Retroalimentación Negativa

(1a. parte)

Algunas de las figuras de esta presentación fueron tomadas de las páginas de internet de los autores de los textos:

A.S. Sedra and K.C. Smith, *Microelectronic Circuits*. New York, NY: Oxford University Press, 1998.

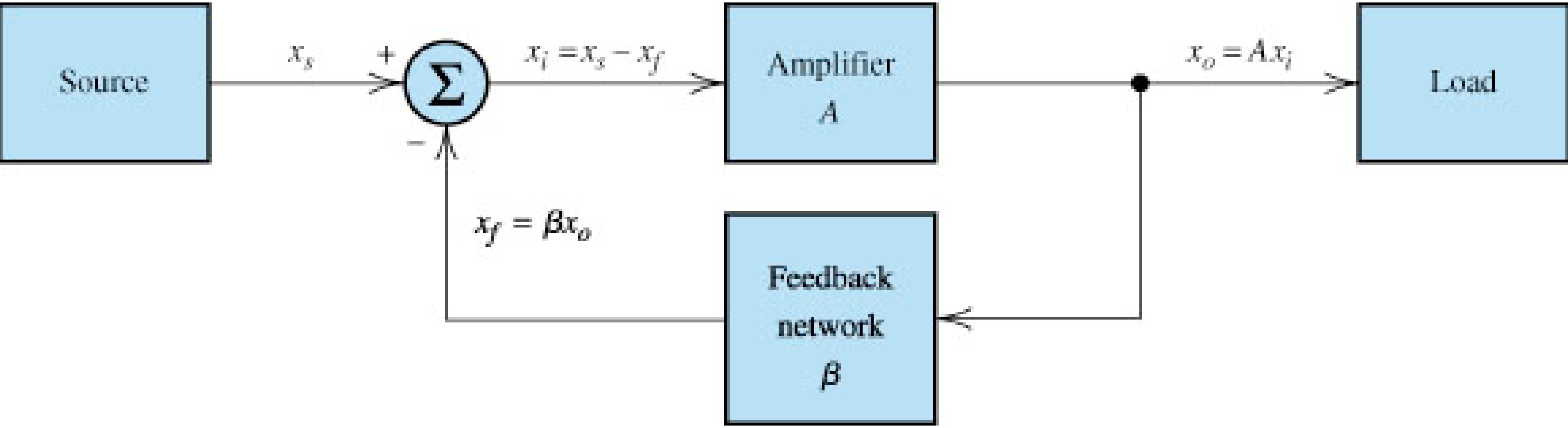
A.R. Hambley, *Electronics: A Top-Down Approach to Computer-Aided Circuit Design*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 2000.

Dr. J.E. Rayas Sánchez

Introducción

- La retroalimentación consiste en tomar parte de la salida de un sistema y regresarlo a la entrada
- Ventajas de la retroalimentación negativa:
  - Mejorara niveles de impedancias
  - Aumenta el ancho de banda
  - Reduce la sensibilidad a la variación de parámetros
  - Reduce la distorsión
  - Aumenta la inmunidad al ruido
- Desventajas de la retroalimentación negativa:
  - Reduce la ganancia
  - Aumenta los riesgos de inestabilidad

Amplificador Genérico Retroalimentado



$$x_i = x_s - x_f \qquad x_f = \beta x_o \qquad x_o = A x_i$$

$$x_o = A(x_s - x_f) = A(x_s - \beta x_o) \qquad A_f \equiv \frac{x_o}{x_s} = \frac{A}{1 + A\beta}$$

A_f Ganancia del amplificador retroalimentado

$A\beta$ Ganancia de lazo

si $A\beta >> 1,\ A_f \approx \dfrac{1}{\beta}$

De-sensibilidad de la Ganancia

'*A*' es altamente dependiente de los parámetros del dispositivo activo, de los niveles de polarización, de la temperatura, etc.

$$A_f = \frac{A}{1 + A\beta}$$

$$\frac{\partial A_f}{\partial A} = \frac{\partial}{\partial A}\left(\frac{A}{1 + A\beta}\right) = \frac{1}{(1 + A\beta)^2}$$

Un cambio pequeño en A produce un cambio en A_f dado por

$$\Delta A_f = \frac{\Delta A}{(1 + A\beta)^2}$$

El cambio fraccional en A_f es

$$\frac{\Delta A_f}{A_f} = \frac{\Delta A}{(1 + A\beta)^2}\,\frac{1 + A\beta}{A} = \frac{\Delta A / A}{1 + A\beta}$$

Ampliación del Ancho de Banda

$$A(s) = \frac{A_M}{1 + s/\omega_H}$$

A_M ganancia a frecuencias medias

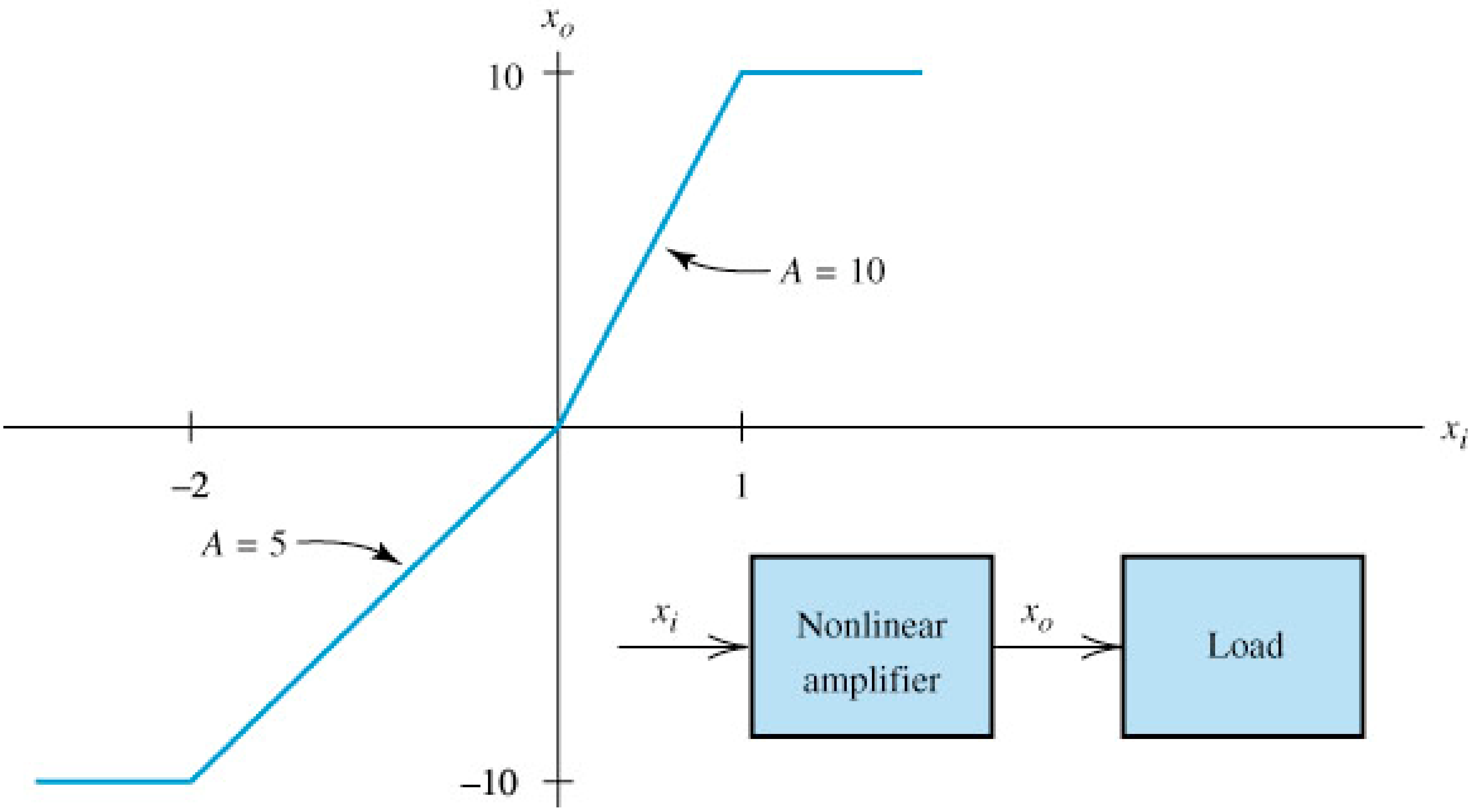
ω_H frecuencia de corte en altas

$$A_f = \frac{A}{1 + A\beta} = \frac{\dfrac{A_M}{1 + s/\omega_H}}{1 + \dfrac{A_M \beta}{1 + s/\omega_H}} = \frac{A_M}{1 + s/\omega_H + A_M \beta} = \frac{\dfrac{A_M}{1 + A_M \beta}}{1 + \dfrac{s}{\omega_H (1 + A_M \beta)}}$$

Por lo tanto $\omega_{Hf} = \omega_H (1 + A_M \beta)$

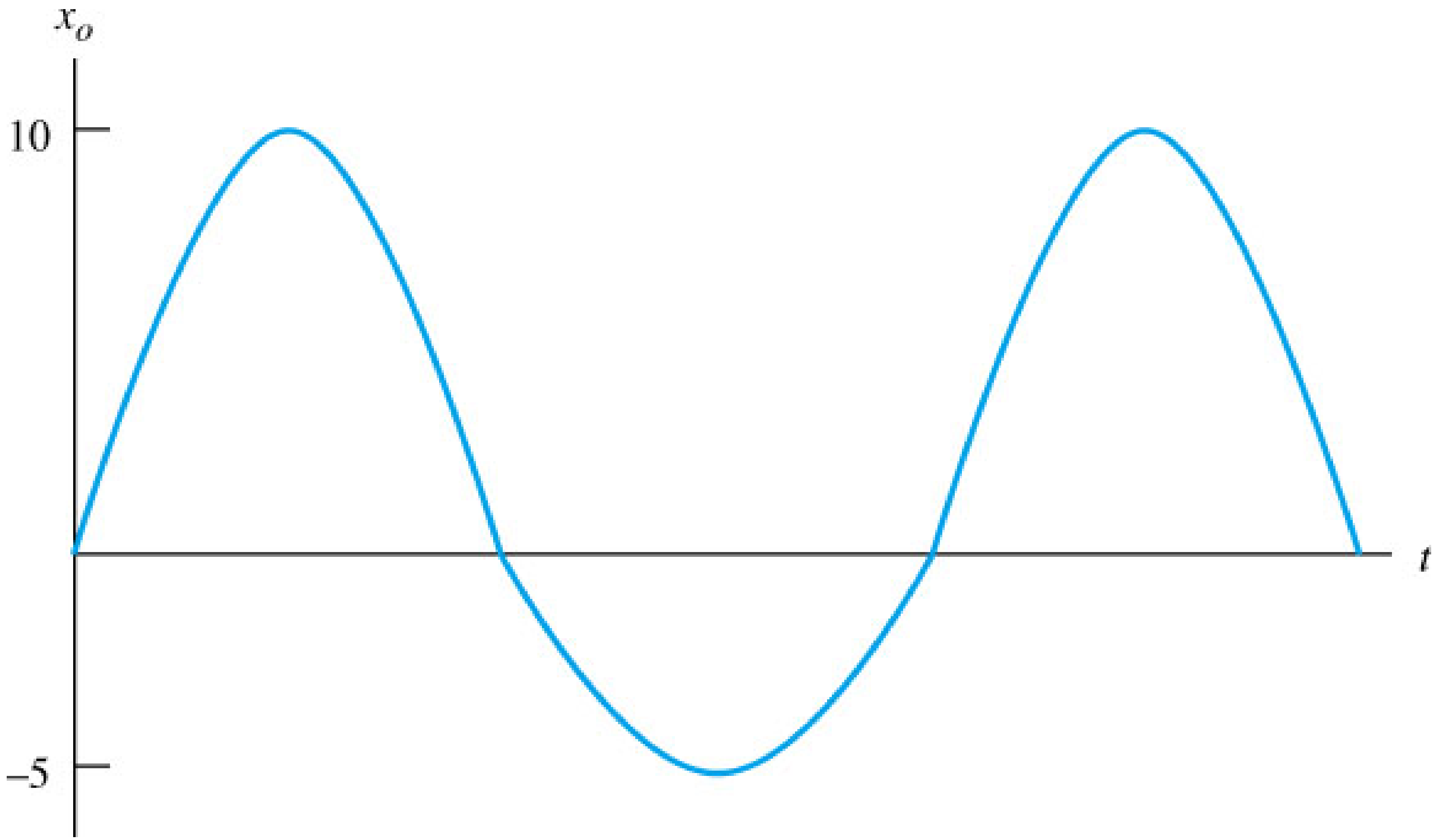
Análogamente se puede demostrar que $\omega_{Lf} = \omega_L / (1 + A_M \beta)$

Distorsión No-Lineal

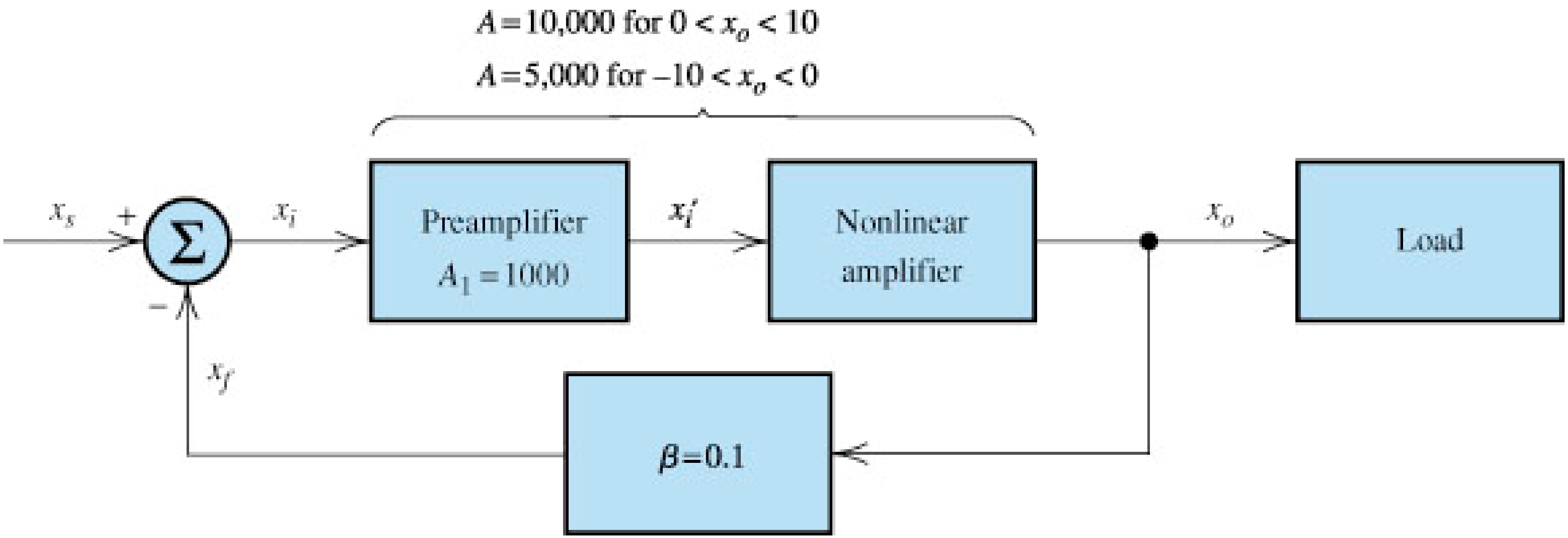


Distorsión No-Lineal (cont.)

Si $x_i = \text{sen}(\omega t)$...



Reducción de la Distorsión No-Lineal

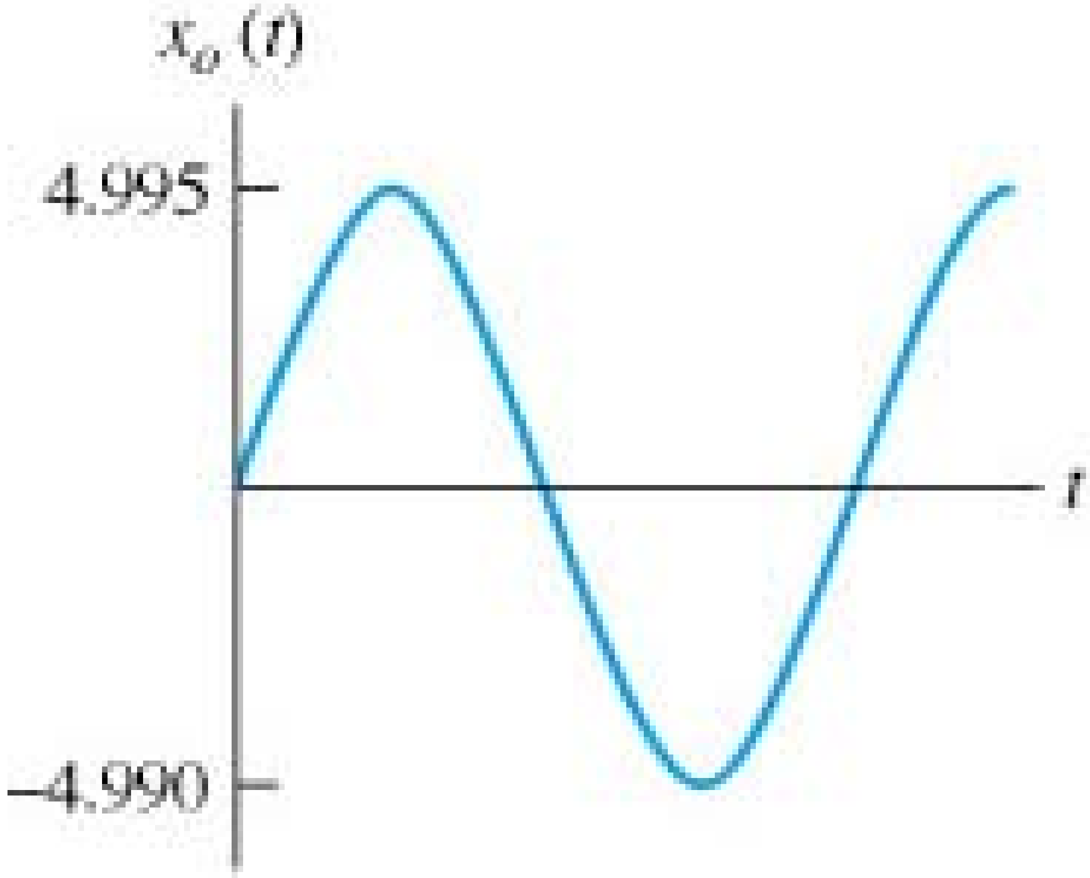


$$A_f = \frac{x_o}{x_s} = \frac{A}{1 + A\beta}$$

como $A\beta >> 1$ para $-10 < x_o < +10$, $A_f \approx \frac{1}{\beta} = 10$

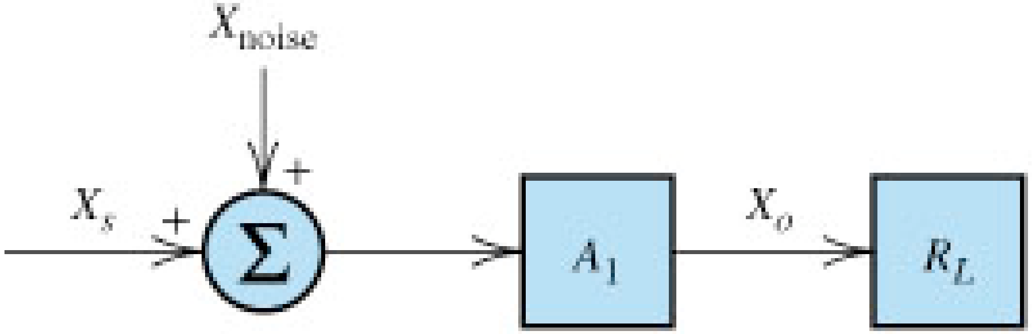
Reducción de la Distorsión No-Lineal (cont.)

Si $x_i = 0.5\ \text{sen}(\omega t)$...

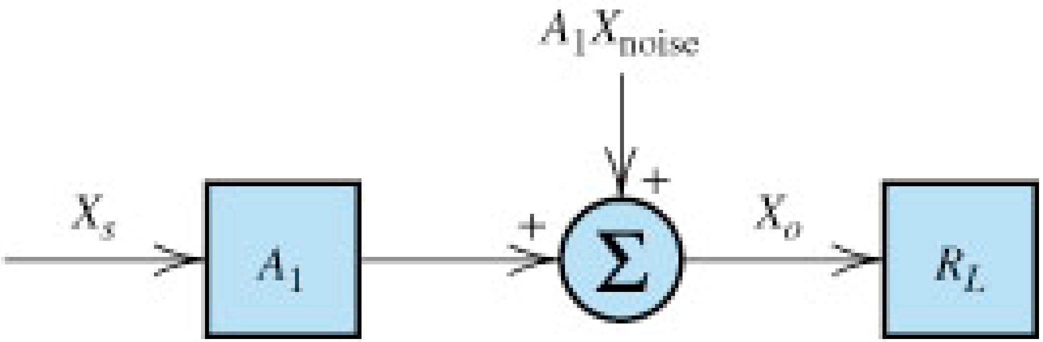


Modelado de Amplificadores con Ruido

Señal de ruido referida a la entrada



Señal de ruido referida a la salida



Relación Señal a Ruido (SNR)

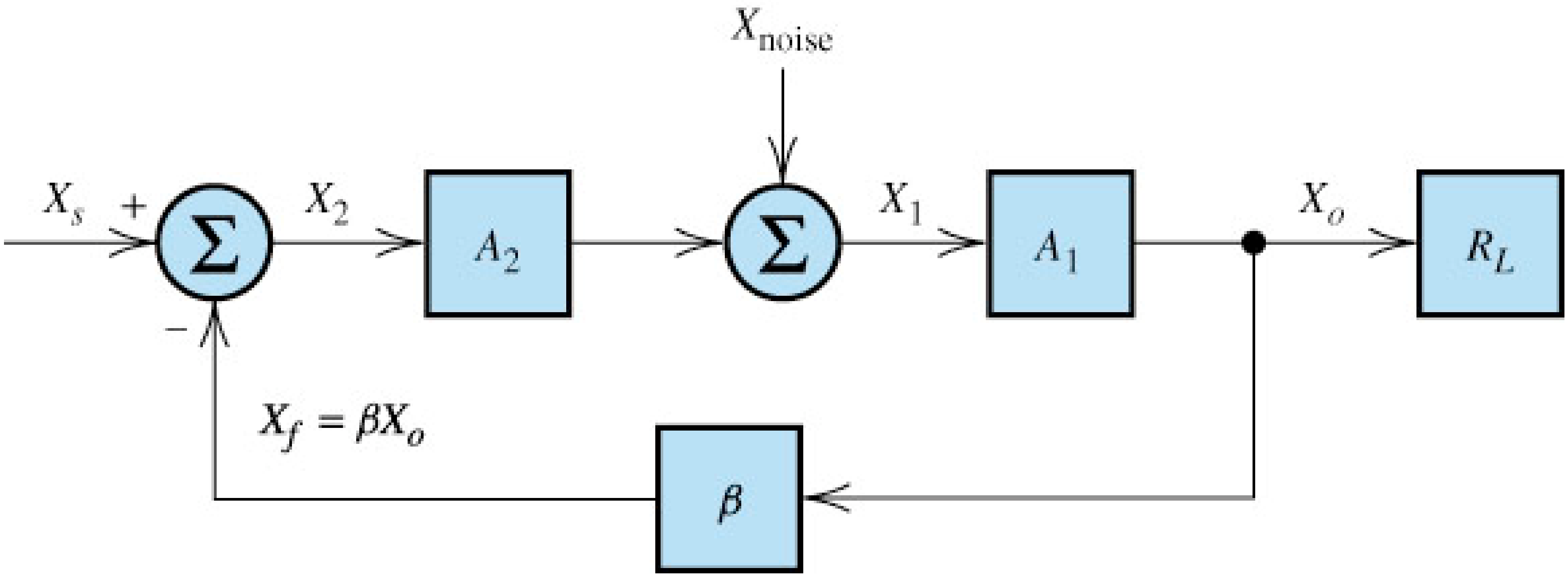
$$SNR = \frac{P_{señal}}{P_{ruido}}$$

$$P_{señal} = \frac{(A_1 X_s)^2}{R_L} \qquad P_{ruido} = \frac{(A_1 X_{noise})^2}{R_L} \qquad SNR = \frac{X_s^{\,2}}{X_{noise}^{\,2}}$$

$$SNR_{\mathrm{dB}} = 10\log\left(\frac{P_{señal}}{P_{ruido}}\right)$$

$$SNR_{\mathrm{dB}} = 20\log\left(\frac{X_s}{X_{noise}}\right)$$

SNR en un Amplificador Retroalimentado



$$X_2 = X_s - \beta X_o \qquad X_1 = A_2 X_2 + X_{noise} \qquad X_o = A_1 X_1$$

$$X_o = A_1[A_2(X_s - \beta X_o) + X_{noise}]$$

$$X_o = X_s \frac{A_1 A_2}{1 + A_1 A_2 \beta} + X_{noise} \frac{A_1}{1 + A_1 A_2 \beta}$$

$$SNR_f = \frac{X_{sf}^{\ 2}}{X_{noisef}^{\ 2}}$$

$$SNR_f = SNR \times A_2^{\ 2}$$

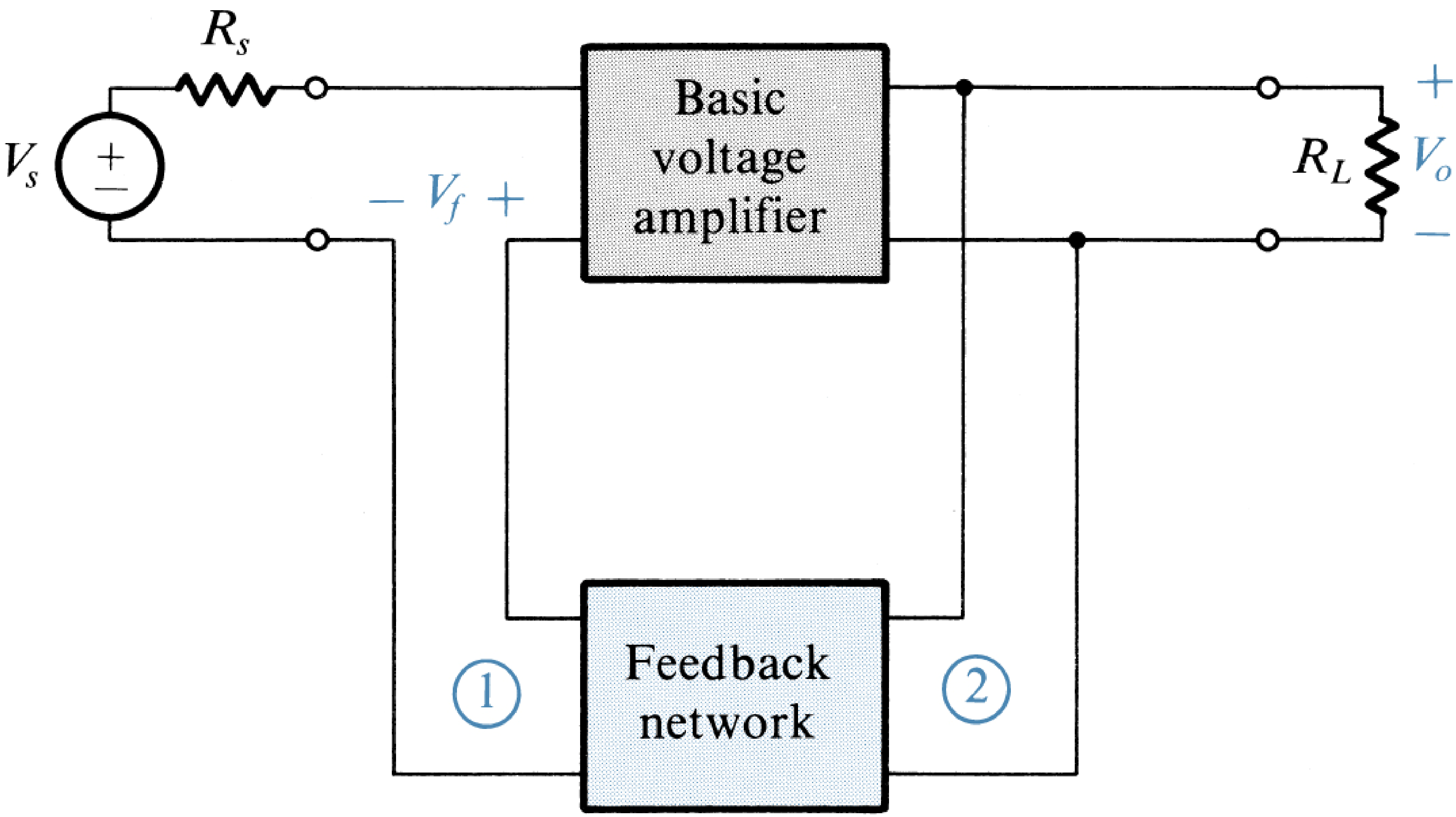
Tipos de Amplificadores

- Amplificadores de Voltaje
- Amplificadores de Corriente
- Amplificadores de Transresistencia
- Amplificadores de Transconductancia

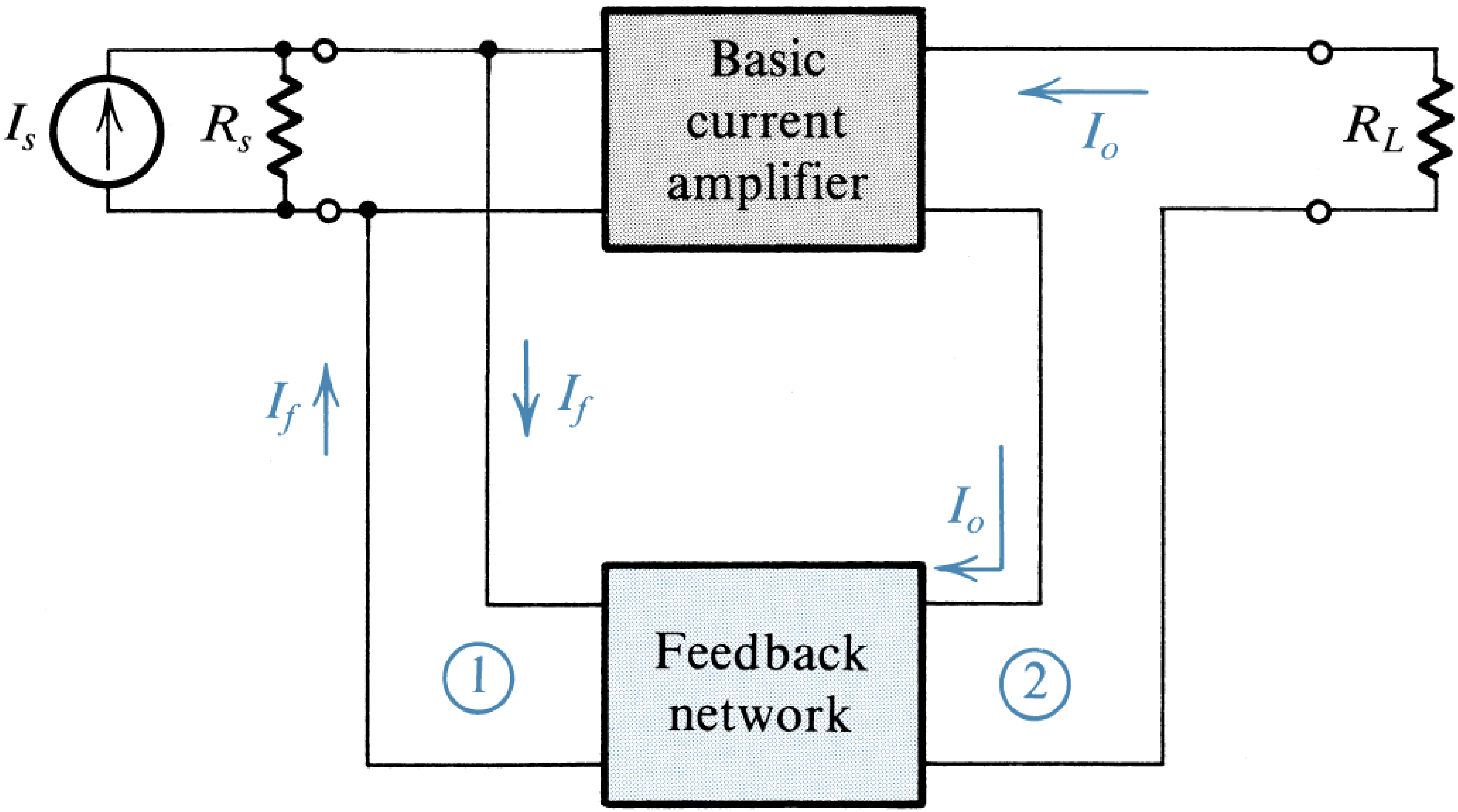
Topologías de Retroalimentación

- Retroalimentación Serie-Paralelo (S-P), o Mezclado de Voltaje/Sensado de Voltaje
- Retroalimentación Paralelo-Serie (P-S), o Mezclado de Corriente/Sensado de Corriente
- Retroalimentación Paralelo-Paralelo (P-P), o Mezclado de Corriente/Sensado de Voltaje
- Retroalimentación Serie-Serie (S-S), o Mezclado de Voltaje/Sensado de Corriente

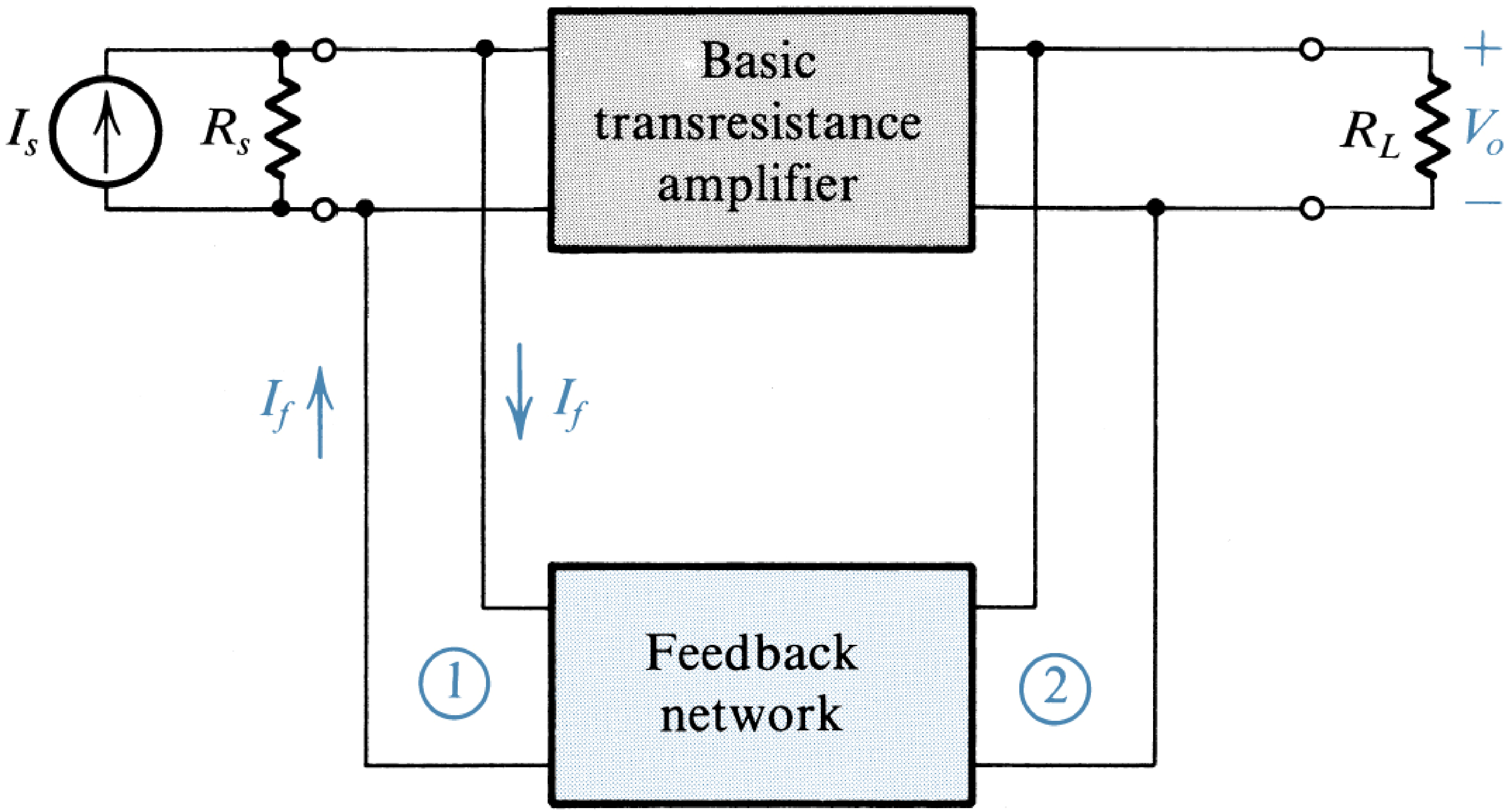
Retroalimentación Serie-Paralelo (S-P)



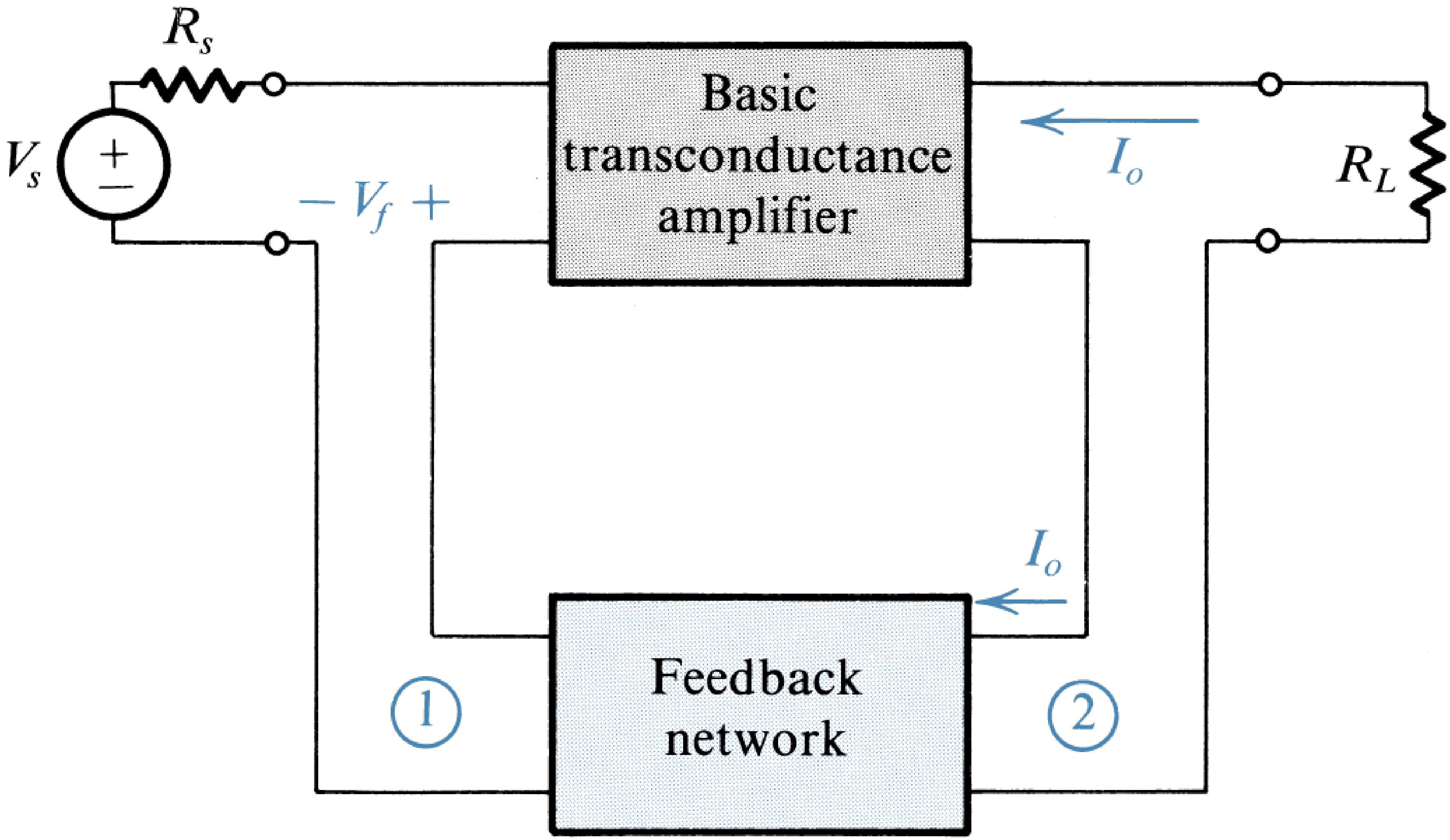
Retroalimentación Paralelo-Serie (P-S)



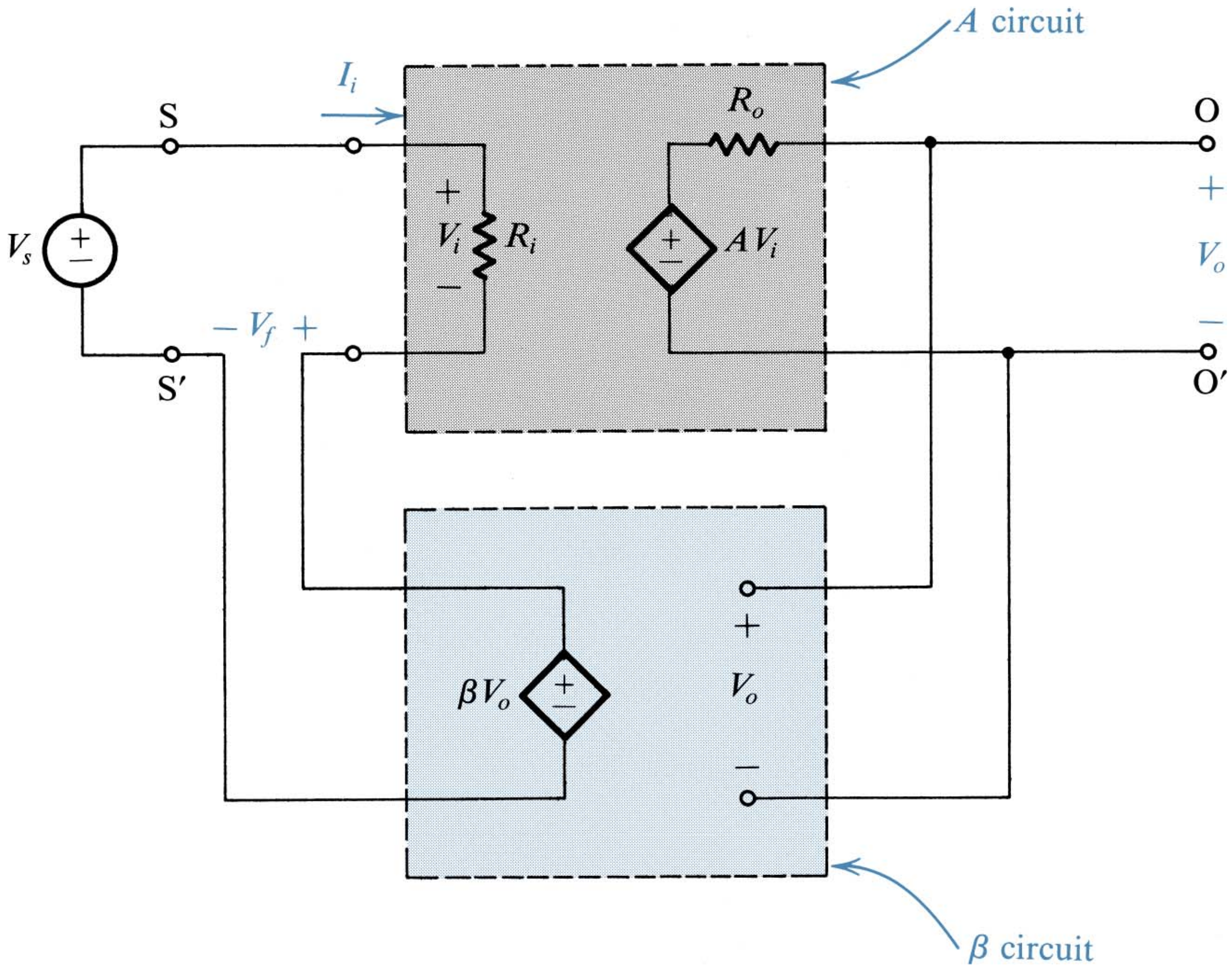
Retroalimentación Paralelo-Paralelo (P-P)



Retroalimentación Serie-Serie (S-S)



Amp. con Retroalimentación S-P (Caso Ideal)



A_f :

$$V_o = AV_i$$

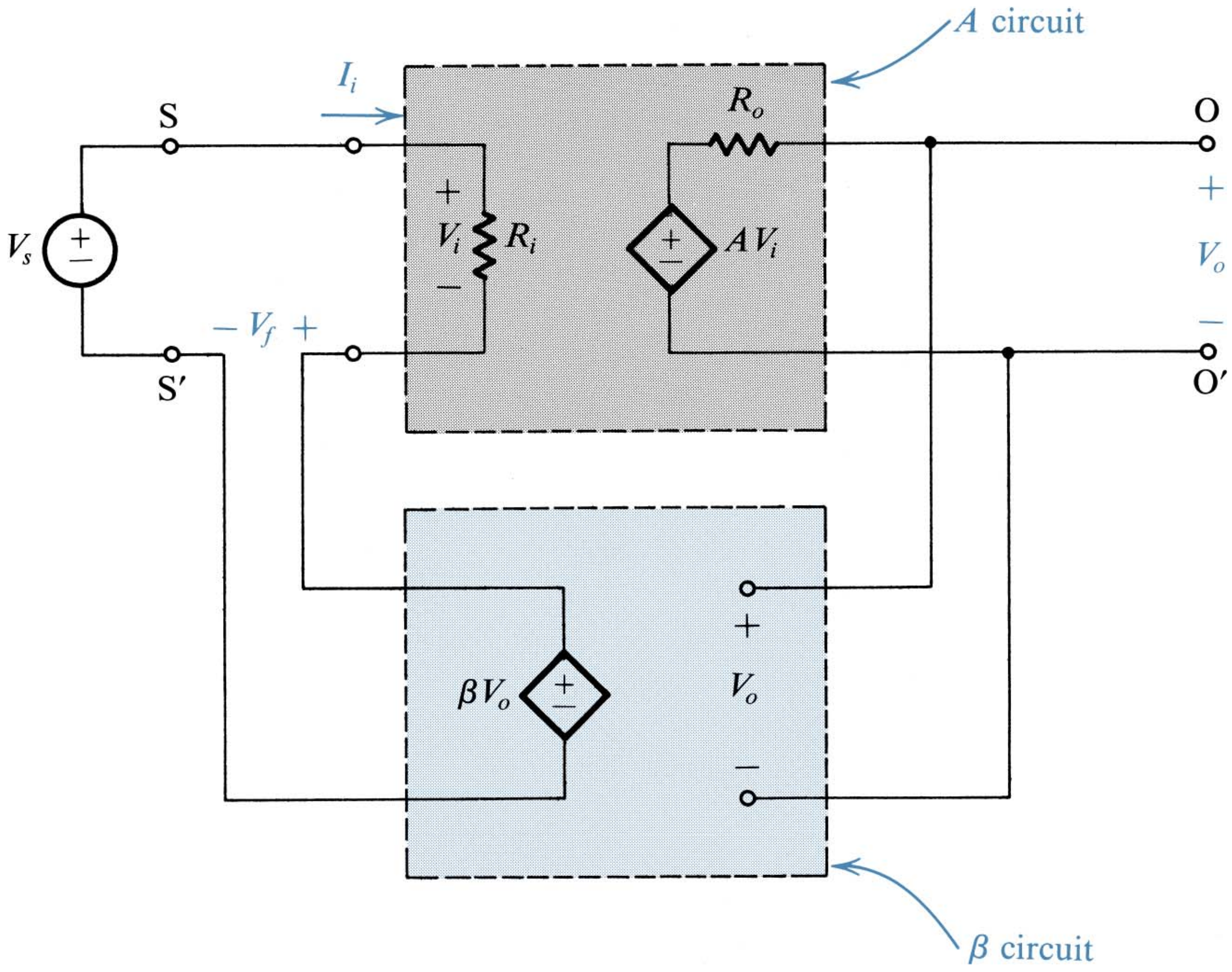
$$V_i = V_s - V_f$$

$$V_i = V_s - \beta V_o$$

$$V_o = A(V_s - \beta V_o)$$

$$A_f = \frac{V_o}{V_s} = \frac{A}{1 + A\beta}$$

Amp. con Retroalimentación S-P (Caso Ideal)



R_{if} :

$$R_{if} = \frac{V_s}{I_i}$$

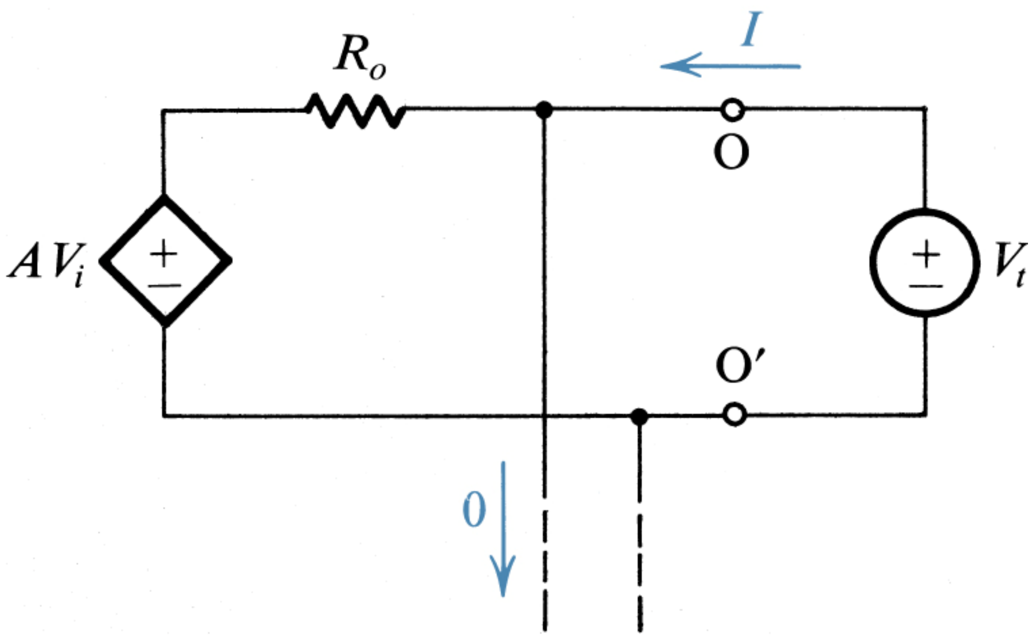
$$R_{if} = \frac{V_s}{V_i / R_i}$$

$$V_i = V_s - \beta V_o$$

$$V_i = V_s - A\beta V_i$$

$$R_{if} = R_i(1 + A\beta)$$

Amp. con Retroalimentación S-P (Caso Ideal)



R_{of} :

$$R_{of} = \left.\frac{V_t}{I}\right|_{V_s=0}$$

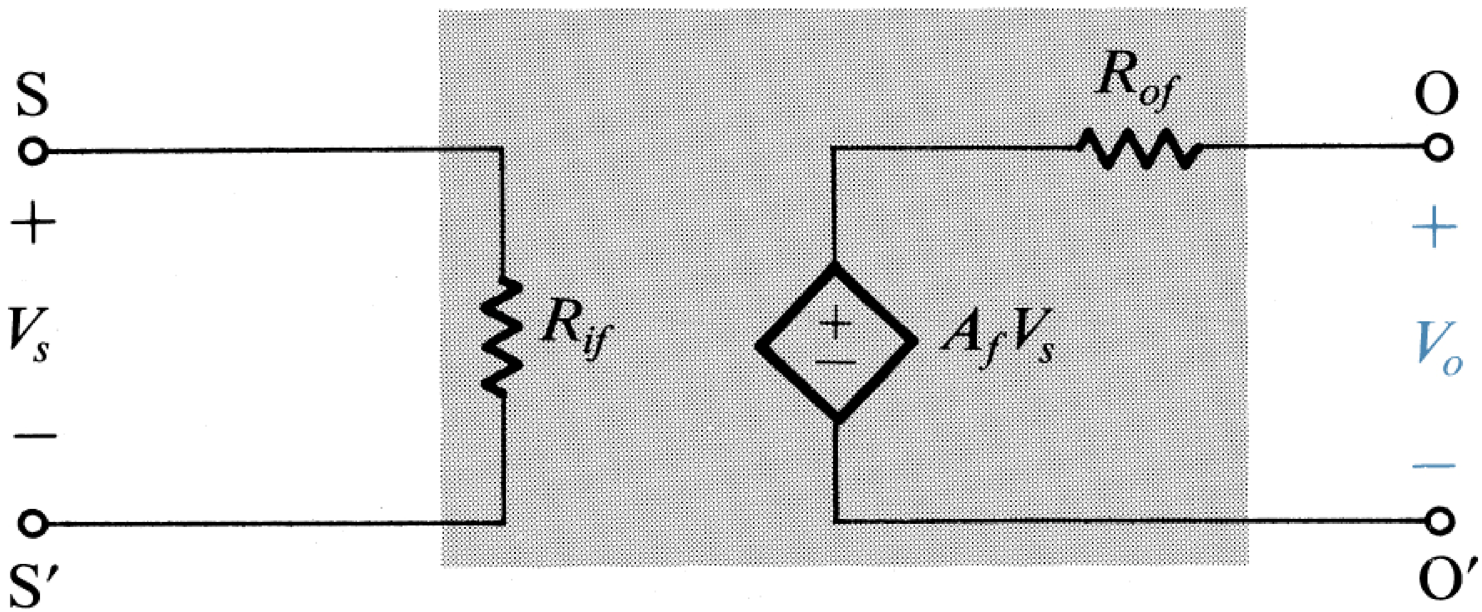
$$I = \frac{V_t - AV_i}{R_o}$$

$$V_i = -\beta V_o = -\beta V_t$$

$$I = \frac{V_t + A\beta V_t}{R_o}$$

$$R_{of} = \frac{R_o}{1 + A\beta}$$

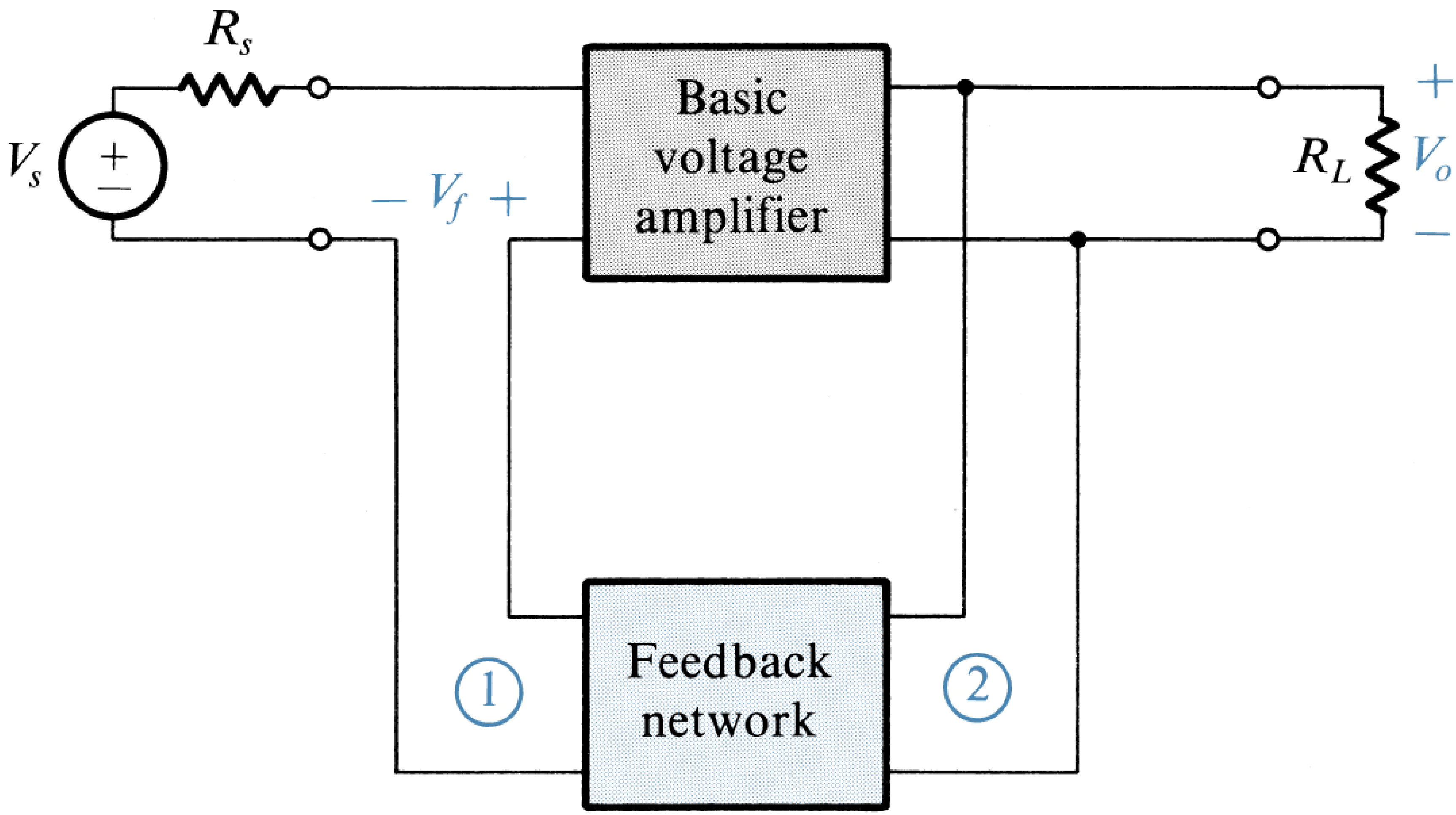
Amp. con Retroalimentación S-P (Caso Ideal)



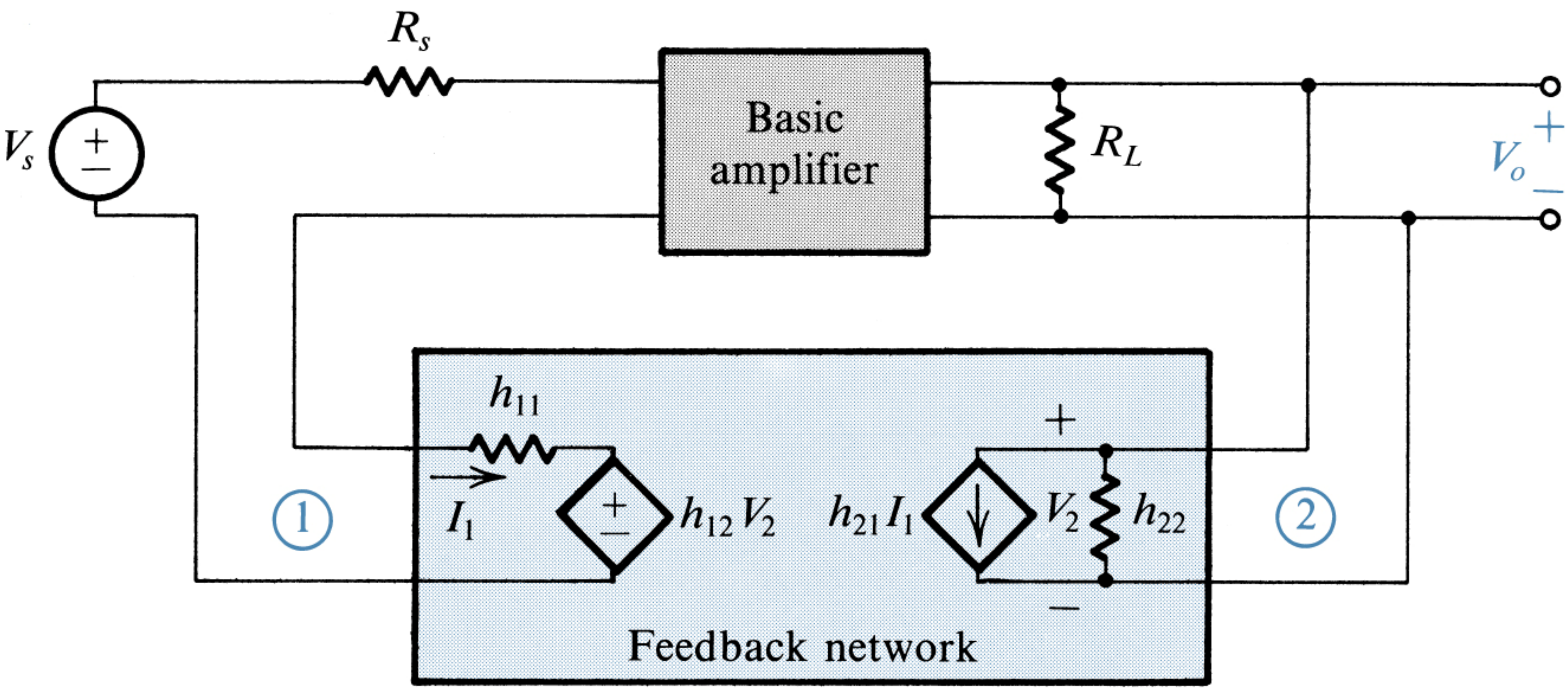
$$A_f = \frac{V_o}{V_s} = \frac{A}{1 + A\beta} \qquad R_{if} = R_i(1 + A\beta) \qquad R_{of} = \frac{R_o}{1 + A\beta}$$

Dr. J.E. Rayas Sánchez

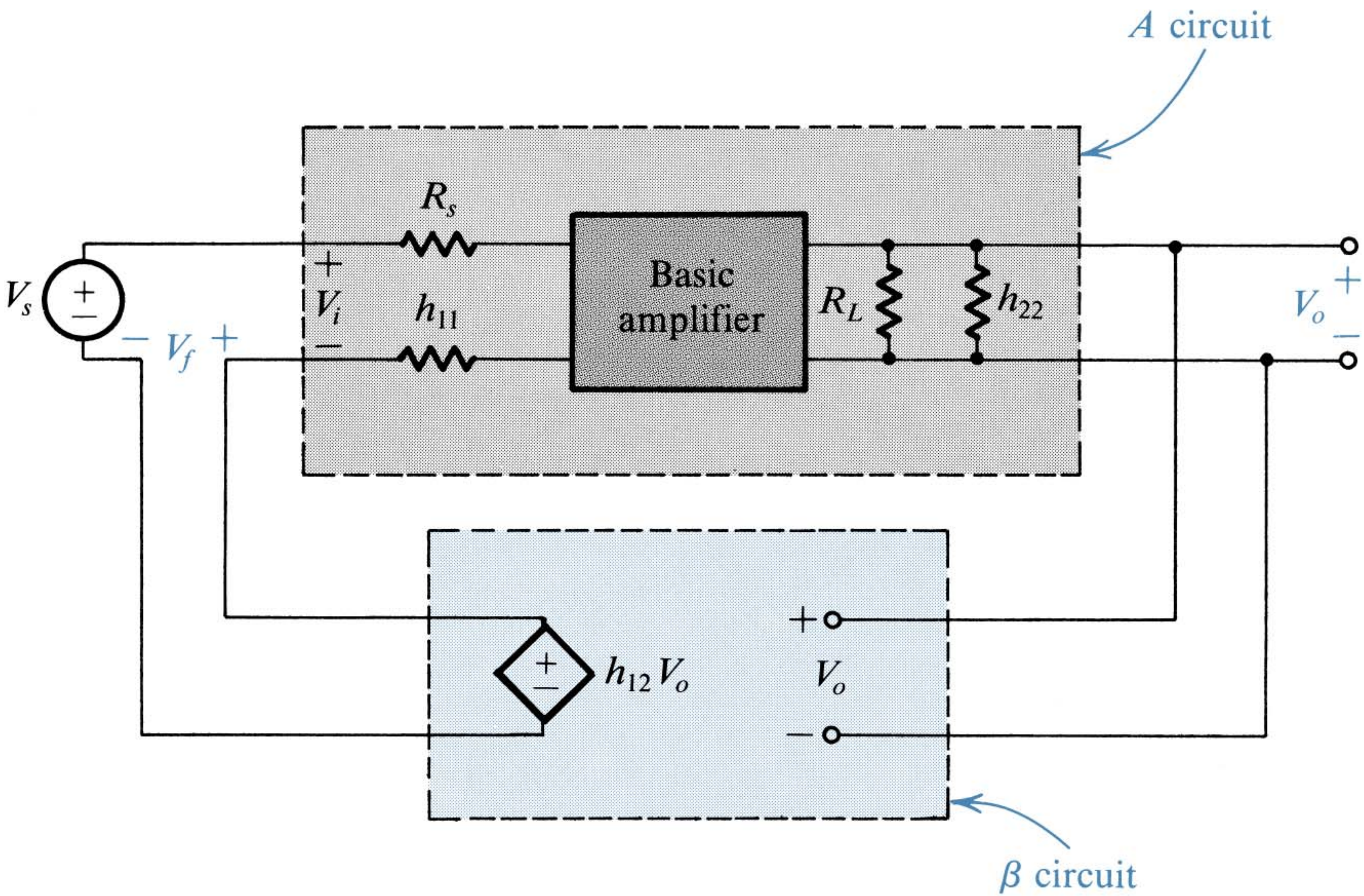
Amp. con Retroalimentación S-P (Caso Real)



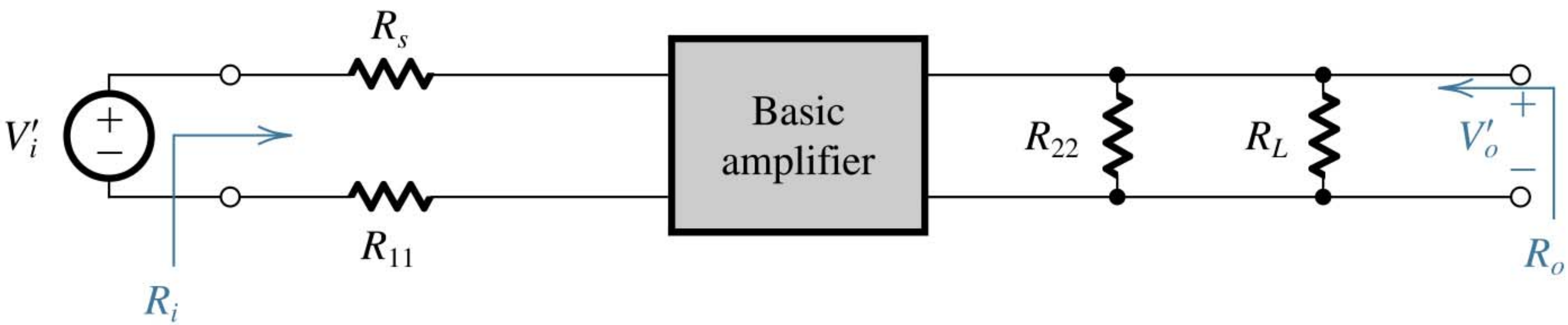
Amp. con Retroalimentación S-P (Caso Real)



Amp. con Retroalimentación S-P (Caso Real)

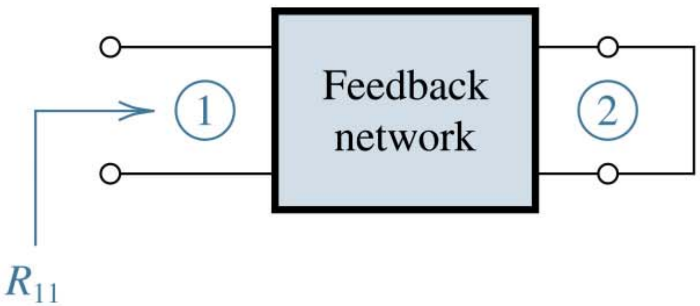


Método para Calcular A y β en el Caso S-P

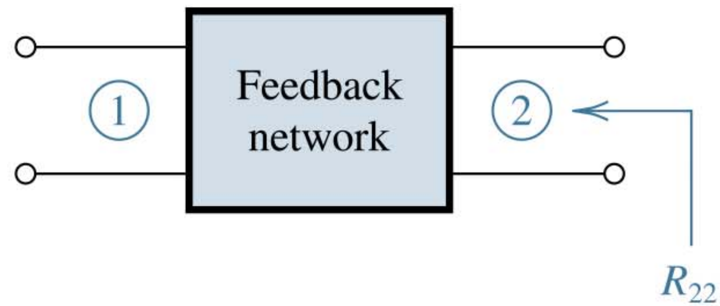


$$A = \frac{V_o'}{V_i'}$$

where R_{11} is obtained from



and R_{22} is obtained from



$$\beta = \left.\frac{V_f'}{V_o'}\right|_{I_1=0}$$

Dr. J.E. Rayas Sánchez

Validez del Método para Calcular de A y β (S-P)

$\boldsymbol{H}_a$ Parámetros híbridos del amplificador A

$\boldsymbol{H}_\beta$ Parámetros híbridos de la red β

El método propuesto es exacto siempre que

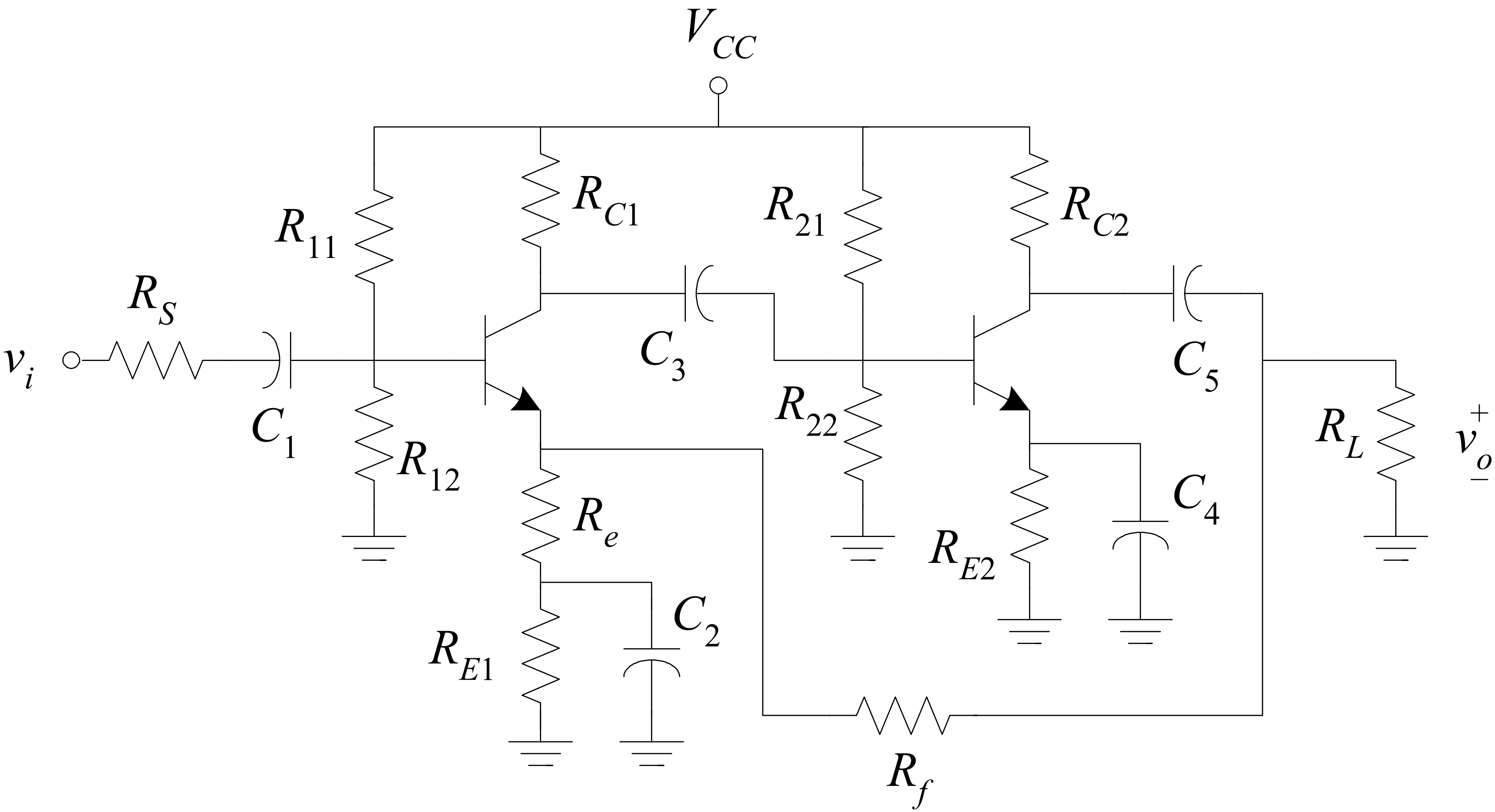
$$h_{12a} << h_{12_\beta}$$

$$h_{21a} >> h_{21_\beta}$$

Una vez calculadas A y β siguiendo el método propuesto,

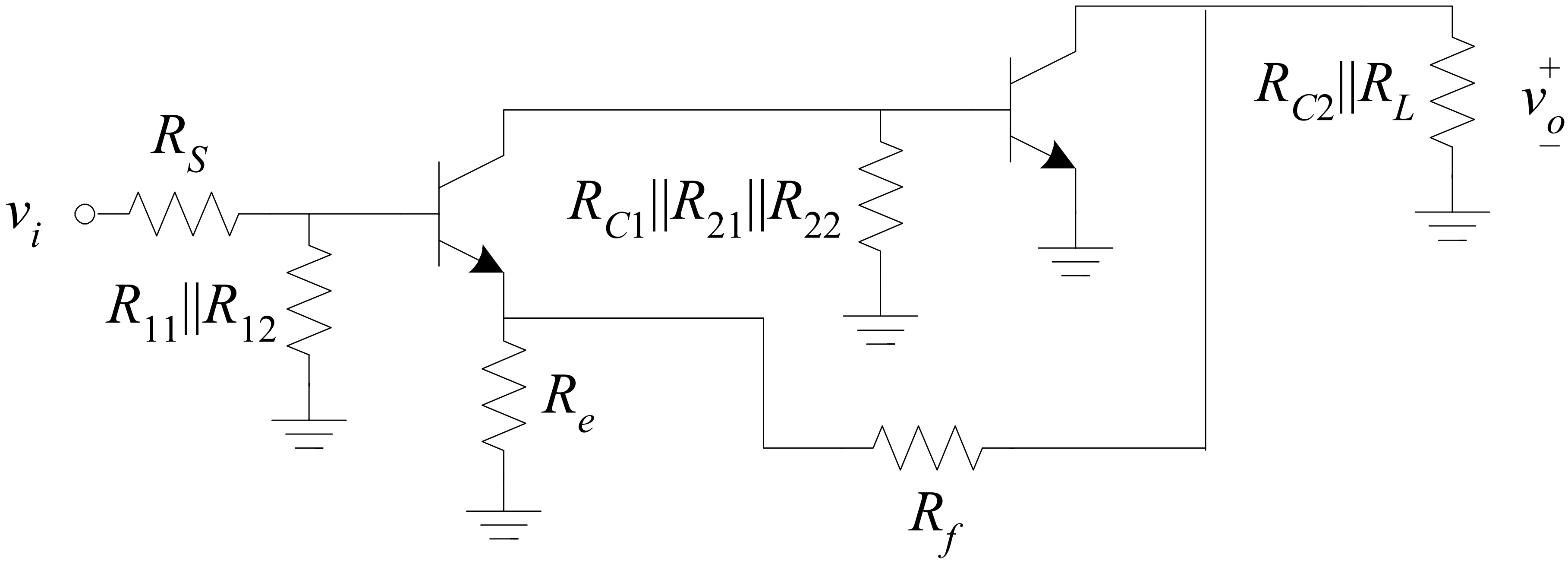
$$A_f = \frac{V_o}{V_s} = \frac{A}{1 + A\beta} \qquad R_{if} = R_i(1 + A\beta) \qquad R_{of} = \frac{R_o}{1 + A\beta}$$

Ejemplo de Retroalimentación S-P



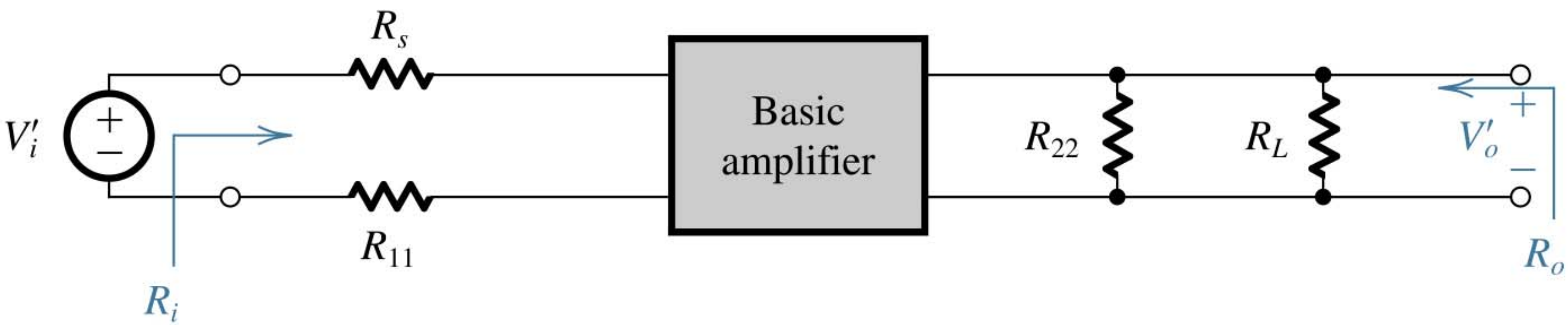
Ejemplo de Retroalimentación S-P (cont.)

Equivalente para señal a frecuencias medias y altas



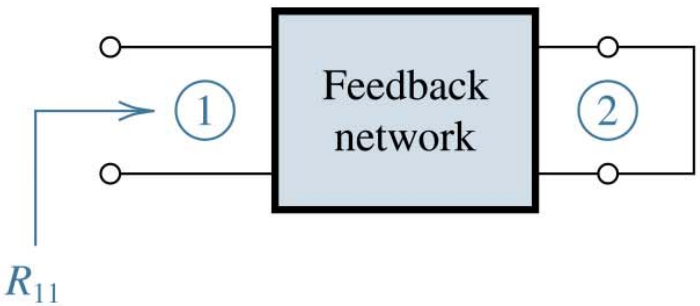
$$v_{th} = \frac{(R_{11} \,||\, R_{12})v_i}{R_S + (R_{11} \,||\, R_{12})} \qquad r_{th} = R_S \,||\, R_{11} \,||\, R_{12}$$

Método para Calcular A y β en el Caso S-P

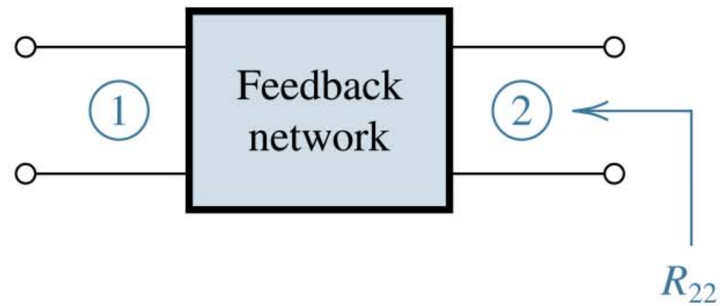


$$A = \frac{V_o'}{V_i'}$$

where R_{11} is obtained from



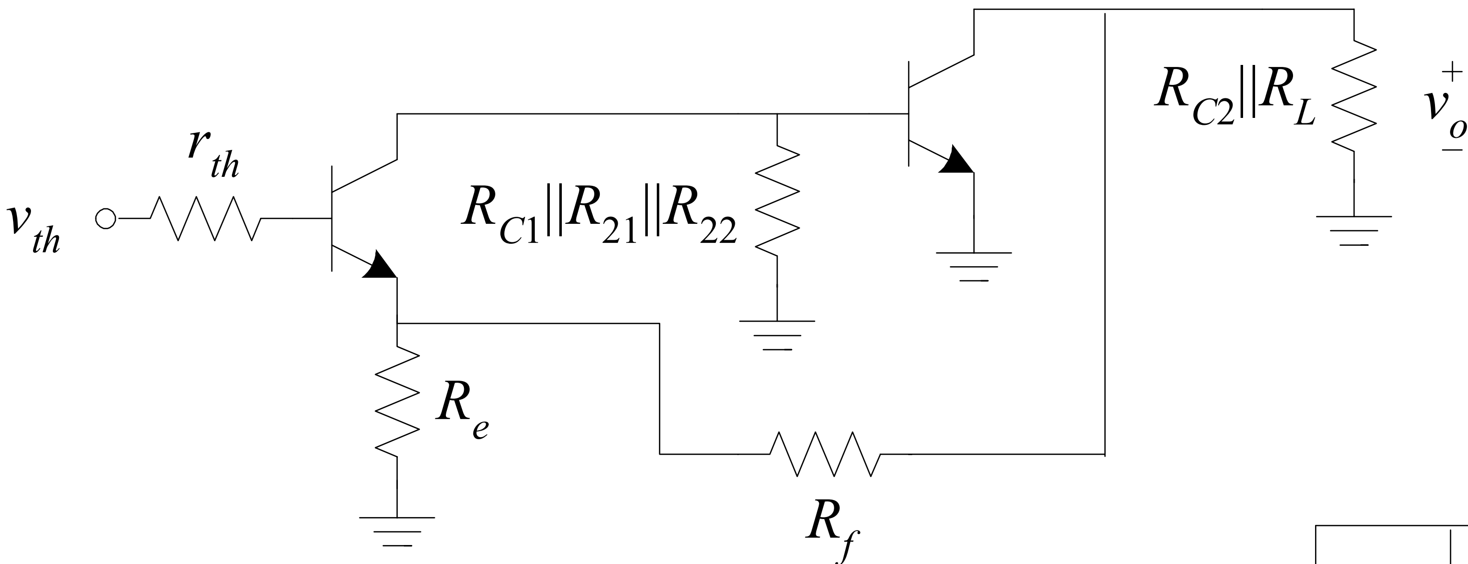
and R_{22} is obtained from



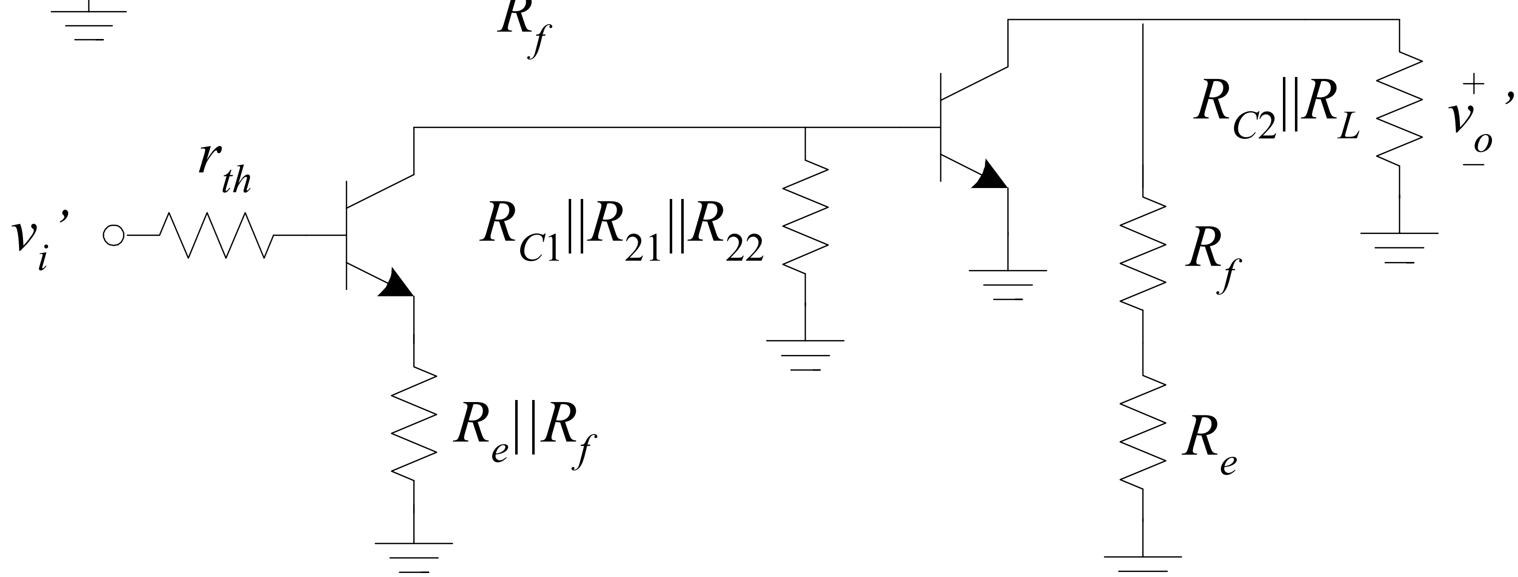
$$\beta = \left.\frac{V_f'}{V_o'}\right|_{I_1=0}$$

Dr. J.E. Rayas Sánchez

Ejemplo de Retroalimentación S-P (cont.)

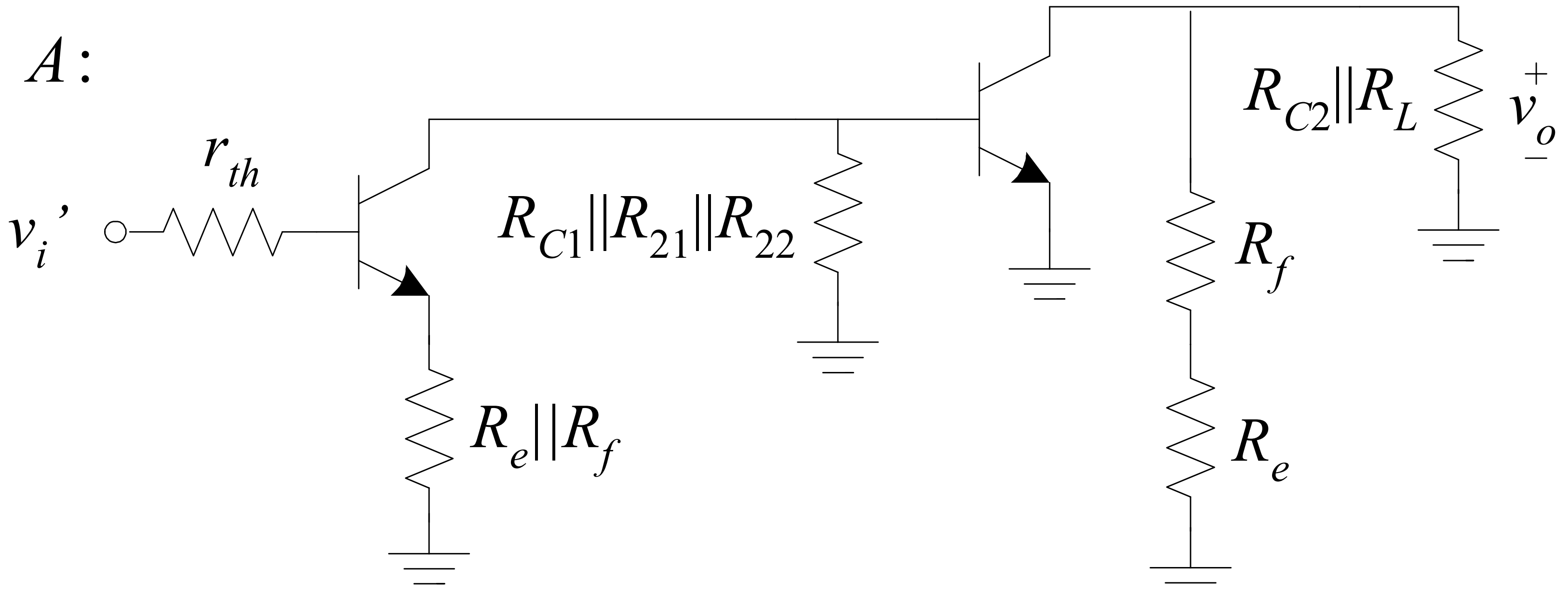


A:



Ejemplo de Retroalimentación S-P (cont.)

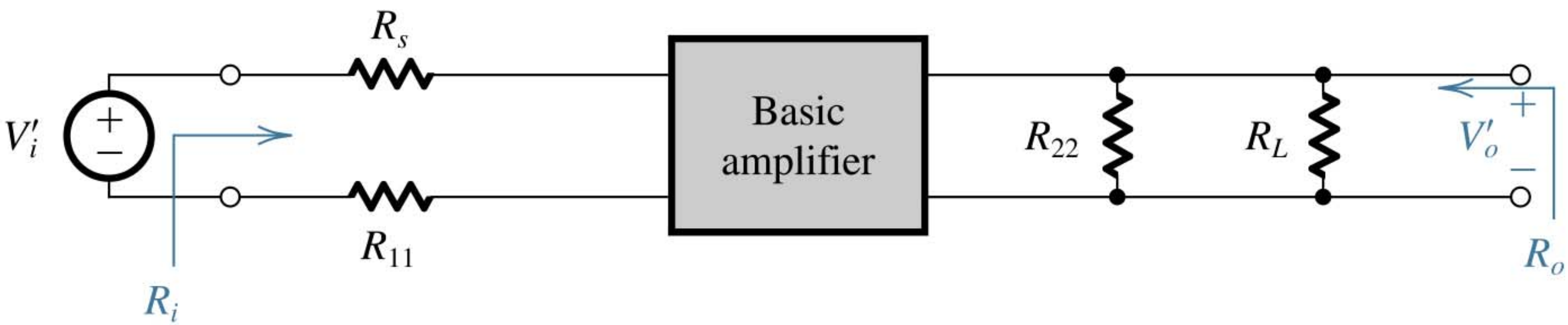
$A:$



$$A_{DE} = \frac{-g_{m1}(R_{C1} \parallel R_{21} \parallel R_{22} \parallel r_{\pi 2})}{1 + g_{m1}(R_e \parallel R_f)} \qquad A_{EC} = -g_{m2}[(R_f + R_e) \parallel R_{C2} \parallel R_L]$$

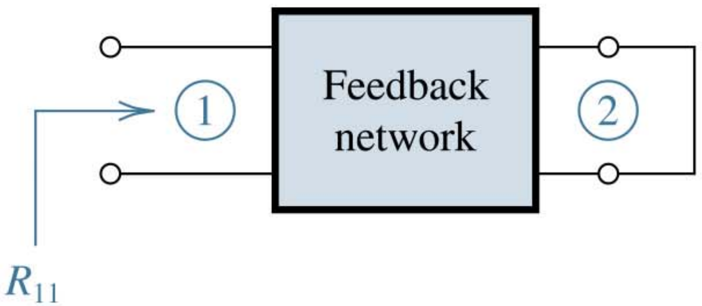
$$A = \frac{v_o'}{v_i'} = \frac{\beta(R_e \parallel R_f) + r_{\pi 1}}{r_{th} + \beta(R_e \parallel R_f) + r_{\pi 1}} A_{DE} A_{EC}$$

Método para Calcular A y β en el Caso S-P

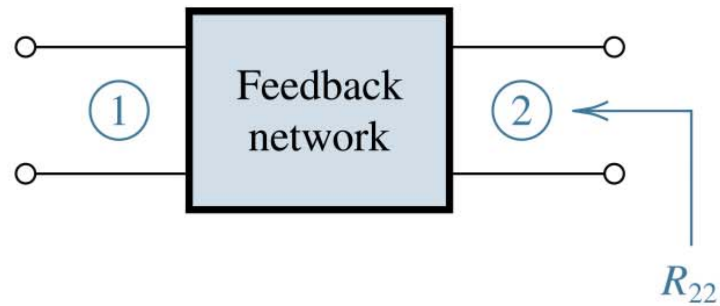


$$A = \frac{V_o'}{V_i'}$$

where R_{11} is obtained from

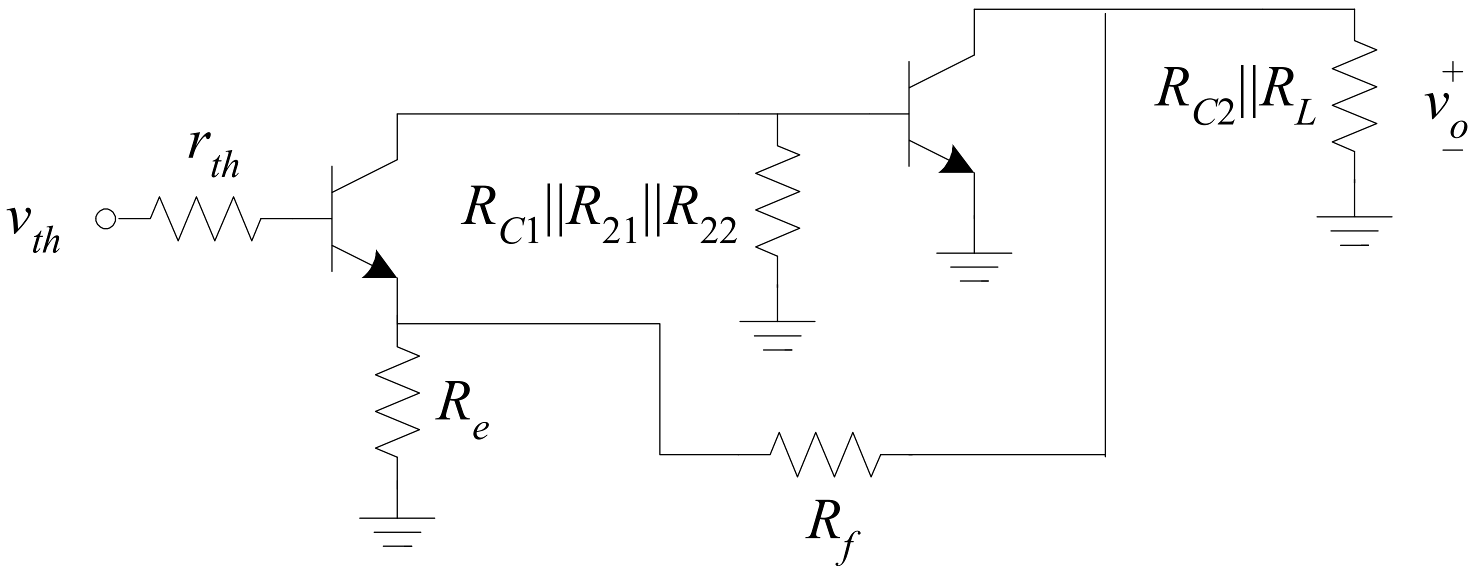


and R_{22} is obtained from

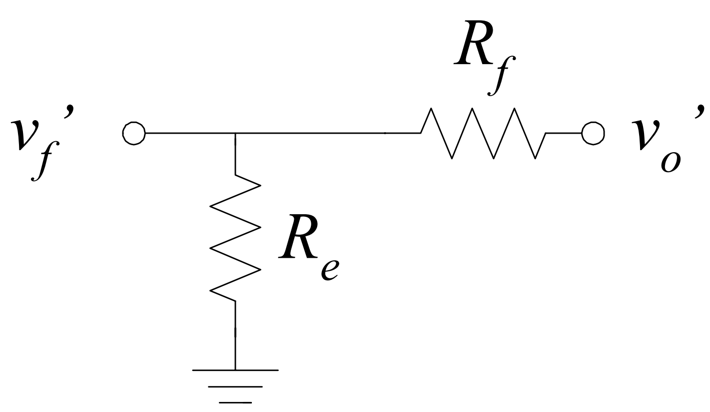


$$\beta = \left.\frac{V_f'}{V_o'}\right|_{I_1=0}$$

Ejemplo de Retroalimentación S-P (cont.)

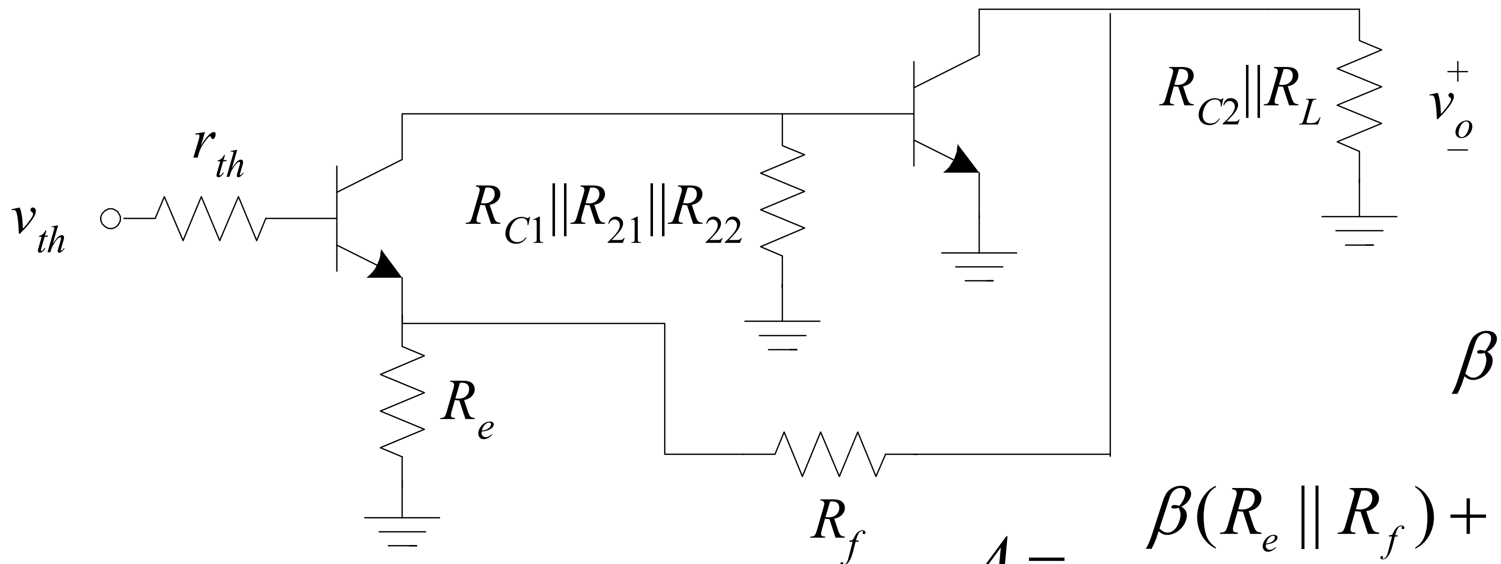


$\beta :$



$$\beta = \frac{R_e}{R_e + R_f}$$

Ejemplo de Retroalimentación S-P (cont.)



$$\beta = \frac{R_e}{R_e + R_f}$$

$$A = \frac{\beta(R_e \parallel R_f) + r_{\pi 1}}{r_{th} + \beta(R_e \parallel R_f) + r_{\pi 1}} A_{DE} A_{EC}$$

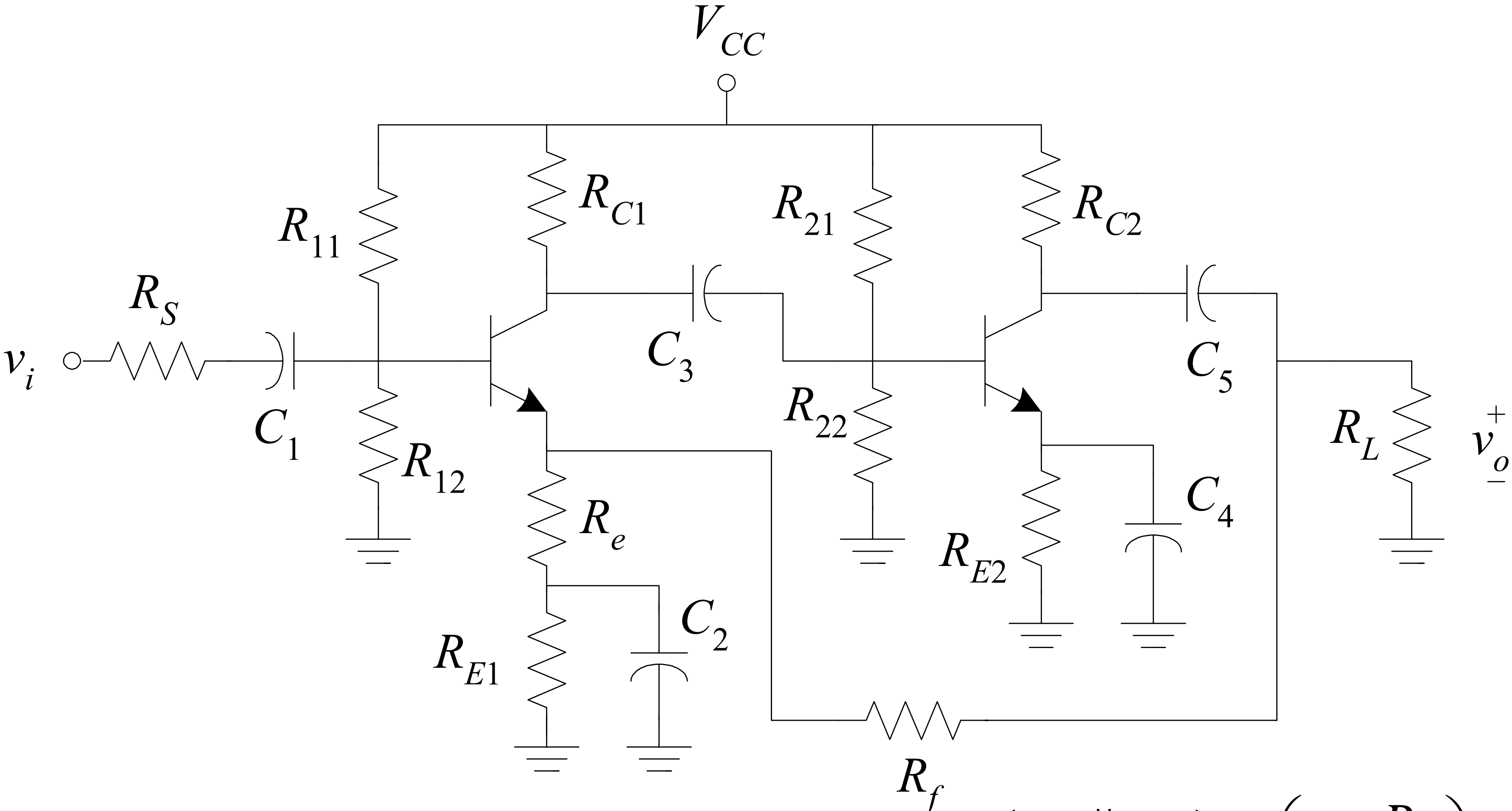
$$A_f = \frac{v_o}{v_{th}} = \frac{A}{1 + A\beta}$$

$$A_{EC} = -g_{m2}[(R_f + R_e) \parallel R_{C2} \parallel R_L]$$

si $A\beta >> 1, \dfrac{v_o}{v_{th}} \approx 1 + \dfrac{R_e}{R_f}$

$$A_{DE} = \frac{-g_{m1}(R_{C1} \parallel R_{21} \parallel R_{22} \parallel r_{\pi 2})}{1 + g_{m1}(R_e \parallel R_f)}$$

Ejemplo de Retroalimentación S-P (cont.)



$$\text{si } A\beta >> 1, \quad \frac{v_o}{v_i} \approx \frac{(R_{11} \parallel R_{12})}{R_S + (R_{11} \parallel R_{12})}\left(1 + \frac{R_f}{R_e}\right)$$

Optimizando la Retroalimentación

$$\beta = \frac{R_e}{R_e + R_f} \qquad \text{si } A\beta >> 1,\ A_f = \frac{v_o}{v_{th}} \approx 1 + \frac{R_f}{R_e}$$

$$A = \frac{\beta(R_e \,\|\, R_f) + r_{\pi 1}}{r_{th} + \beta(R_e \,\|\, R_f) + r_{\pi 1}} A_{DE} A_{EC}$$

Para una A_f deseada, ¿cuál es el valor óptimo de R_f?

$$A_{EC} = -g_{m2}[(R_f + R_e) \,\|\, R_{C2} \,\|\, R_L]$$

$$R_f^* = \arg\max_{R_f} A$$

$$A_{DE} = \frac{-g_{m1}(R_{C1} \,\|\, R_{21} \,\|\, R_{22} \,\|\, r_{\pi 2})}{1 + g_{m1}(R_e \,\|\, R_f)}$$

$$\left.\frac{\partial A}{\partial R_f}\right|_{R_f = R_f^*} = 0$$

Se puede demostrar que [1]

$$R_f^* \approx \sqrt{\frac{R_{C2}(A_f^2 - 1)}{g_{m1} A_f}\left(1 + \frac{R_S \,\|\, R_{11} \,\|\, R_{12}}{r_{\pi 1}}\right)}$$

[1] P. Hoff, "On optimizing the feedback components in a voltage-feedback amplifier," *IEEE Trans. Educ.*, vol. 40, pp. 219-221, Aug. 1997.