

The logo for Cartagena99, featuring the word 'Cartagena99' in a stylized, green, cursive font. The text is set against a background of a blue and orange abstract shape that resembles a stylized 'C' or a flame.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
Escuela Universitaria de  
Ingeniería Técnica Industrial

...s de estabilidad y diseño de en  
...ncia de sistemas realimentados

DR. BASIL M. AL-HADITHI

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



ESCUELA UNIVERSITARIA DE  
INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Análisis de estabilidad y diseño de en frecuencia de sistemas realimentados

### INTRODUCCIÓN

- El principal inconveniente de los amplificadores activos es la dispersión que suelen presentar la ganancia y otras características. A fin de mejorar el rendimiento del sistema y resolver estos inconvenientes se suele acudir a la realimentación.
- Los sistemas de realimentación ven la salida del sistema y usan esta información para modificar la señal de entrada con el fin de lograr el resultado deseado. En definitiva, la realimentación en un amplificador no consiste en otra cosa que conseguir que una parte o la totalidad de la señal de salida se introduzca en la entrada del amplificador.

2

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL  
**Realimentación de Sistemas Electrónicos**

◆ Los sistemas de lazo cerrado tienen un camino de realimentación a través del cual se devuelve la información de la salida para compararla con el objetivo. La diferencia entre ambas es la señal de error; la cual se usa como entrada para el camino directo.

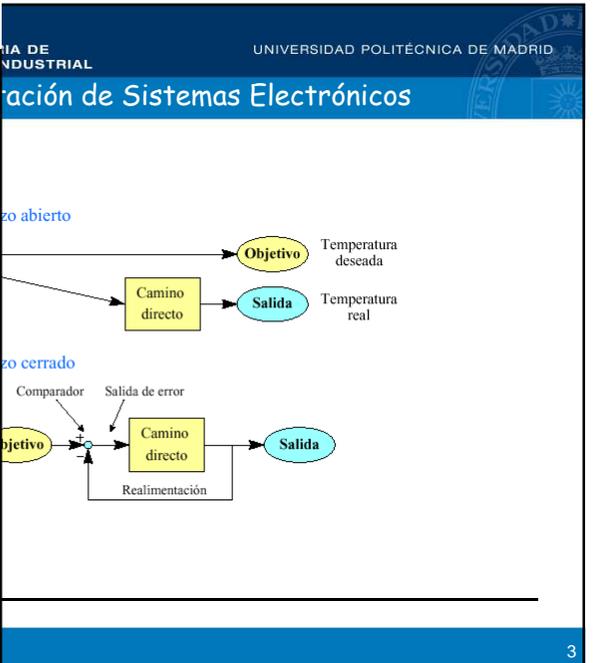
**Ventajas de la realimentación**

- ◆ Estabilizar la ganancia frente a variaciones de temperatura, envejecimiento de los dispositivos.
- ◆ Permite modificar las impedancias de entrada y salida.
- ◆ Aumenta el ancho de banda

**Desventajas de la realimentación**

- ◆ Reduce la ganancia
- ◆ Puede producir oscilaciones cuando la realimentación pasa a ser positiva

3



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



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

## Sistemas realimentados Electrónicos

Al darnos a un circuito realimentado, tenemos dos

... nodos y mallas. Esta opción hará que perdamos la

... ficador y la red de realimentación como dos

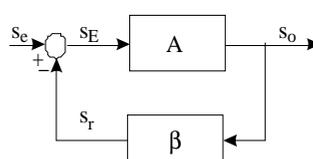
... nectados

5

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

## Función de transferencia de los sistemas realimentados

1.1 En la figura 1.1 se muestra un sistema realimentado

$$G = \frac{s_o}{s_e} = \frac{A}{1 + A\beta} = \frac{A}{1 + T}$$


G: ganancia total de realimentación (función de transferencia de lazo cerrado)

A: ganancia de lazo directo o la función de transferencia de lazo directo

T: ganancia de lazo abierto o la función de transferencia de lazo abierto

6

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

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

### Propiedades generales de los sistemas realimentados

Si la ganancia del lazo abierto es mucho mayor que 1, la ganancia del lazo cerrado es aproximadamente igual a  $1/\beta$ , es decir, depende de la ganancia del lazo directo A:

$$G(s) \approx \frac{1}{\beta}$$

Si el sistema de realimentación está formado (normalmente) por elementos pasivos y estables, el valor de  $\beta$  queda bien definido y, por tanto, la ganancia del amplificador realimentado funciona forzando a  $s_e$  a aproximarse al polo del sistema de realimentación:

$$s_e \approx -\frac{1}{T}$$

Por lo tanto, entonces  $s_e$  se hace mucho menor que  $s_e$ .

7

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

### Propiedades generales de los sistemas realimentados

Consideramos que la ganancia del amplificador es de la forma:

$$A(s) = \frac{A_0}{1 - \frac{s}{s_1}}$$

Y tiene un polo en el eje real negativo  $s = -\sigma_1$

La ganancia total del circuito realimentado es:

$$G(s) = \frac{A(s)}{1 + A(s)\beta} = \frac{\frac{A_0}{1 + \frac{s}{\sigma_1}}}{1 + \frac{A_0}{1 + \frac{s}{\sigma_1}}\beta}$$

8

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

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

### Propiedades generales de los sistemas realimentados

El polo  $\sigma_1'$  se ha alejado del eje imaginario en la misma cantidad que se ha reducido la ganancia

**Conclusión:** se mantiene constante el producto ganancia  $\times$  ancho de banda  
 $G \times BW = \text{constante}$

9

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

### Propiedades generales de los sistemas realimentados

$$-\beta \frac{A_0/(1+A_0\beta)}{s/\sigma_1(1+A_0\beta)+1}$$

Respuesta a frecuencias medias con  $\sigma_1' = \sigma_1(1+A_0\beta)$

9

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



www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002. Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

Propiedades generales de los sistemas realimentados

La ganancia A depende de la temperatura, de las características del dispositivo activo y de los parámetros del sistema.

Una ganancia negativa reduce las variaciones en la ganancia (G) debido a variaciones de A

$$\frac{dG}{G} = \frac{1}{1+A\beta} \frac{\delta A}{A}$$

Por lo tanto, cuando la ganancia A varía en  $\delta A$ , la ganancia G varía en  $\delta G$

11

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

Propiedades generales de los sistemas realimentados

**Sensibilidad**

La fracción de cambio en G será:

$$\frac{dG}{G} = \frac{1+A\beta}{A} \frac{\delta A}{(1+A\beta)^2}$$

que se puede expresar como:

$$\frac{dG}{G} = \frac{\delta A}{A} \frac{1}{(1+A\beta)}$$

El término  $1+A\beta$  se denomina factor de desensibilización. De la expresión podemos deducir que una variación en A se manifestará como una variación  $(1+A\beta)$  veces menor en G. Por ejemplo, si  $A\beta=100$ , una variación del 10% en A se manifestará como una variación del 0,1% en G.

12

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

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

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

## Propiedades generales de los sistemas realimentados

### Reducción de ruido y distorsión

Un amplificador práctico contiene además de un amplificador ideal, algunos componentes de estos se clasifican como "ruido", ya que están presentes en la entrada y en la salida. Este ruido elimina la señal de entrada.

El efecto no deseado de la salida es la distorsión, que se produce cuando en la salida presente la señal. La distorsión es producida por no linealidad en la relación entrada-salida del amplificador. Ambos efectos se reducen al aplicar realimentación al circuito.

13

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

## Propiedades generales de los sistemas realimentados

### Reducción de ruido y distorsión

Sea un sistema en lazo abierto en el que a una señal de entrada ( $s_e$ ) se le adiciona una señal de ruido ( $s_r$ ), que tiene cierta influencia sobre la señal de salida ( $s_0$ ).

A) Sistema en lazo directo

$$s_0 = A_2 \cdot s^* \quad s^* = s_p + A_1 \cdot s_e$$

$$s_0 = A_2 \cdot (s_p + A_1 \cdot s_e) = A_2 \cdot s_p + A_2 \cdot A_1 \cdot s_e = A_2 \cdot s_p + A \cdot s_e$$

La señal de ruido queda amplificada a la salida.

14





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

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

frecuencia de sistemas realimentados

Se puede enunciar que un sistema es inestable si el contorno de Nyquist de  $A'(\omega)\beta$  rodea el punto  $(-1, j0)$ . Se puede redefinir la estabilidad de un sistema de la siguiente manera: un sistema es estable si el contorno de Nyquist de  $A'(\omega)\beta$  no rodea el punto  $(-1, j0)$ .

Figura 2.1

17

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

Consideraciones sobre la representación de la ganancia de lazo abierto

Consideremos un sistema cuya ganancia en lazo directo  $A'(\omega)$  puede representarse de la forma indicada en la figura 2.2.

Figura 2.2

18

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

**sobre la representación de la ganancia de lazo abierto**

na red resistiva (no depende de  $\omega$ ) de ganancia  $\beta$ . Los  
 están referidos al producto  $A'(\omega)\beta$ .

$20 \log A' + 20 \log \beta$

resistiva,  $20 \log \beta$  será una recta ( $\omega$  está en logarítmicas).

19

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

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

**Consideraciones sobre la representación de la ganancia de lazo abierto**

El punto de 0 dB en la representación de  $A'(\omega)\beta$  será aquel que hace que:

$$20 \log A'(\omega)\beta = 0 \text{ dB} = 20 \log A' + 20 \log \beta$$

$$20 \log A'(\omega) = 20 \log \frac{1}{\beta}$$

es decir, si sobre la representación del módulo de la ganancia de  $A'(\omega)$  trazamos la recta  $20 \log 1/\beta$ , ésta será el eje de 0 dB de la representación de  $A'(\omega)\beta$ .

Si relacionamos la  $\beta$  de tal manera que  $20 \log 1/\beta$  sea el representado en la figura 2.3., la ganancia de  $A'(\omega)\beta$  se hace 0 dB antes que la fase se haga  $-180^\circ$  y, por lo tanto, el circuito será estable.

Diagrama de Bode

Módulo (dB)

Fase (deg)

Frecuencia (Hz)

20

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

### de la ganancia y margen de fase

son los decibelios que puede aumentar  $A'(\omega)\beta$  hasta que el sistema sea inestable.

el margen que puede aumentar la fase de  $A'(\omega)\beta$  hasta que el sistema sea inestable.

ejemplo  $\beta=1$ , tendremos que  $20\log 1=0$  dB y la representación en la de  $A'$ , y por tanto, la ganancia es superior a 0 dB cuando se cumple el criterio de Nyquist) por lo que el amplificador realimentado será estable. Justificación de porqué es peligroso trabajar con  $\beta$  elevadas.

---

21

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

### Ejemplo

**Ejemplo 1:** Una vez analizada la red  $A'$  de un sistema obtenemos que su función de transferencia es de la forma:

$$A' = \frac{10^4}{\left(1 + j\frac{f}{10^3}\right)\left(1 + j\frac{f}{10^4}\right)\left(1 + j\frac{f}{10^5}\right)}$$

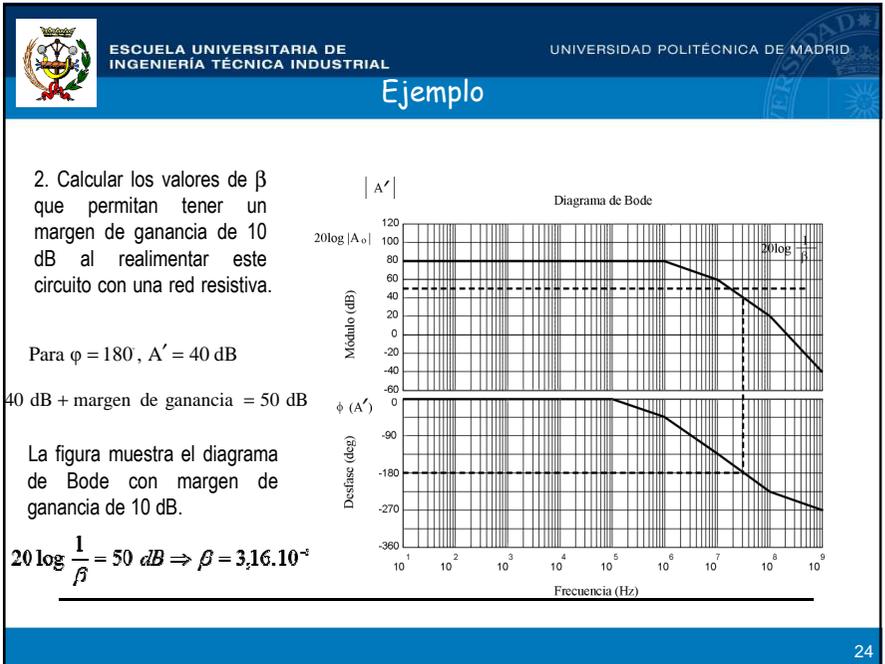
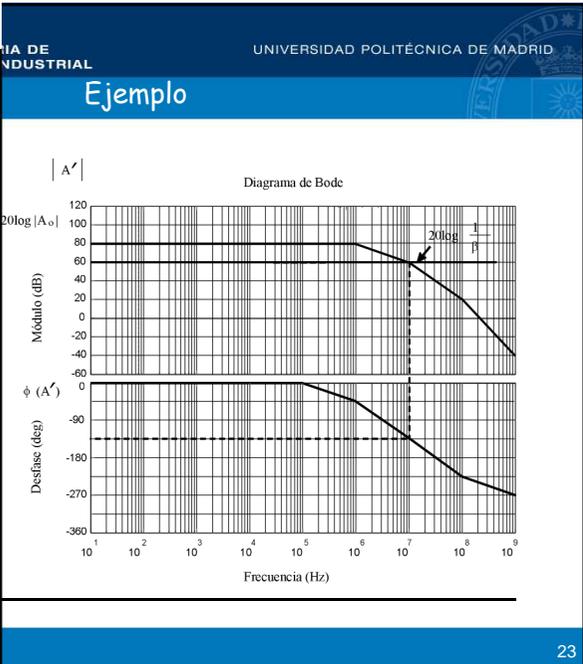
1. Calcular los valores de  $\beta$  que permitan tener un margen de fase de  $45^\circ$  al realimentar este circuito con una red resistiva.

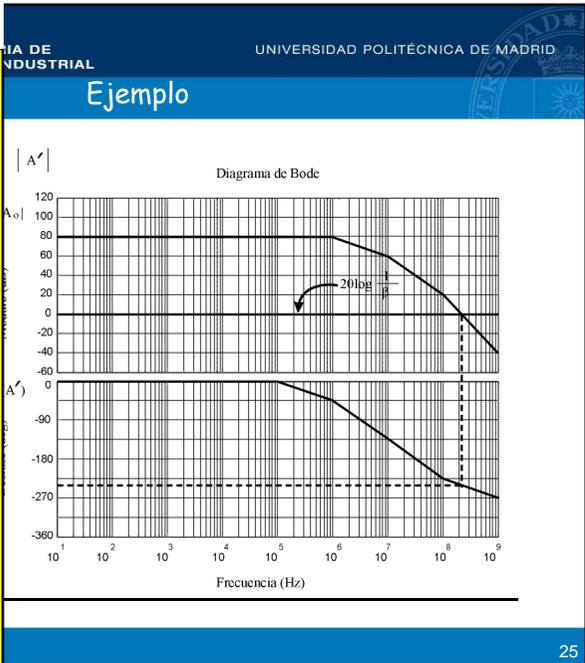
---

22

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

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





ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

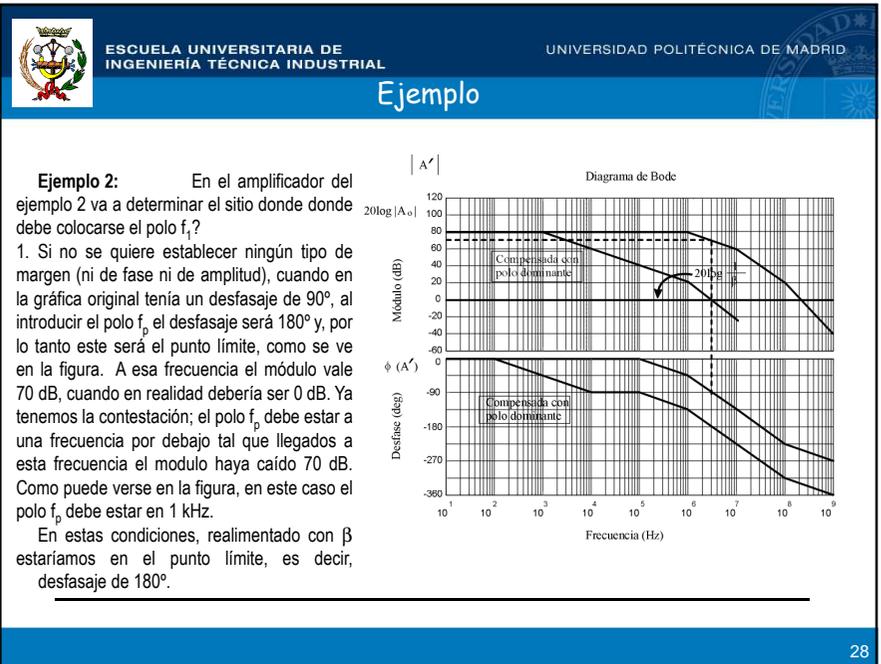
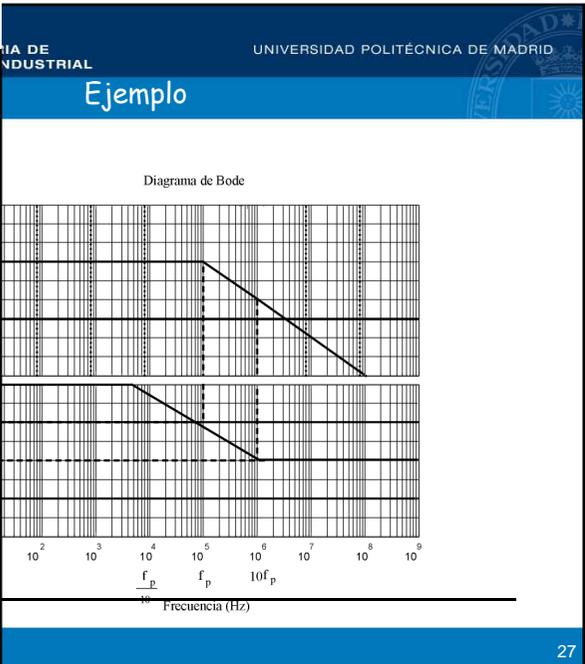
### Ejemplo

- La realimentación con determinados valores de  $\beta$  pueden llevar al sistema a la inestabilidad, ya que el desfase es superior a  $-180^\circ$ . Sin embargo, por necesidades del diseño que estemos realizando, podemos tener la necesidad de utilizar ese amplificador incluso con  $\beta=1$ .
- La solución consiste en compensar el circuito. La compensación se basa en hacer que el módulo  $A'(\omega)\beta$  caiga mas deprisa, para que cuando la fase de  $A'(\omega)\beta$  alcance los  $-180^\circ$  de desfase, el módulo sea menor que la unidad.
- Las dos formas más habituales de compensar un circuito son la compensación por polo dominante y la compensación por polo-cero
- La compensación implica una pérdida de producto Ganancia-Ancho de Banda.
- En la compensación por polo dominante se introduce un polo a una frecuencia  $f_p$  muy por debajo del primer polo que en el ejemplo 2 está en 1 MHz. De esta forma el módulo caerá desde mucho antes y la frecuencia a la que corte el eje de 0 dB corresponderá a un desfase menor. El inconveniente es que el polo  $f_p$  que introducimos también produce desfase adicional, en concreto  $90^\circ$ , es decir, que al acercarnos a la frecuencia de 1 MHz la fase viene ya desfasao  $90^\circ$  como se ve en la figura.

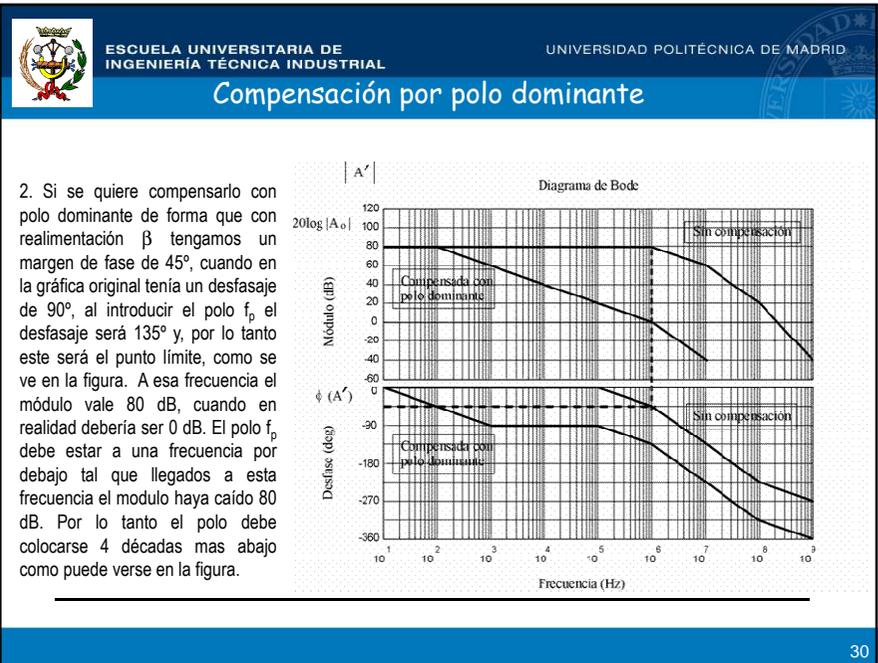
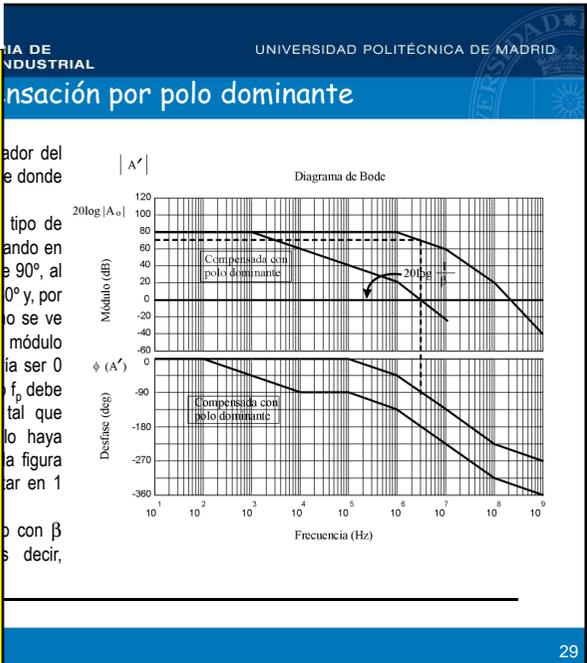
26

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

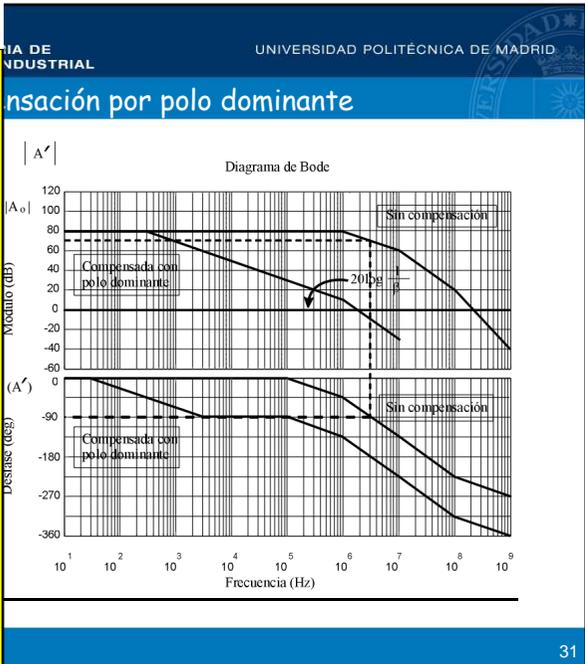
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70  
 ---  
 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



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



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



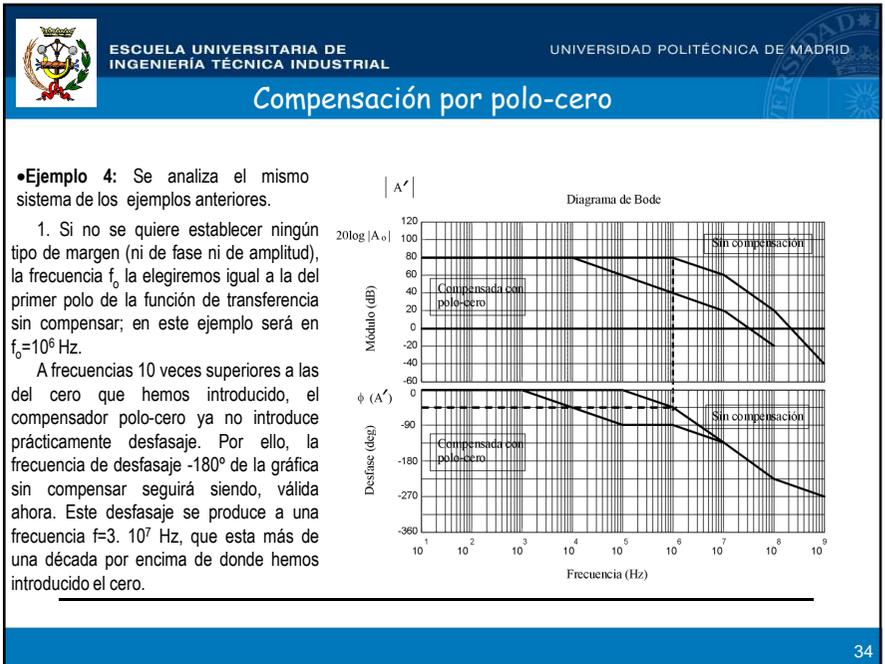
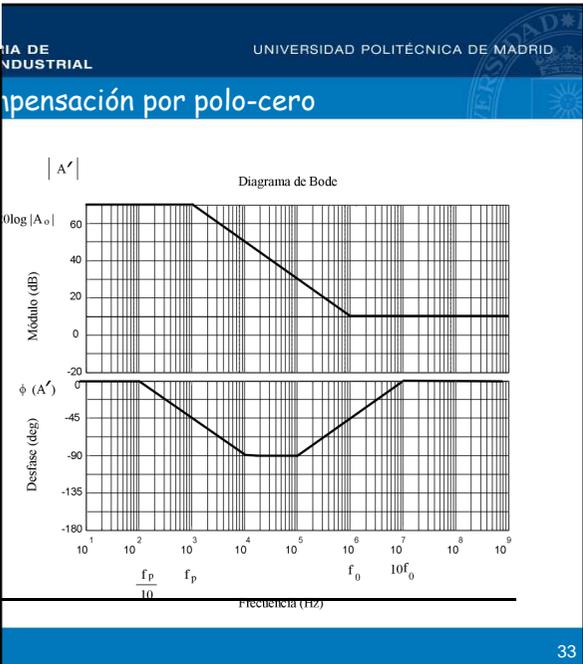
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

### Compensación por polo dominante

- La pérdida de producto ganancia-ancho de banda aplicando la compensación por polo dominante es la siguiente:
- Sin compensación, el producto  $G \times BW$  es:  
 $G \times BW = 10^4 \times 10^6 = 10 \text{ GHz}$
- Con la compensación realizada en el apartado 1, es decir, sin ningún tipo de margen:  
 $G \times BW = 10^4 \times 10^3 = 10 \text{ MHz}$   
 lo cual ha supuesto ya una pérdida de 3 ordenes de magnitud.
- Con la compensación realizada en el apartado 2:  
 $G \times BW = 10^4 \times 10^2 = 1 \text{ MHz}$
- Con la compensación realizada en el apartado 3:  
 $G \times BW = 10^4 \times 3 \cdot 10^2 = 3 \text{ MHz}$
- Como puede observarse, en cualquiera de los casos la pérdida de producto  $G \times BW$  ha sido muy significativa. Una de las razones es que al introducir el polo dominante no solo modificábamos el módulo sino también la fase.

32

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



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

