



## Tema 2: Análisis en Frecuencia de Circuitos Electrónicos Realimentados

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99



## 1. Dinámica de los sistemas realimentados

- 1.1 Función de transferencia
- 1.2 Dinámica en bucle abierto y en bucle cerrado

## 2. Respuesta en frecuencia de amplificadores realimentados

- 2.1 Función de transferencia y Respuesta en frecuencia
- 2.2 Diagrama de Bode y Diagrama Polar
- 2.3 Respuesta transitoria y la Respuesta en frecuencia
- 2.4 Respuesta en frecuencia en bucle cerrado
- 2.5 Producto Ganancia x Ancho de banda
- 2.6 Respuesta en frecuencia de amplificadores con varios polos
- 2.7 "Slew-rate" de amplificadores realimentados
- 2.8 Diagrama asintótico de Bode y Ejemplo de trazado D. Bode y D. polar

## 3. Estudio de la estabilidad

- 3.1 Efectos de la realimentación negativa
- 3.2 Concepto inestabilidad
- 3.2 Inestabilidad en el diagrama de Bode
- 3.3 Inestabilidad en el diagrama polar. Criterio estabilidad Nyquist
- 3.4 La realimentación negativa se vuelve positiva
- 3.5 Margen de Fase y Margen de Ganancia
- 3.6 Estudio de la estabilidad en un amplificador real
- 3.7 Estudio de  $A(\omega)$  a partir de  $A(\omega)$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

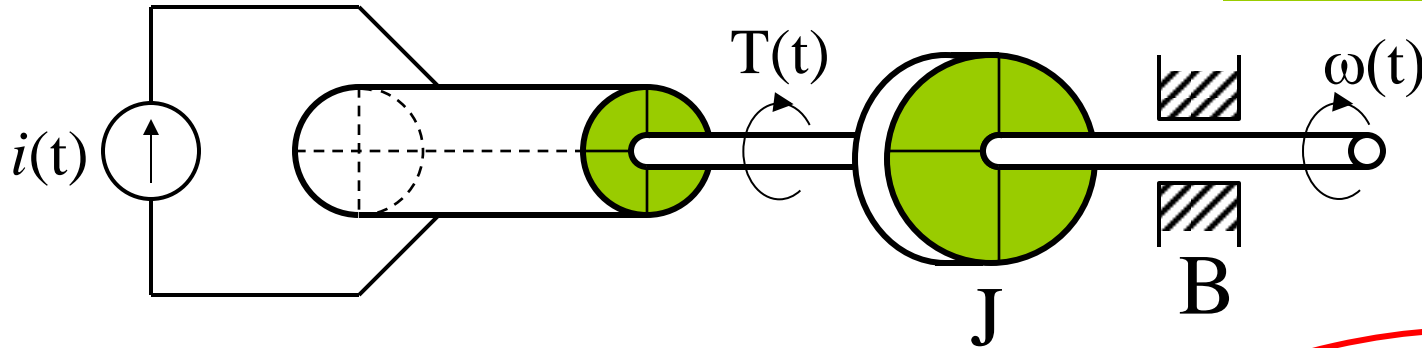
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

## 4.3 Compensación polo - cero



**Sistema Dinámico,**  
Las magnitudes varían  
con el tiempo

## Motor de C.C. controlado por inducido



$J \Rightarrow$  Momento de inercia  
 $B \Rightarrow$  Coef. Rozamiento viscoso

**Sistema lineal**

$$T(t) = K_M \cdot i(t) = J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} + B \cdot \omega(t)$$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



# Función de transferencia

Su operación se puede describir mediante:

## Ecuación diferencial lineal de coeficientes constantes

Sistema lineal

$$T(t) = K_M \cdot i(t) = J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} + B \cdot \omega(t)$$

**L**

Transformada de Laplace

Dominio de Laplace

$$T(s) = K_M \cdot I(s) = J \cdot s \cdot \omega(s) + B \cdot \omega(s)$$

### 1 Función de transferencia

$$\frac{\omega(s)}{I(s)} = H(s) = \frac{K_M}{J \cdot s + B}$$

2 Entrada  $i(t) = I \cdot 1(t) \xrightarrow{\odot} I(s) = \frac{I}{s}$

3 Salida  $\omega(s) = H(s) \cdot I(s) = \frac{K_M}{J \cdot s + B} \cdot \frac{I}{s}$

**L<sup>-1</sup>**

Anti-transformada de Laplace

Respuesta temporal

Cartagena99

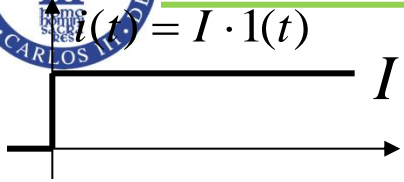
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



# Función de transferencia



**Dominio de Laplace**



**Entrada**

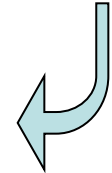
$$I(s) = \frac{I}{s}$$



**Salida**

$$\omega(s) = H(s) \cdot I(s) = \frac{K_M}{J \cdot s + B} \cdot \frac{I}{s}$$

☹️-1



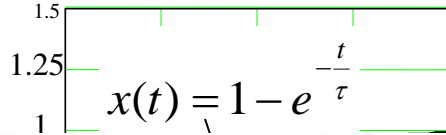
**Respuesta temporal**

$$\omega(t) = \frac{I \cdot K_M}{B} \cdot (1 - e^{-\frac{B}{J}t}) = \frac{I \cdot K_M}{B} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

• Tablas

f(t)	F(s)
1(t)	$\frac{1}{s}$
$e^{-a \cdot t}$	$\frac{1}{s + a}$

**$\tau$ , Constante de tiempo**



**Cartagena99**

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

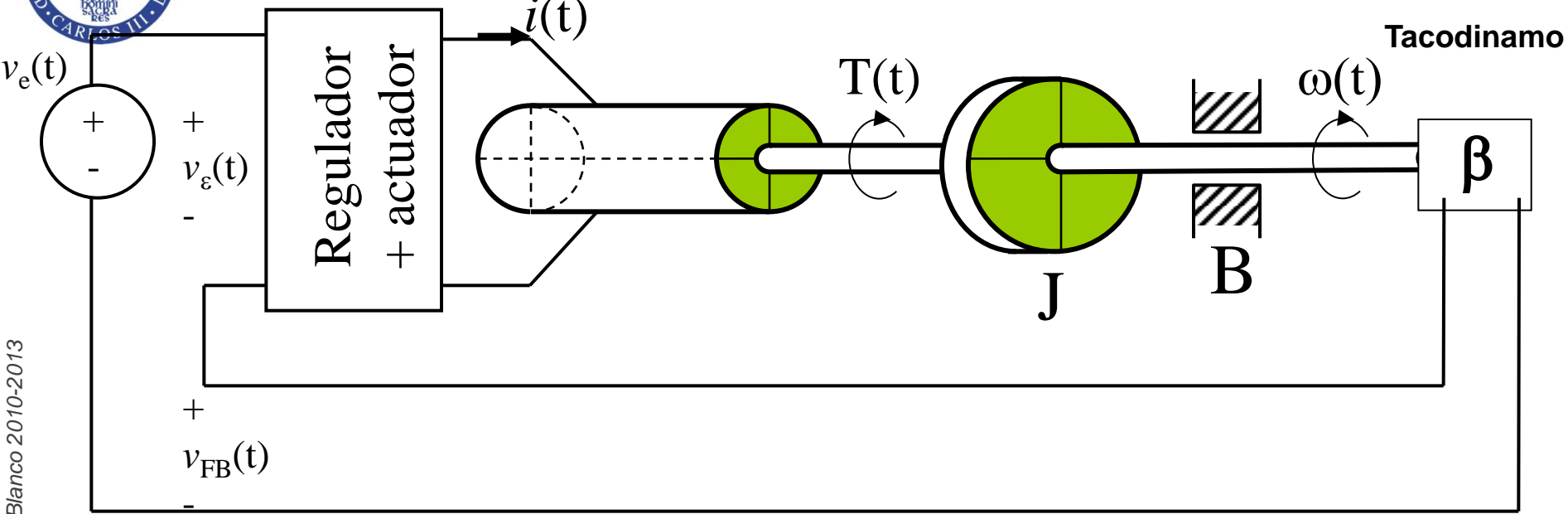
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

$$\frac{a}{s} = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + a}$$

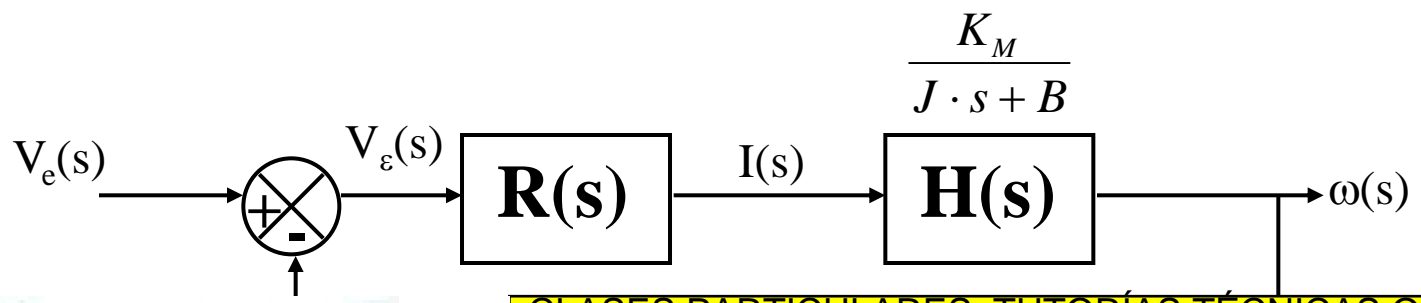
© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013



# Dinámica en bucle abierto y en bucle cerrado



© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013

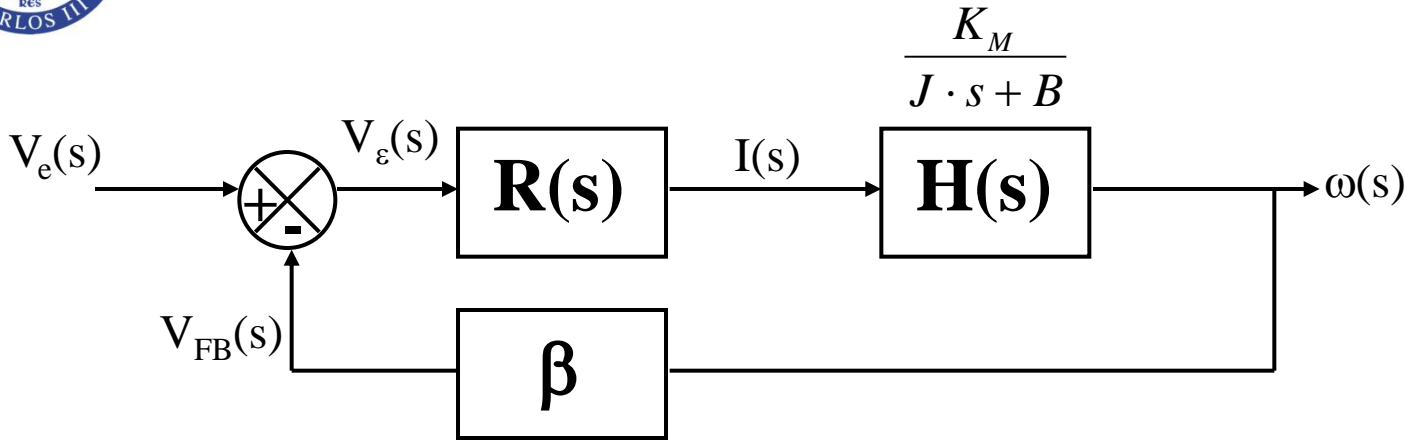


# Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70  
 ---  
 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

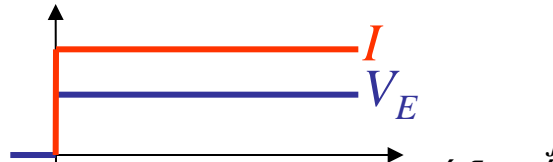


# Dinámica en bucle abierto y en bucle cerrado



$$\frac{\omega(s)}{V_e(s)} = \frac{R(s) \cdot H(s)}{1 + R(s) \cdot H(s) \cdot \beta} = \frac{\frac{K_M}{J \cdot s + B}}{1 + R(s) \cdot \frac{K_M}{J \cdot s + B} \cdot \beta} = \frac{R \cdot K_M}{B + R \cdot K_M \cdot \beta} \cdot \frac{1}{1 + \frac{J}{B} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R \cdot K_M}{B} \cdot \beta} \cdot s}$$

Si  $R(s)H(s)\beta \gg 1$



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

✓ INDEPENDIENTE de J y de B ✓ MÁS RÁPIDO

## 1. Dinámica de los sistemas realimentados

- 1.1 Función de transferencia
- 1.2 Dinámica en bucle abierto y en bucle cerrado



## 2. Respuesta en frecuencia de amplificadores realimentados

- 2.1 Función de transferencia y Respuesta en frecuencia
- 2.2 Diagrama de Bode y Diagrama Polar
- 2.3 Respuesta transitoria y la Respuesta en frecuencia
- 2.4 Respuesta en frecuencia en bucle cerrado
- 2.5 Producto Ganancia x Ancho de banda
- 2.6 Respuesta en frecuencia de amplificadores con varios polos
- 2.7 “*Slew-rate*” de amplificadores realimentados
- 2.8 Diagrama asintótico de Bode y Ejemplo de trazado D. Bode y D. polar

## 3. Estudio de la estabilidad

- 3.1 Efectos de la realimentación negativa
- 3.2 Concepto inestabilidad
- 3.2 Inestabilidad en el diagrama de Bode
- 3.3 Inestabilidad en el diagrama polar. Criterio estabilidad Nyquist
- 3.4 La realimentación negativa se vuelve positiva
- 3.5 Margen de Fase y Margen de Ganancia
- 3.6 Estudio de la estabilidad en un amplificador real
- 3.7 Estudio de  $A(j\omega)$  a partir de  $A(s)$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

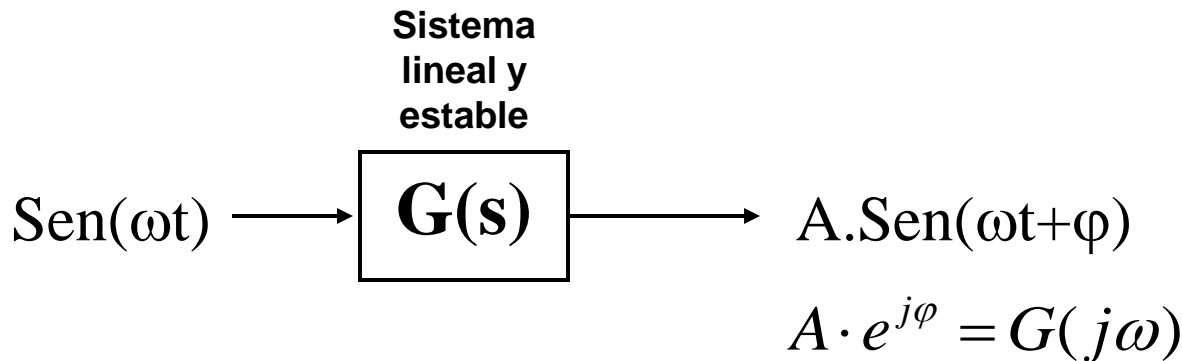
## 4.3 Compensación polo - cero





# Función de transferencia y Respuesta en frecuencia

- Función de transferencia  $G(s)$  está íntimamente ligada con la solución de la ecuación diferencial.
- Respuesta en frecuencia: Otro uso de la función de transferencia, para determinar la respuesta de un sistema lineal ante una entrada sinusoidal, o suma de funciones sinusoidales (Series de Fourier y Ppo. De superposición)



Cartagena99

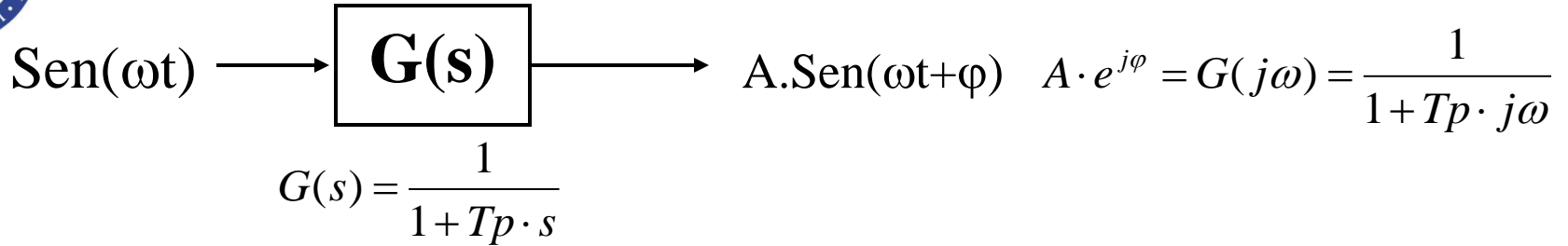
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

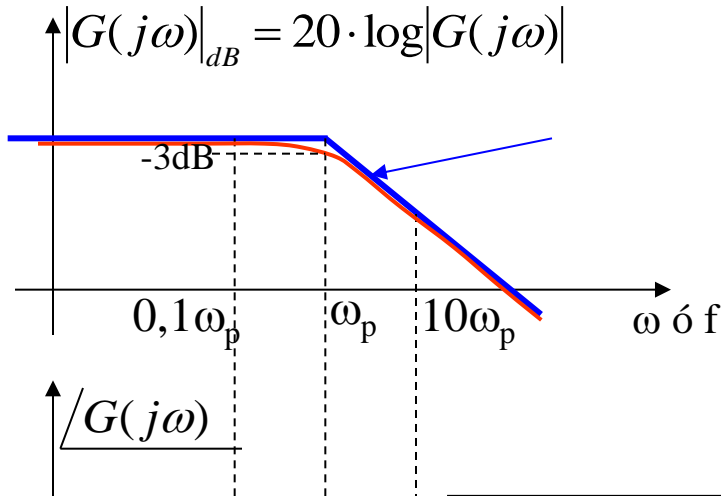


# Diagrama de Bode y Diagrama Polar

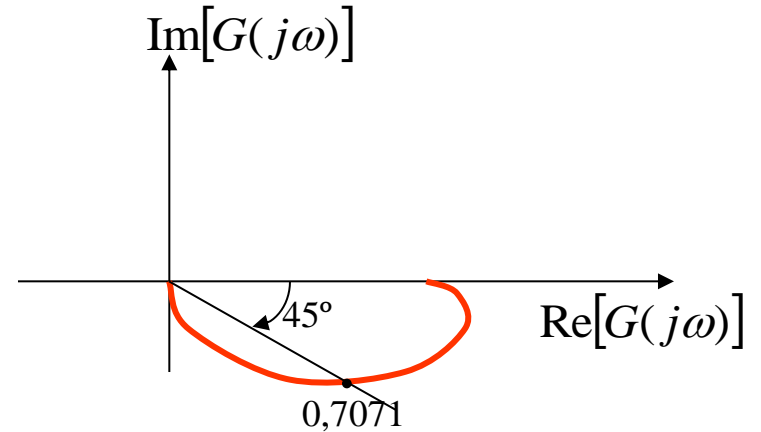


Representaciones en función de la frecuencia

## Diagrama de Bode



## Diagrama Polar



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

# Cartagena99

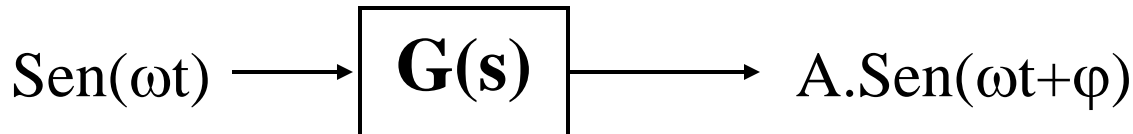


# Respuesta transitoria y la Respuesta en frecuencia

- Existe una correlación entre la respuesta transitoria y la respuesta en frecuencia

## Ej: Sistema de primer orden (1 sólo polo)

$$G(s) = \frac{1}{1 + Tp \cdot s}$$



$$A \cdot e^{j\varphi} = G(j\omega) = \frac{1}{1 + Tp \cdot j\omega}$$

... También proporciona información cuando:

# Cartagena99

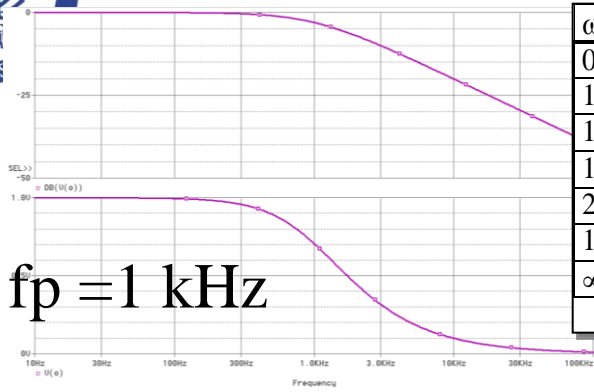
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

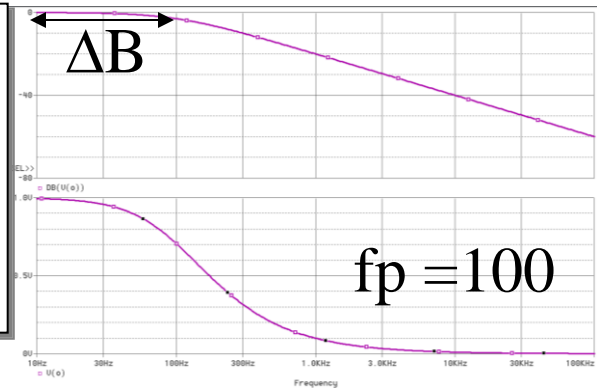


# Respuesta transitoria y la respuesta en frecuencia



$f_p = 1 \text{ kHz}$

$\omega$	A	A [dB]	$\phi$ [°]
0	1	0	0
$1/10T_p$	$\approx 1$	$\approx 0$	$\approx 5,7$
$1/2T_p$		$\approx -1$	$\approx 26,6$
$1/T_p$	$1/\sqrt{2}$	$\approx -3$	$\approx 45$
$2/T_p$		$\approx -7$	$\approx 63,4$
$10/T_p$	$\approx 0,1$	$\approx -20$	$\approx 84,3$
$\infty$	0	$-\infty$	-90



$f_p = 100$

$f_s = 100 \text{ Hz}$

$v_e$

$v_o$

$v$

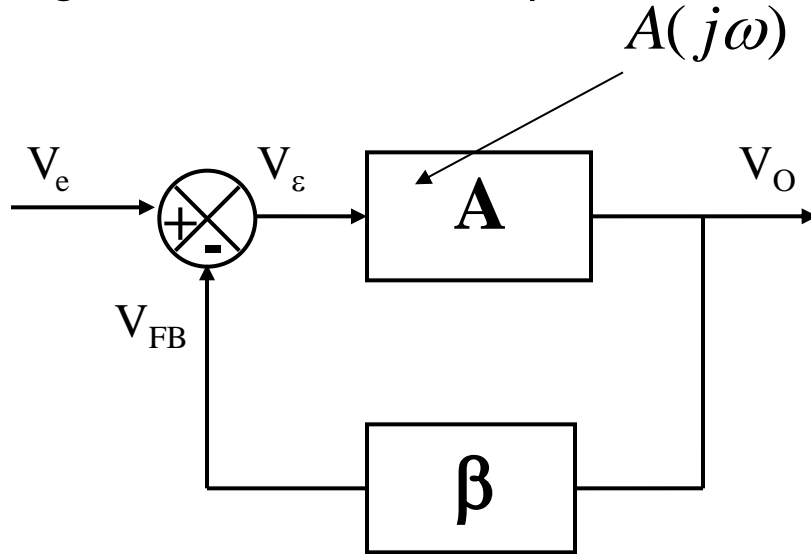
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

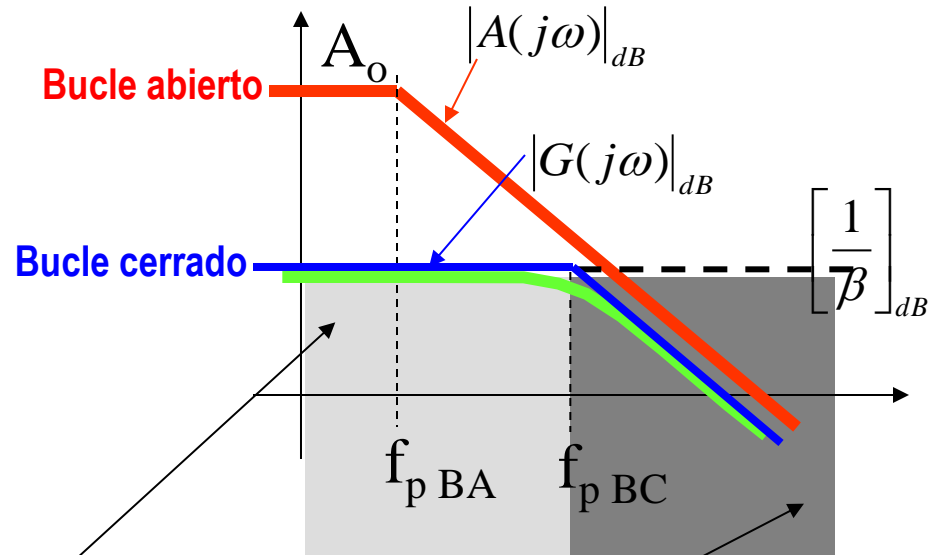
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

# Respuesta en frecuencia en bucle cerrado

Relación entre el bucle abierto y el bucle cerrado en función de la ganancia del lazo  $A \cdot \beta$



$$G(j\omega) = \frac{A(j\omega)}{1 + A(j\omega) \cdot \beta}$$



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013

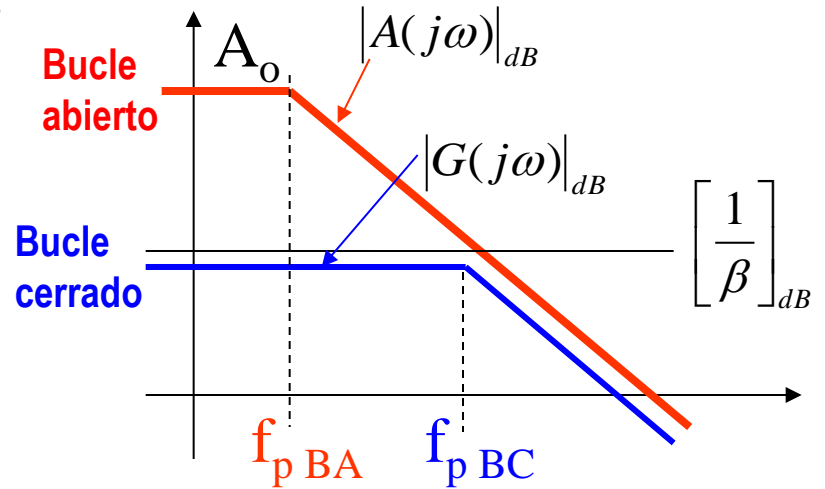
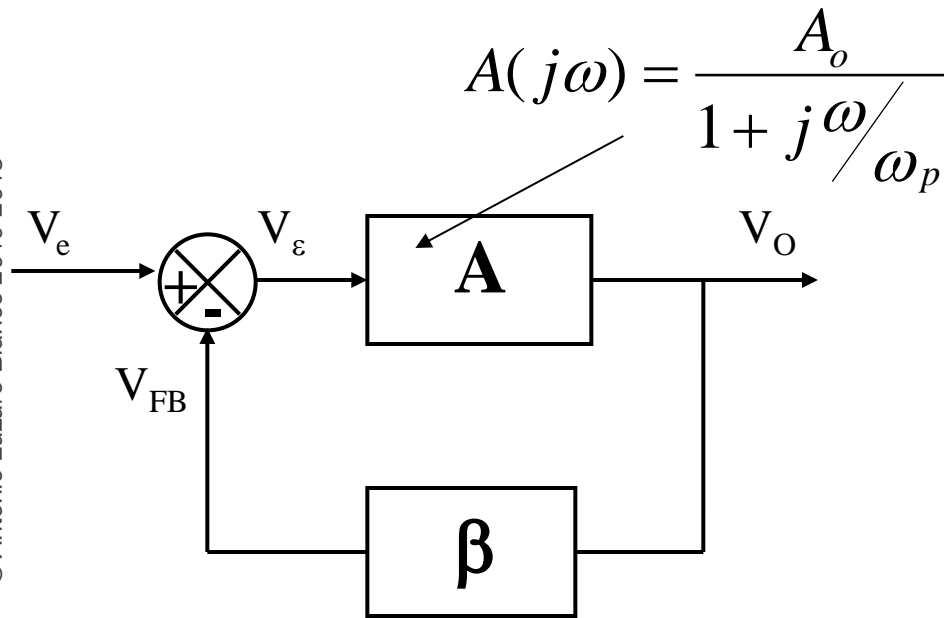
Cartagena99



# Respuesta en frecuencia en bucle cerrado

¿Que relación existe entre  $f_{pBA}$  y  $f_{pBC}$ ?

Efecto de la realimentación negativa sobre el ancho de banda



© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013

# Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

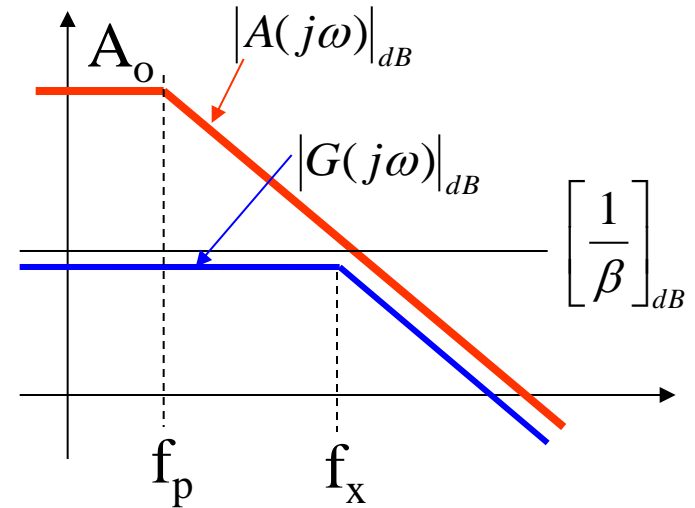
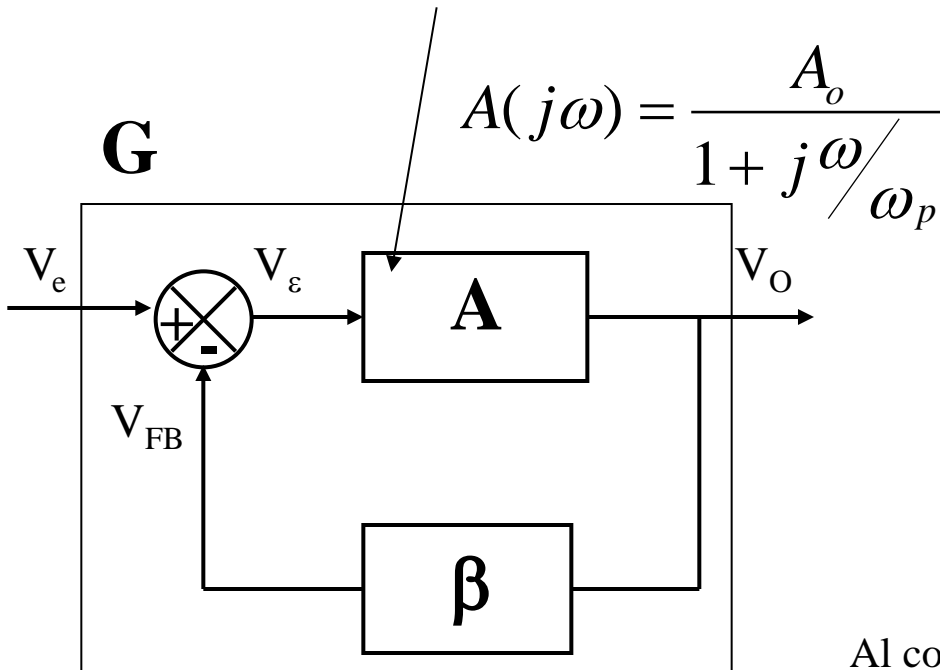
---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

$\omega_p (1 + \frac{\omega}{\omega_p})$

## Amplificadores de un solo polo realimentados

“Consideremos todos los amplificadores realimentados (G) que podemos construir con el amplificador (A), **que tiene un solo polo**”



Al cortar siempre a la misma pendiente, la ganancia en bucle cerrado se obtiene geoméricamente:

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

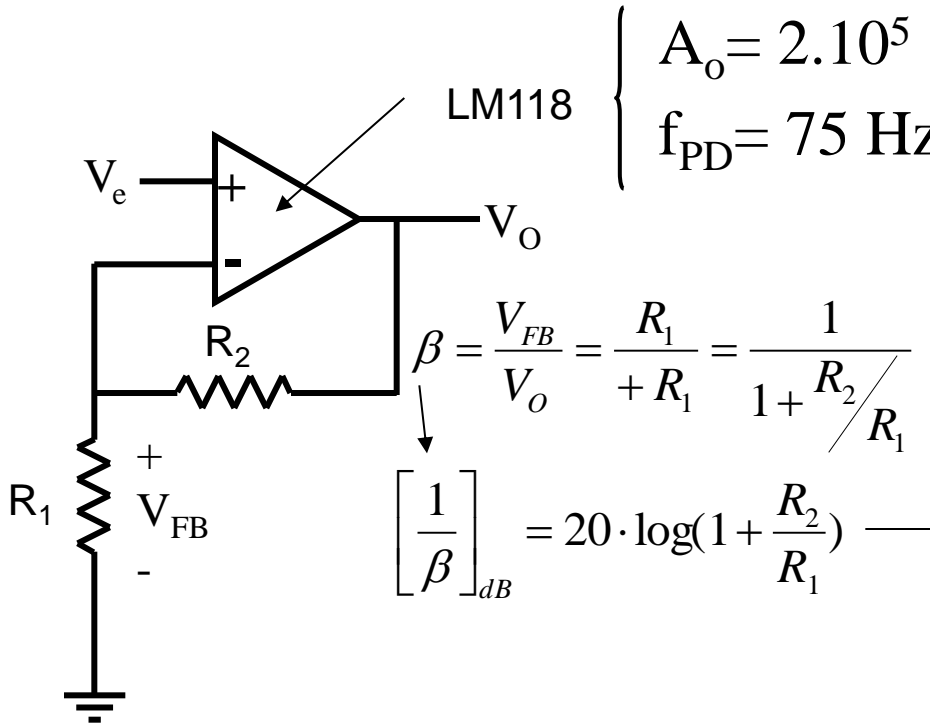
---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

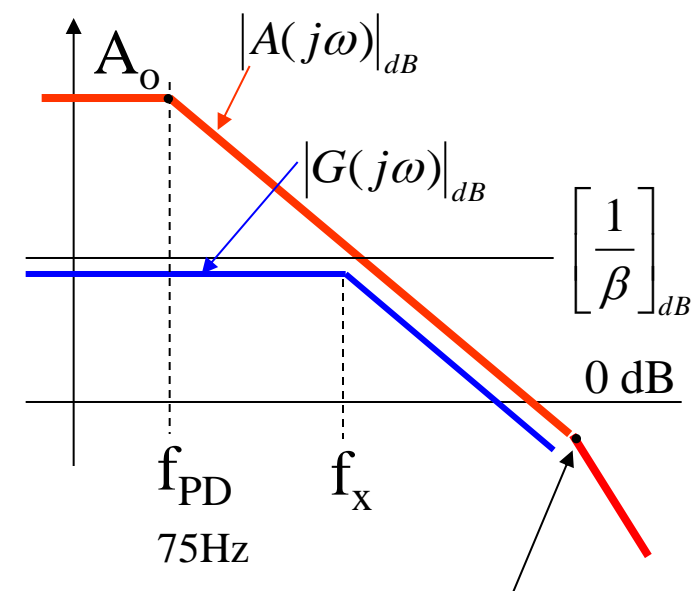
ganancia x ancho de banda = constante

# Producto Ganancia x Ancho de banda

Amplificadores compensados por polo dominante  $G \times \Delta B = cte$



$$\left\{ \begin{array}{l} A_0 = 2 \cdot 10^5 \\ f_{PD} = 75 \text{ Hz} \end{array} \right. \quad G \times \Delta B = cte = 2 \cdot 10^5 \times 75 \text{ Hz} = 15 \text{ MHz}$$



© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

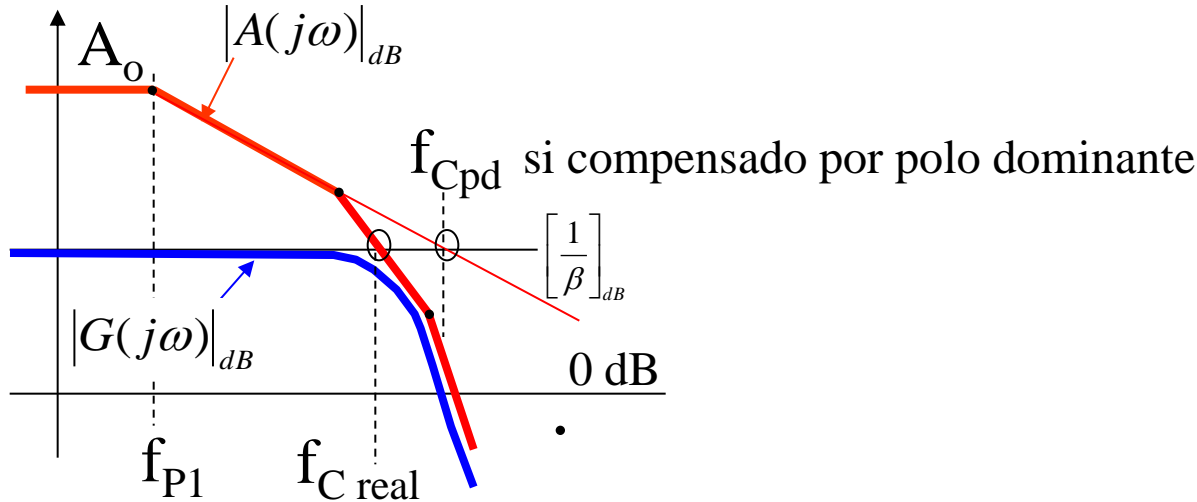
---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



# Respuesta en frecuencia de amplificadores con varios polos

## Amplificadores con varios polos realimentados



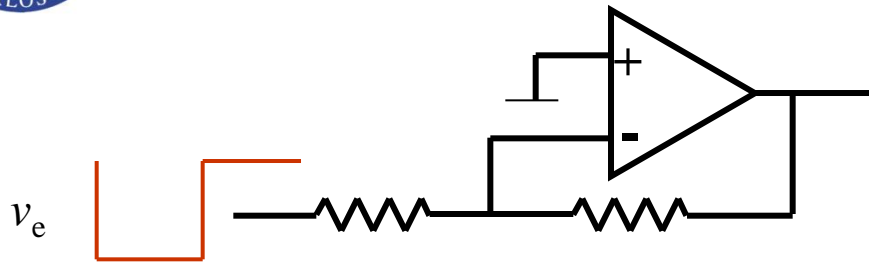
- La realimentación negativa siempre aumenta el  $\Delta B$ :  $f_{C \text{ real}} > f_{P1}$

Cartagena99

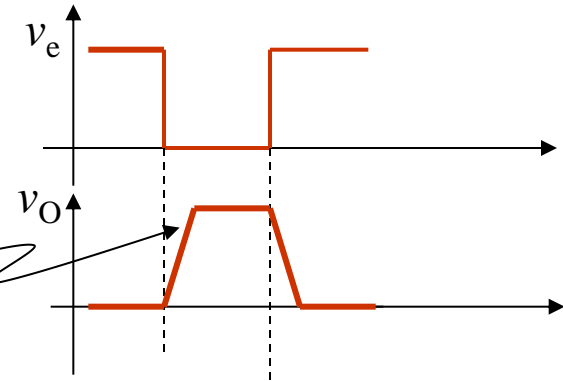
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

# “Slew-rate” de amplificadores realimentados



Ante una entrada en **escalón en gran señal**, la derivada de tensión que se obtiene a la salida tiene un máximo, que se conoce con el nombre de “slew rate”



Escalón en gran señal

Large Signal Inverting



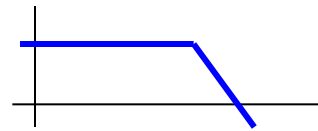
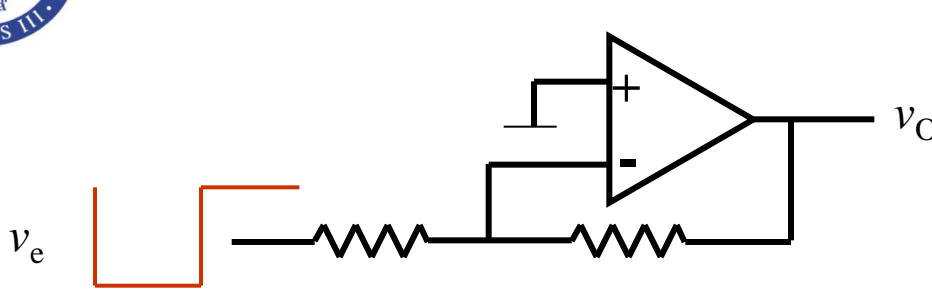
CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

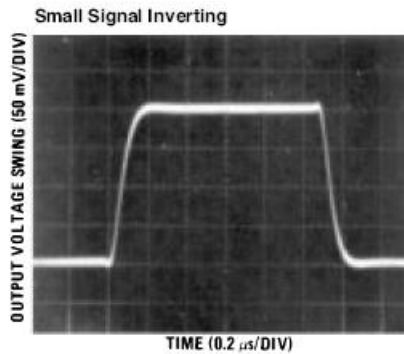
# “Slew-rate” de amplificadores realimentados



Respuesta en frecuencia (pequeña señal) en lazo cerrado **de primer orden**

## Pulse Response

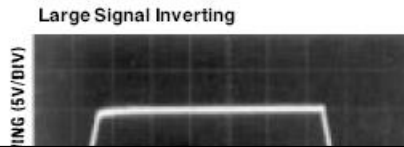
Escalón en pequeña señal



TL/H/8358-7

Escalón en gran señal

20V



Cartagena99

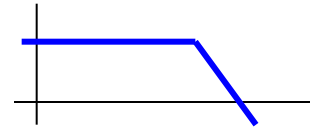
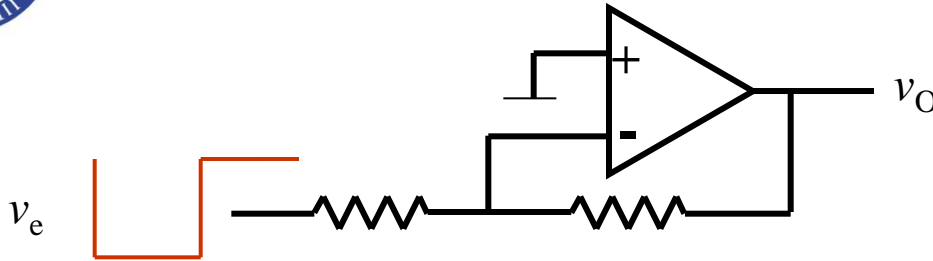
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

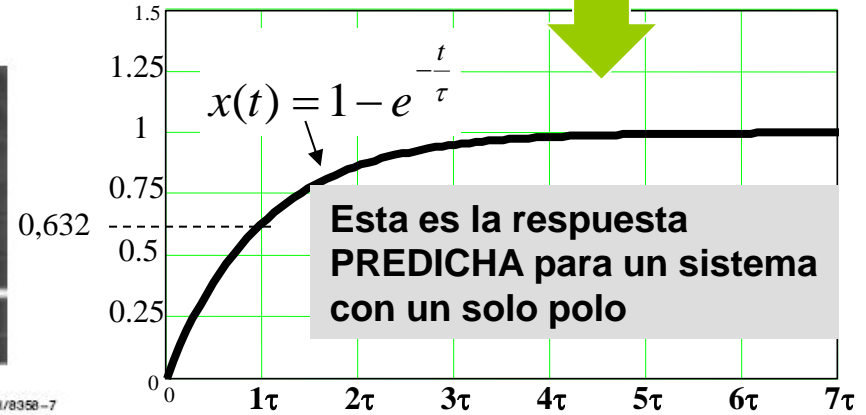


# "Slew-rate" de amplificadores realimentados



Respuesta en frecuencia (pequeña señal) en lazo cerrado **de primer orden**

Respuesta exponencial

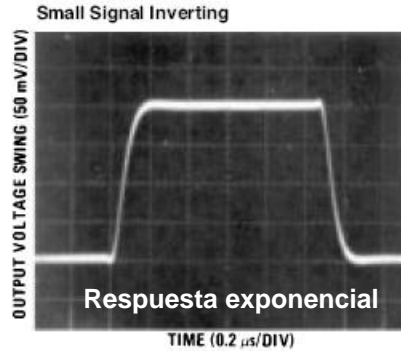


Esta es la respuesta PREDICHA para un sistema con un solo polo

Escalón en pequeña señal

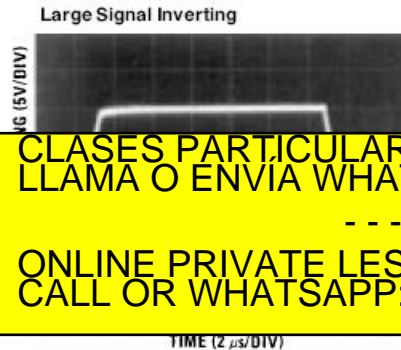


Pulse Response



TL/H/8358-7

Escalón en gran señal



¿Por qué la respuesta a un escalón de gran señal es

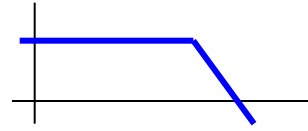
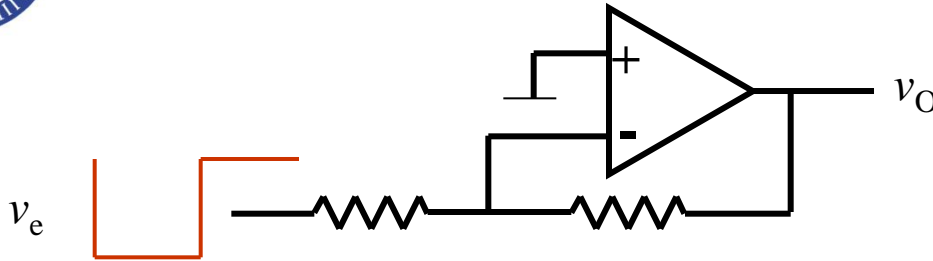
CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# Cartagena99

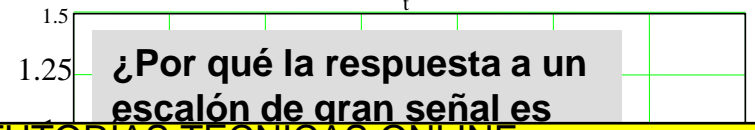
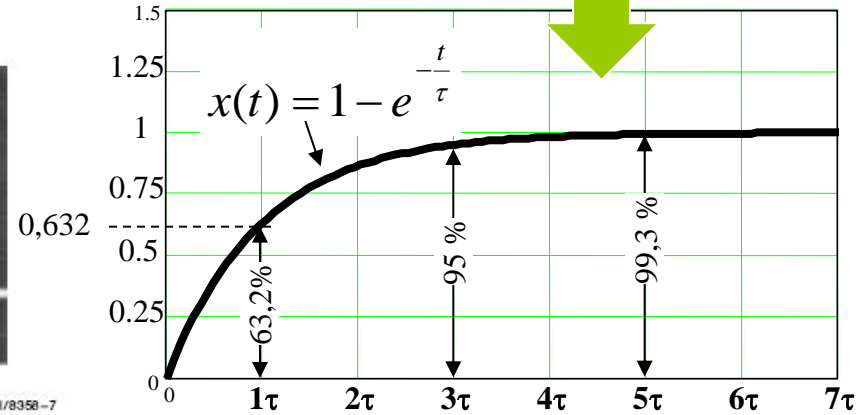


# "Slew-rate" de amplificadores realimentados



Respuesta en frecuencia (pequeña señal) en lazo cerrado **de primer orden**

Respuesta exponencial

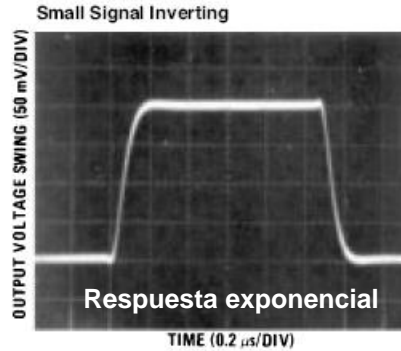


© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013

Escalón en pequeña señal



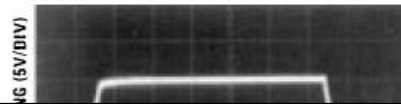
Pulse Response



Respuesta exponencial

TL/H/8358-7

Large Signal Inverting



Escalón en gran señal

# Cartagena99

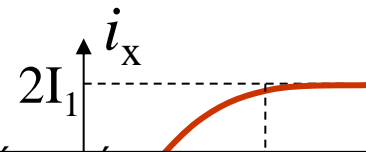
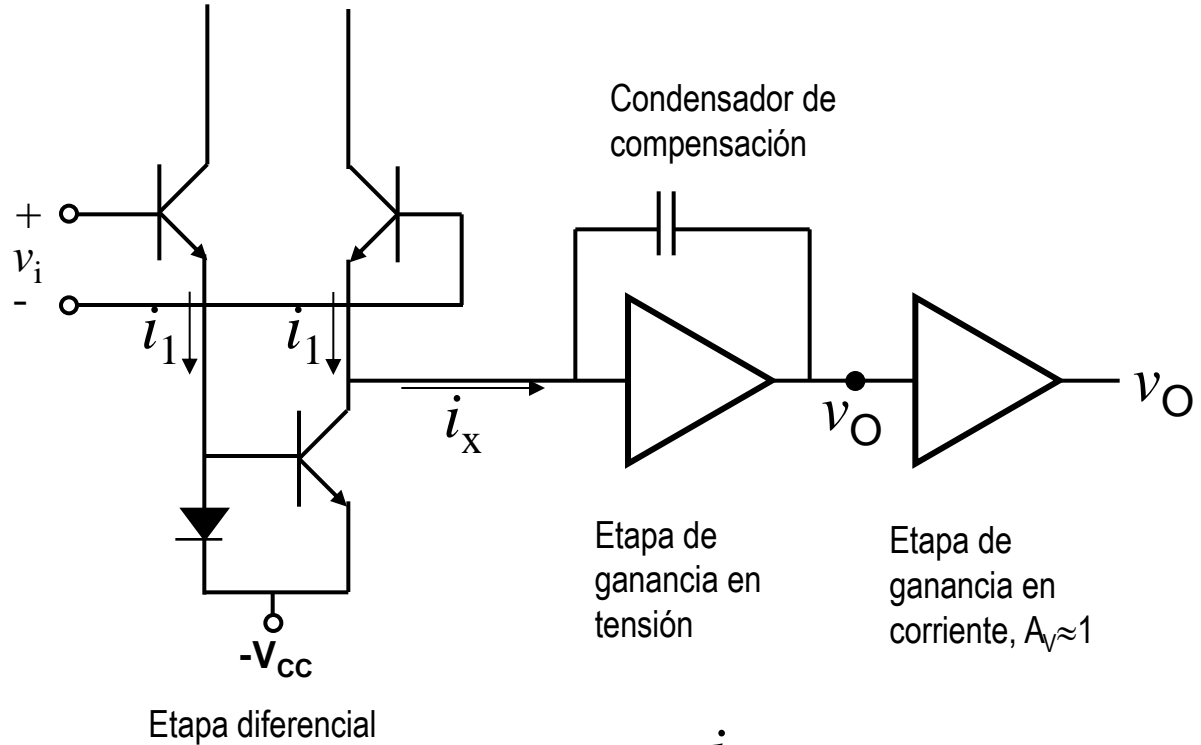
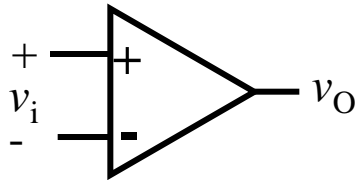
CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

TIME (2 μs/DIV)

# “Slew-rate” de amplificadores realimentados



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

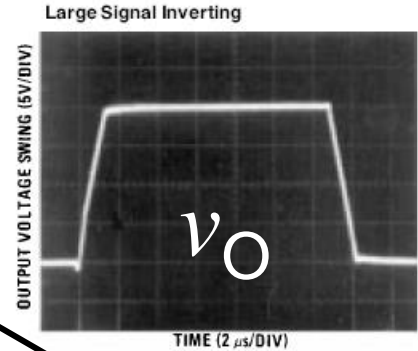
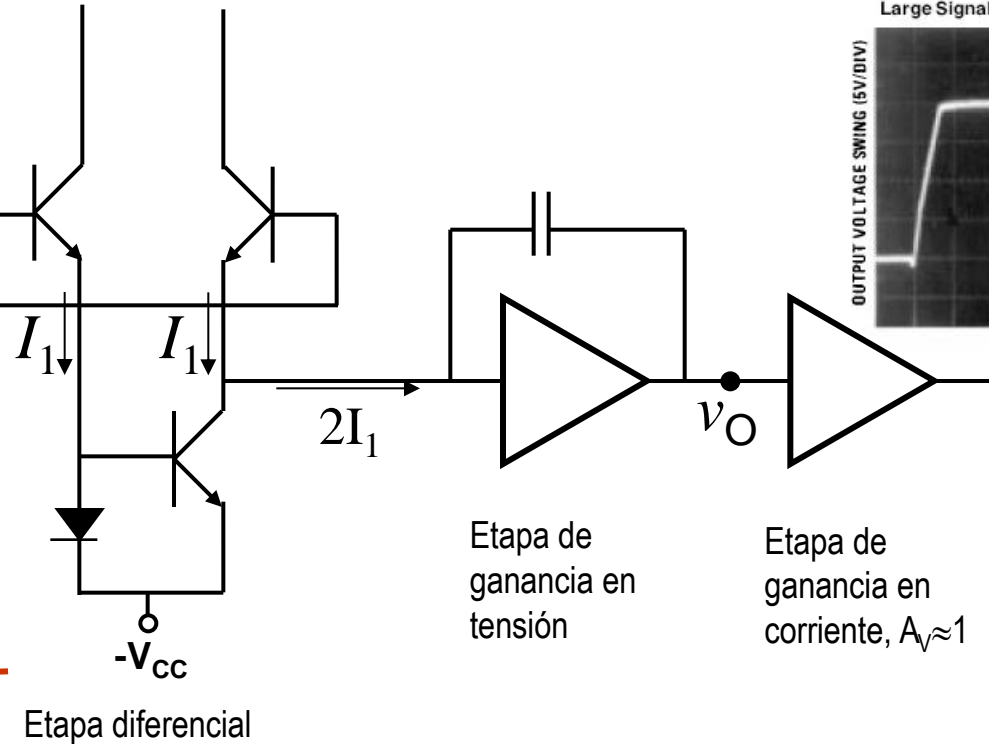
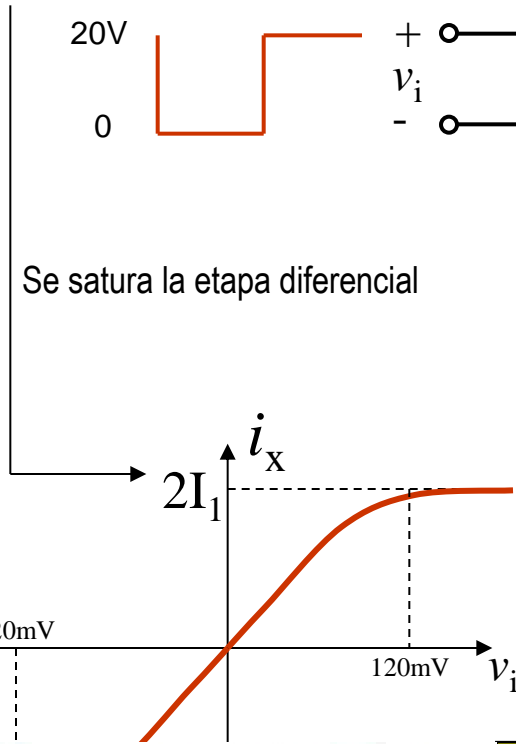
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013

Cartagena99

# “Slew-rate” de amplificadores realimentados

Escalón en gran señal



Carga lineal de un condensador  $i = C \cdot \frac{dv}{dt}$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

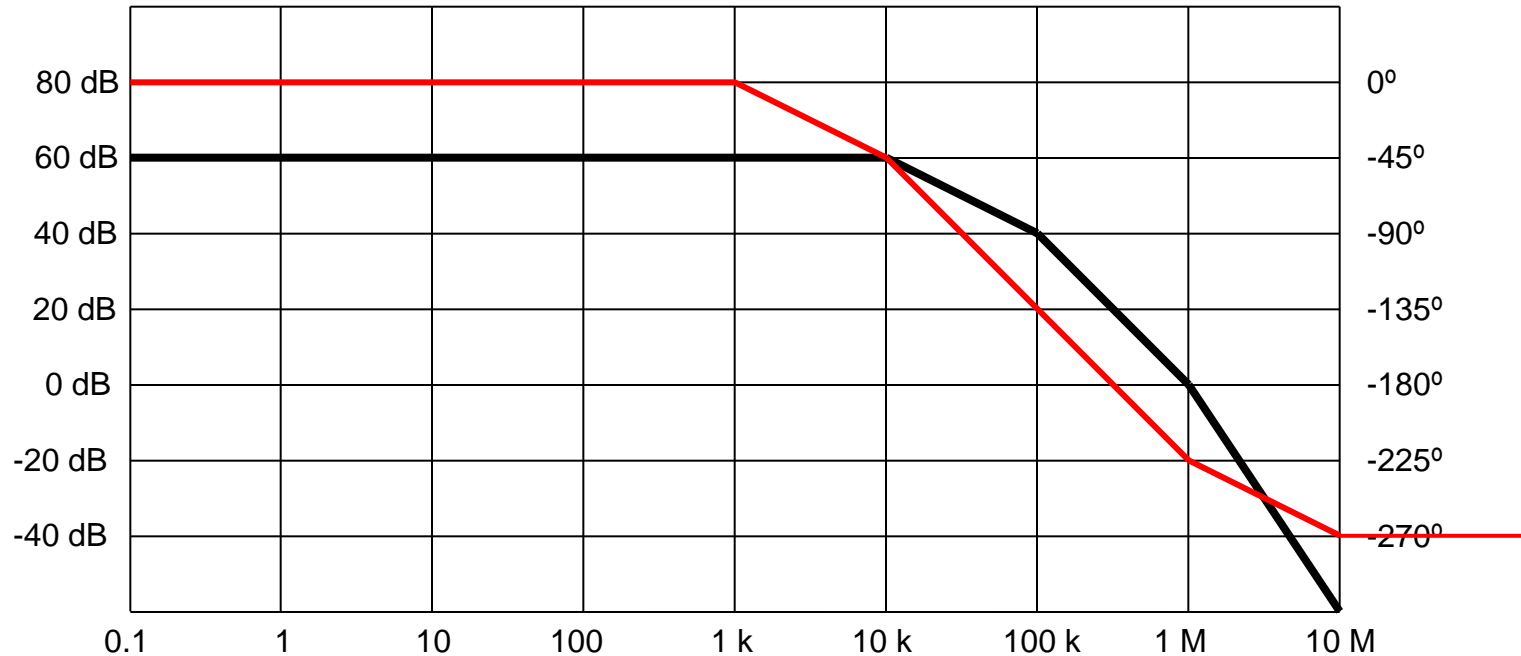
“Slew-rate”  $\frac{dv_o}{dt} = cte. = \frac{2I_1}{C}$



# Diagrama de Bode asintótico

$$A(jf) = \frac{1000}{(1 + j \frac{f}{fp1}) \cdot (1 + j \frac{f}{fp2}) \cdot (1 + j \frac{f}{fp3})}$$

	fp1	fp2	fp3	
Polo 1	-1	-1		
Polo 2		-1	-1	
Polo 3			-1	-1
Total	-1	-2	-2	-1



© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



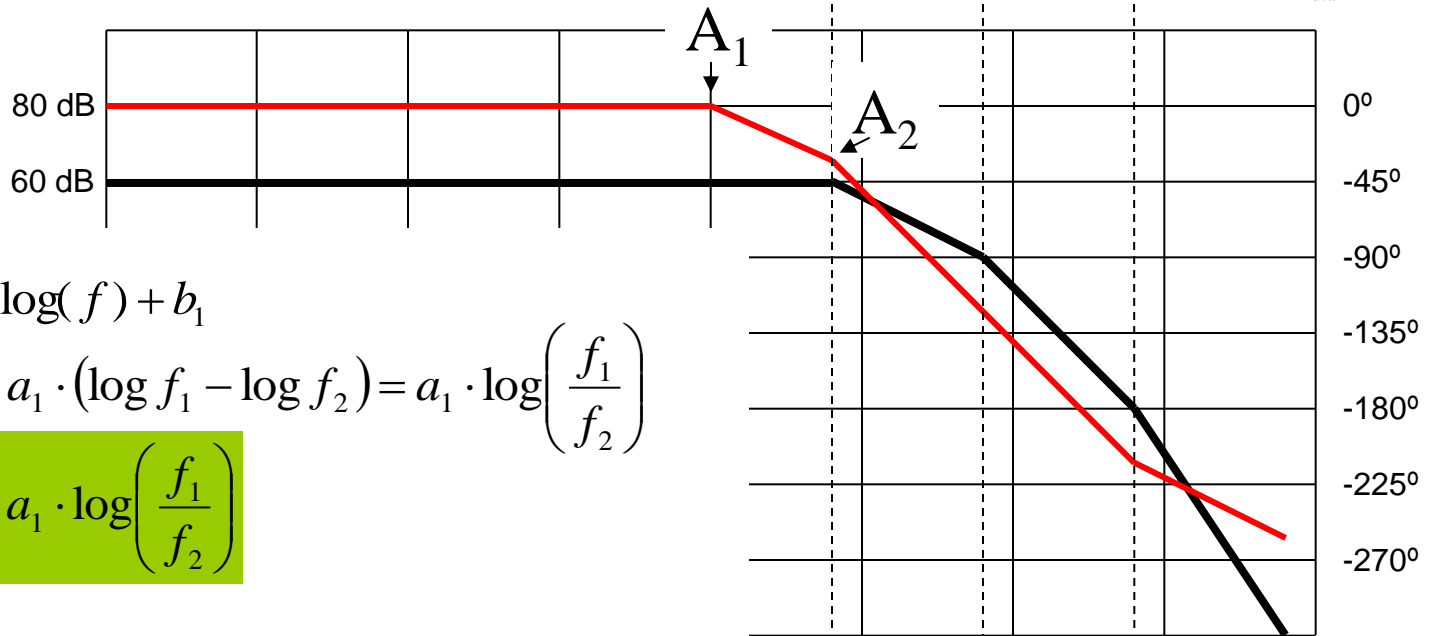


# Diagrama de Bode asintótico

Cuando los polos no coinciden sobre las frecuencias de los marcadores

$$A(jf) = \frac{1000}{(1 + j \frac{f}{fp1}) \cdot (1 + j \frac{f}{fp2}) \cdot (1 + j \frac{f}{fp3})}$$

	fp1	fp2	fp3	
Polo 1	-1	-1		
Polo 2		-1	-1	
Polo 3			-1	-1
Total		-2	-2	-1



$$A_{dB} = a_1 \cdot \log(f) + b_1$$

$$A_1 - A_2 = a_1 \cdot (\log f_1 - \log f_2) = a_1 \cdot \log\left(\frac{f_1}{f_2}\right)$$

$$A_1 - A_2 = a_1 \cdot \log\left(\frac{f_1}{f_2}\right)$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

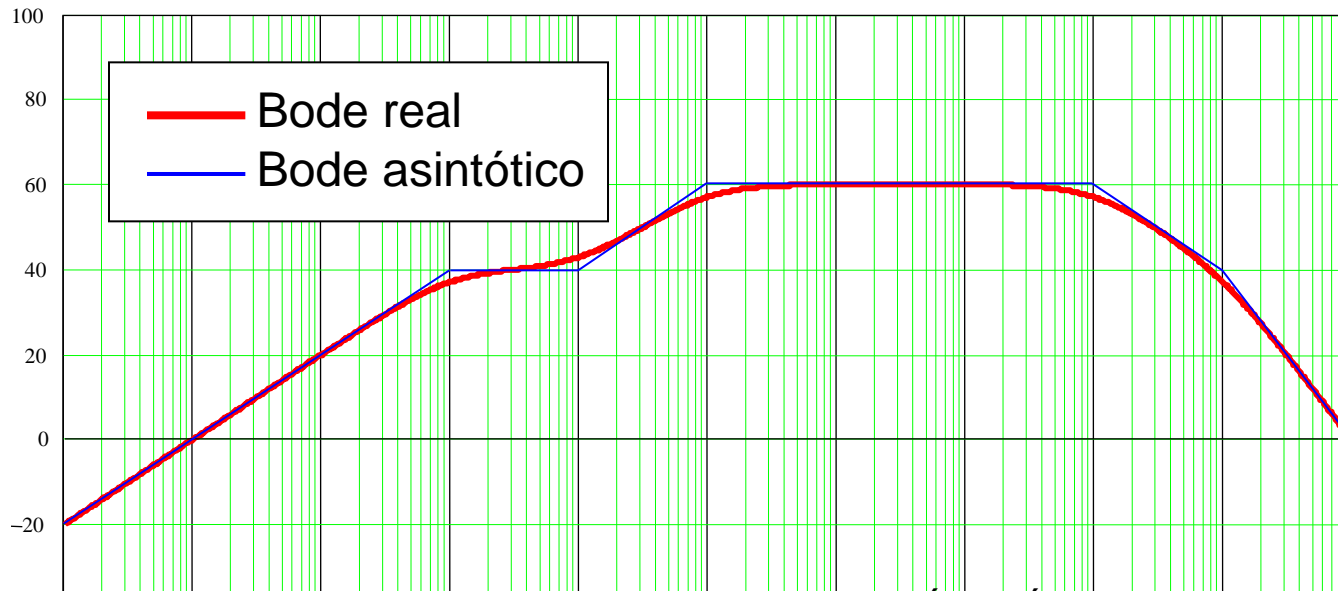
Cartagena99



# Ejemplo de trazado diagrama de Bode y Diagrama polar

$$A(jf) = \frac{10 \cdot jf \cdot (1 + j \frac{f}{fz1})}{(1 + j \frac{f}{fp1}) \cdot (1 + j \frac{f}{fp2}) \cdot (1 + j \frac{f}{fp3}) \cdot (1 + j \frac{f}{fp4})}$$

- fz2 = 100Hz
- fp1 = 10Hz
- fp2 = 1kHz
- fp3 = 1MHz
- fp4 = 10MHz



© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013

# Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

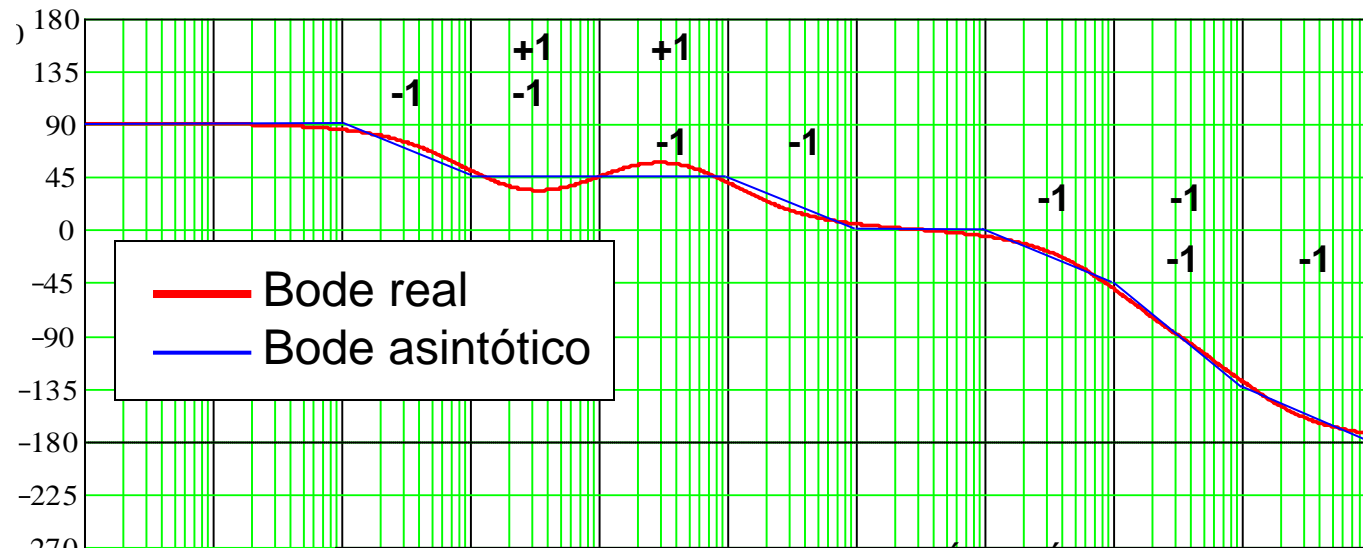
---  
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



# Ejemplo de trazado diagrama de Bode y Diagrama polar

$$A(jf) = \frac{10 \cdot jf \cdot (1 + j \frac{f}{fz1})}{(1 + j \frac{f}{fp1}) \cdot (1 + j \frac{f}{fp2}) \cdot (1 + j \frac{f}{fp3}) \cdot (1 + j \frac{f}{fp4})}$$

**fz2 = 100Hz**  
**fp1 = 10Hz**  
**fp2 = 1kHz**  
**fp3 = 1Mhz**  
**fp4 = 10MHz**



**z2**  
**p1**  
**p2**  
**p3**  
**p4**

© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013

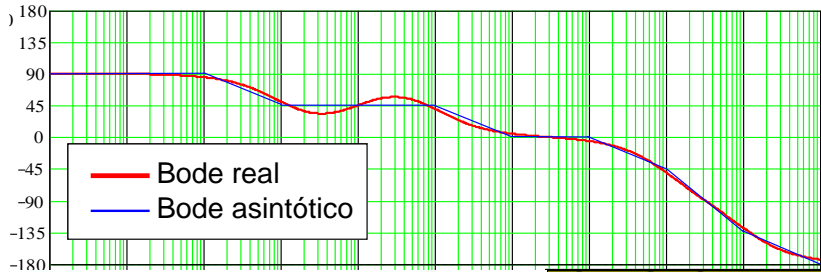
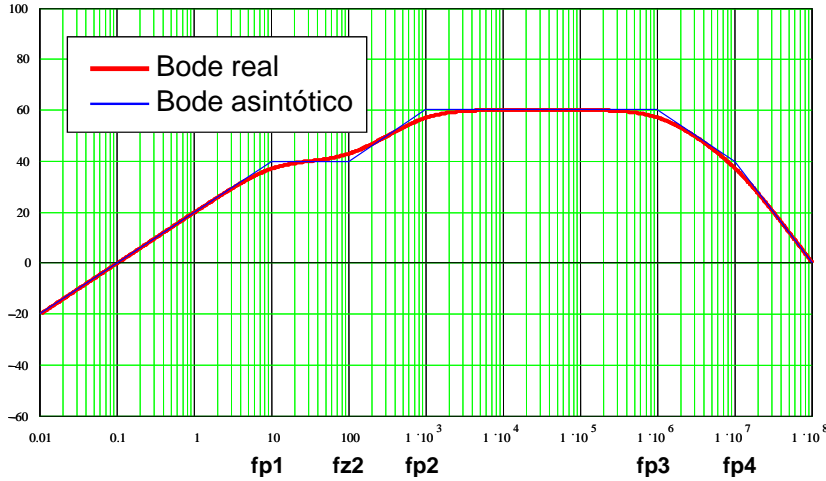
**CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE**  
**LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70**  
 ---  
**ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS**  
**CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70**

**Cartagena99**



# Ejemplo de trazado diagrama de Bode y Diagrama polar

$fz2 = 100\text{Hz}$   
 $fp1 = 10\text{Hz}$   
 $fp2 = 1\text{kHz}$   
 $fp3 = 1\text{MHz}$   
 $fp4 = 10\text{MHz}$



$A_{dB}(\text{dB})$	$A_{nat}(\text{V/V})$	Fase ( $^{\circ}$ )
$-\infty$	0	+90
20	10	+90
40	100	+45
60	1000	+45
60	1000	0
60	1000	-45
40	100	-135
0	1	-180

© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013

**Cartagena99**

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

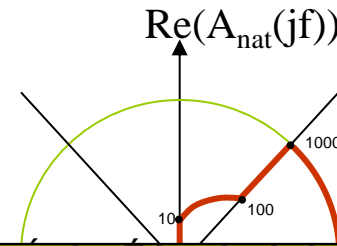
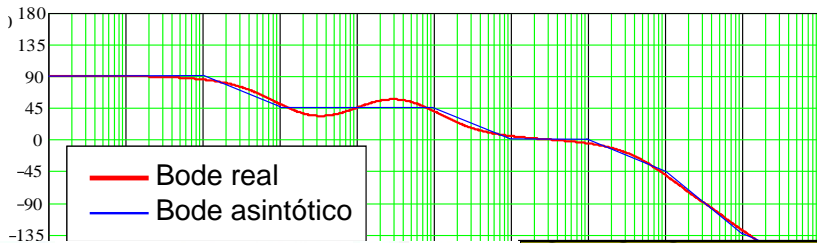
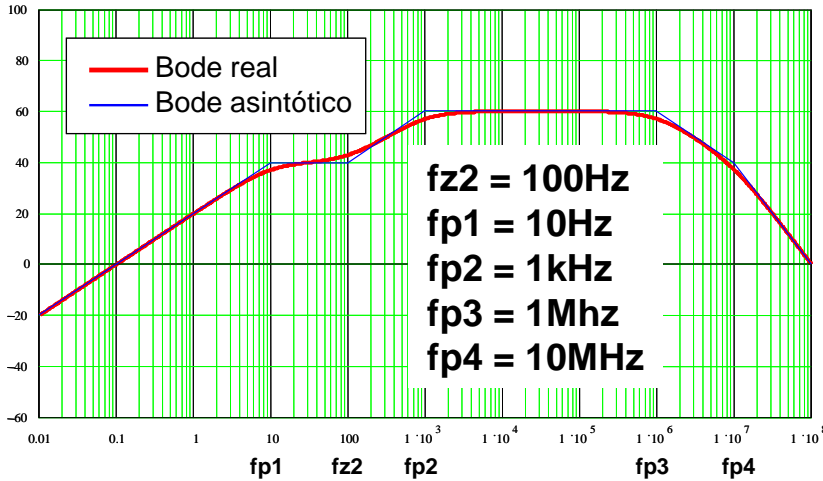
---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



# Ejemplo de trazado diagrama de Bode y Diagrama polar

$A_{dB}(dB)$	$A_{nat}(V/V)$	Fase ( $^{\circ}$ )
$-\infty$	0	+90
20	10	+90
40	100	+45
60	1000	+45
60	1000	0
60	1000	-45
40	100	-135
0	1	-180



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

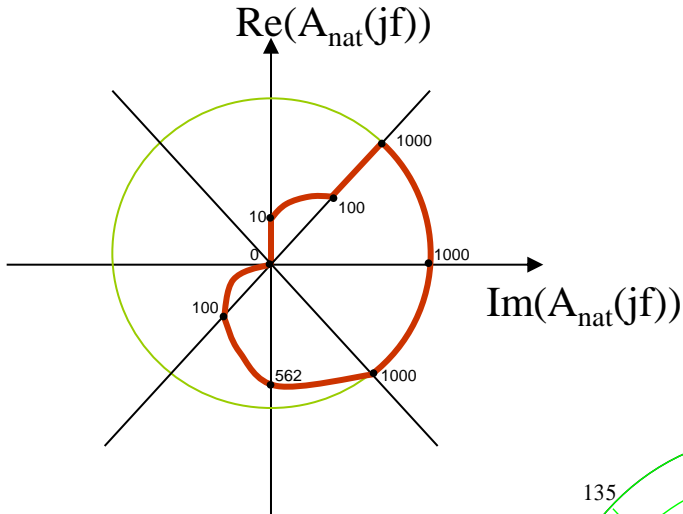
fp3 fp4

© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013

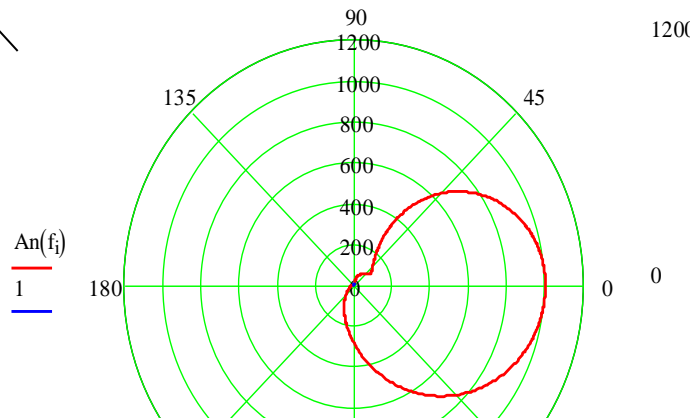
Cartagena99



# Ejemplo de trazado diagrama de Bode y Diagrama polar



$A_{dB}(dB)$	$A_{nat} (V/V)$	Fase ( $^{\circ}$ )
$-\infty$	0	+90
20	10	+90
40	100	+45
60	1000	+45
60	1000	0
60	1000	-45
40	100	-135
0	1	-180




$A_n(f_i)$   
 1  
 1

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

1. Dinámica de los sistemas realimentados
  - 1.1 Función de transferencia
  - 1.2 Dinámica en bucle abierto y en bucle cerrado
2. Respuesta en frecuencia de amplificadores realimentados
  - 2.1 Función de transferencia y Respuesta en frecuencia
  - 2.2 Diagrama de Bode y Diagrama Polar
  - 2.3 Respuesta transitoria y la Respuesta en frecuencia
  - 2.4 Respuesta en frecuencia en bucle cerrado
  - 2.5 Producto Ganancia x Ancho de banda
  - 2.6 Respuesta en frecuencia de amplificadores con varios polos
  - 2.7 "Slew-rate" de amplificadores realimentados
  - 2.8 Diagrama asintótico de Bode y Ejemplo de trazado D. Bode y D. polar
-  3. Estudio de la estabilidad

- 3.1 Efectos de la realimentación negativa
- 3.2 Concepto inestabilidad
- 3.2 Inestabilidad en el diagrama de Bode
- 3.3 Inestabilidad en el diagrama polar. Criterio estabilidad Nyquist
- 3.4 La realimentación negativa se vuelve positiva
- 3.5 Margen de Fase y Margen de Ganancia
- 3.6 Estudio de la estabilidad en un amplificador real
- 3.7 Estudio de  $A'(j\omega)$  a partir de  $A(j\omega)$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

- 4.3 Compensación polo - cero



# Efectos de la realimentación negativa en amplificadores

A cambio de una **reducción de ganancia** se obtienen importantes contraprestaciones:

El amplificador tiende hacia sus características ideales:  
Reducción de la sensibilidad de la ganancia en bucle abierto:

- Mejora (reducción) de la sensibilidad de la ganancia.
- Mejora (reducción) de la distorsión y otras perturbaciones
- Mejora de las impedancias de entrada y salida
- Mejora (aumento) del ancho de banda.

Se potencian si  
A, B aumenta

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

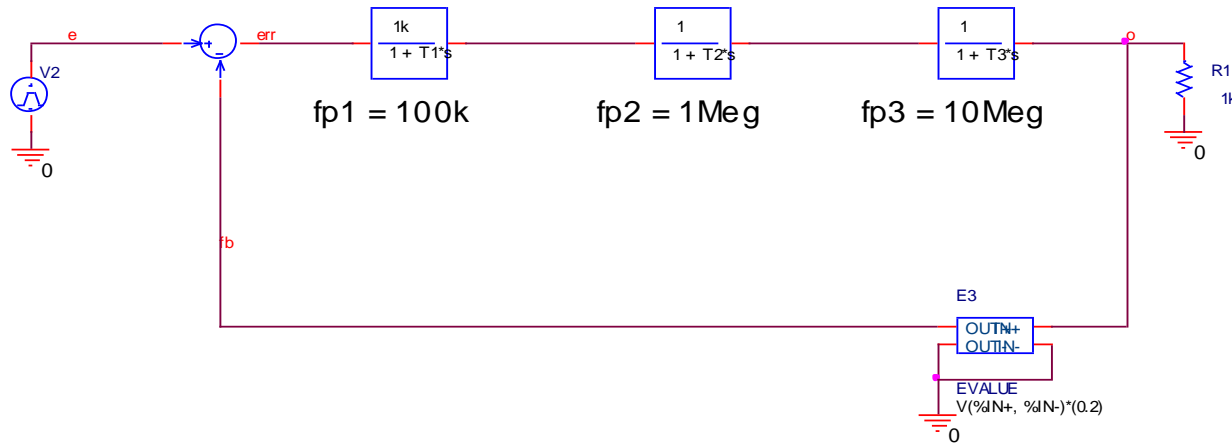
---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



**Ao=1000**

**PARAMETERS:**  
 $T1 = \{1/(6.28*(fp1))\}$   
 $T2 = \{1/(6.28*(fp2))\}$   
 $T3 = \{1/(6.28*(fp3))\}$



**B=0,2**

© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013

# Cartagena99

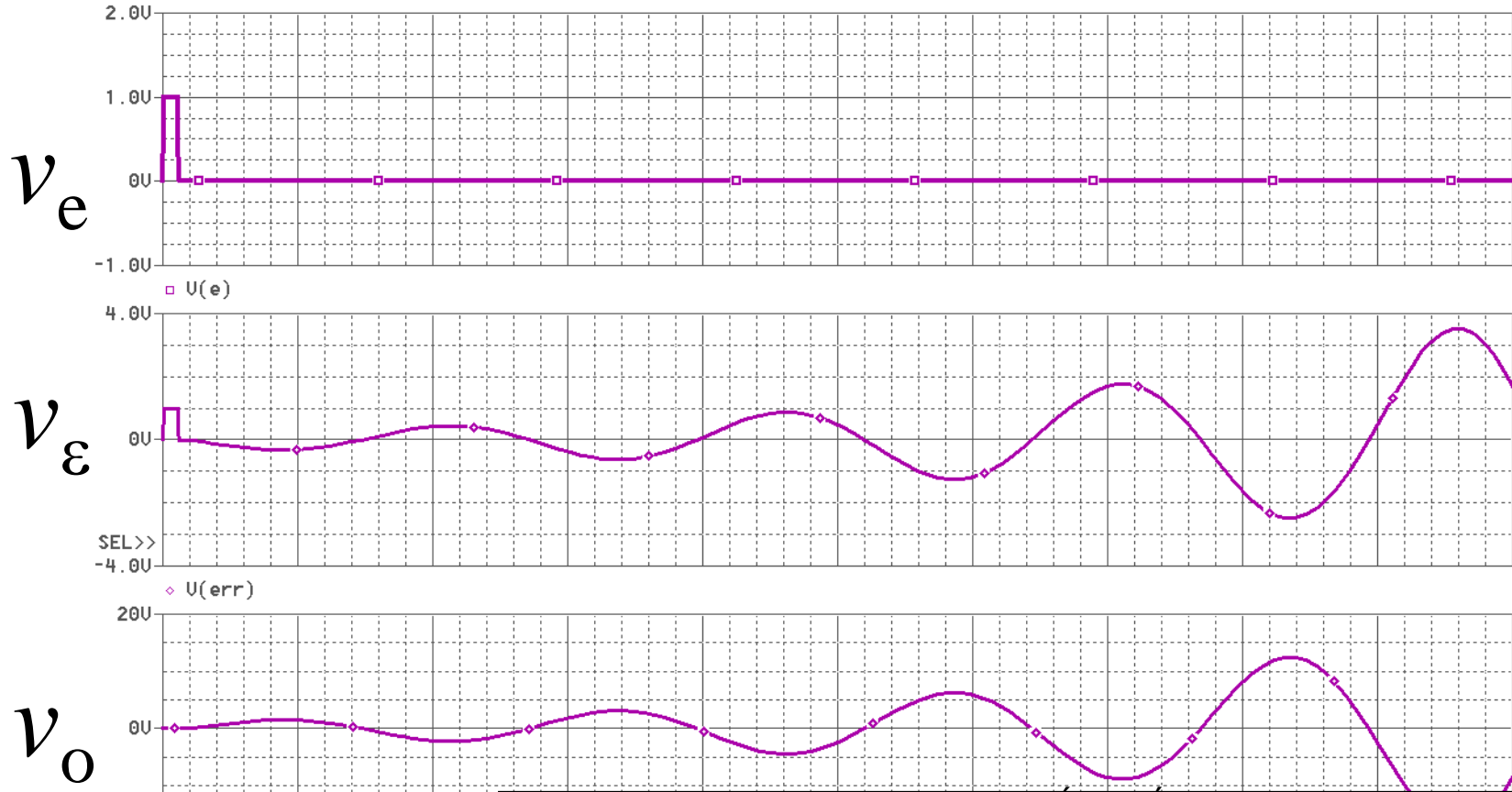
**CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70**

---

**ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70**



# Concepto inestabilidad



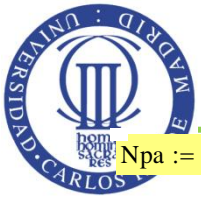
© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013

**CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE**  
**LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70**

---

**ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS**  
**CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70**

Cartagena99



$Npa := 20$

$Aa := 100$

$\beta a := 0.005$

$Vg = 1$

$p := 0..Npa - 1$

$q := 1..6$

# Concepto inestabilidad

## ¿Qué ha pasado?

$q =$   $Ve(Npa, Aa, \beta a)_q = V\epsilon(Npa, Aa, \beta a)_q =$

1	1	1
2	1	0.5
3	1	0.75
4	1	0.625
5	1	0.688
6	1	0.656

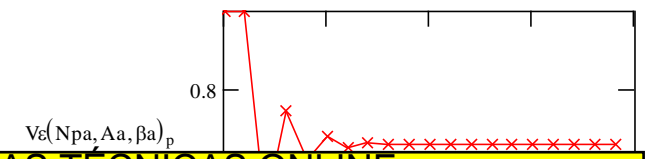
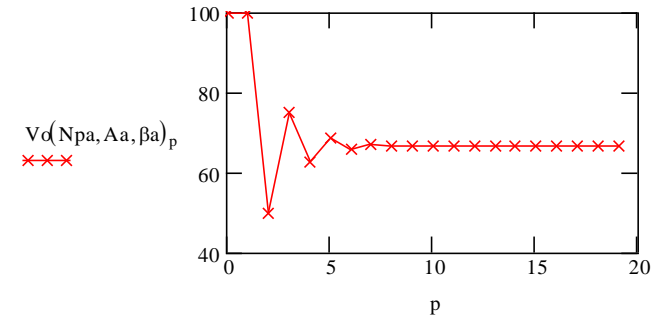
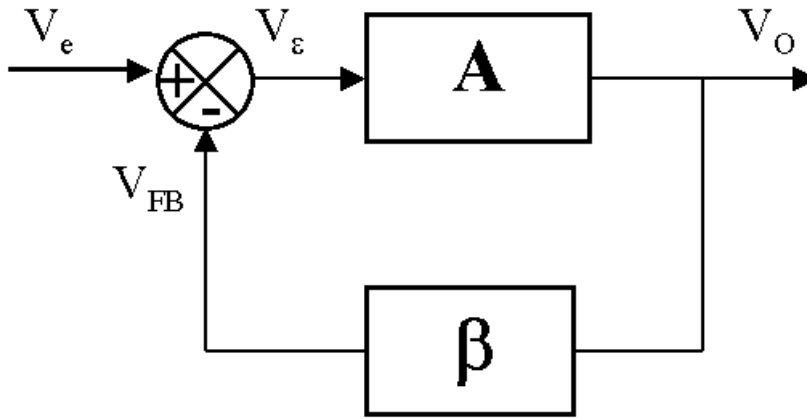
$Vo(Npa, Aa, \beta a)_q =$

100
50
75
62.5
68.75
65.625

$Aa = 100$

$Aa \cdot \beta a = 0.5$

$$\frac{Aa}{(1 + Aa \cdot \beta a)} = 66.667$$



© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Negativa



Npa := 20

Aa := -100

βa := 0.005

Vg = 1

p := 0..Npa - 1

q := 1..6

# Concepto inestabilidad

## ¿Qué ha pasado?

$$q = \quad V_e(Npa, Aa, \beta a)_q = V_\varepsilon(Npa, Aa, \beta a)_q =$$

1
2
3
4
5
6

1
1
1
1
1
1

1
1.5
1.75
1.875
1.938
1.969

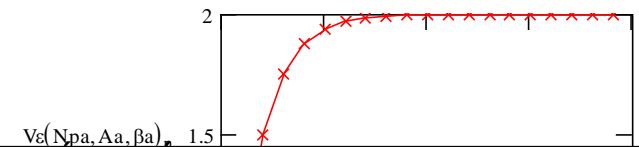
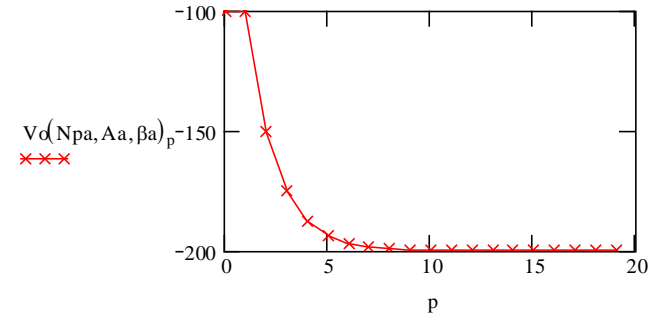
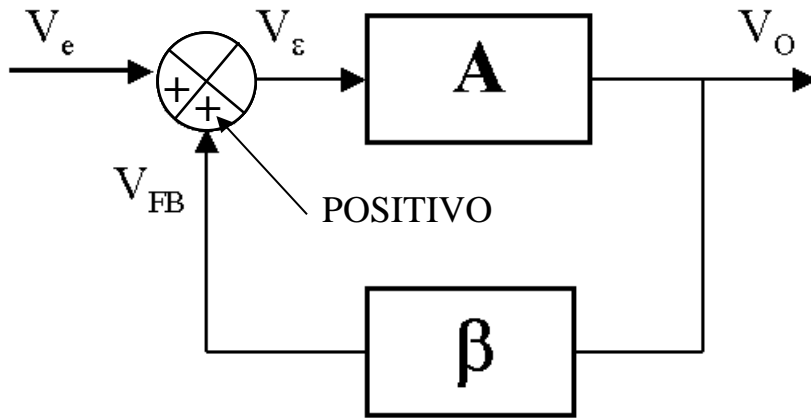
$$V_o(Npa, Aa, \beta a)_q =$$

-100
-150
-175
-187.5
-193.75
-196.875

$$Aa = -100$$

$$Aa \cdot \beta a = -0.5$$

$$\frac{Aa}{(1 + Aa \cdot \beta a)} = -200$$



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

-0.969

$A \cdot \beta < 0$

positiva estable



Npa := 10

Aa := -100

βa := 0.05

Vg = 1

p := 0..Npa - 1

q := 1..6

# Concepto inestabilidad

## ¿Qué ha pasado?

$$q = \text{Ve}(Npa, Aa, \beta a)_q = \text{V}\epsilon(Npa, Aa, \beta a)_q =$$

1	1	1
2	1	6
3	1	31
4	1	156
5	1	781
6	1	3.906 · 10 <sup>3</sup>

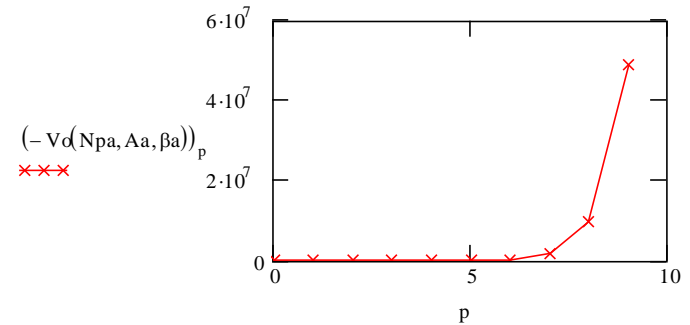
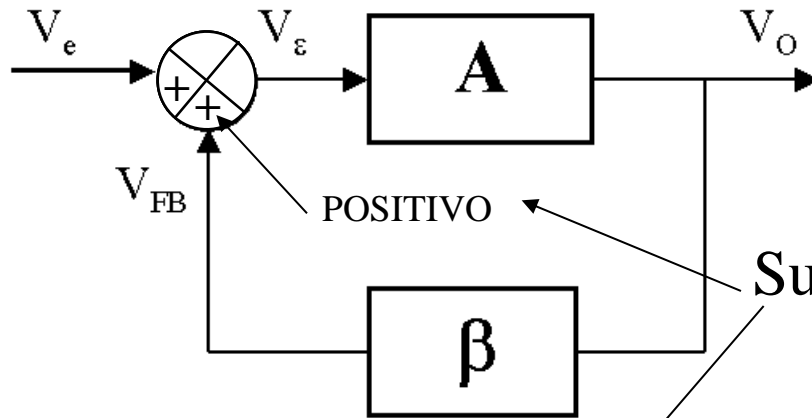
$$\text{Vo}(Npa, Aa, \beta a)_q =$$

-100
-600
-3.1 · 10 <sup>3</sup>
-1.56 · 10 <sup>4</sup>
-7.81 · 10 <sup>4</sup>
-3.906 · 10 <sup>5</sup>

Aa = -100

Aa · βa = -5

$$\frac{Aa}{(1 + Aa \cdot \beta a)} = 25$$



Suponer una frecuencia en la que

**Realimentación positiva**

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

en pasadas sucesivas por el lazo

Cartagena99

1.953 · 10<sup>4</sup>

A β < 0

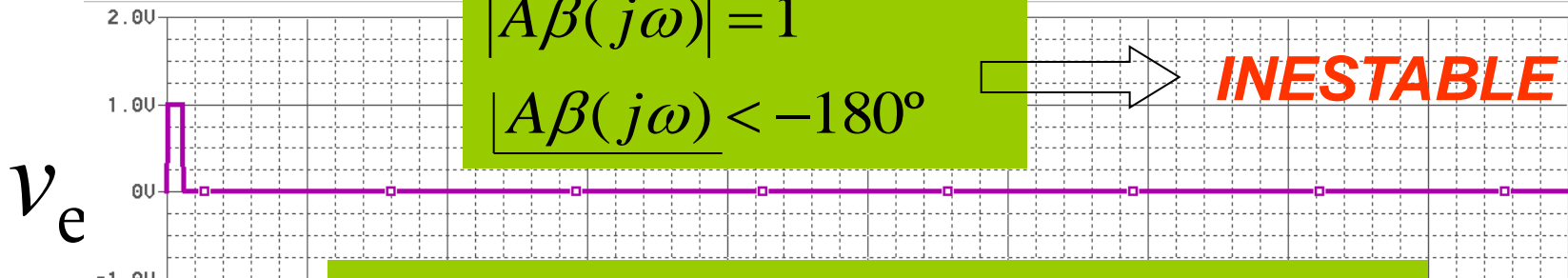
© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013

¿Qué ha pasado? Alguna de las frecuencias contenidas en la entrada cumple la condición:

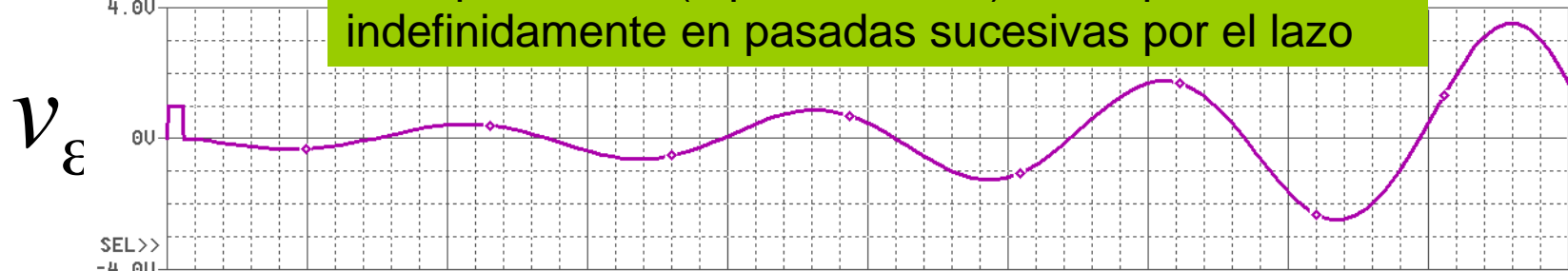
$$|A\beta(j\omega)| = 1$$

$$A\beta(j\omega) < -180^\circ$$

**INESTABLE**



Cualquier señal (1 pulso o ruido) se amplifica indefinidamente en pasadas sucesivas por el lazo



250ns

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

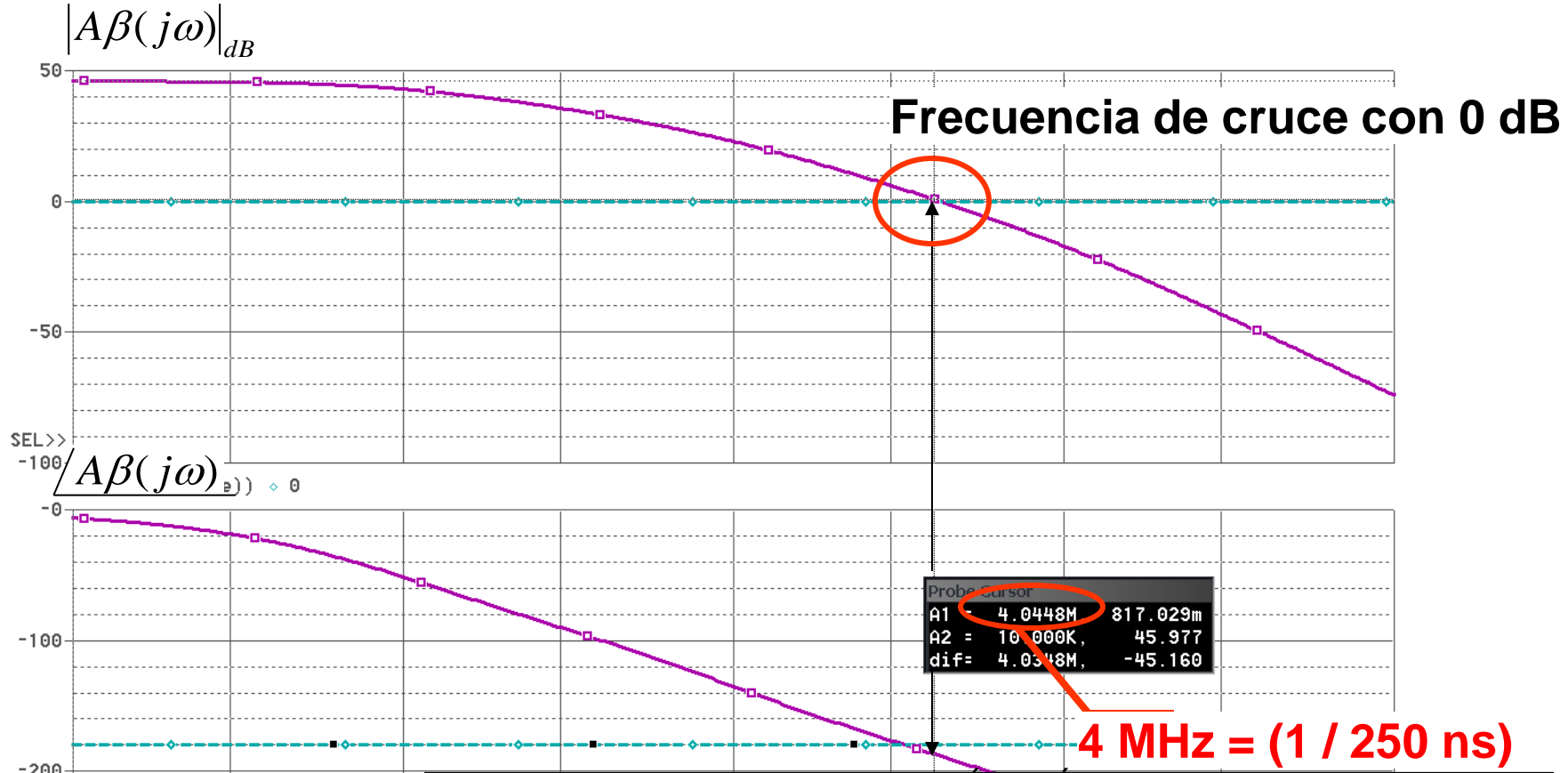
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013

Cartagena99



# Inestabilidad en el diagrama de Bode



© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013

# Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

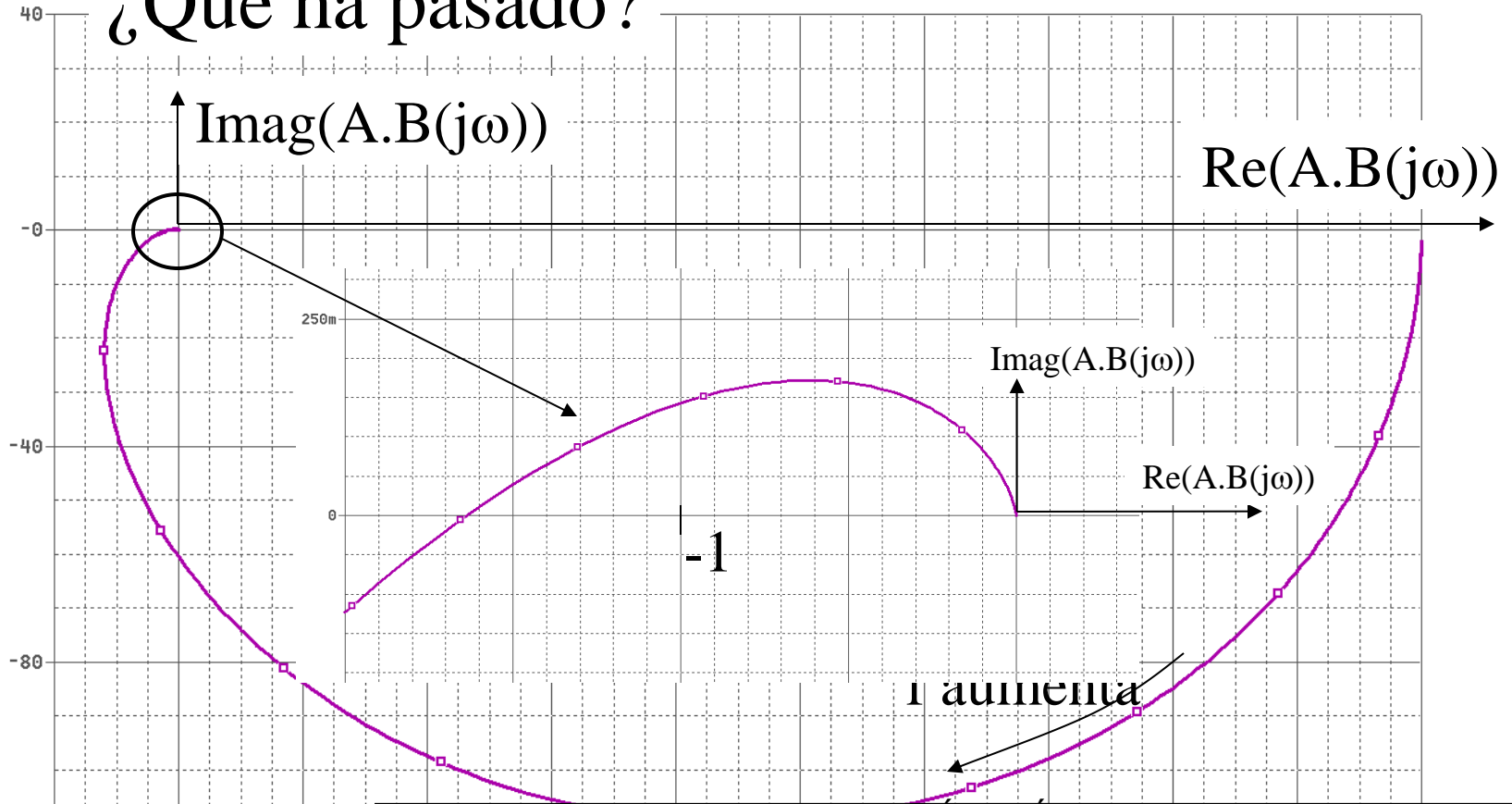
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Frequency



# Inestabilidad en el diagrama polar. Criterio estabilidad Nyquist

## ¿Qué ha pasado?



© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

# Cartagena99



# La realimentación negativa se vuelve positiva

## ¿Qué ha pasado?

- **Hemos pensado un circuito para que tenga realimentación negativa, pero...**
- **... a una determinada frecuencia se vuelve positiva.**
- **Esto se debe a la inversión de fase que se produce a frecuencias suficientemente grandes.**



## Hay que tratar de evitar:

“ ... que a la frecuencia para la que la ganancia de lazo se hace igual a la unidad ( $A_{OL} = 0 \text{ dB}$ ) se produce un  $\pm 180^\circ$  ”

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

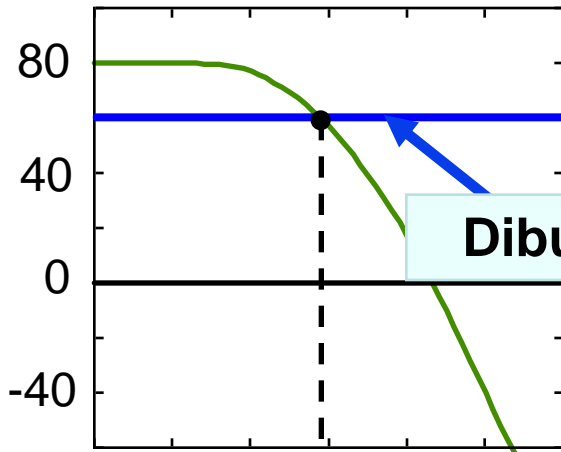
Cartagena99



# Margen de fase y Margen de ganancia

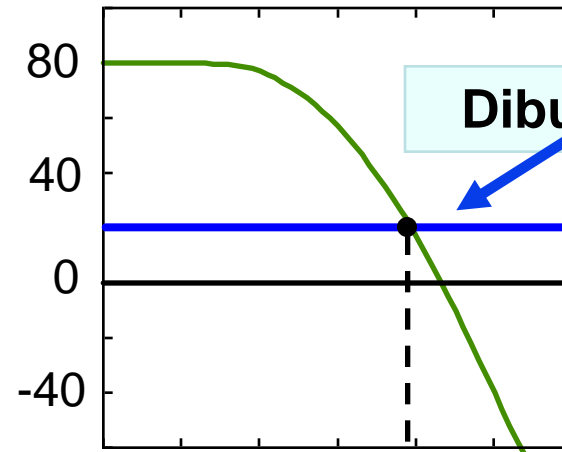
## Método sistemático de analizar la estabilidad

|A| [dB]



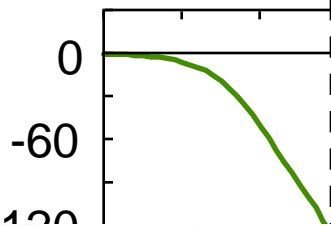
Dibujamos  $1/\beta$

|A| [dB]



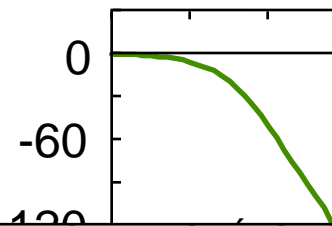
Dibujamos  $1/\beta$

A [°]



No llega a  $-180^\circ$ :  
sistema estable

A [°]



Sobrepasa  $-180^\circ$ :  
sistema inestable

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

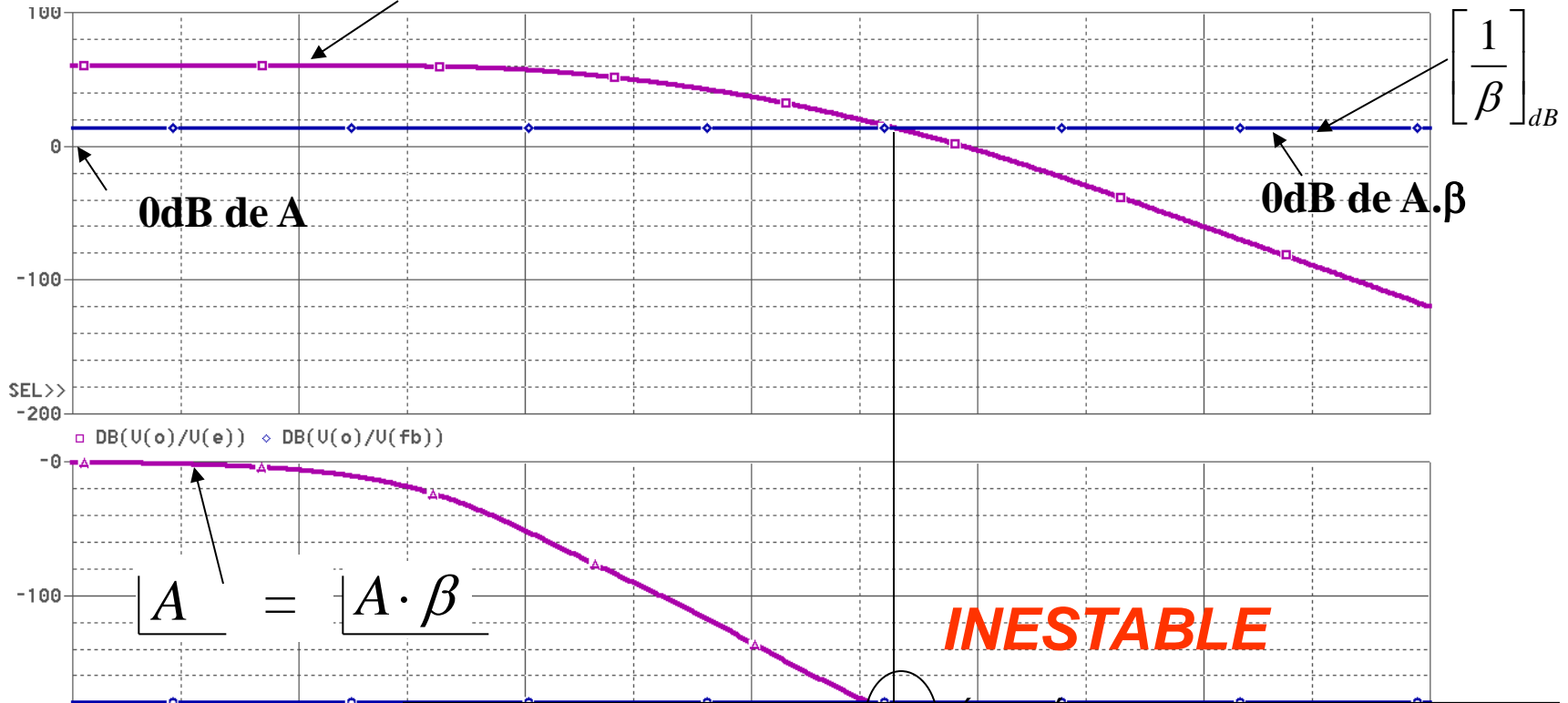
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



# Margen de fase y Margen de ganancia

## Para el ejemplo de amplificador con tres polos

$|A|_{dB}$  pasa a ser  $|A \cdot \beta|_{dB}$



© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013

# Cartagena99

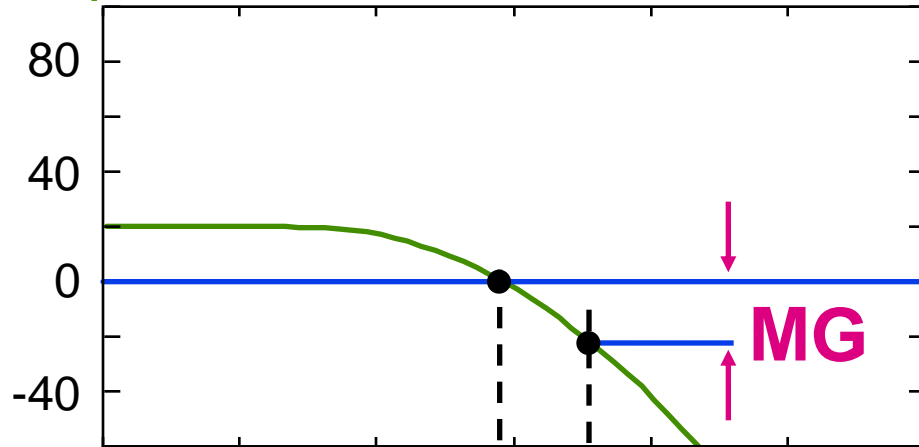
CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

## Conceptos útiles en sistemas estables

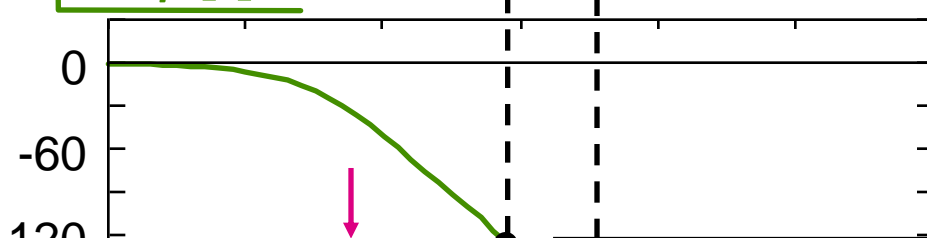
$|A_\beta|$  [dB]



**MG:** *margen de ganancia*

**MF:** *margen de fase*

$A_\beta$  [°]



***Ambos parámetros miden la distancia a las condiciones de inestabilidad, valorada como***

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

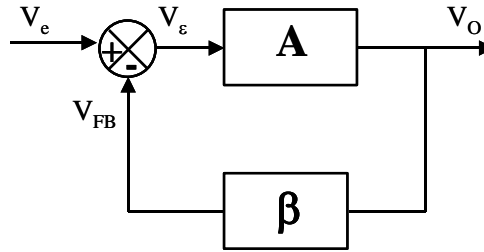
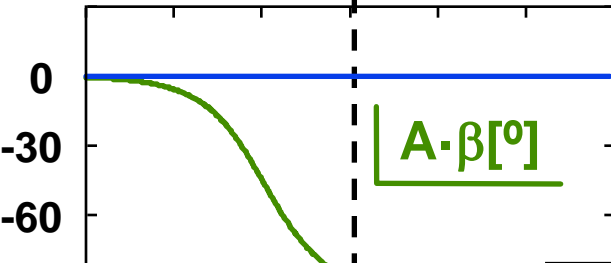
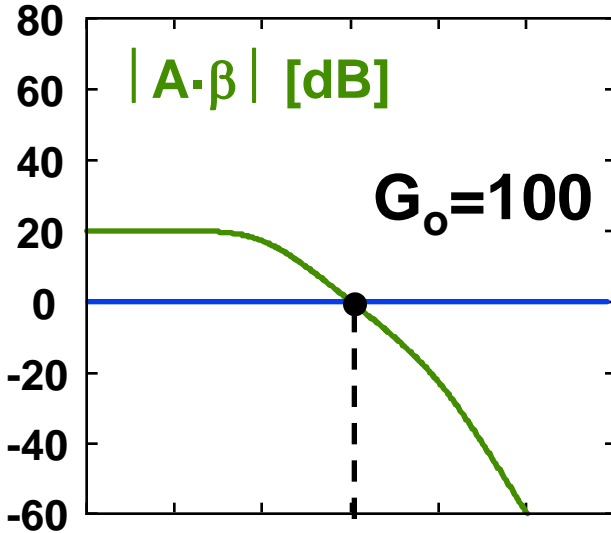
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

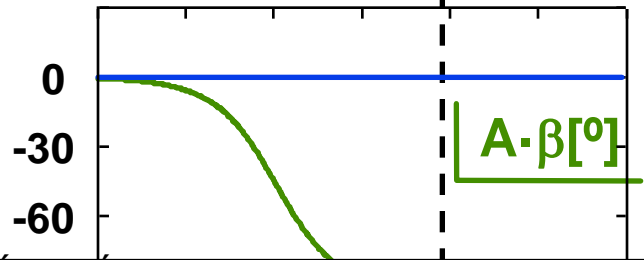
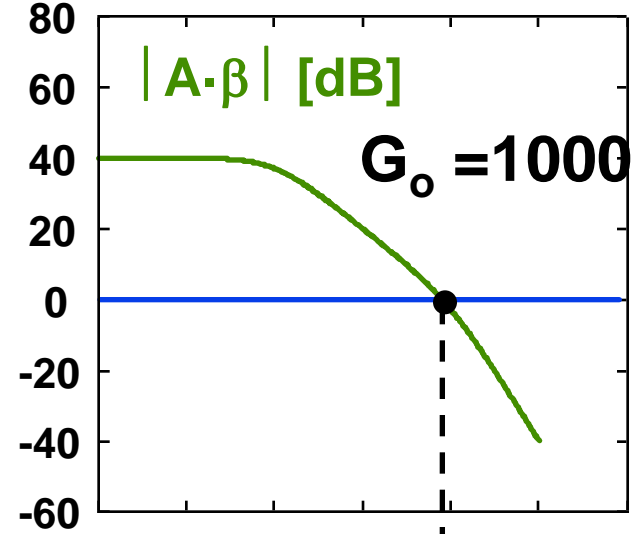


# Margen de fase y Margen de ganancia

## Dos ejemplos con distinto MF y MG



$G(s) = G_o/P(s)$   
 $\beta = \text{fija} = 10^{-1}$



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013

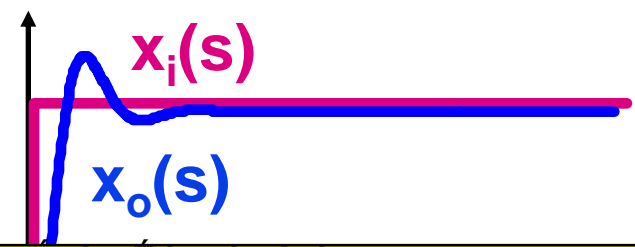
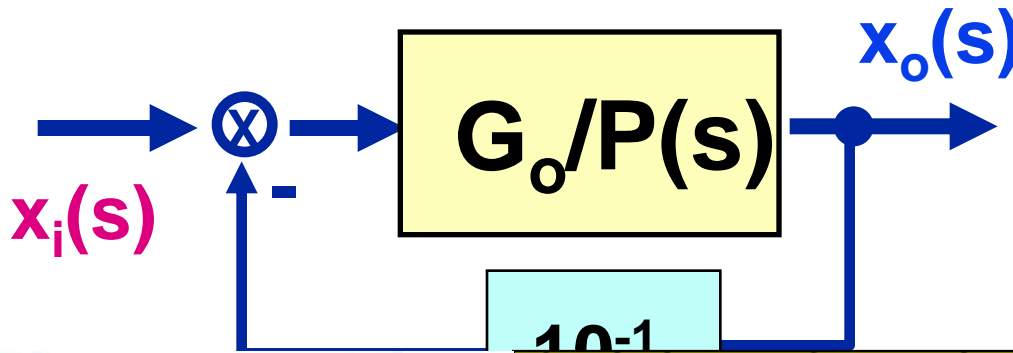
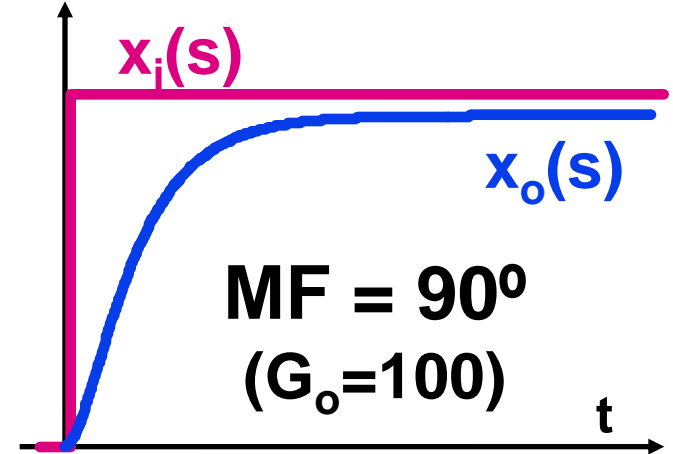
Cartagena99



# Margen de fase y Margen de ganancia

## Dos ejemplos con distinto MF y MG

### Respuesta temporal ante un escalón



© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



# Estudio de la estabilidad en un amplificador real

## Repaso de definiciones:

- **A**: Ganancia de un amplificador sin realimentar
- **A'**: Ganancia del amplificador conteniendo todos los efectos de carga: los suyos propios, los del generador, los de la carga y los de la red  $\beta$  expresada como cuadripolo. Se obtiene tras aplicar el método práctico y en su expresión aparece la ganancia del amplificador sin realimentar, A.
- **G**: Ganancia en bucle cerrado. Se ha obtenido aplicando las expresiones de realimentación ideal tras haber empleado el método práctico.
- **$\beta_{12}$** : Ganancia ideal de la red  $\beta$  expresada como cuadripolo (relación entre la magnitud que comparo en la entrada de A' y la que realimento de la salida de A').

## Muy importante:

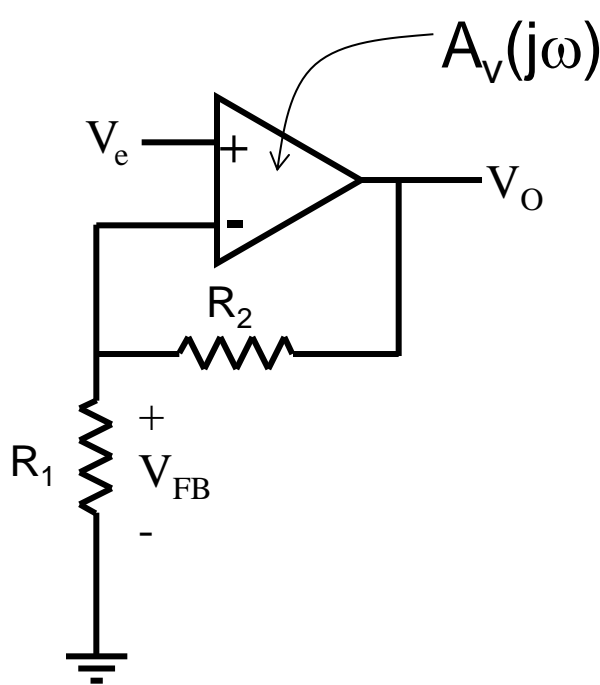
CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

<sup>A'</sup>  
Cartagena99

# Estudio de la estabilidad en un amplificador real



El amplificador operacional tiene una respuesta en frecuencia  $A_v(j\omega)$

¿Se estudia la estabilidad con  $A_v\beta$ ?

**Muy importante:**

El estudio de la estabilidad siempre hay que hacerlo sobre  $A'\beta(j\omega)$ , nunca sobre  $A_v(j\omega)$ .

Esto se debe a que la expresión del lazo cerrado  $G$  habla de  $A'\beta$  no de  $A_v\beta$

Cartagena99

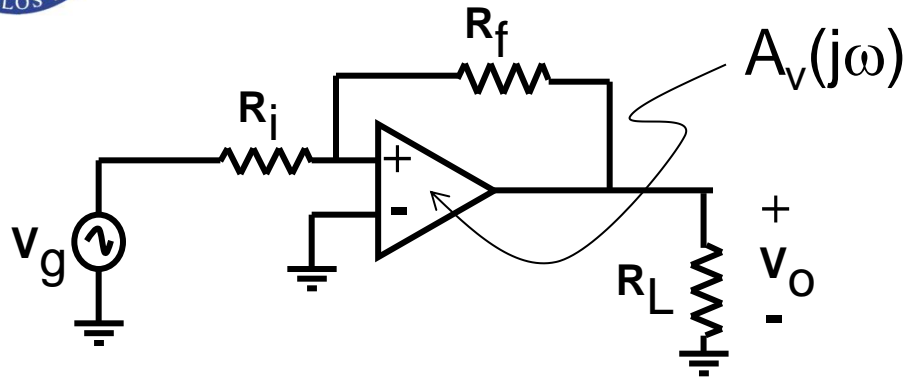
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



# Estudio de la estabilidad en un amplificador real



El amplificador operacional tiene una respuesta en frecuencia  $A_v(j\omega)$

**El amplificador operacional es un amplificador de tensión.**

Sin embargo en esta caso presenta una realimentación **paralelo – paralelo**, que estabiliza una ganancia de **transimpedancia**

El estudio de la estabilidad siempre habrá que hacerlo sobre  $A_z \beta_Y(j\omega)$ , nunca sobre  $A_v \beta(j\omega)$ .

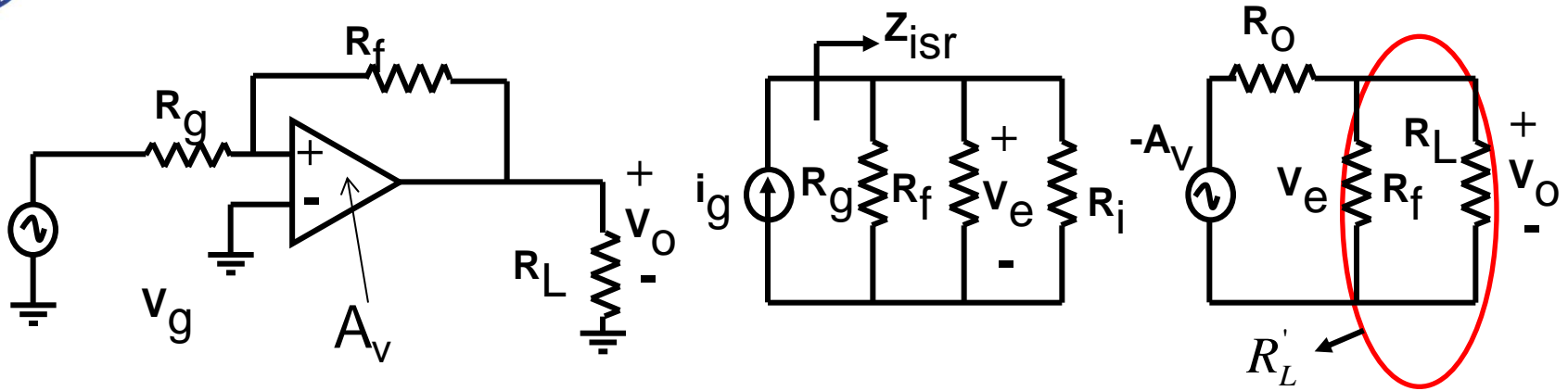
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

# Estudio de la estabilidad en un amplificador real



$$\beta_{11} = \frac{1}{R_f} \quad \beta_{12} = \beta_Y = -\frac{1}{R_f} \quad \beta_{22} = \frac{1}{R_f}$$

$$A'_Z = \frac{V_o}{V_1} \cdot \frac{V_1}{V_e} \cdot \frac{V_e}{R_g}$$

Donde :  $\frac{V_e}{i_g} = Z_{isr}, \frac{V_1}{V_e} = -A_v, \frac{V_o}{V_1} = \frac{R'_L}{R'_L + R_o}$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



# Estudio de la estabilidad en un amplificador real

Aplicando las expresiones de la realimentación ideal:

$$G_z = \frac{V_o}{i_g} = \frac{A'_z}{1 + A'_z \cdot \beta_{12}} = \frac{-Z_{isr} \cdot A_v \cdot D_o}{1 + Z_{isr} \cdot A_v \cdot D_o \cdot \frac{1}{R_f}}$$

$$\frac{V_o}{V_g} = \frac{V_o}{i_g} \cdot \frac{i_g}{V_g} = G_z \cdot \frac{1}{R_g}$$

$$G_v = G_z \cdot \frac{1}{R_g} = \frac{-Z_{isr} \cdot A_v \cdot D_o \cdot \frac{1}{R_g}}{1 + Z_{isr} \cdot A_v \cdot D_o \cdot \frac{1}{R_f}}$$

# Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

$\omega_{pd}$



# Estudio de la estabilidad en un amplificador real

## Estudio de la estabilidad como transimpedancia

$$G_z = \frac{A'_z}{1 + A'_z \cdot \beta_y}$$

$A'_z \cdot \beta_y \gg 1 \longrightarrow G_z = \frac{1}{\beta_y} = R_f$   
 $A'_z \cdot \beta_y \ll 1 \longrightarrow G_z = A'_z$

¿Cómo es  $A'_z$  ?

etapa inversora

$$A'_z = Z_{isr} \cdot [\ominus A_v(j\omega)] \cdot D_o$$

Asumiendo que  $D_o \approx 1$  nos quedaría :

$$A'_z = Z_{isr} \cdot (-1) \cdot A_v(j\omega) = -Z_{isr} \cdot \frac{A_o}{1 + j \frac{\omega}{\omega_p}}$$

# Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

$\omega_p$

$\omega_p$



# Estudio de la estabilidad en un amplificador real

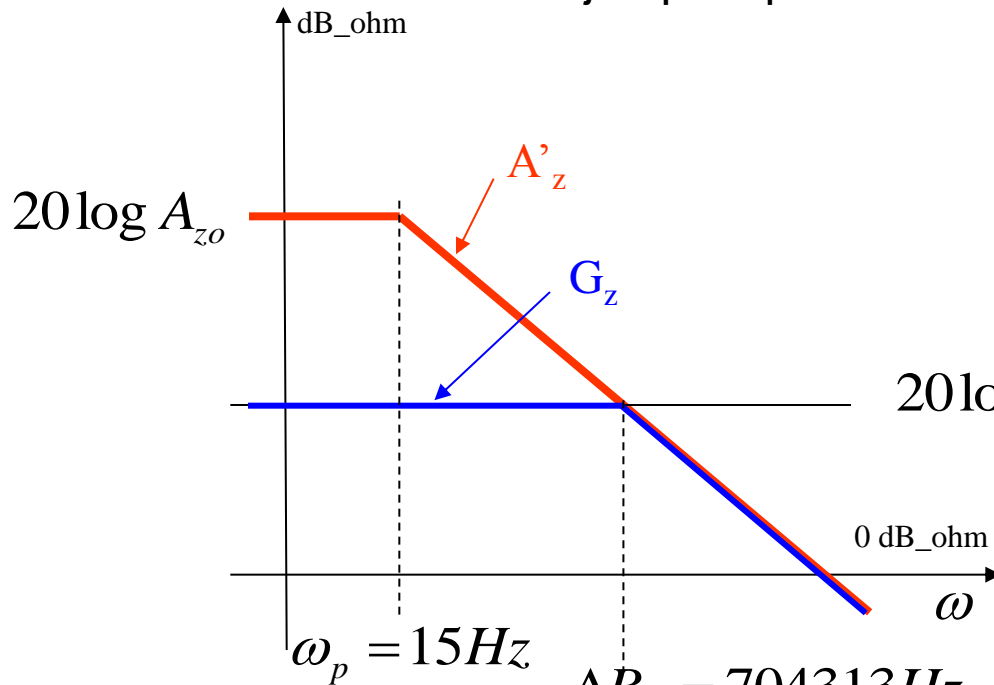
## Estudio de la estabilidad como transimpedancia

Ejemplo aplicado:  $R_g = 10k$     $R_f = 50k$     $Z_{isr} = 8.33k$

$$A_o = 109dB \equiv 281838$$

$$A_{zo} = A_o \cdot Z_{isr} = 187.41dB$$

$$\omega_p = 15Hz$$



$$20 \log R_f = 20 \log(50k) = 94dB\_ohm$$

Aplicando  $G \times \Delta B = cte.$

$$\Delta B_z = \frac{281838 \cdot 8.33 \cdot 10^3 \cdot 15}{50 \cdot 10^3} = 704313Hz$$

$$\Delta B_z = 704313Hz$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

$\frac{dB\_ohm}{\omega} = 20 \log(10)$



# Estudio de la estabilidad en un amplificador real

## Estudio de la estabilidad como transtensión

$$G_v = G_z \cdot \frac{1}{R_g} = \frac{A'_z}{1 + A'_z \cdot \beta_y} \cdot \frac{R_g}{R_g} \Rightarrow \beta_y = -\frac{1}{R_f} \begin{cases} A'_z \cdot \beta_y \gg 1 \Rightarrow G_v = \frac{1}{\beta_y \cdot R_g} = -\frac{R_f}{R_g} \\ A'_z \cdot \beta_y \ll 1 \Rightarrow G_v = A'_z \cdot \frac{1}{R_g} = A'_v \end{cases}$$

¿Cómo es  $A'_v$  ?

$$A'_v = A'_z \cdot \frac{1}{R_g} = Z_{isr} \cdot [-A_v(j\omega)] \cdot D_o \cdot \frac{1}{R_g}$$

Asumiendo que  $D_o \approx 1$  nos quedaría :

$$A'_v = \frac{Z_{isr}}{R_g} \cdot [-A_v(j\omega)] = -\frac{Z_{isr}}{R_g} \cdot \frac{A_o}{1 + j\frac{\omega}{\omega_c}} \quad A'_o = -\frac{A'_o}{1 + j\frac{\omega}{\omega_c}}$$

# Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

$R_g$



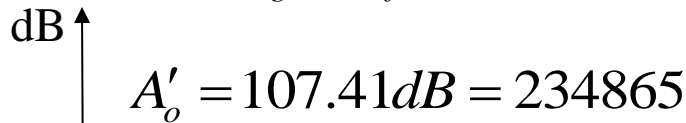
# Estudio de la estabilidad en un amplificador real

Lo aplicamos al mismo ejemplo anterior teniendo en cuenta:

$$Z_{isr} \approx \frac{R_g \cdot R_f}{R_g + R_f}$$

$$A'_o = \frac{R_g \cdot R_f}{R_g + R_f} \cdot \frac{1}{R_g} \cdot A_o$$

$$A'_o = \frac{R_f}{R_g + R_f} \cdot A_o = \frac{50k}{10k + 50k} \cdot 281838 = 234865 = 107.41dB$$



$$20 \log \frac{R_f}{R_g} = 20 \log(5) = 13.98dB$$

Aplicando  $G \times \Delta B = cte.$

$$\Delta B_V = \frac{234865 \cdot 15}{1} = 704595Hz$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

$$\Delta B_V = 704595Hz$$

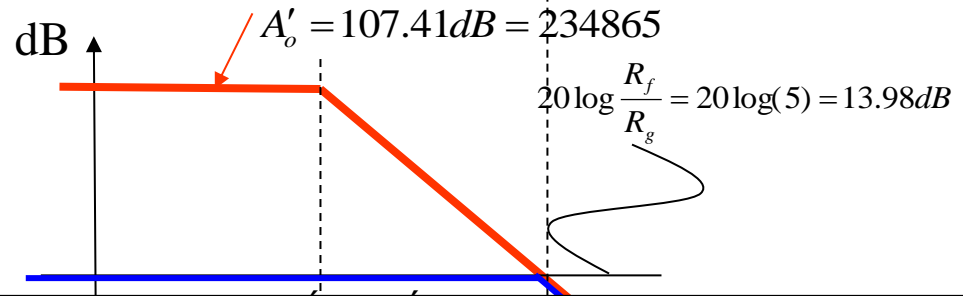
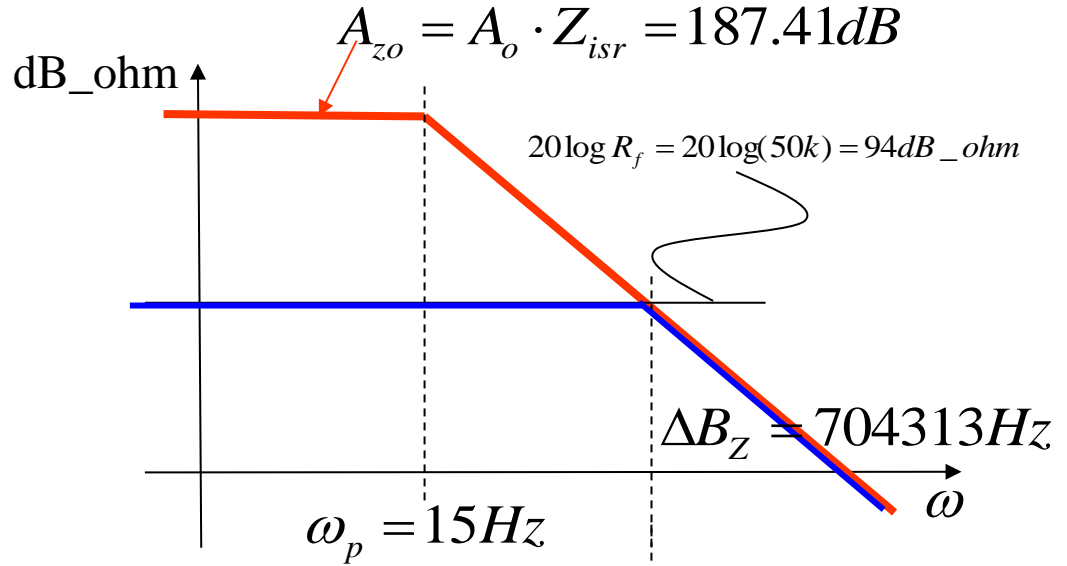
Cartagena99



# Estudio de la estabilidad en un amplificador real

## Comparación $G_Z$ y $G_V$

Las escalas se han modificado, pero el polo dominante y el ancho de banda se conservan



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99





# Estudio de $A'\beta(j\omega)$ a partir de $A(j\omega)$

## Los cero dB de $A'\beta(j\omega)$

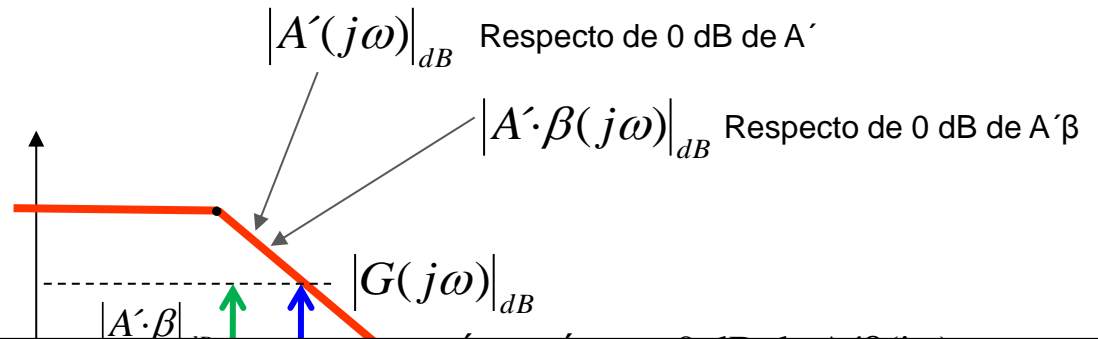
La estabilidad se estudia a partir de  $A'\beta(j\omega)$ , sin embargo el dato que se conoce a priori es  $A(j\omega)$ , ni siquiera  $A'(j\omega)$ . Por tanto se trata de representar gráficamente  $A'\beta(j\omega)$  a partir de  $A(j\omega)$ . **¿Qué modificación supone  $\beta$ ?**

$$|A'\beta|_{dB} = |A'|_{dB} + 20 \cdot \log(\beta) = |A'|_{dB} + \text{constante}$$

Esta constante supone un cambio de eje

$$|A'\beta|_{dB} - 20 \cdot \log(\beta) = |A'|_{dB}$$

$$|A'\beta|_{dB} + 20 \cdot \log\left(\frac{1}{\beta}\right) = |A'|_{dB}$$



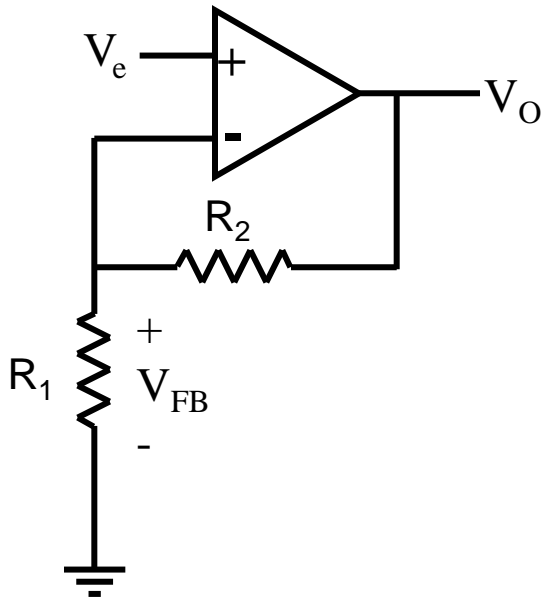
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

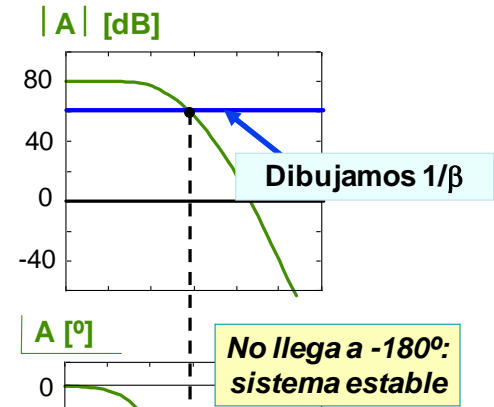
## ¿Cual es la red $\beta$ más desfavorable de cara a la estabilidad?



Si para este amplificador queremos una ganancia de 3 en bucle cerrado,  $G$ , elegiremos por ejemplo  $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$  y  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$  dado que:

$$G = \frac{1}{\beta} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad \beta = \frac{V_{FB}}{V_O} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1}}$$

Al imponer  $G$  se impone el valor de  $1/\beta$ . ¿Qué valor de  $G$  o de  $1/\beta$  acerca más al amplificador a la inestabilidad?



$$\left[ \frac{1}{\beta} \right] = 20 \cdot \log\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

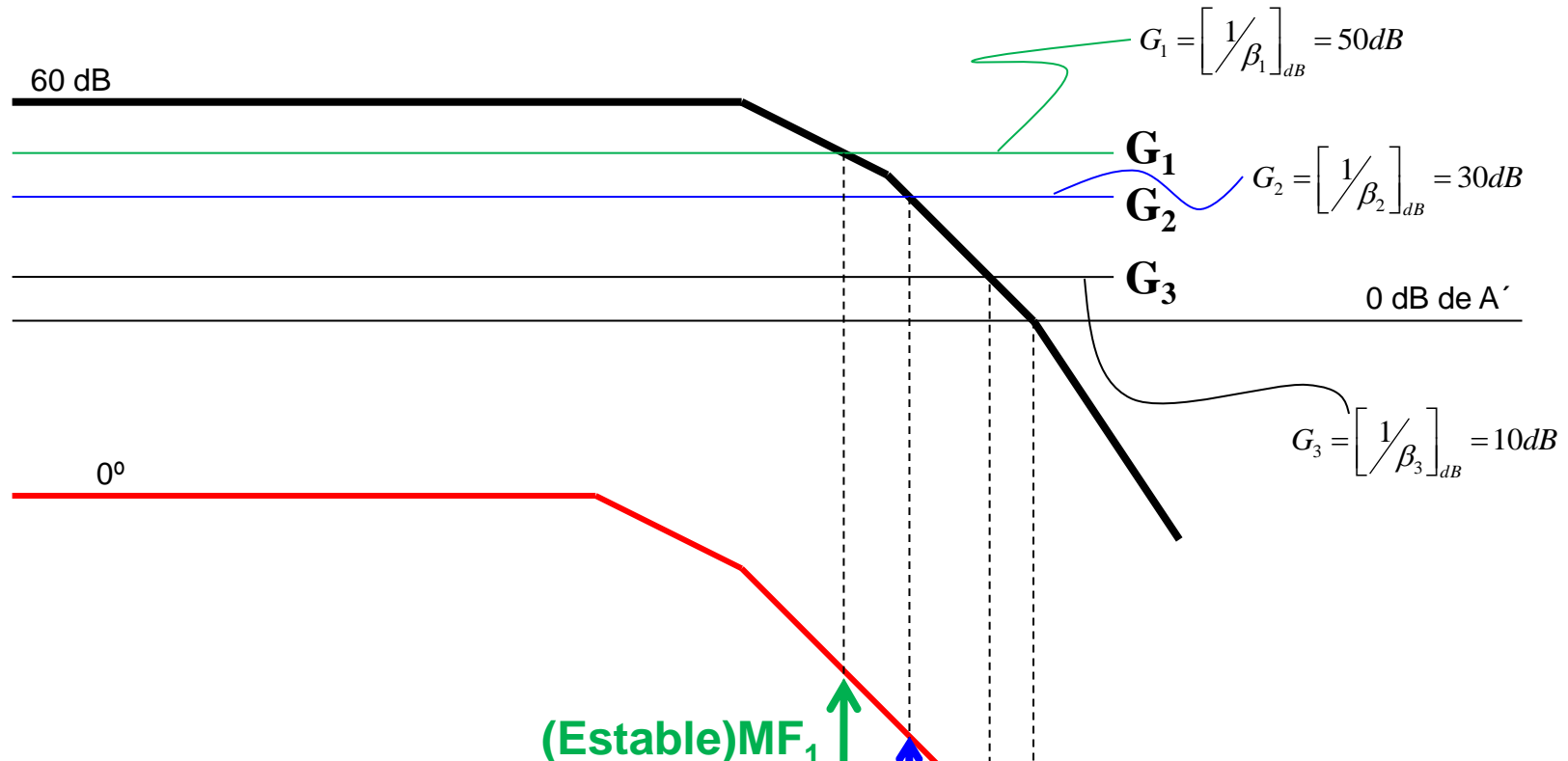
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

1 10<sup>2</sup> 10<sup>4</sup> 10<sup>6</sup>

¿Cual es la red  $\beta$  más desfavorable de cara a la estabilidad?

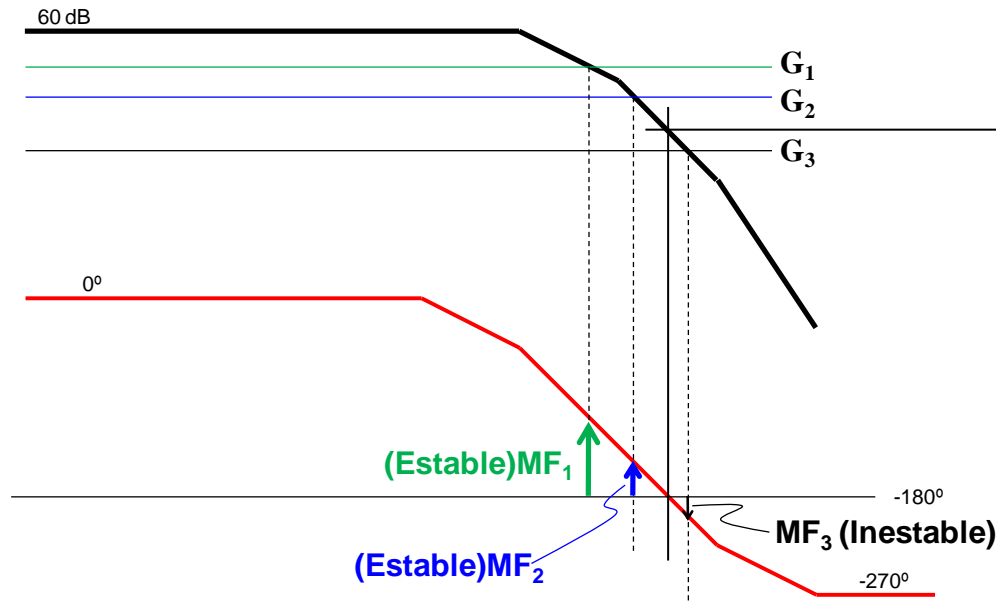


CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

## ¿Cual es la red $\beta$ más desfavorable de cara a la estabilidad?



**$G_{LIM}$**  Este es el valor de la ganancia límite. Para valores de  $G$  inferiores, el amplificador ya no es estable.

### Muy importante:

- Conforme  $G$  se reduce, se reduce también el margen de fase

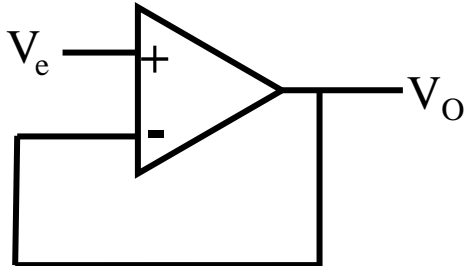
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

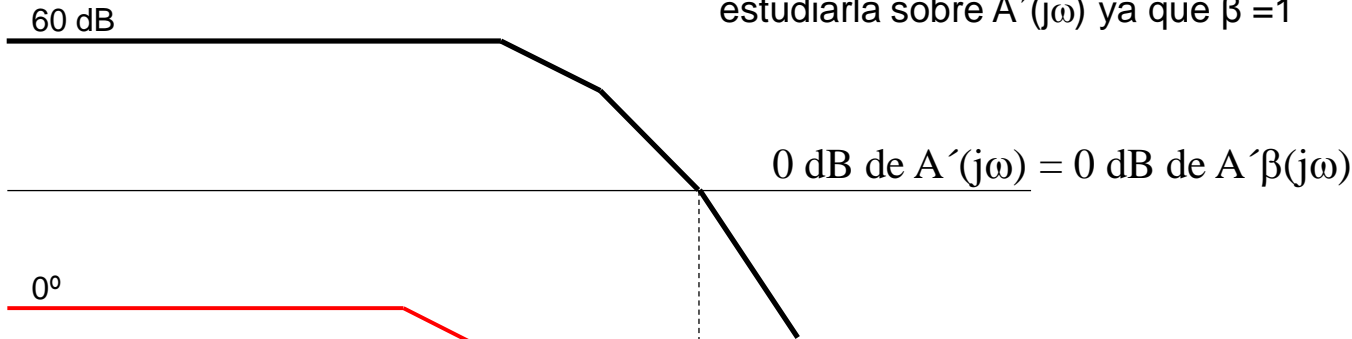
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

## ¿Cual es la red $\beta$ más desfavorable de cara a la estabilidad?



$$G=1 \rightarrow \beta=1$$

- **El seguidor de tensión** es el peor caso desde el punto de vista de la estabilidad.
- Si se asegura la estabilidad para este caso, se asegurará para cualquier otro valor de  $\beta$
- Ahora estudiar la estabilidad sobre  $A'\beta(j\omega)$  es lo mismo que estudiarla sobre  $A'(j\omega)$  ya que  $\beta=1$



Amplificador **inestable** para

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99



1. Dinámica de los sistemas realimentados
  - 1.1 Función de transferencia
  - 1.2 Dinámica en bucle abierto y en bucle cerrado
2. Respuesta en frecuencia de amplificadores realimentados
  - 2.1 Función de transferencia y Respuesta en frecuencia
  - 2.2 Diagrama de Bode y Diagrama Polar
  - 2.3 Respuesta transitoria y la Respuesta en frecuencia
  - 2.4 Respuesta en frecuencia en bucle cerrado
  - 2.5 Producto Ganancia x Ancho de banda
  - 2.6 Respuesta en frecuencia de amplificadores con varios polos
  - 2.7 “Slew-rate” de amplificadores realimentados
  - 2.8 Diagrama asintótico de Bode y Ejemplo de trazado D. Bode y D. polar
3. Estudio de la estabilidad
  - 3.1 Efectos de la realimentación negativa
  - 3.2 Concepto inestabilidad
  - 3.2 Inestabilidad en el diagrama de Bode
  - 3.3 Inestabilidad en el diagrama polar. Criterio estabilidad Nyquist
  - 3.4 La realimentación negativa se vuelve positiva
  - 3.5 Margen de Fase y Margen de Ganancia
  - 3.6 Estudio de la estabilidad en un amplificador real
  - 3.7 Estudio de  $A\beta(j\omega)$  a partir de  $A(j\omega)$
  - 3.8 La red  $\beta$  y la estabilidad
  - 3.9 Compensación polo - cero

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

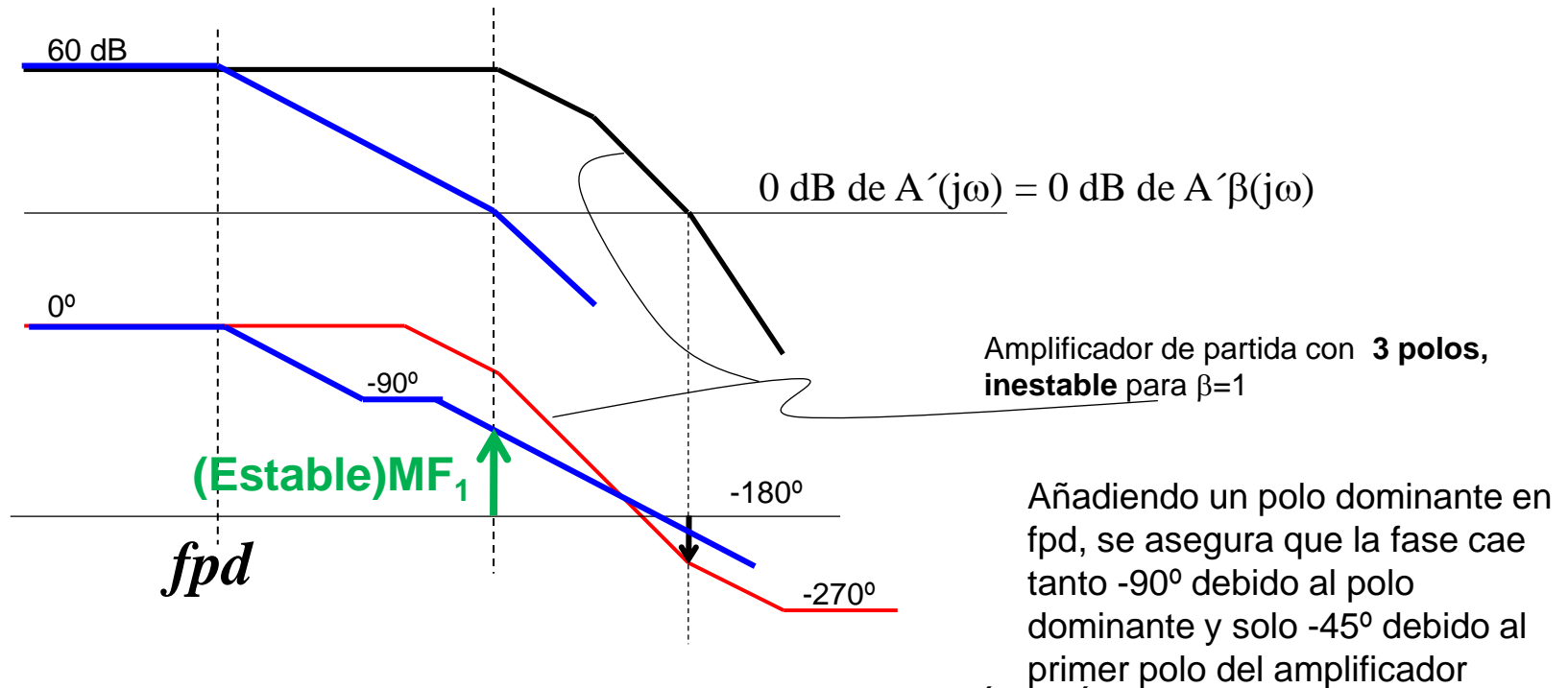
---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013

Cartagena99

¿Cómo podemos asegurar que este amplificador con tres polos sea estable incluso para  $\beta=1$ ?



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



# Compensación por polo dominante

## Pasos para imponer un margen de fase

Calcular la frecuencia de cruce con los 0 dB del nuevo Bode que incluye el polo dominante,  $f_{cruce}$

$$\angle A' \beta \cdot P_D = \angle P_D + \angle A' + \angle \beta = -180^\circ + MF$$

$\begin{matrix} -90^\circ \nearrow & & 0^\circ \nearrow \end{matrix}$

$$\angle A'(j \cdot f_{cruce}) = -90^\circ + MF \Rightarrow f_{cruce}$$

Identificar el nº de polos a la izquierda de  $f_{cruce}$

**1 solo polo, el polo dominante,** ya que a la  $f_{cruce}$  la fase solo ha podido bajar hasta  $-135^\circ$  si  $MF=45^\circ$ . El  $P_D$  contribuye con  $-90^\circ$  por tanto el polo 1 solo puede añadir  $-45^\circ$ . ¿A que frecuencia añade el polo 1  $-45^\circ$ ? Justo a  $f_{p1}$ .

Si

$MF \geq 45$

No

**2 polos: el polo dominante y el polo 1,** ya que si  $MF < 45^\circ$ , a la  $f_{cruce}$  la fase habrá debido caer por debajo de  $-135^\circ$ . El  $P_D$  contribuye con  $-90^\circ$  por tanto el polo 1 ha de añadir más de  $-45^\circ$  lo cual sólo ocurre más allá de  $f_{p1}$ .

$f_{cruce} = f_{p1}$  para  $MF = 45^\circ$   
 $f_{cruce} < f_{p1}$  para  $MF > 45^\circ$

$f_{cruce} > f_{p1}$  para  $MF < 45^\circ$

Trazar desde los 0dB de  $A' \beta \cdot P_D$  subiendo (de dcha. a izq.) con 20 dB/dec. hasta cortar a la ganancia a

Trazar desde los 0dB de  $A' \beta \cdot P_D$  subiendo (de dcha. a izq.) con 40

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70





# Compensación por polo dominante. Requisito cumplir MF

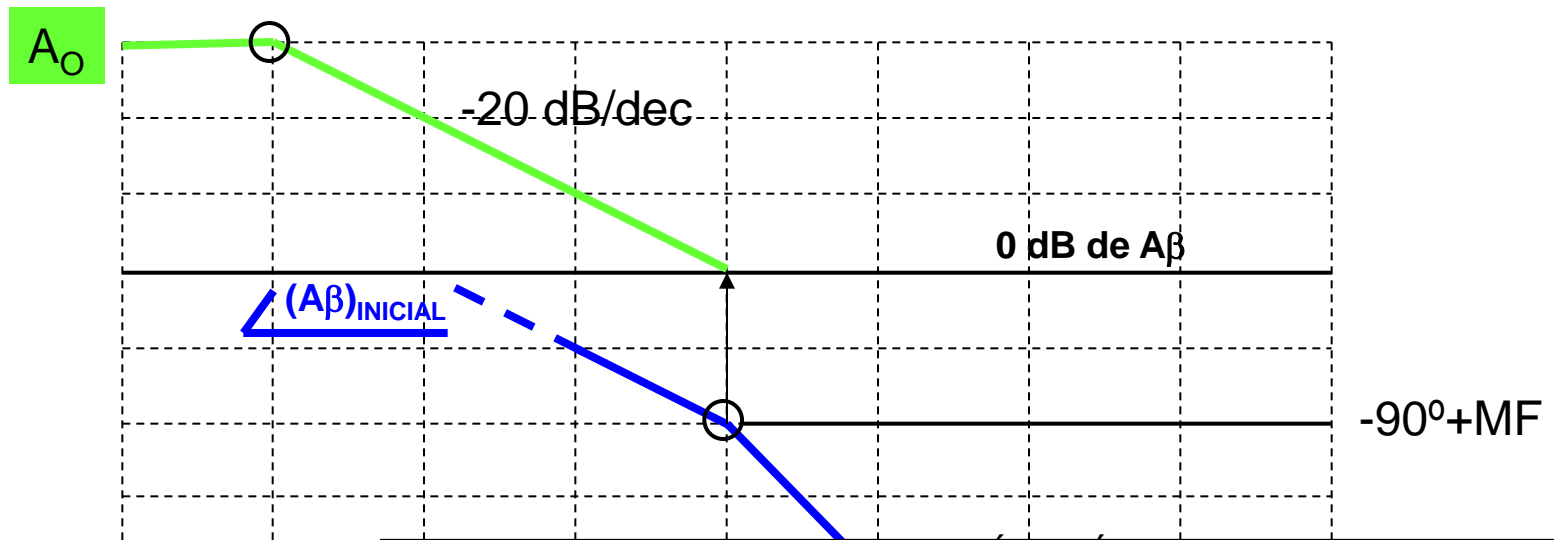
Compensación para obtener un determinado MF

$$\angle A\beta \cdot P_D = \angle P_D + \angle(A\beta)_{INICIAL} = -180^\circ + MF$$

$-90^\circ \rightarrow$

$$\angle(A\beta)_{INICIAL} = -90^\circ + MF$$

A la frec. A la que se cumple esta condición se ha de cumplir:  $|A\beta \cdot P_D| = 0dB$

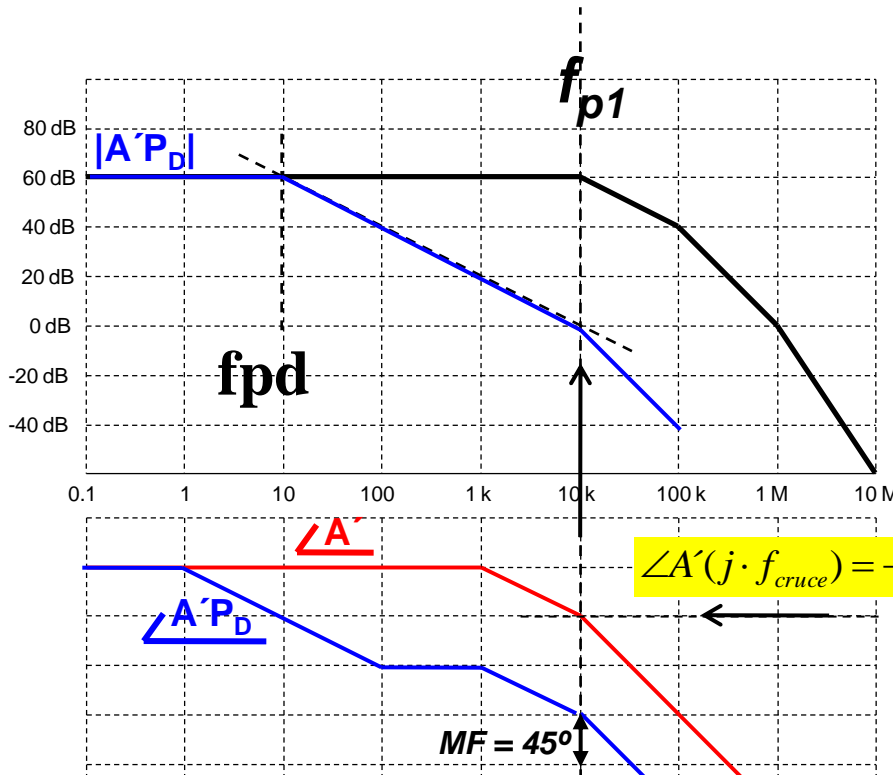


CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

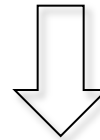
Cartagena99

## Ejemplo 1: Imponer un margen de fase de 45°, para $\beta=1$



¿Cuántos polos hay a la izquierda de  $f_{cruce}$  ?

**1 solo polo, el polo dominante, ya que a la  $f_{cruce}$  la fase solo ha podido bajar hasta  $-135^\circ$  si  $MF=45^\circ$ . El  $P_D$  contribuye con  $-90^\circ$  por tanto el polo 1 solo puede añadir  $-45^\circ$ . ¿A que frecuencia añade el polo 1  $-45^\circ$ ? Justo a  $f_{p1}$ .**



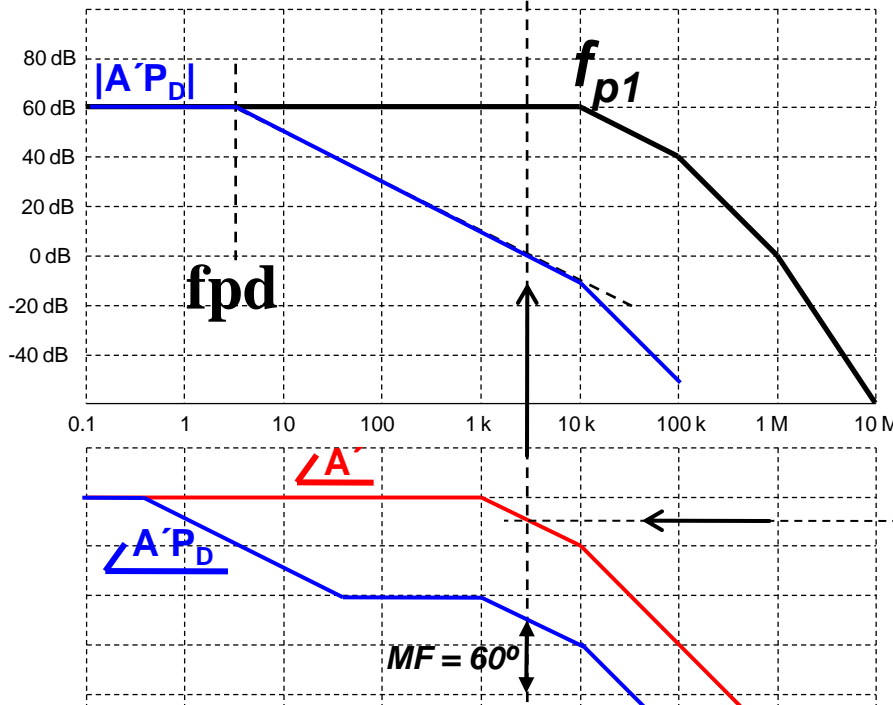
Trazar desde los 0dB de  $A' \beta \cdot P_D$  subiendo (de dcha. a izq.) con 20 dB/dec hasta cortar a la ganancia a baja frecuencia. En la intersección está la frecuencia del polo dominante  **$f_{pd}$**

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

## Ejemplo 2: Imponer un margen de fase $> 45^\circ$ , para $\beta=1$



¿Cuántos polos hay a la izquierda de  $f_{cruce}$  ?

**1 solo polo, el polo dominante, ya que a la  $f_{cruce}$  la fase solo ha podido bajar hasta  $-120^\circ$  si  $MF=60^\circ$ . El  $P_D$  contribuye con  $-90^\circ$  por tanto el polo 1 solo puede añadir  $-30^\circ$ . Esto ocurre sólo ocurre antes de  $f_{p1}$ .**

**$f_{cruce} < f_{p1}$  para  $MF > 45^\circ$**

$$\angle A'(j \cdot f_{cruce}) = -90^\circ + MF$$

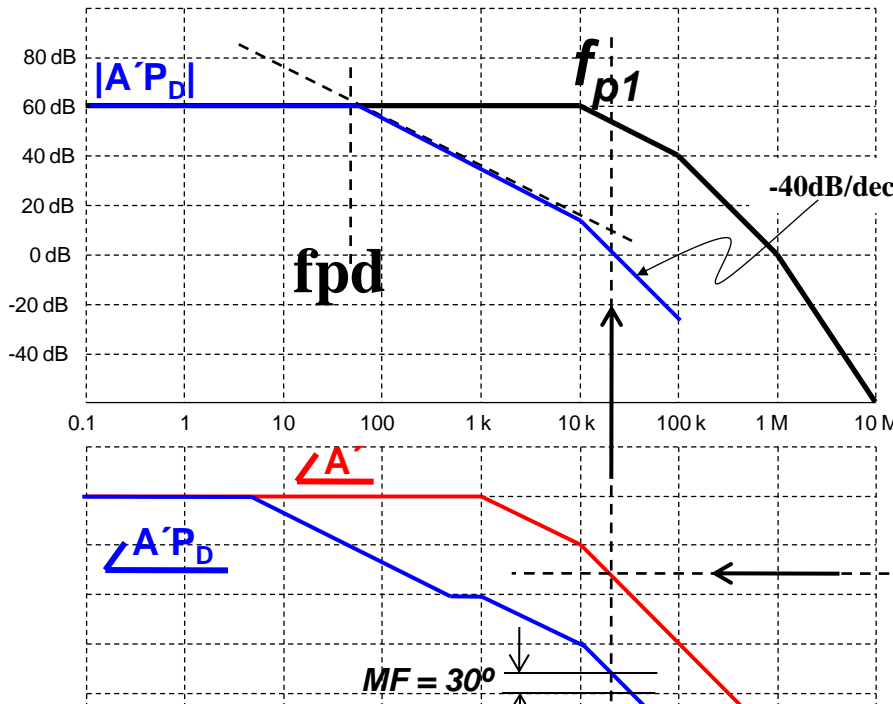
Trazar desde los 0dB de  $A' \beta \cdot P_D$  subiendo (de dcha. a izq.) con 20 dB/dec hasta cortar a la ganancia a

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

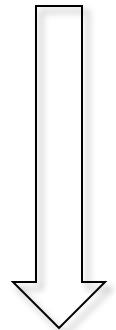
## Ejemplo 3: Imponer un margen de fase $< 45^\circ$ , para $\beta=1$



¿Cuántos polos hay a la izquierda de  $f_{cruce}$  ?

**2 polos: el polo dominante y el polo 1**, ya que si  $MF = 30^\circ$ , a la  $f_{cruce}$  la fase habrá debido caer hasta  $-150^\circ$ . El  $P_D$  contribuye con  $-90^\circ$  por tanto el polo 1 ha de  $-60^\circ$  lo cual sólo ocurre más allá de  $f_{p1}$ .

$$f_{cruce} > f_{p1} \text{ para } MF < 45^\circ$$



Trazar desde los 0dB de  $A' \cdot \beta \cdot P_d$  subiendo

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

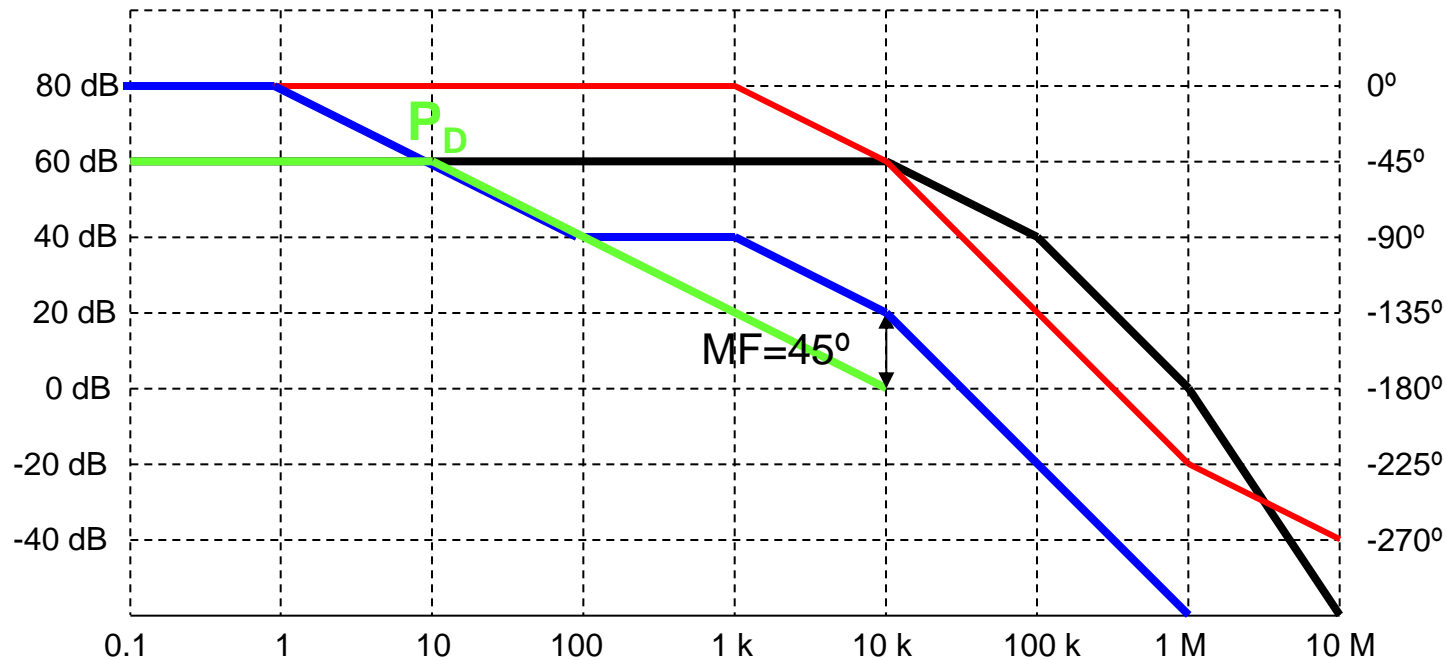
Cartagena99



# Compensación por polo dominante

$$A\beta(jf) = \frac{1000}{(1 + j\frac{f}{fp1}) \cdot (1 + j\frac{f}{fp2}) \cdot (1 + j\frac{f}{fp3})}$$

	fp1	fp2	fp3	
Polo 1	-1	-1		
Polo 2		-1	-1	
Polo 3			-1	-1
Total	-1	-2	-2	-1



© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

$A_0 \times 1p_d = 1 \times 1p_1$       1 solo polo  $\rightarrow 0 \times \Delta B = 0$



# Compensación por polo dominante

## Pasos para imponer un margen de ganancia

Calcular la frecuencia de cruce con los  $-180^\circ$  del nuevo Bode que incluye el polo dominante,  $f_{180}$

$$\angle A' \beta \cdot P_D = \angle P_D + \angle A' + \angle \beta = -180^\circ$$

$-90^\circ \quad \quad \quad 0^\circ$

$$\angle A'(j \cdot f_{180}) = -90^\circ \Rightarrow f_{180}$$

A la frecuencia  $f_{180}$  el nuevo Bode debe cumplir:  $|A' \beta \cdot P_D| = -MG$

A la frecuencia  $f_{180}$  se el módulo del nuevo Bode vale  $-MG_{dB}$

$$f_{180} \geq 10f_{p1} \text{ para imponer } MG$$

Identificar el nº de polos a la izquierda de  $f_{180}$

**Al menos 2 polos: el polo dominante y el polo 1**, ya que si la fase de  $A'$  ha alcanzado los  $-90^\circ$ , esto solo ocurre para frecuencias iguales o superiores a  $10f_{p1}$ .

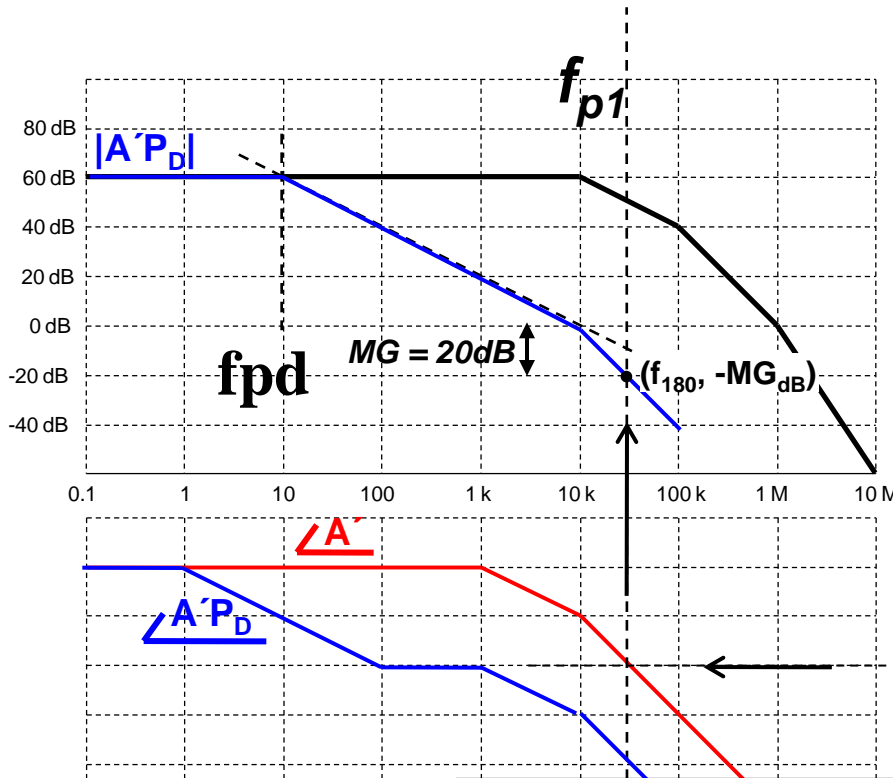
Dibujar el punto  $(f_{180}, -MG_{dB})$ . Desde este punto, trazar de dcha. a izq.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70  
---  
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

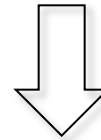
© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013



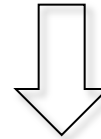
## Ejemplo 4: Imponer un margen de ganancia, MG, para $\beta=1$



$$\angle A'(j \cdot f_{180}) = -90^\circ \Rightarrow f_{180}$$



Dibujar el punto  $(f_{180}, -MG_{dB})$ .



¿Cuántos polos hay a la izquierda de  $f_{cruce}$  ?

**Al menos 2 polos: el polo dominante y el polo 1**, ya que si la fase de  $A'$  ha alcanzado los  $-90^\circ$ , esto solo ocurre para frecuencias iguales o superiores a  $10f_{p1}$ .

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

En la intersección está la frecuencia del polo

Cartagena99

# Compensación por polo dominante. Requisito cumplir MG

Compensación para obtener un determinado MG

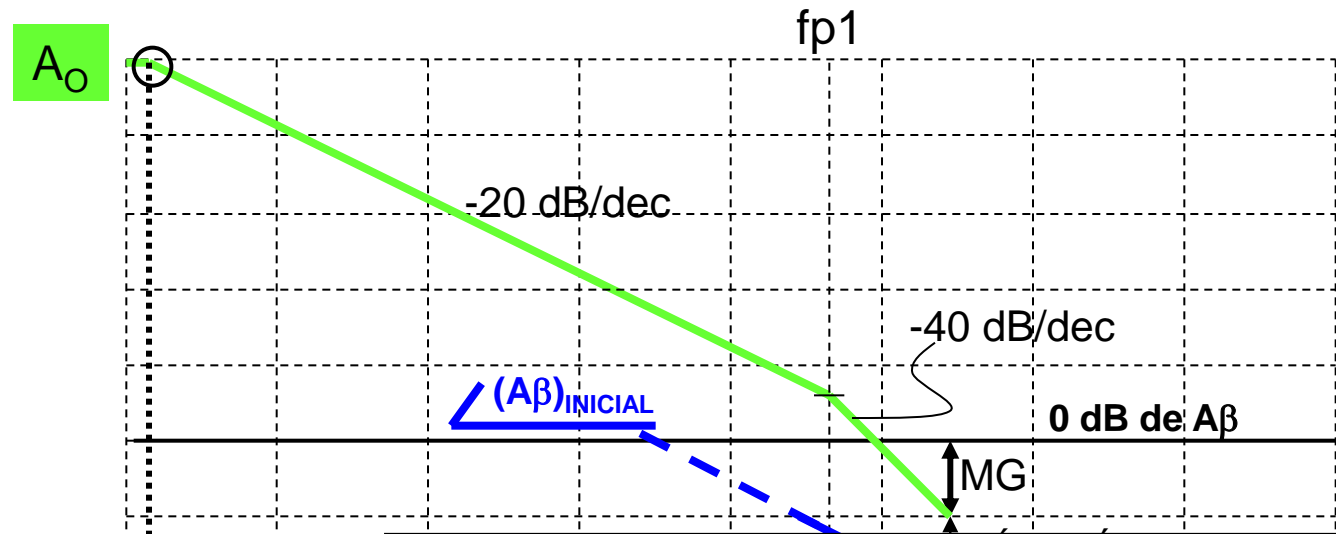
$$\angle A\beta \cdot P_D = \angle P_D + \angle (A\beta)_{INICIAL} = -180^\circ$$

$\swarrow$   
 $-90^\circ$

$$\angle (A\beta)_{INICIAL} = -90^\circ$$

A la frecuencia a la que se cumple esta condición se ha de cumplir:

$$|A\beta \cdot P_D| = -MG$$



© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

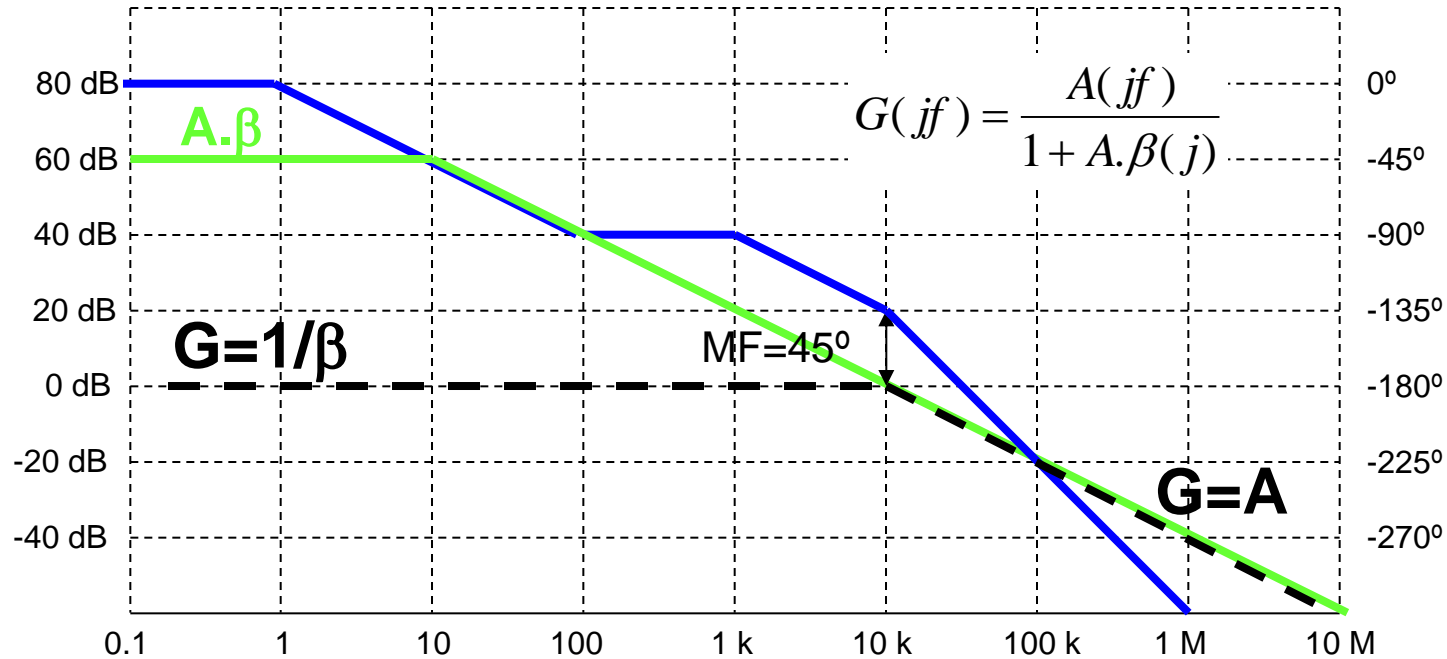
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70





# Compensación por polo dominante. $\Delta B$ en bucle cerrado

## $\Delta B$ del amplificador en bucle cerrado



© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013

fn1      fn2      fn2

**CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE**  
**LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70**

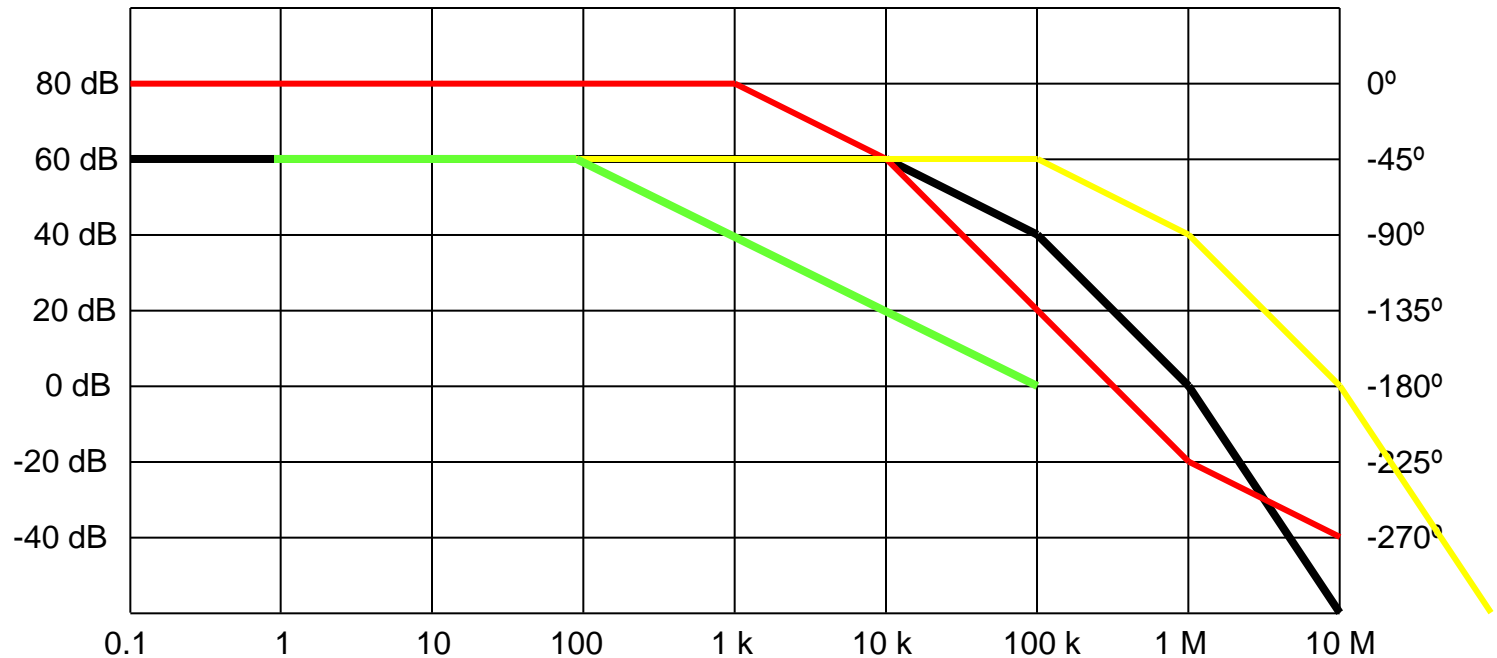
---

**ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS**  
**CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70**

# Cartagena99

$$A(jf) = \frac{1000 \cdot (1 + j \frac{f}{fp1})}{(1 + j \frac{f}{fpd}) \cdot (1 + j \frac{f}{fp1}) \cdot (1 + j \frac{f}{fp2}) \cdot (1 + j \frac{f}{fp3})}$$

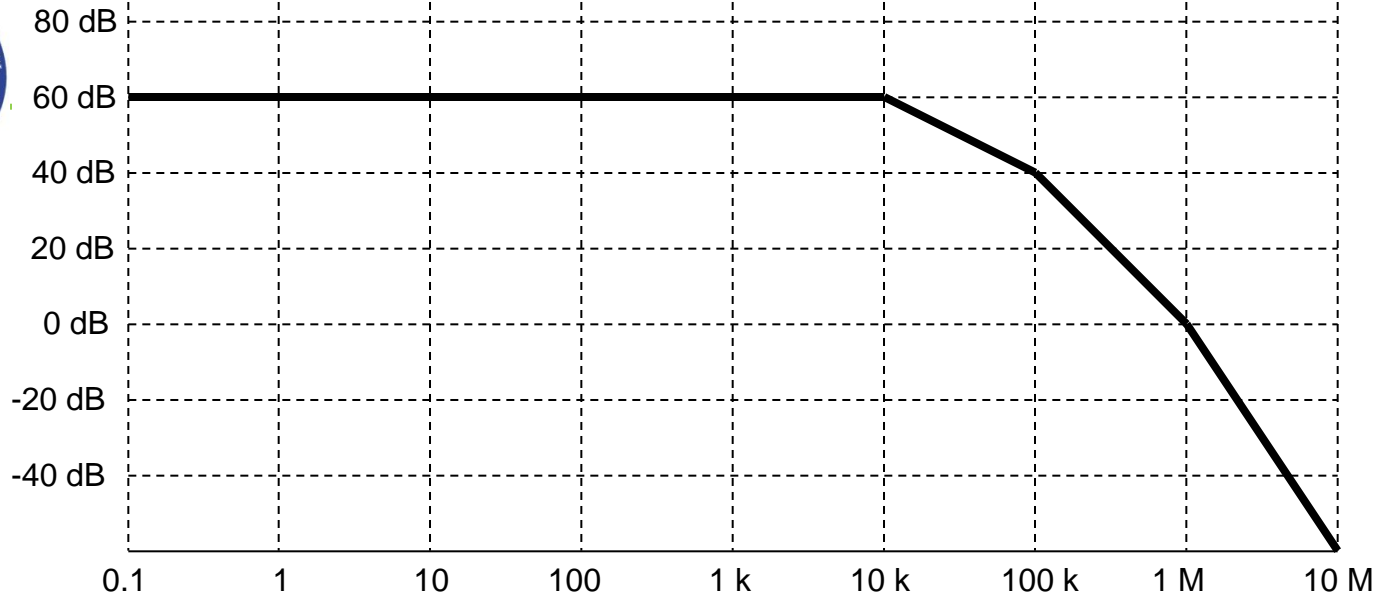
$$A_O \times fpd = 1 \times fp2$$



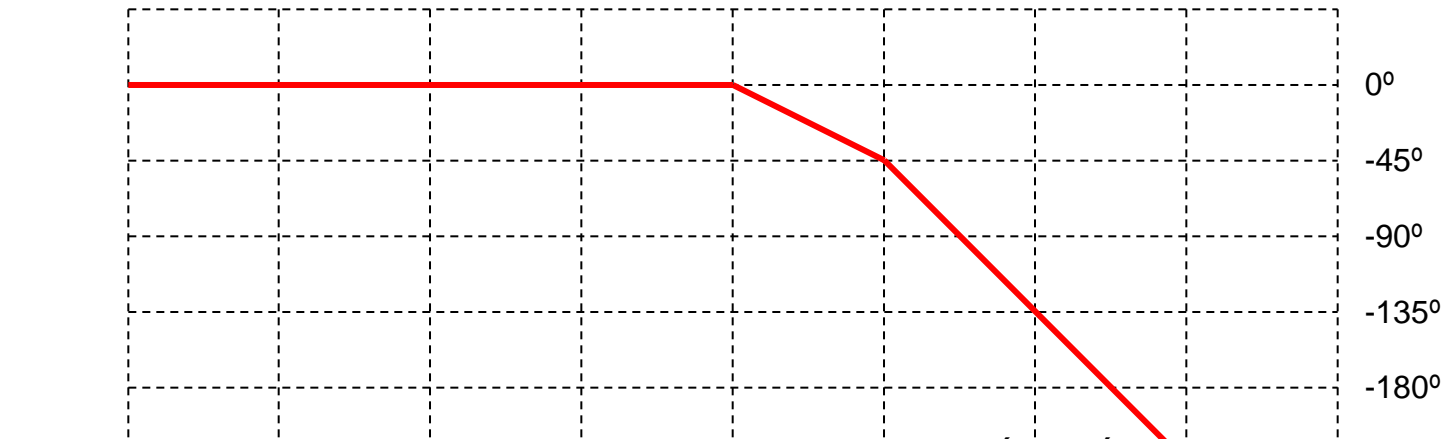
© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70  
 ---  
 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



Imprimir para ensayar



© Antonio Lázaro Blanco 2010-2013

# Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70