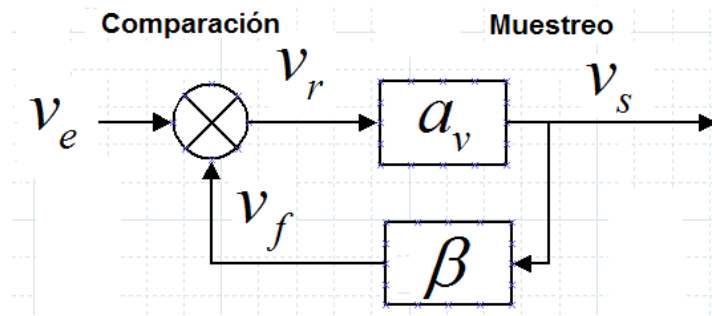


## IV. AMPLIFICADORES REALIMENTADOS

- a. Efectos de la realimentación negativa con amplificadores
- b. Amplificadores con realimentación serie-paralelo
- c. Amplificadores con realimentación paralelo-paralelo.
- d. Amplificadores con realimentación paralelo-serie.
- e. Amplificadores con realimentación serie-serie.
- f. Determinación de la ganancia de lazo.
- g. Análisis de la estabilidad en amplificadores realimentados.
- h. Efecto de la realimentación en la respuesta en frecuencia del amplificador.
- i. Compensación en frecuencia.
- j. Análisis y diseño de amplificadores con realimentación asistidos por computadora.

1. AMPLIFICADORES REALIMENTADOS .....	2
2. CONFIGURACIONES BASICAS DE REALIMENTACION. ....	5
2.1. CONFIGURACION PARALELO-SERIE .....	5
2.2. CONFIGURACION PARALELO-PARALELO .....	6
2.3. CONFIGURACION SERIE-PARALELO .....	7
2.4. CONFIGURACION SERIE-SERIE.....	8
3. ANALISIS DE UN AMPLIFICADOR REALIMENTADO .....	10
4. ANALISIS DE AMPLIFICADORES REALIMENTADOS .....	17
5. EJEMPLO DE UN AMPLIFICADOR REALIMENTADO .....	18

# 1. AMPLIFICADORES REALIMENTADOS



$$v_s = a_v v_e$$

$$v_s = a_v v_r$$

$$v_f = \beta v_s$$

$$v_r = v_e - v_f$$

$$v_s = a_v (v_e - v_f)$$

$$v_s = a_v v_e - a_v v_f$$

$$v_s = a_v v_e - a_v [\beta v_s]$$

$$v_s (1 + a_v \beta) = a_v v_e$$

$$v_s = \frac{a_v}{1 + a_v \beta}$$

$a_v$  : Ganancia en la trayectoria directa

Considerando un amplificador con un solo polo.

$$a_v = \frac{a_0 \omega_0}{s + \omega_0}$$

$a_0$  : Ganancia de malla abierta.  $\omega_0$  : Frecuencia de corte.

$$a_v = \frac{a_0}{\frac{s}{\omega_0} + 1}$$

**En malla cerrada y con realimentación negativa:**

$$\frac{v_s}{v_e} = A_v = \frac{\left( \frac{a_0}{\frac{s}{\omega_0} + 1} \right)}{1 + \left( \frac{a_0}{\frac{s}{\omega_0} + 1} \right) \beta}$$

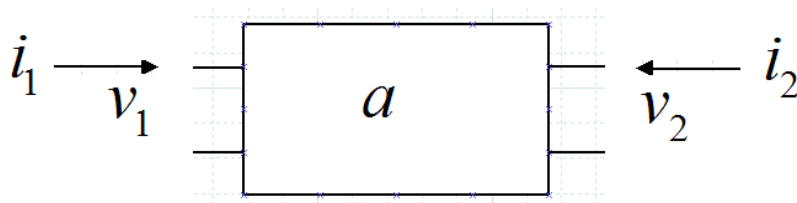
$$\frac{v_s}{v_e} = A_v = \frac{a_0}{\frac{s}{\omega_0} + a_0 \beta + 1}$$

$$\frac{v_s}{v_e} = A_v = \frac{\frac{a_0}{a_0 \beta + 1}}{\frac{s}{\omega_0 (a_0 \beta + 1)} + 1}$$

Finalmente:

$$\frac{v_s}{v_e} = \frac{\frac{a_0}{a_0 \beta + 1}}{\frac{s}{\omega_0 (a_0 \beta + 1)} + 1}$$

$a_v$ : Corresponde a dispositivos no lineales, transistores, amplificadores, en general, ejemplo: amplificadores operacionales.



## BLOQUE DE AMPLIFICACION

$$a_v = \frac{v_2}{v_1} :$$

**Amplificador de voltaje**

$$a_r = \frac{v_2}{i_1} :$$

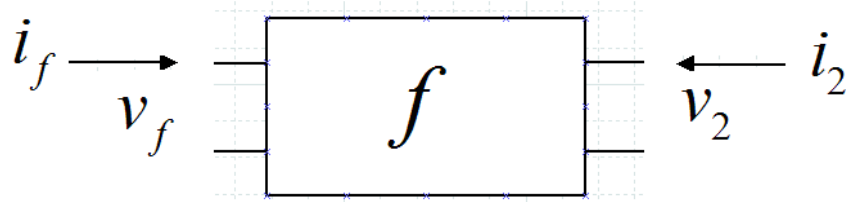
**Amplificador de transresistencia.**

$$a_i = \frac{i_2}{i_1} :$$

**Amplificador de corriente.**

$$a_g = \frac{i_2}{v_1} :$$

**Amplificador de transconductancia.**



$$f_v = \frac{v_f}{v_2} :$$

**Realimentación de voltaje.**

$$f_r = \frac{v_f}{i_2} :$$

**Realimentación de transresistencia.**

$$f_i = \frac{i_f}{i_2} :$$

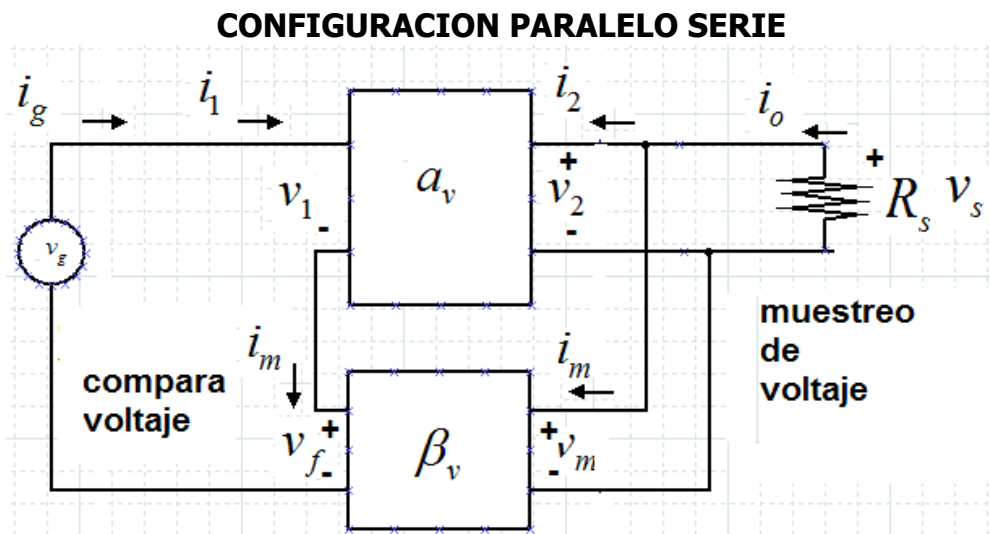
**Realimentación de corriente.**

$$f_g = \frac{i_f}{v_2} :$$

**Realimentación de transconductancia.**

## 2. CONFIGURACIONES BASICAS DE REALIMENTACION.

### 2.1. CONFIGURACION PARALELO-SERIE



**Salida:**

$$v_s = v_2 = v_m$$

$$i_o = i_2 + i_m$$

$$v_g = v_1 + v_f$$

$$v_1 = v_g - v_f$$

$$i_g = i_1 = i_f$$

$$v_o = kv_g$$

**Muestrea voltaje**

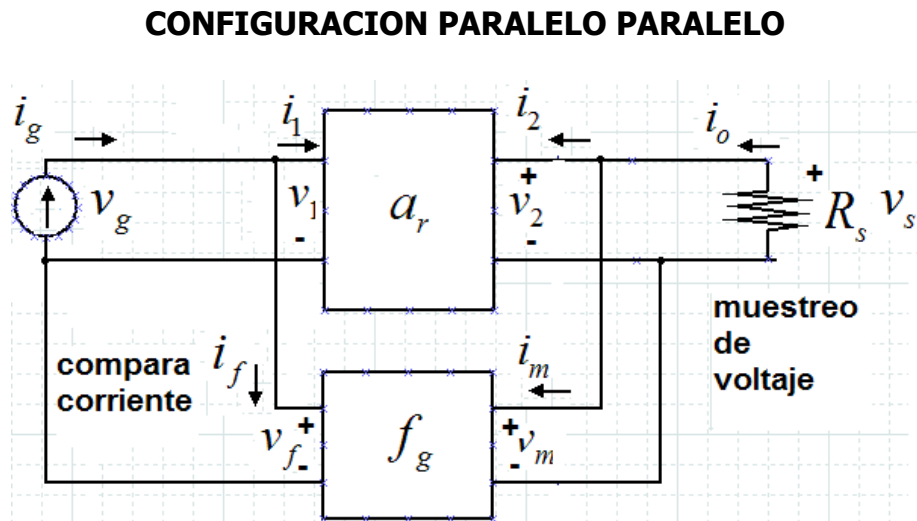
**Compara voltaje --> Entrada:**

**Configuración de realimentación negativa**

**MVCV**

**Fuente de voltaje controlada por voltaje FVCV**

## 2.2. CONFIGURACION PARALELO-PARALELO



### Salida:

$$v_s = v_2 = v_m$$

$$i_o = i_2 + i_m$$

### Entrada:

$$i_g = i_1 + i_f$$

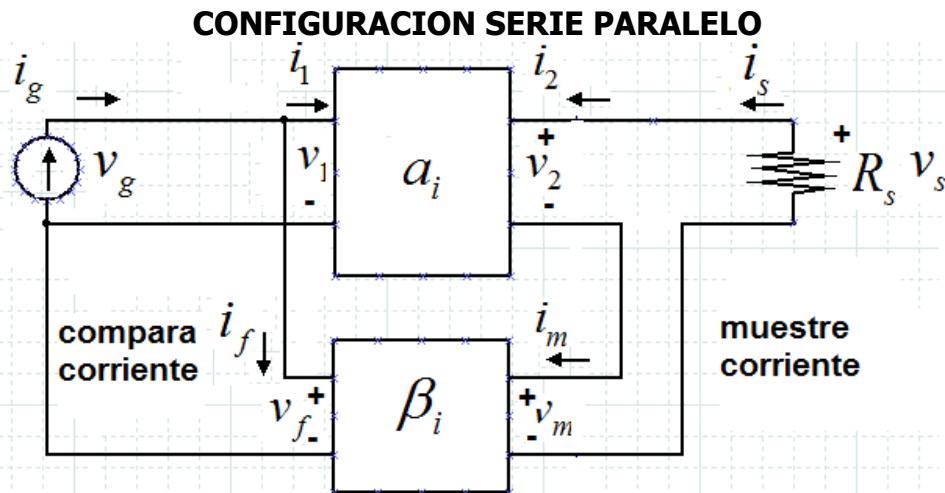
$$i_1 = i_g - i_f$$

$$v_g = v_1 = v_f$$

$$v_o = k i_g$$

**FVCI**

### 2.3. CONFIGURACION SERIE-PARALELO



**Salida:**

$$v_s = v_2 + v_m$$

$$i_s = i_2 = i_m$$

**Entrada:**

$$v_g = v_1 = v_f$$

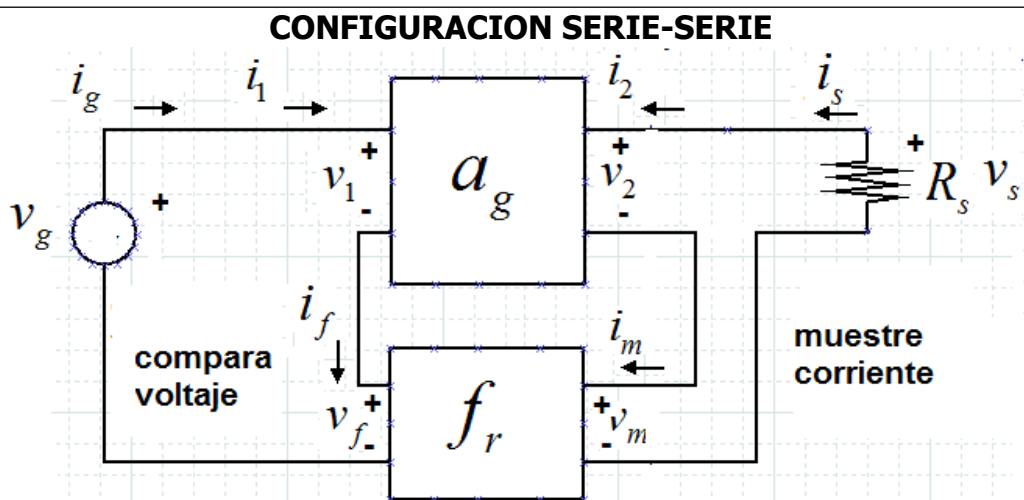
$$i_g = i_1 + i_f$$

$$i_1 = i_g - i_f$$

$$i_s = k i_g$$

**FICI**

## 2.4. CONFIGURACION SERIE-SERIE



### Salida:

$$v_s = v_2 + v_m$$

$$i_s = i_2 = i_m$$

### Entrada:

$$i_g = i_1 = i_f$$

$$v_g = v_1 + v_f$$

$$v_1 = v_g - v_f$$

**MICV**

$$i_s = kv_g$$

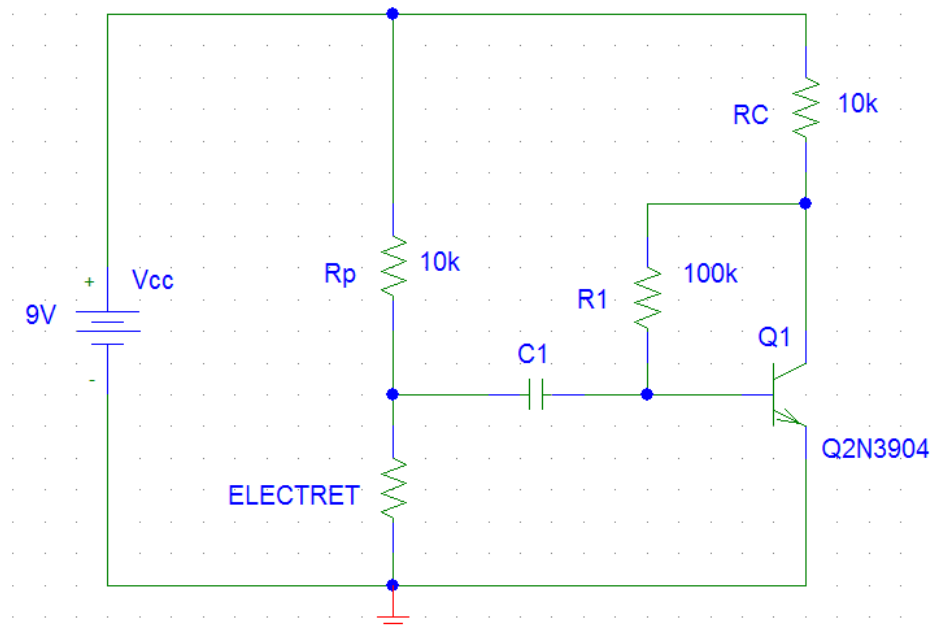
**FICV**



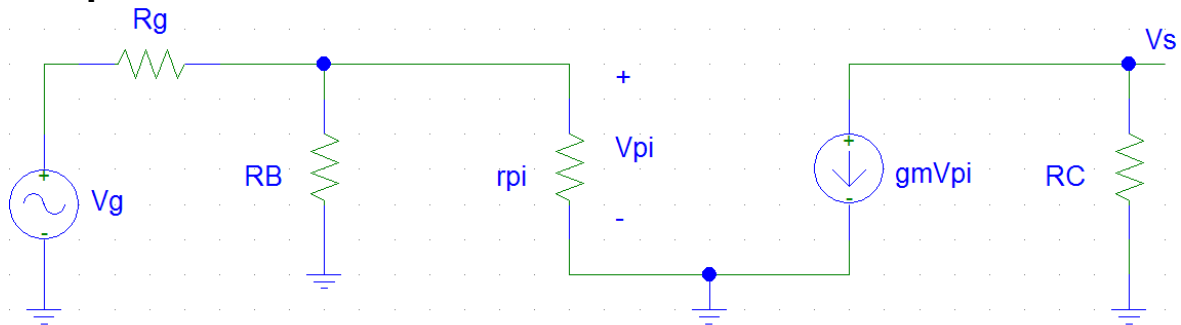


### 3. ANALISIS DE UN AMPLIFICADOR REALIMENTADO

#### REALIMENTACION EN DC



#### Modelo equivalente sin realimentar



#### a) SIN REALIMENTACION

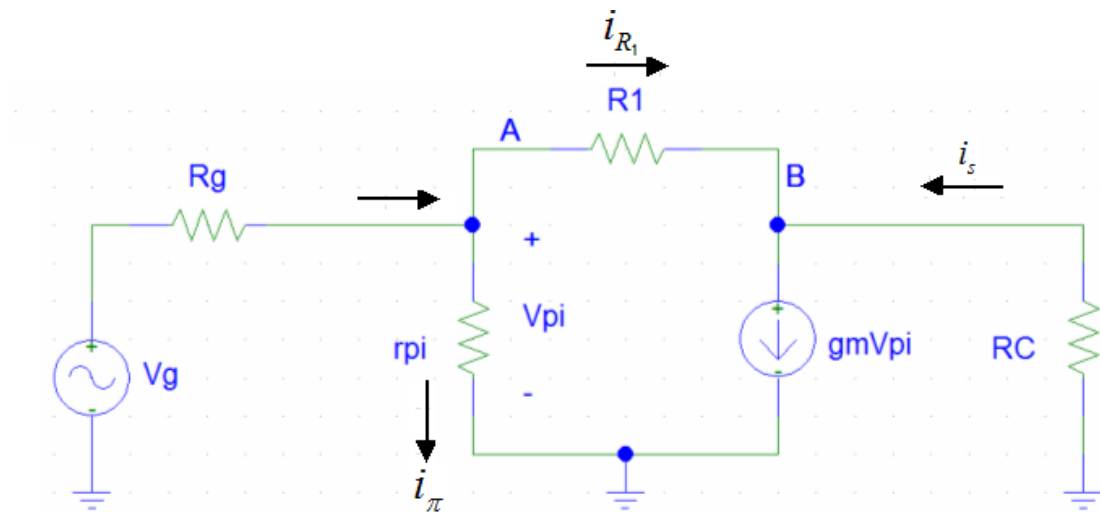
$$\frac{v_s}{v_g} = \left( \frac{v_s}{v_\pi} \right) \left( \frac{v_\pi}{v_g} \right)$$

$$\frac{v_s}{v_g} = -g_m R_C \frac{R_B \parallel r_\pi}{R_B \parallel r_\pi + R_g} \approx -g_m R_C \frac{r_\pi}{r_\pi + \boxed{?}} \approx -g_m R_C \frac{r_\pi}{r_\pi} \approx -g_m R_C$$

*pequeña*

$$\frac{v_s}{v_g} = -320$$

## b) CON REALIMENTACION



$$\Delta v_f = \frac{v_s}{v_\pi} \frac{v_\pi}{v_g} = \frac{v_s}{v_g}$$

$\sum i$  en el nodo B

$$g_m v_\pi = i_s + i_{R_1}$$

$$g_m v_\pi = \frac{-v_s}{R_C} + \frac{(v_\pi - v_s)}{R_1}$$

$$g_m v_\pi = \frac{-v_s}{R_C} + \frac{v_\pi}{R_1} - \frac{v_s}{R_1}$$

$$g_m v_\pi - \frac{v_\pi}{R_1} = -v_s \left( \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_1} \right)$$

$$v_\pi \left( g_m - \frac{1}{R_1} \right) = -v_s \left( \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_1} \right)$$

$$\frac{v_s}{v_\pi} = - \frac{\left( g_m - \frac{1}{R_1} \right)}{\left( \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_1} \right)} = - \frac{(g_m)}{\frac{1}{R_C \parallel R_1}} \approx - \frac{g_m}{\frac{1}{R_C}} \approx -R_C g_m$$

$\sum i$  en el nodo A

$$i_g = i_\pi + i_{R_1}$$

$$i_g = \frac{v_\pi}{r_\pi} + \frac{v_\pi - v_s}{R_1}$$

$$\frac{v_g - v_\pi}{R_g} = \frac{v_\pi}{r_\pi} + \frac{v_\pi}{R_1} - \frac{v_s}{R_1}$$

$$\frac{v_g - v_\pi}{R_g} = \frac{v_\pi}{r_\pi} + \frac{v_\pi}{R_1} - \frac{v_s}{R_1}$$

$$\frac{v_g}{R_g} = v_\pi \left( \frac{1}{r_\pi} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_g} \right) - \frac{v_s}{R_1}$$

$$\frac{v_g}{R_g} = \left[ -\frac{v_s}{g_m R_C} \right] \left( \frac{1}{r_\pi \parallel R_1 \parallel R_g} \right) - \frac{v_s}{R_1}$$

$$\frac{v_g}{R_g} \approx -v_s \left( \frac{1}{g_m R_C R_g} + \frac{1}{R_1} \right)$$

$$\frac{-1}{R_g \left( \frac{1}{g_m R_C R_g} + \frac{1}{R_1} \right)} \approx \frac{v_s}{v_g}$$

$$\frac{-1}{R_g \left( \frac{R_1 + g_m R_C R_g}{(R_1)(g_m R_C R_g)} \right)} \approx \frac{v_s}{v_g}$$

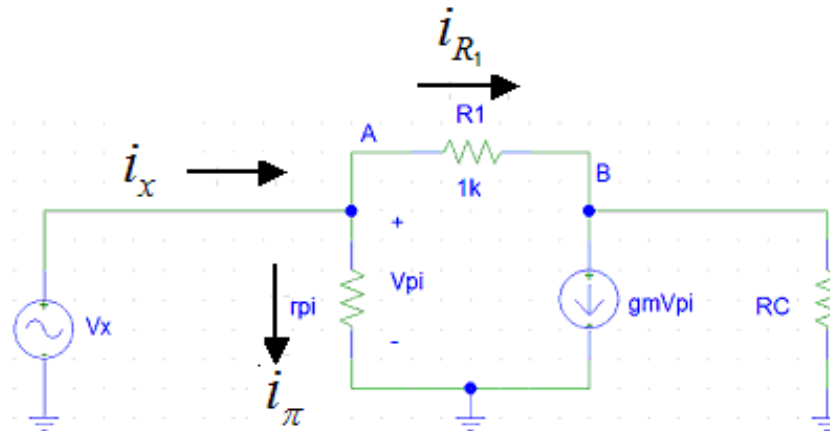
$$\frac{-(R_1)(g_m R_C R_g)}{R_g R_1 + g_m R_g R_C R_g} \approx \frac{v_s}{v_g}$$

$$\frac{-(g_m R_C R_g)}{R_g \left( 1 + g_m R_C \frac{R_g}{R_1} \right)} \approx \frac{v_s}{v_g}$$

$$\frac{v_s}{v_g} \approx \frac{(-g_m R_C)}{\left( 1 - (-g_m R_C) \left[ \frac{R_g}{R_1} \right] \right)}$$

$$\boxed{\frac{v_s}{v_g} \approx \frac{(a_v)}{\left( 1 - (a_v) \left[ \frac{R_g}{R_1} \right] \right)}}$$

### Impedancia de entrada:



$\sum i$  en el nodo A

$$i_x = i_{\pi} + i_{R_1}$$

$$i_x = \frac{v_{\pi}}{r_{\pi}} + \frac{v_{\pi} - v_s}{R_1}$$

$$i_x = \frac{v_{\pi}}{r_{\pi}} + \frac{v_{\pi}}{R_1} - \frac{v_s}{R_1}$$

$$v_x = v_{\pi}$$

$$i_x = \frac{v_x}{r_{\pi}} + \frac{v_x}{R_1} - \frac{v_s}{R_1}$$

Falta poner Vs en función de vx:

$$i_x = v_x \left( \frac{1}{r_{\pi}} + \frac{1}{R_1} \right) - \frac{v_s}{R_1}$$

$$i_x = v_x \left( \frac{1}{r_{\pi} \parallel R_1} \right) - \frac{v_s}{R_1}$$

$$i_x = v_x \left( \frac{1}{r_{\pi} \parallel R_1} \right) - \frac{[-g_m R_C v_x]}{R_1}$$

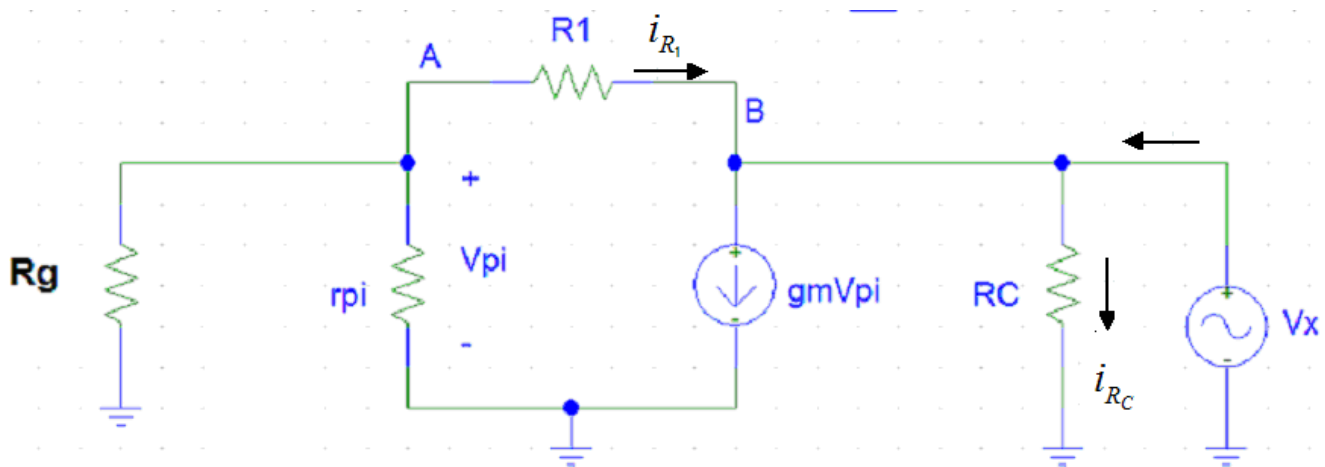
$$i_x = v_x \left[ \frac{1}{r_{\pi} \parallel R_1} + \frac{g_m R_C}{R_1} \right]$$

$$\frac{1}{\left[ \frac{1}{r_{\pi} \parallel R_1} + \frac{g_m R_C}{R_1} \right]} = \frac{v_x}{i_x}$$

$$\frac{v_x}{i_x} = \frac{1}{\left[ \frac{1}{r_{\pi}} + \frac{g_m R_C}{R_1} \right]} = \frac{1}{\left[ \frac{R_1 + r_{\pi} g_m R_C}{r_{\pi} R_1} \right]} = \frac{r_{\pi} R_1}{R_1 + r_{\pi} g_m R_C} = \frac{\frac{r_{\pi} R_1}{R_1}}{\frac{R_1 + r_{\pi} g_m R_C}{R_1}} = \frac{r_{\pi}}{1 + g_m R_C \left[ \frac{r_{\pi}}{R_1} \right]}$$

$$\boxed{\frac{v_x}{i_x} = \frac{r_{\pi}}{1 + g_m R_C \left[ \frac{r_{\pi}}{R_1} \right]} = \frac{Z_e}{1 + \Delta v \beta}}$$

## Impedancia en la salida



$\sum i$  en el nodo B

$$i_x = g_m v_{\pi} - i_{R_1} + i_{R_C}$$

$$i_x = g_m v_{\pi} - \left( \frac{v_{\pi} - v_x}{R_1} \right) + \frac{v_x}{R_C}$$

$$i_x = g_m v_{\pi} - \frac{v_{\pi}}{R_1} + \frac{v_x}{R_1} + \frac{v_x}{R_C}$$

$$i_x = v_{\pi} \left( g_m - \frac{1}{R_1} \right) + v_x \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_C} \right)$$

$$i_x = v_{\pi} \left( g_m - \frac{1}{R_1} \right) + v_x \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_C} \right)$$

$$i_x = v_{\pi} \left( \frac{R_1 g_m - 1}{R_1} \right) + v_x \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_C} \right)$$

$$i_x \approx v_{\pi} (g_m) + v_x \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_C} \right)$$

**Observe el divisor de tensión formado por la resistencia  $r_{\pi} \parallel R_g$  y  $R_1$ , y considerando que  $r_{\pi} \gg R_g$  y que  $R_1 \gg R_g$**

$$v_{\pi} = \frac{R_g \parallel r_{\pi}}{R_g \parallel r_{\pi} + R_1} v_x = \frac{R_g}{R_g + R_1} v_x = \frac{R_g}{R_1} v_x$$

$$i_x \approx \left[ \frac{R_g}{R_1} v_x \right] (g_m) + v_x \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_C} \right)$$

$$i_x \approx \frac{R_g}{R_1} v_x (g_m) + v_x \left( \frac{1}{R_1 \parallel R_C} \right)$$

$$i_x \approx v_x \left[ \frac{R_g}{R_1} (g_m) + \left( \frac{1}{R_1 \parallel R_C} \right) \right]$$

$$\frac{1}{\left[ \frac{R_g}{R_1} (g_m) + \left( \frac{1}{R_1 \parallel R_C} \right) \right]} \approx \frac{v_x}{i_x}$$

$$\frac{1}{\left[ \frac{R_g}{R_1} (g_m) + \left( \frac{1}{R_C} \right) \right]} \approx \frac{v_x}{i_x}$$

$$\frac{1}{\left[ \frac{R_g}{R_1} (g_m) + \left( \frac{1}{R_C} \right) = \frac{R_C R_g g_m + R_1}{R_1 R_C} \right]} \approx \frac{v_x}{i_x}$$

$$\frac{1}{\left[ \frac{R_C R_g g_m + R_1}{R_1 R_C} \right]} \approx \frac{v_x}{i_x}$$

$$\frac{R_1 R_C}{R_C R_g g_m + R_1} \approx \frac{v_x}{i_x}$$

$$\frac{R_C}{\left[ \frac{R_g}{R_1} \right] R_C g_m + 1} \approx \frac{v_x}{i_x}$$

$$\frac{v_x}{i_x} \approx \frac{R_C}{\left[ \frac{R_g}{R_1} \right] R_C g_m + 1}$$

$$\boxed{\frac{v_x}{i_x} \approx \frac{R_C}{1 - (-R_C g_m) \left[ \frac{R_g}{R_1} \right]} = \frac{Z_2}{1 - (-\Delta v) \beta}}$$



## 4. ANALISIS DE AMPLIFICADORES REALIMENTADOS

1. Identificar el amplificador principal.
2. Identificar la red de realimentación.
3. Considerando los efectos de la red de realimentación sobre la ganancia de lazo abierto.
  - a. Cortocircuita las terminales con realimentación en paralelo y dejar en circuito abierto las terminales de realimentación en serie.
4. Representar el amplificador modificado utilizando la topología de amplificador equivalente (voltaje, corriente, transconductancia, transresistencia.)
5. Determinar la expresión que define el factor de realimentación  $\beta$  (ganancia de voltaje, corriente, transresistencia, transconductancia).
6. Calcular  $Z_{ef}$ ,
  - $Z_{ef} = Z_e (1 + \beta A)$  serie-serie  
serie-paralelo
  - $Z_{ef} = \frac{Z_e}{(1 + \beta A)}$  paralelo-serie  
paralelo-paralelo
7. calcular  $Z_{sf}$ ,
  - $Z_{sf} = Z_s (1 + \beta A)$  paralelo-serie  
serie-serie
  - $Z_{sf} = \frac{Z_s}{(1 + \beta A)}$  serie-paralelo  
paralelo-paralelo
8. calcular  $A_f$ :
  - $A_f = \frac{A}{1 + A\beta}$

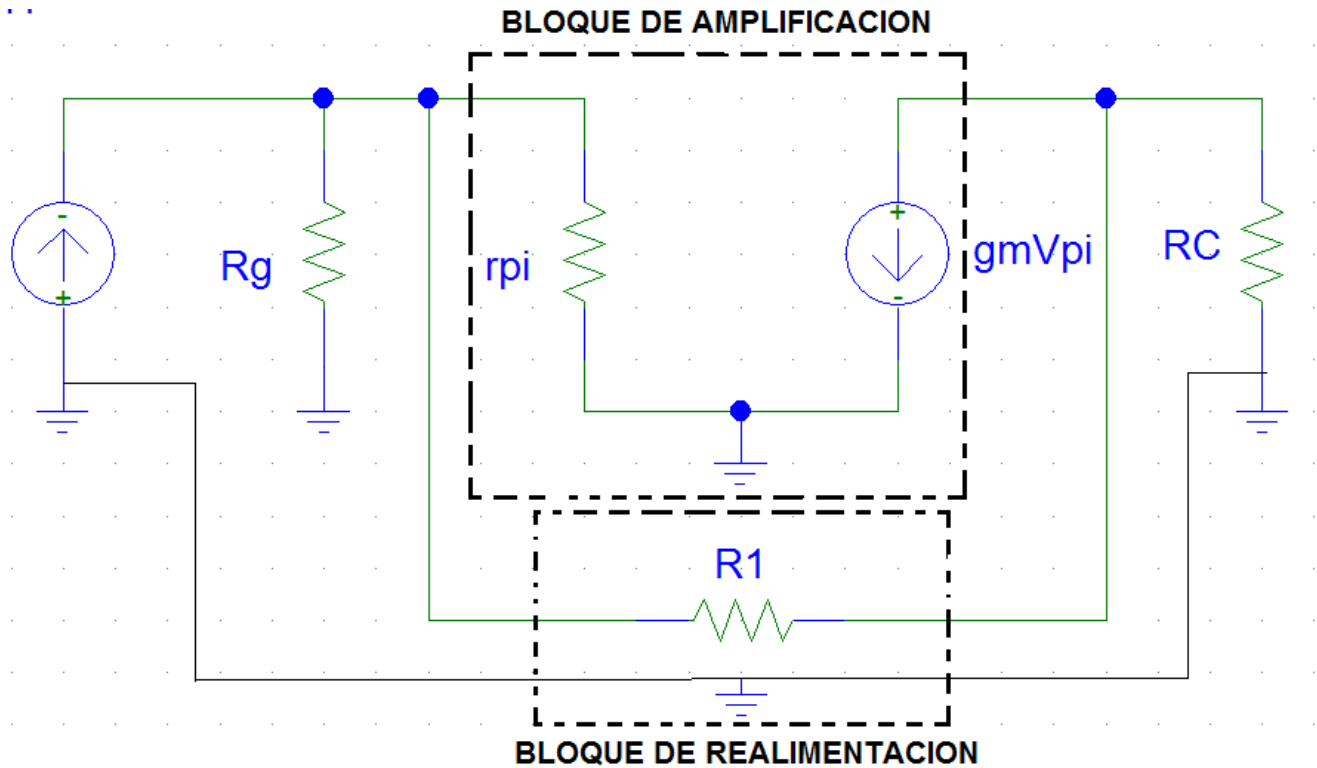
## 5. EJEMPLO DE UN AMPLIFICADOR REALIMENTADO

Para el ejercicio anterior, calcular todos los parámetros de realimentación siguiendo los pasos antes mencionados

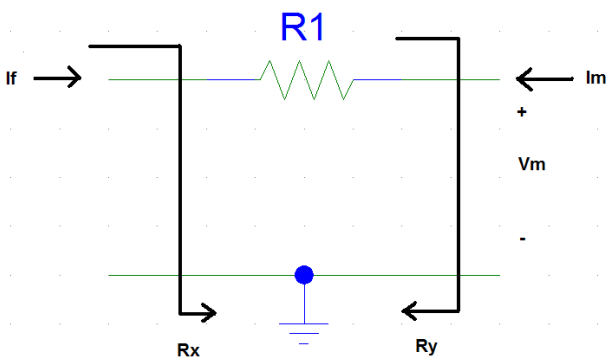
PASO 1:

PASO 2:

...



PASO 3:



$$R_x = \left. \frac{v_f}{i_f} \right|_{V_m=0}$$

$$R_y = \left. \frac{v_m}{i_m} \right|_{V_f=0}$$

$$\beta = f_g = \frac{i_f}{v_m} \bigg|_{V_f=0}$$

$$f_g = \frac{i_f}{v_m}$$

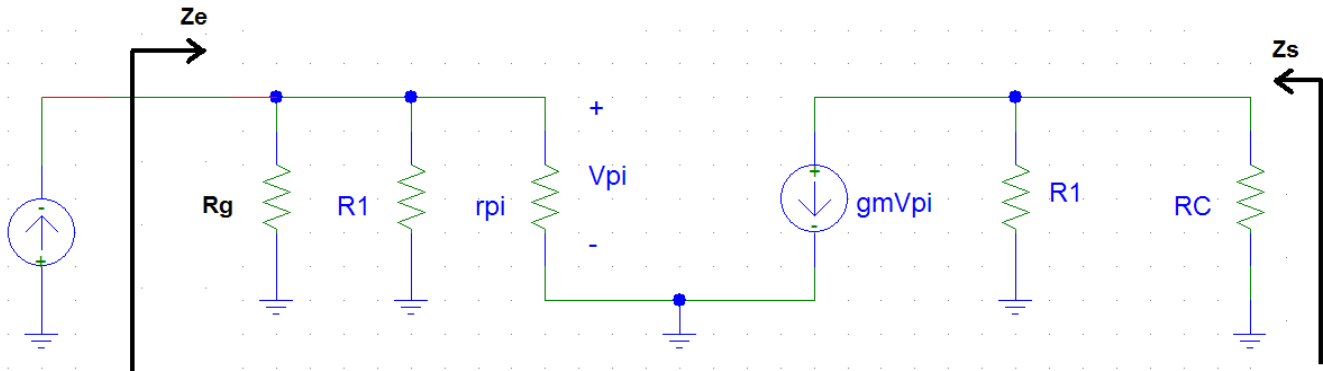
$$\beta = f_g$$

$$v_f = i_f R_1 \Rightarrow \frac{v_f}{i_f} \bigg|_{v_m=0} = R_1 = R_x$$

$$v_m = i_m R_1 \Rightarrow \frac{i_f}{v_m} \bigg|_{v_f=0} = R_1 = R_y$$

$$v_m = -i_f R_1 \Rightarrow \frac{i_f}{v_m} \bigg|_{v_f=0} = -\frac{1}{R_1} = \beta$$

#### PASO 4:



$$Z_e = R_g \parallel R_1 \parallel r_{\pi} \approx R_g$$

$$Z_s = R_C \parallel R_1 \approx R_C$$

$$\Delta v = \frac{v_s}{v_e} = -g_m (R_1 \parallel R_C) (R_g \parallel R_1 \parallel r_{\pi}) \approx -g_m R_C$$

#### PASO 6:

$$Z_{ef} = \frac{R_g}{1 + \left( -\frac{1}{R_1} \right) (-g_m R_C R_g)}$$

$$Z_{ef} = \frac{R_g}{1 + \left( -\frac{R_g}{R_l} \right) (-g_m R_C)}$$

$$Z_{ef} = \frac{R_g}{1 + \left( -\frac{R_g}{R_l} \right) (-g_m R_C)} = \frac{Z_e}{1 + \beta \Delta v}$$

**PASO 7:**

$$Z_{sf} = \frac{R_C}{1 + \left( -\frac{1}{R_l} \right) (-g_m R_C R_g)}$$

**PASO 8:**

$$A_{rf} = \frac{-g_m R_C}{1 + \left( -\frac{1}{R_l} \right) (-g_m R_C R_g)} = \frac{\Delta v}{1 + A\beta}$$