

07__realimentacion

June 19, 2026

1 Tema 5 - Realimentación

Electrónica General - 2º GIERM

1.1 Objetivos de aprendizaje

- Comprender el concepto de realimentación negativa y su diagrama de bloques
 - Derivar la ganancia en lazo cerrado A_{CL} y entender el papel de $A \cdot \beta$
 - Cuantificar los beneficios: desensibilización, aumento de ancho de banda, reducción de distorsión
 - Conocer las 4 topologías de realimentación y su efecto sobre impedancias
 - Analizar la estabilidad de sistemas realimentados (margen de fase y ganancia)
 - Resolver problemas numéricos de diseño con realimentación
-

2 Formulario de Realimentación

2.1 Ganancia en lazo cerrado

$$A_{CL} = \frac{A}{1 + A\beta}$$

Para $A\beta \gg 1$:

$$A_{CL} \approx \frac{1}{\beta}$$

2.2 Ganancia de lazo

$$A_L = -A\beta \quad (\text{loop gain})$$

2.3 Desensibilización de la ganancia

$$\frac{dA_{CL}}{A_{CL}} \approx \frac{1}{1 + A\beta} \cdot \frac{dA}{A}$$

$$\Delta A_{CL} \approx \frac{\Delta A}{(1 + A\beta)^2}$$

2.4 Aumento de ancho de banda

$$\omega_{CL,p1} = (1 + A_0\beta) \omega_{p1}$$

$$GBW_{CL} = GBW_{OL} \quad (\text{se conserva el producto ganancia-ancho de banda})$$

2.5 Reducción de distorsión (misma entrada)

$$HD_{CL,i} \approx \frac{HD_i}{(1 + a_1\beta)^i}$$

2.6 Reducción de distorsión (misma salida)

$$HD_{CL,i} \approx \frac{HD_i}{1 + a_1\beta}$$

2.7 4 Topologías de realimentación

Topología	Muestreo	Mezcla	Efecto en Z_{in}	Efecto en Z_{out}
Serie-Paralelo (tensión-tensión)	Tensión (paralelo)	Serie	$Z_{in} \uparrow \times (1 + A\beta)$	$Z_{out} \downarrow \div (1 + A\beta)$
Serie-Serie (corriente-tensión)	Corriente (serie)	Serie	$Z_{in} \uparrow \times (1 + A\beta)$	$Z_{out} \uparrow \times (1 + A\beta)$
Paralelo-Paralelo (tensión-corriente)	Tensión (paralelo)	Paralelo	$Z_{in} \downarrow \div (1 + A\beta)$	$Z_{out} \downarrow \div (1 + A\beta)$
Paralelo-Serie (corriente-corriente)	Corriente (serie)	Paralelo	$Z_{in} \downarrow \div (1 + A\beta)$	$Z_{out} \uparrow \times (1 + A\beta)$

3 1. Introducción a la Realimentación

3.1 1.1 ¿Qué es la realimentación?

La **realimentación** (feedback) consiste en tomar una muestra de la señal de salida de un sistema y devolverla a la entrada para compararla con la señal deseada. Es uno de los conceptos más importantes en ingeniería electrónica y de control.

3.1.1 Analógico vs. Digital

Aspecto	Mundo analógico	Mundo digital
Ejemplo	Amplificador con resistencias de retroalimentación	PLL, convertidores $\Sigma\Delta$
Señal de error	Continua en el tiempo	Muestreada/cuantizada
Análisis	Función de transferencia en s	Función de transferencia en z

3.1.2 ¿Por qué realimentación negativa?

La **realimentación negativa** sacrifica ganancia a cambio de:

1. **Menor sensibilidad** a variaciones de los componentes activos
2. **Mayor ancho de banda**
3. **Menor distorsión**
4. **Control de impedancias** de entrada y salida
5. **Mayor linealidad** del sistema

Nota: La realimentación *positiva* se usa en osciladores y biestables, pero no es el foco de este tema.

3.2 2. Realimentación ideal - Derivación de A_{CL}

3.2.1 2.1 Ecuaciones del sistema

Del diagrama de bloques:

$$y = A \cdot u$$

$$u = x - \beta \cdot y$$

Sustituyendo:

$$y = A(x - \beta y) = Ax - A\beta y$$

$$y + A\beta y = Ax$$

$$y(1 + A\beta) = Ax$$

$$A_{CL} = \frac{y}{x} = \frac{A}{1 + A\beta}$$

3.2.2 2.2 Interpretación

- A : Ganancia en lazo abierto (open loop, OL)
- β : Factor de realimentación
- $A\beta$: Ganancia de lazo (loop gain) - es la magnitud clave
- $1 + A\beta$: Factor de realimentación (siempre > 1 para realimentación negativa)

3.2.3 2.3 Caso límite: $A\beta \gg 1$

$$A_{CL} = \frac{A}{1 + A\beta} \approx \frac{A}{A\beta} = \frac{1}{\beta}$$

Resultado fundamental: Cuando la ganancia de lazo es grande, la ganancia en lazo cerrado **depende solo de la red de realimentación** β , que normalmente se construye con componentes pasivos (resistencias) muy estables.

3.3 3. Desensibilización de la Ganancia

3.3.1 3.1 Derivación

Si la ganancia A varía una cantidad dA , ¿cuánto varía A_{CL} ?

$$A_{CL} = \frac{A}{1 + A\beta}$$

Derivando respecto a A :

$$\frac{dA_{CL}}{dA} = \frac{(1 + A\beta) - A\beta}{(1 + A\beta)^2} = \frac{1}{(1 + A\beta)^2}$$

Por tanto:

$$dA_{CL} = \frac{dA}{(1 + A\beta)^2}$$

En forma de **sensibilidad relativa**:

$$\frac{dA_{CL}}{A_{CL}} = \frac{dA}{(1 + A\beta)^2} \cdot \frac{1 + A\beta}{A} = \frac{1}{1 + A\beta} \cdot \frac{dA}{A}$$

$$\frac{dA_{CL}/A_{CL}}{dA/A} = \frac{1}{1 + A\beta}$$

3.3.2 3.2 Ejemplo numérico

Si $A\beta = 50$:

$$\frac{dA_{CL}}{dA} = \frac{1}{(1 + 50)^2} = \frac{1}{2601}$$

Una variación absoluta en A se reduce **2601 veces** en A_{CL} .

La variación relativa se reduce $1 + A\beta = 51$ veces.

3.4 4. Aumento del Ancho de Banda

3.4.1 4.1 Amplificador con un polo dominante

Si el amplificador en lazo abierto tiene un polo dominante:

$$A(s) = \frac{A_0}{1 + s/\omega_{p1}}$$

donde A_0 es la ganancia DC y ω_{p1} es la frecuencia del polo.

3.4.2 4.2 Ganancia en lazo cerrado

$$A_{CL}(s) = \frac{A(s)}{1 + A(s)\beta} = \frac{\frac{A_0}{1+s/\omega_{p1}}}{1 + \frac{A_0\beta}{1+s/\omega_{p1}}}$$

Simplificando:

$$A_{CL}(s) = \frac{A_0}{1 + A_0\beta + s/\omega_{p1}} = \frac{A_0/(1 + A_0\beta)}{1 + s/[(1 + A_0\beta)\omega_{p1}]}$$

$$A_{CL}(s) = \frac{A_{CL,0}}{1 + s/\omega_{CL,p1}}$$

donde:

$$A_{CL,0} = \frac{A_0}{1 + A_0\beta}, \quad \omega_{CL,p1} = (1 + A_0\beta)\omega_{p1}$$

3.4.3 4.3 Conservación del GBW

$$GBW_{OL} = A_0 \cdot \omega_{p1}$$

$$GBW_{CL} = A_{CL,0} \cdot \omega_{CL,p1} = \frac{A_0}{1 + A_0\beta} \cdot (1 + A_0\beta)\omega_{p1} = A_0 \cdot \omega_{p1}$$

$$GBW_{CL} = GBW_{OL}$$

Conclusión: La realimentación negativa reduce la ganancia pero aumenta el ancho de banda en la misma proporción. El producto ganancia-ancho de banda se conserva.

3.5 5. Reducción de Distorsión

3.5.1 5.1 Modelo de distorsión

Un amplificador no lineal tiene una salida de la forma:

$$y = a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots$$

donde a_1 es la ganancia lineal y los términos a_i con $i > 1$ generan **distorsión armónica**.

El **coeficiente de distorsión armónica** de orden i es:

$$HD_i = \frac{|a_i|}{|a_1|} \cdot A_{entrada}^{i-1}$$

3.5.2 5.2 Con realimentación (misma señal de entrada)

Al aplicar realimentación negativa, la distorsión se reduce drásticamente:

$$HD_{CL,i} \approx \frac{HD_i}{(1 + a_1\beta)^i}$$

Para el segundo armónico ($i = 2$): se reduce como $(1 + a_1\beta)^2$.

3.5.3 5.3 Con realimentación (misma señal de salida)

Si se compara a **igual nivel de salida** (aumentando la entrada para compensar la pérdida de ganancia):

$$HD_{CL,i} \approx \frac{HD_i}{1 + a_1\beta}$$

La mejora es menor pero aún significativa.

Importante: La reducción de distorsión “a misma entrada” es más agresiva (potencia i), pero la comparación “a misma salida” es más realista en la práctica.

3.6 6. Las 4 Topologías de Realimentación

La forma en que se **muestrea** la salida y se **mezcla** con la entrada define 4 topologías posibles:

3.6.1 6.1 Serie-Paralelo (Tensión-Tensión)

- **Muestreo:** en paralelo con la salida (tensión)
- **Mezcla:** en serie con la entrada (tensión)
- **A es una ganancia de tensión:** $A_v = v_o/v_i$
- **Efecto:**
 - $Z_{in,CL} = Z_{in} \cdot (1 + A\beta)$ (aumenta)
 - $Z_{out,CL} = Z_{out}/(1 + A\beta)$ (disminuye)
- **Ejemplo típico:** Amplificador operacional no inversor

3.6.2 6.2 Serie-Serie (Corriente-Tensión)

- **Muestreo:** en serie con la salida (corriente)
- **Mezcla:** en serie con la entrada (tensión)
- **A es una transconductancia:** $G_m = i_o/v_i$
- **Efecto:**
 - $Z_{in,CL} = Z_{in} \cdot (1 + A\beta)$ (aumenta)
 - $Z_{out,CL} = Z_{out} \cdot (1 + A\beta)$ (aumenta)
- **Ejemplo típico:** Par diferencial con resistencia de degeneración

3.6.3 6.3 Paralelo-Paralelo (Tensión-Corriente)

- **Muestreo:** en paralelo con la salida (tensión)
- **Mezcla:** en paralelo con la entrada (corriente)
- **A es una transimpedancia:** $R_m = v_o/i_i$
- **Efecto:**
 - $Z_{in,CL} = Z_{in}/(1 + A\beta)$ (disminuye)
 - $Z_{out,CL} = Z_{out}/(1 + A\beta)$ (disminuye)
- **Ejemplo típico:** Amplificador de transimpedancia

3.6.4 6.4 Paralelo-Serie (Corriente-Corriente)

- **Muestreo:** en serie con la salida (corriente)
- **Mezcla:** en paralelo con la entrada (corriente)
- **A es una ganancia de corriente:** $A_i = i_o/i_i$
- **Efecto:**
 - $Z_{in,CL} = Z_{in}/(1 + A\beta)$ (disminuye)
 - $Z_{out,CL} = Z_{out} \cdot (1 + A\beta)$ (aumenta)
- **Ejemplo típico:** Espejo de corriente con realimentación

3.7 7. Estabilidad

3.7.1 7.1 Condición de estabilidad

Un sistema realimentado es **inestable** si existe una frecuencia ω_0 tal que:

$$|A(j\omega_0)\beta| = 1 \quad \text{y} \quad \angle A(j\omega_0)\beta = -180^\circ$$

Es decir, si la señal de realimentación llega **en fase** con la señal de entrada y con la **misma amplitud**, se produce oscilación (criterio de Barkhausen).

3.7.2 7.2 Margen de fase (Phase Margin, PM)

Es la “distancia angular” a la inestabilidad cuando $|A\beta| = 1$ (0 dB):

$$PM = 180^\circ + \angle A(j\omega_{gc})\beta$$

donde ω_{gc} es la frecuencia de cruce de ganancia ($|A\beta| = 0$ dB).

- $PM > 0$: sistema estable
- $PM > 45^\circ$: recomendado para buena respuesta transitoria
- $PM \approx 60^\circ$: óptimo en muchas aplicaciones

3.7.3 7.3 Margen de ganancia (Gain Margin, GM)

Es cuántos dB por debajo de 0 dB está $|A\beta|$ cuando la fase es -180° :

$$GM = -20 \log_{10} |A(j\omega_{pc})\beta|$$

donde ω_{pc} es la frecuencia de cruce de fase ($\angle A\beta = -180^\circ$).

- $GM > 0$ dB: sistema estable
- $GM > 10$ dB: recomendado

4 EJERCICIOS RESUELTOS

4.1 Ejercicio 1: Ganancia y Sensibilidad Básicas

Enunciado: Un amplificador tiene ganancia en lazo abierto $A = 1000$ y se realimenta con $\beta = 0.01$.

Calcular: 1. La ganancia en lazo cerrado A_{CL} 2. La sensibilidad (factor de desensibilización) 3. Si A varía un 20%, ¿cuánto varía A_{CL} ?

4.2 Ejercicio 2: Ancho de Banda y GBW

Enunciado: Un amplificador tiene las siguientes características en lazo abierto: - Ganancia DC: $A_0 = 10\,000$ - Polo dominante: $f_{p1} = 1$ kHz - Se aplica realimentación con $\beta = 0.1$

Calcular: 1. La ganancia en lazo cerrado $A_{CL,0}$ 2. La nueva frecuencia del polo $f_{CL,p1}$ 3. El producto ganancia-ancho de banda (GBW) en ambos casos

4.3 Ejercicio 3: Identificación de Topología

Enunciado: Dado el siguiente circuito de amplificador operacional en configuración no inversora, identificar:

1. Tipo de muestreo (tensión o corriente)
2. Tipo de mezcla (serie o paralelo)
3. Topología de realimentación
4. Factor β
5. Efecto esperado sobre Z_{in} y Z_{out}

El circuito tiene: - Op-amp con v^+ conectada a v_{in} - $R_1 = 1\text{ k}\Omega$ entre la salida y v^- - $R_2 = 9\text{ k}\Omega$ entre v^- y tierra

4.4 Ejercicio 4: Reducción de Distorsión

Enunciado: Un amplificador tiene los siguientes coeficientes no lineales: - Ganancia lineal: $a_1 = 500$ - Coeficiente de segundo armónico: $HD_2 = 5\%$ - Coeficiente de tercer armónico: $HD_3 = 1\%$

Se aplica realimentación con $\beta = 0.02$.

Calcular la distorsión en lazo cerrado para: 1. Misma señal de entrada 2. Misma señal de salida

4.5 Ejercicio 5 (Numérico): Desensibilización con $A\beta = 50$

Enunciado: Un amplificador con $A = 5000$ y $\beta = 0.01$ experimenta una variación de A del $\pm 10\%$ debido a temperatura.

Calcular la variación de A_{CL} y compararla con el caso sin realimentación.

5 CATÁLOGO DE EJERCICIOS

5.1 Tipo 1: Ganancia en lazo cerrado

Método: 1. Identificar A y β del circuito 2. Calcular $A\beta$ (ganancia de lazo) 3. Aplicar $A_{CL} = A/(1 + A\beta)$ 4. Verificar si $A\beta \gg 1$ para usar la aproximación $A_{CL} \approx 1/\beta$

Variantes: - Calcular A_{CL} dado A y β - Encontrar β para obtener una A_{CL} deseada - Determinar el A mínimo para que el error sea menor que un porcentaje dado

5.2 Tipo 2: Desensibilización

Método: 1. Calcular $1 + A\beta$ 2. Sensibilidad relativa: $\Delta A_{CL}/A_{CL} = \Delta A/(A \cdot (1 + A\beta))$ 3. Sensibilidad absoluta: $\Delta A_{CL} = \Delta A/(1 + A\beta)^2$

Variantes: - Calcular variación de A_{CL} dada variación de A - Diseñar $A\beta$ para limitar la sensibilidad a un valor máximo - Comparar variación con y sin realimentación

5.3 Tipo 3: Ancho de banda y GBW

Método: 1. Identificar A_0 y ω_{p1} del amplificador en lazo abierto 2. Calcular $GBW = A_0 \cdot \omega_{p1}$ 3. Nuevo polo: $\omega_{CL,p1} = (1 + A_0\beta)\omega_{p1}$ 4. Verificar conservación del GBW

Variantes: - Calcular nuevo BW con realimentación - Diseñar β para lograr un BW mínimo - Sistemas con múltiples polos

5.4 Tipo 4: Identificación de topología

Método: 1. Identificar cómo se muestrea la salida: - ¿Se toma tensión (paralelo) o corriente (serie)? 2. Identificar cómo se mezcla con la entrada: - ¿Se suma/resta en serie (tensión) o en paralelo (corriente)? 3. Determinar la topología y sus efectos sobre Z_{in} , Z_{out} 4. Calcular β de la red de realimentación

Variantes: - Amplificador no inversor (serie-paralelo) - Amplificador de transconductancia con degeneración (serie-serie) - Amplificador de transimpedancia (paralelo-paralelo)

5.5 Tipo 5: Estabilidad

Método: 1. Obtener $A(j\omega)\beta$ (Bode de la ganancia de lazo) 2. Encontrar ω_{gc} : frecuencia donde $|A\beta| = 0$ dB 3. $PM = 180^\circ + \angle A(j\omega_{gc})\beta$ 4. Encontrar ω_{pc} : frecuencia donde $\angle A\beta = -180^\circ$ 5. $GM = -20 \log |A(j\omega_{pc})\beta|$

Variantes: - Verificar estabilidad de un sistema dado - Diseñar compensación para lograr PM y GM deseados - Determinar β_{max} para estabilidad

6 RESUMEN

6.1 Tabla resumen de realimentación negativa

Propiedad	Sin realimentación	Con realimentación	Factor
Ganancia	A	$\frac{A}{1+A\beta} \approx \frac{1}{\beta}$	$\div (1 + A\beta)$
Sensibilidad	$\frac{dA}{A}$	$\frac{1}{1+A\beta} \frac{dA}{A}$	$\div (1 + A\beta)$
Ancho de banda	ω_{p1}	$(1 + A_0\beta)\omega_{p1}$	$\times (1 + A\beta)$
GBW	$A_0\omega_{p1}$	$A_0\omega_{p1}$	$= 1$ (conservado)
Distorsión (misma x)	HD_i	$\frac{HD_i}{(1+a_1\beta)^i}$	$\div (1 + a_1\beta)^i$
Distorsión (misma y)	HD_i	$\frac{HD_i}{1+a_1\beta}$	$\div (1 + a_1\beta)$

6.2 Topologías y su efecto en impedancias

Topología	A es	Mezcla	Muestreo	Z_{in}	Z_{out}
Serie-Paralelo	A_v	Serie	Paralelo (V)	$\uparrow (1 + A\beta)$	$\downarrow (1 + A\beta)$
Serie-Serie	G_m	Serie	Serie (I)	$\uparrow (1 + A\beta)$	$\uparrow (1 + A\beta)$
Paralelo-Paralelo	R_m	Paralelo	Paralelo (V)	$\downarrow (1 + A\beta)$	$\downarrow (1 + A\beta)$
Paralelo-Serie	A_i	Paralelo	Serie (I)	$\downarrow (1 + A\beta)$	$\uparrow (1 + A\beta)$

6.3 Regla mnemotécnica para impedancias

- **Serie en la entrada** $\rightarrow Z_{in}$ **aumenta** $\times (1 + A\beta)$
- **Paralelo en la entrada** $\rightarrow Z_{in}$ **disminuye** $\div (1 + A\beta)$
- **Paralelo en la salida** (muestreo de V) $\rightarrow Z_{out}$ **disminuye** $\div (1 + A\beta)$
- **Serie en la salida** (muestreo de I) $\rightarrow Z_{out}$ **aumenta** $\times (1 + A\beta)$

6.4 Criterios de estabilidad

Margen	Definición	Recomendado
Phase Margin	$PM = 180^\circ + \angle A\beta \Big _{ A\beta =0\text{dB}}$	$PM > 45^\circ$
Gain Margin	$GM = -20 \log A\beta \Big _{\angle A\beta=-180^\circ}$	$GM > 10 \text{ dB}$