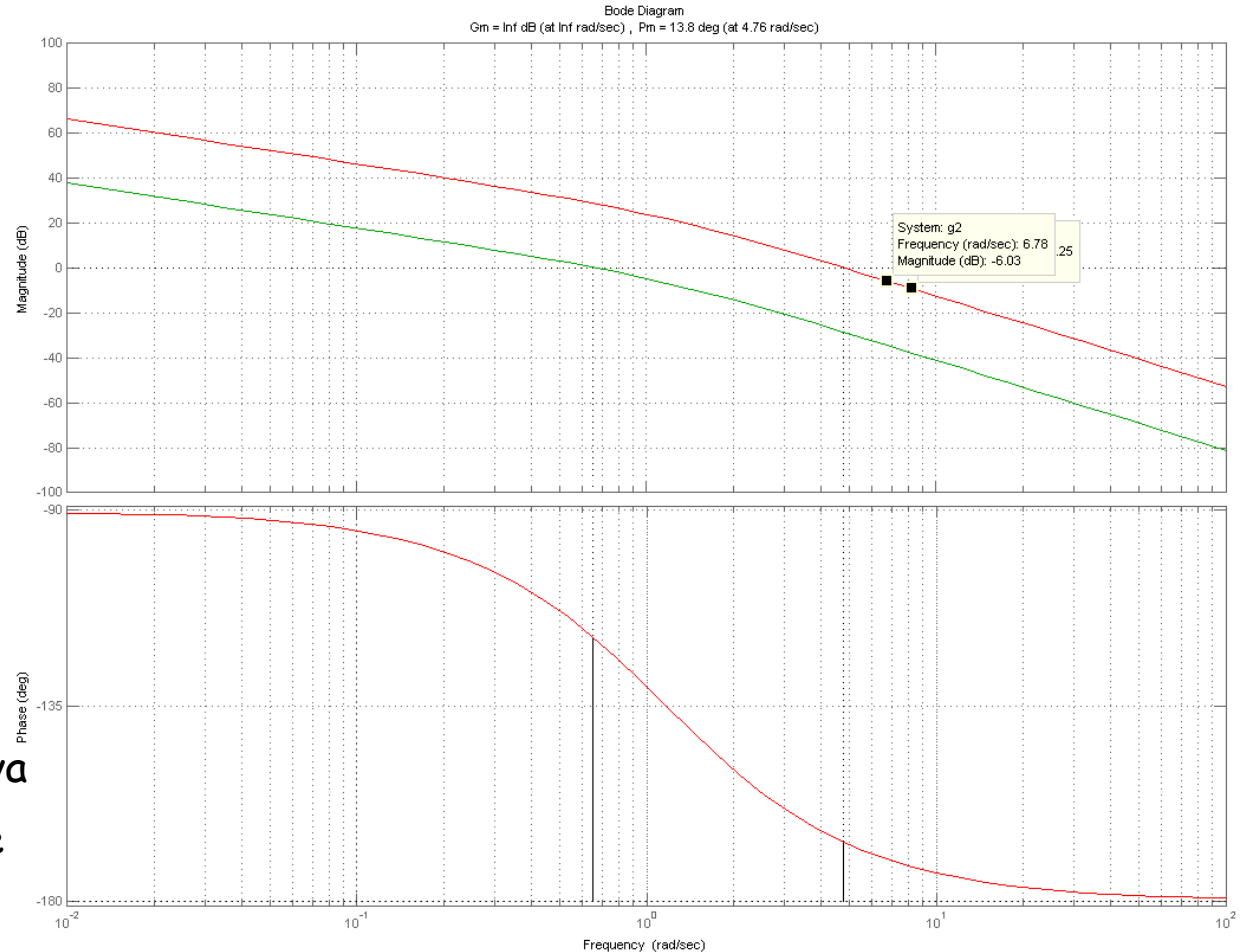
A partir de la curva de módulo del diagrama de Bode, establecer la frecuencia para la cual la magnitud del sistema no compensado vale

$$-20 \log\left(\frac{1}{\sqrt{\alpha}}\right) = -7 \text{ db}$$

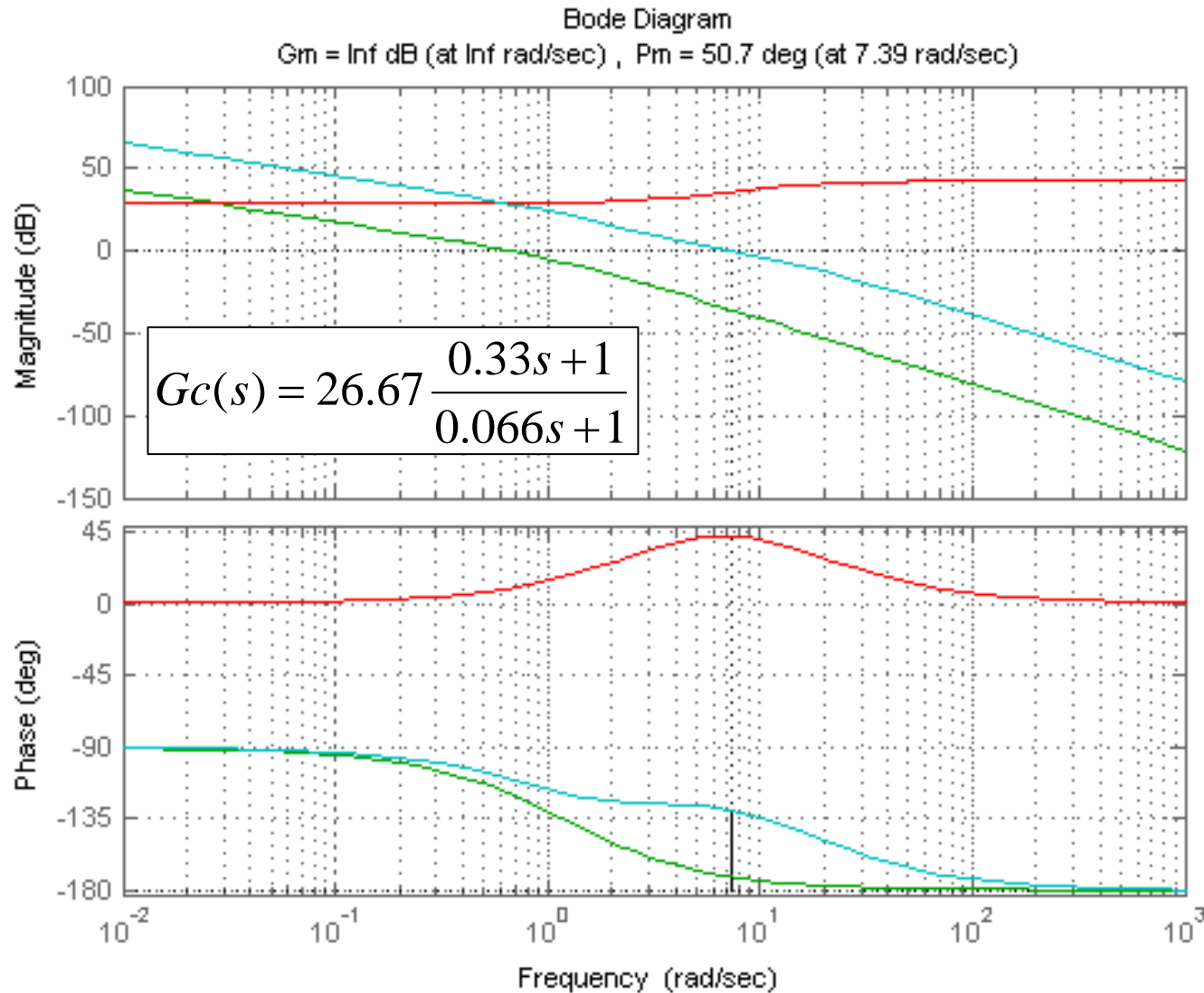
y seleccionar ésta como la nueva frecuencia ganancia crítica que

es: $\omega_{gc}' = 6.8 \text{ rad/s}$

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{\alpha}T} = 6.8 \Rightarrow T = 0.33$$



Cumple las tres especificaciones: $k_v=20$, $M_F=50^\circ$ y $M_G>10$ db



b) Respuesta del sistema ante una entrada escalón y rampa:

