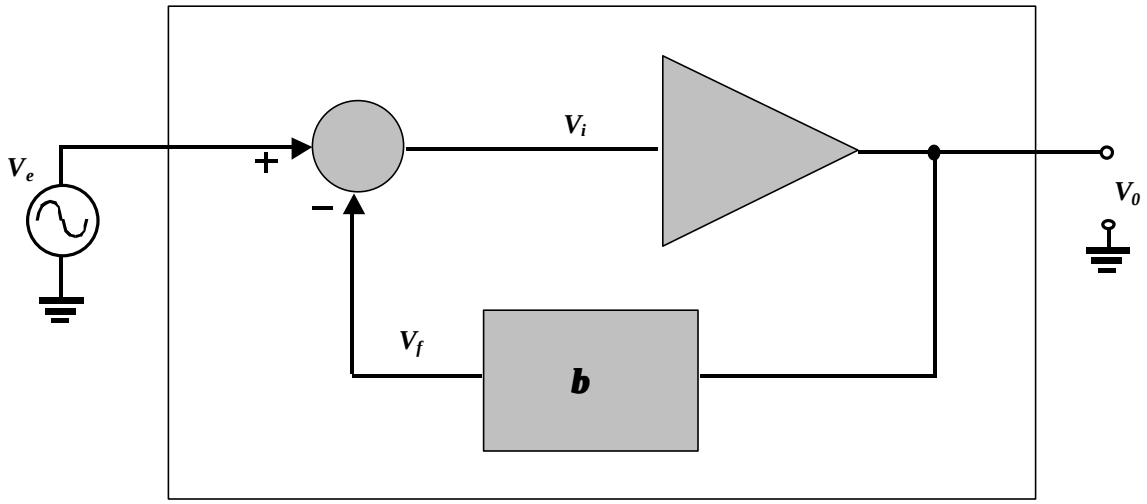
- ***Realimentação negativa***

✓ *Conceitos sobre realimentação*

A técnica de realimentação já foi aborda na seção de Amplificadores operacionais, onde foram analisados alguns circuitos. Dependendo da polaridade relativa do sinal que é realimentado em um circuito, podemos ter realimentação positiva ou negativa. Realimentação negativa produz uma redução do ganho de tensão, trazendo várias vantagens, as quais podemos citar:

1. ***Impedância de entrada aumentada ou diminuída***
2. ***Ganho de tensão mais estável***
3. ***Resposta em freqüência melhorada***
4. ***Impedância de saída aumentada ou diminuída***
5. ***Ruído reduzido***
6. ***Distorção reduzida***

Uma conexão típica está mostrada na figura abixo. O sinal de entrada, V_e, é aplicado a um circuito misturador (ponto de soma), onde é combinado com o sinal realimentado, V_f. A diferença entre estes sinais, V_i, é então a tensão de entrada para o amplificador. Uma porção da saída do amplificador , V_0, é conectada ao circuito de realiemntação (b), que apresenta um aparte reduzida da saída como sinal de realimentação ao circuito misturador.



Amplificador com realimentação

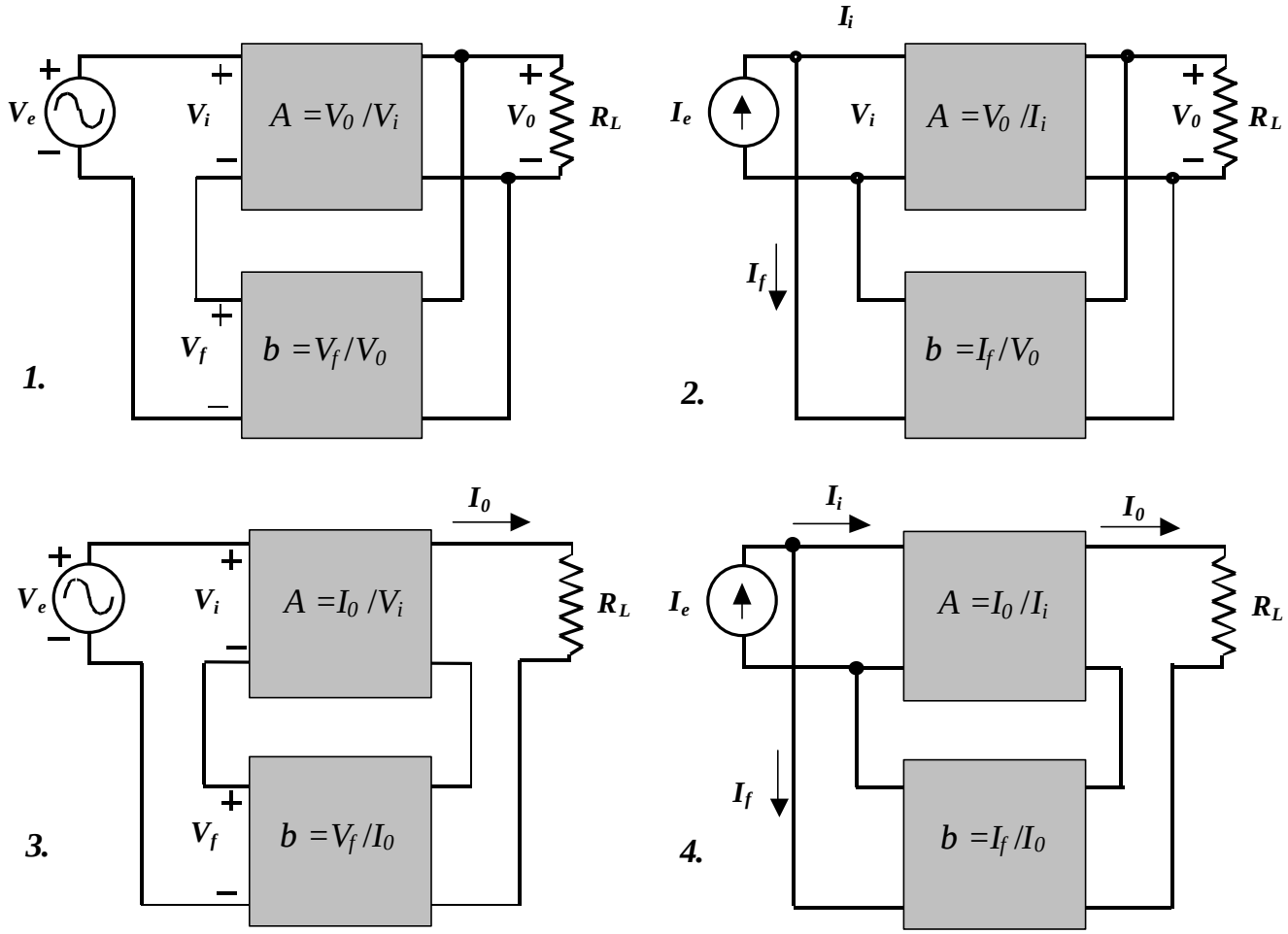
✓ *Tipos de conexão de realimentação*

Há quatro maneiras básicas de se realizar a realimentação. Tanto a corrente como a tensão pode ser realimentada, em série ou em paralelo. Assim, podemos ter

1. ***Realimentação de tensão em série (série na entrada e paralelo na saída)***
2. ***Realimentação de tensão em paralelo (paralelo na entrada e paralelo na saída)***
3. ***Realimentação de corrente em série (série na entrada e série na saída)***
4. ***Realimentação de corrente em paralelo (paralelo na entrada e série na saída)***

A figura abaixo mostra estas conexões.

Note que na lista acima, tensão refere-se a conectar em paralelo com a tensão de saída a entrada do circuito de realimentação; corrente, refere-se a conectar em série (amostra a corrente) a saída do amplificador e a entrada do circuito de realimentação. Ainda, série significa conectar o sinal realimentado em série a uma fonte de tensão na entrada; paralelo quer dizer conectar o sinal realimentado em paralelo a uma fonte de corrente na entrada.



Conexões de realimentação

A seguir examinaremos o ganho de cada uma das conexões. O ganho sem realimentação, A,e chamaremos de ganho de malha aberta e corresponde ao ganho do estágio amplificador. O ganho resultante após a realimentação, A_f, e chamaremos de ganho de malha fechada. As impedâncias de entrada e saída também serão examinadas.

Para referência aos vários tipos de ganhos de malha aberta, fator de realimentação e ganho de malha fechada, nós mostramos abaixo um resumo.

Resumo dos vários tipos de ganhos e fatores de realimentação

		Tensão em série	Tensão em paralelo	Corrente em série	Corrente em paralelo
Ganho malha aberta	A	$\frac{V_0}{V_i}$	$\frac{V_0}{I_i}$	$\frac{I_0}{V_i}$	$\frac{I_0}{I_i}$
Fator de realimentação	b	$\frac{V_f}{V_0}$	$\frac{I_f}{V_0}$	$\frac{V_f}{I_0}$	$\frac{I_f}{I_0}$
Ganho malha fechada	A_f	$\frac{V_0}{V_e}$	$\frac{V_0}{I_e}$	$\frac{I_0}{V_e}$	$\frac{I_0}{I_e}$

Baseada na forma como o fator de realimentação está inserido na entrada, e na saída do estágio amplificador, estas conexões também podem ser chamadas com outra forma alternativa de denominação com mostra a tabela abaixo.

Outra denominação do tipo de realimentação

Tipo de conexão	Conexão na entrada	Conexão na saída	Tipo de conexão (alternativa)
Tensão em série	série	paralelo	série - paralelo
Tensão em paralelo	paralelo	paralelo	paralelo - paralelo
Corrente em série	série	série	série - série
Corrente em paralelo	paralelo	série	paralelo - série

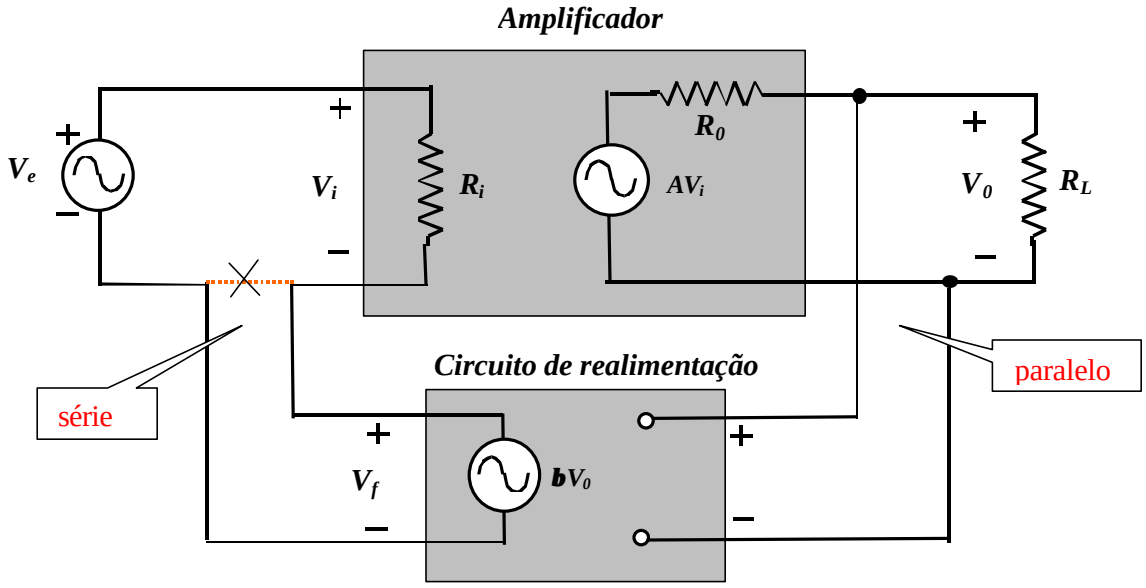
Resumindo, esta forma de denominar a o tipo de conexão pode ser esquematizada, como mostra a figura abaixo

Tipo

XXXXX - XXXX = Conexão na entrada - Conexão na saída

✓ *Realimentação de tensão em série (série-paralelo)*

A figura abaixo mostra uma conexão de realimentação de tensão em série, com uma parte da tensão (b) de saída realimentada em série com o sinal de entrada.



Conexão para realimentação de tensão em série (série-paralelo)

O amplificador apresenta um ganho ***A*** *(ganho de malha aberta da conexão), impedância de entrada* $\boldsymbol{R_i}$*, e impedância de saída* $\boldsymbol{R_0}$*. O circuito de realimentação apresenta um ganho de tensão* ***b****, uma impedância de entrada infinita, e uma impedância de saída zero.*

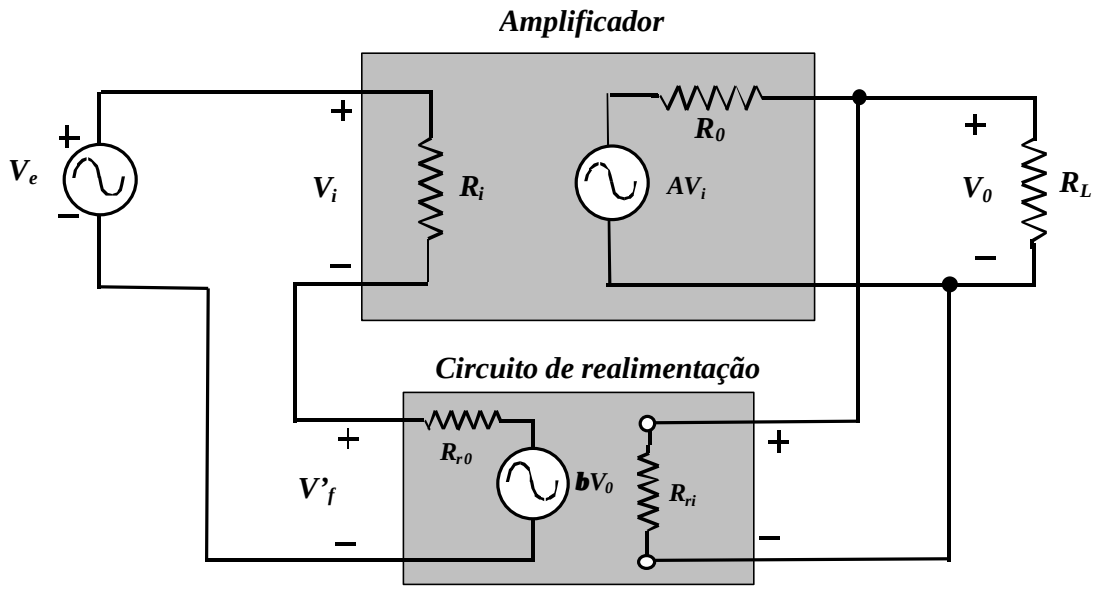
- *Caso o circuito de realimentação apresente uma impedância de saída diferente de zero,* $\boldsymbol{R_{r0}}$*, podemos considerar esta em série com a impedância de entrada, e ainda considerar a conexão como a mostrada acima, agora com a impedância de entrada do amplificador* $\boldsymbol{R'_i = R_i + R_{r0}}$*.*

- *Ainda, caso o circuito de realimentação apresente uma impedância de entrada finita,* $\boldsymbol{R_{ri}}$*, podemos considerar esta em paralelo a impedância de saída* R_0*, e ainda considerar a conexão como a mostrada acima, agora com uma carga* $\boldsymbol{R'_0 = R_{ri}//R_0}$ *com o ganho reduzido para* $\boldsymbol{A' = A.R_{ri}/(R_{ri}+R_0)}$*.*

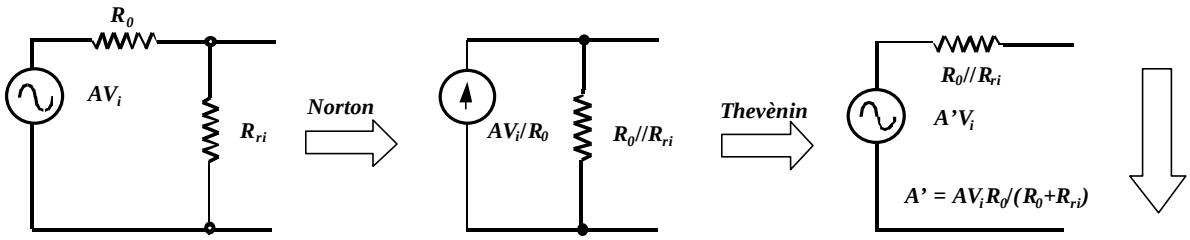
- *O ganho reverso* (V_0/V_f) *do circuito de realimentação é sempre de desprezado.*

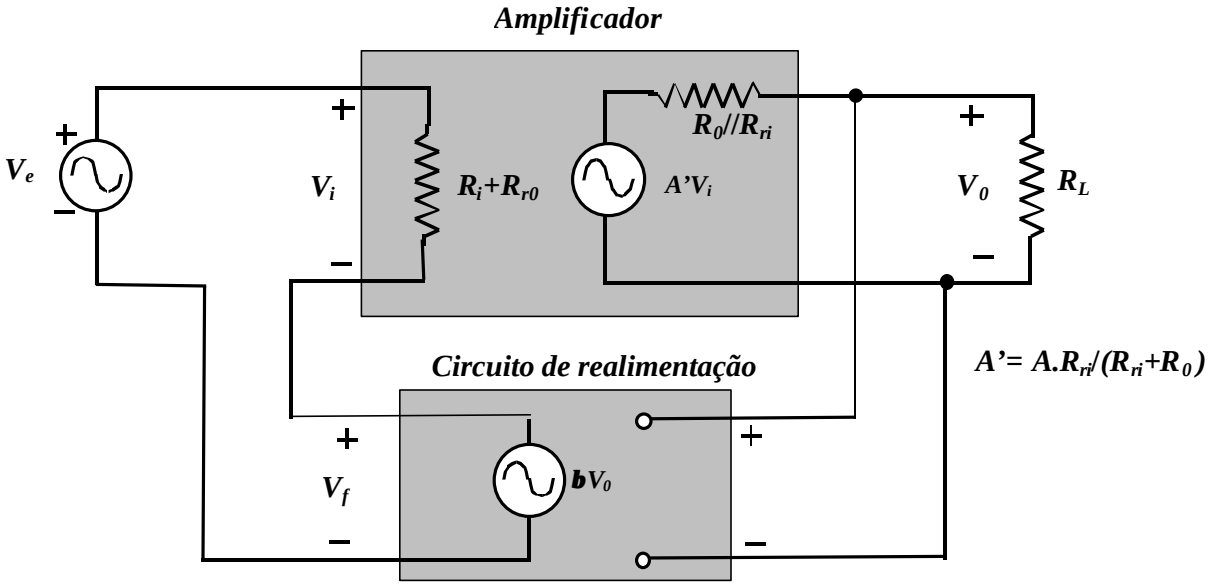
Obs: Normalmente $\boldsymbol{R_{ri} >> R_0}$ ***e*** $\boldsymbol{R_{r0} << R_i}$

As figuras abaixo ilustram as considerações acima.



Conexão para realimentação de tensão em série (série-paralelo) com impedância de entrada e saída no circuito de realimentação





Conexão para realimentação de tensão em série (série-paralelo) com impedância de entrada e saída no circuito de realimentação equivalente

Vamos determinar para esta conexão, o ganho de malha fechada, a impedância de entrada e a impedância de saída.

- ***Ganho de malha fechada***

Para esta análise vamos nos reportar as figuras anteriores. Se não houver realimentação (V_f =0), o ganho de tensão do estágio amplificador (ganho de malha aberta com R_L = ¥) é

$$A = V_0 / V_e = V_0 / V_i$$

Se um sinal de realimentação, V_f, for conectado em série com a entrada, então

$$V_i = V_e - V_f$$

Uma vez que

$$V_0 = A\, V_i = A\,(V_e - V_f) = A\, V_e - A\, V_f = A\, V_e - Ab\, V_0$$

então

$$V_0\,(1 + Ab) = A\, V_e$$

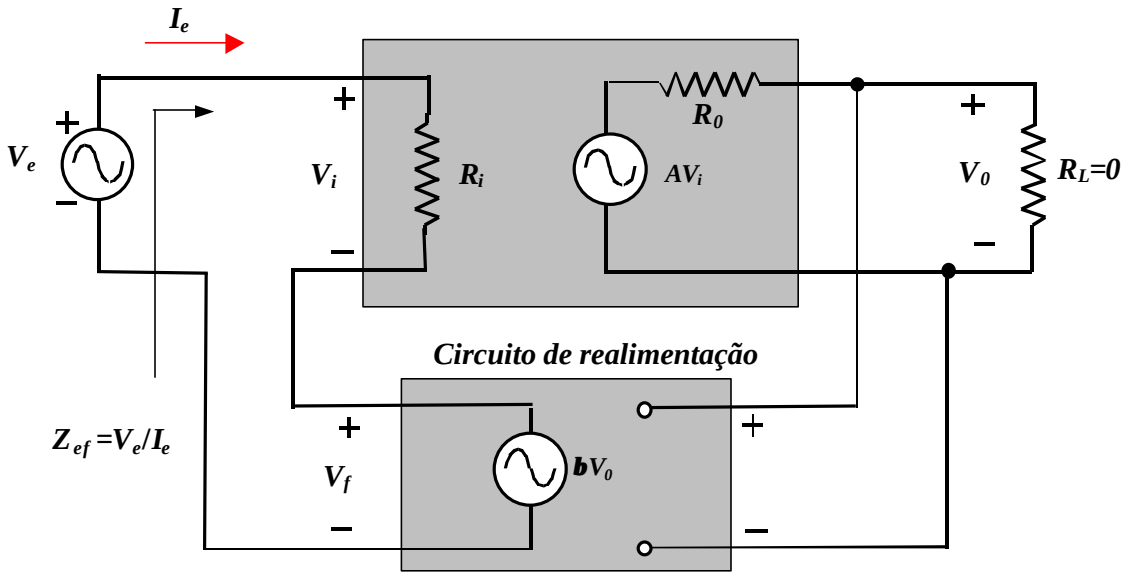
e o ganho de malha fechada é dada por

$$\boxed{A_f = V_0 / V_e = A/(1 + Ab)} \qquad (411)$$

A equação (411) mostra que o ganho com realimentação (ganho de malha fechada) é o ganho do amplificador reduzido pelo fator ***(1+ Ab).*** *Mais adiante será visto que este fator afeta também a impedância de entrada e de saída, dentre outras características do circuito.*

- ***Impedância de entrada***

Para determinar a impedância de entrada vamos repetir a conexão com a indicação da impedância de entrada como mostra a figura abaixo.



Matriz G

Determinação da impedância de entrada para a conexão realimentação de tensão em série (série-paralelo)

A impedância de entrada pode ser determinada da seguinte forma: ***(com R_L = ¥)***

$$I_e = V_i/R_i = (V_e - V_f)/R_i = V_e/R_i - b\,V_0/R_i$$

$$R_i\,I_e = V_e - b\,V_0$$

$$V_e = R_i\,I_e + b\,V_0 = R_i\,I_e + bA_iR_i\,I_e$$

$$V_e = (1+bA)R_i\,I_e$$

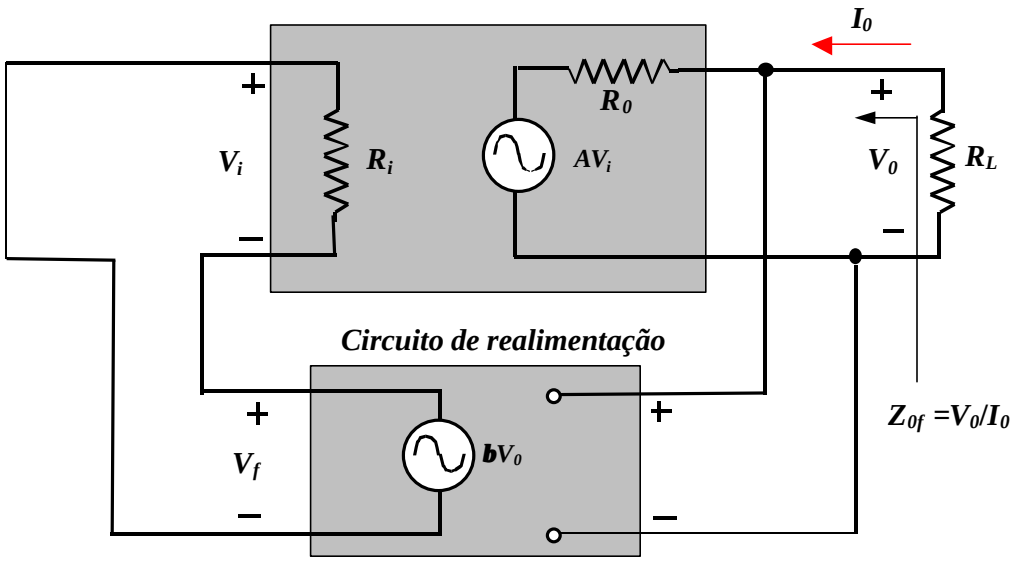
Portanto

$$\boxed{Z_{ef} = V_e / I_e = (1+bA)\,R_i} \qquad (412)$$

*Esta equação mostra que a impedância de entrada de um circuito com realimentação de tensão em série(**série-paralelo**) é igual a impedância de entrada sem realimentação multiplicada pelo fator **(1+bA)**. Como veremos adiante este resultado é também válido para a conexão de realimentação de corrente em série (**série-série**).*

- ***Impedância de saída***

Para determinar a impedância de entrada vamos repetir a conexão com a indicação da impedância de saída como mostra a figura abaixo.



Determinação da impedância de saída para a conexão realimentação de tensão em série (série-paralelo)

A impedância de saída pode ser determinada da seguinte forma:

$V_0 = R_0 I_0 + AV_i$

para $V_e = 0$ $\qquad V_i = -V_f$

portanto

$V_0 = R_0 I_0 - AV_f = R_0 I_0 - Ab V_0$

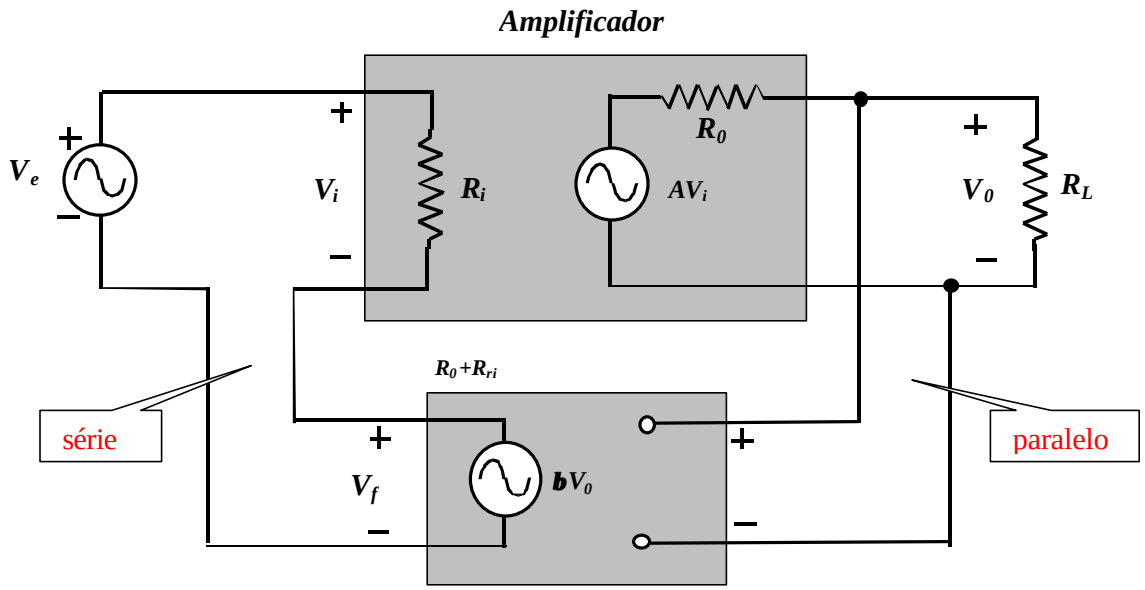
$V_0(1 + Ab) = R_0 I_0$

portanto

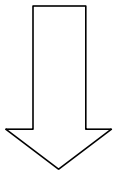
$$Z_{0f} = V_0 / I_0 = R_0 / (1 + Ab) \qquad (413)$$

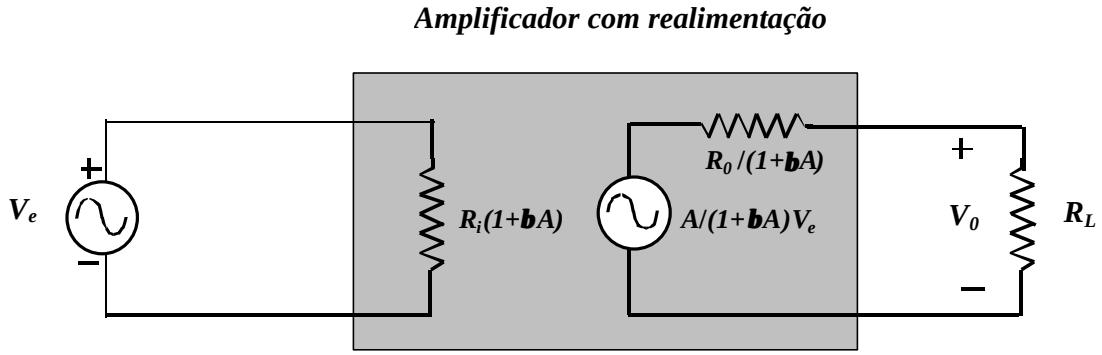
*Esta equação mostra que a impedância de saída de um circuito com realimentação de tensão em série (**série-paralelo**) é igual a impedância de saída sem realimentação divida pelo fator **(1+bA)**. Como veremos adiante este resultado é também válido para a conexão de realimentação de tensão em paralelo (**paralelo-paralelo**).*

A figura abaixo mostra o circuito equivalente da conexão com realimentação de tensão em série.



Conexão com realimentação de tensão em série

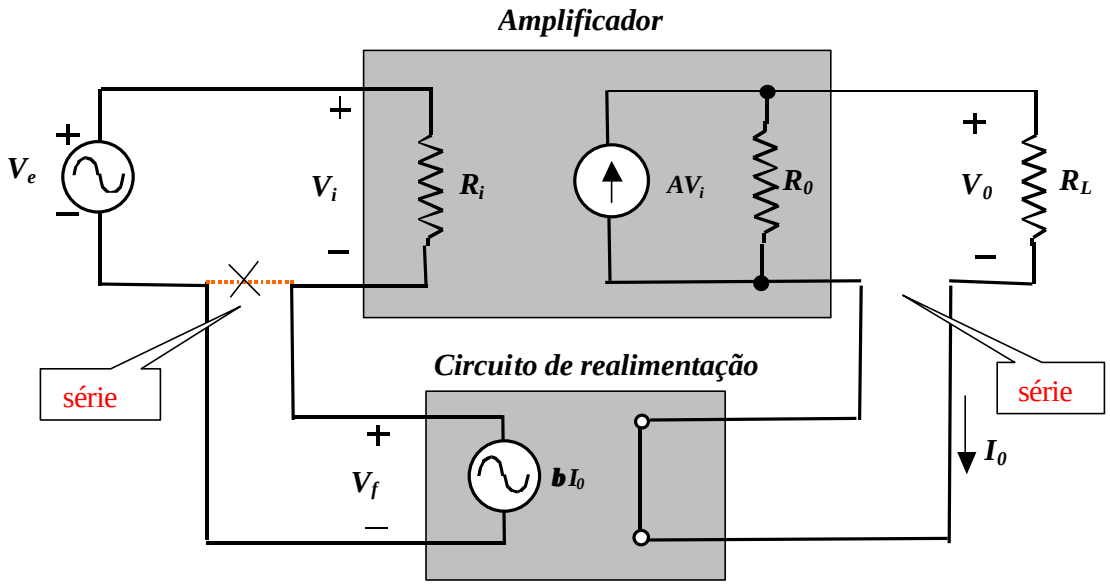




Circuito equivalente

✓ *Realimentação de corrente em série (série-série)*

A figura abaixo mostra uma conexão de realimentação de corrente em série. A tensão de realimentação (V_f) que é proporcional (b) a corrente de saída é realimentada em série com o sinal de entrada.



Matriz Z

Conexão para realimentação de corrente em série (série-série)

*O amplificador apresenta um ganho **A** (transcondutância) (ganho de malha aberta da conexão), impedância de entrada R_i, e impedância de saída R_0. O circuito de realimentação apresenta um ganho **b** (transresistência), uma impedância de entrada zero, e uma impedância de saída zero.*

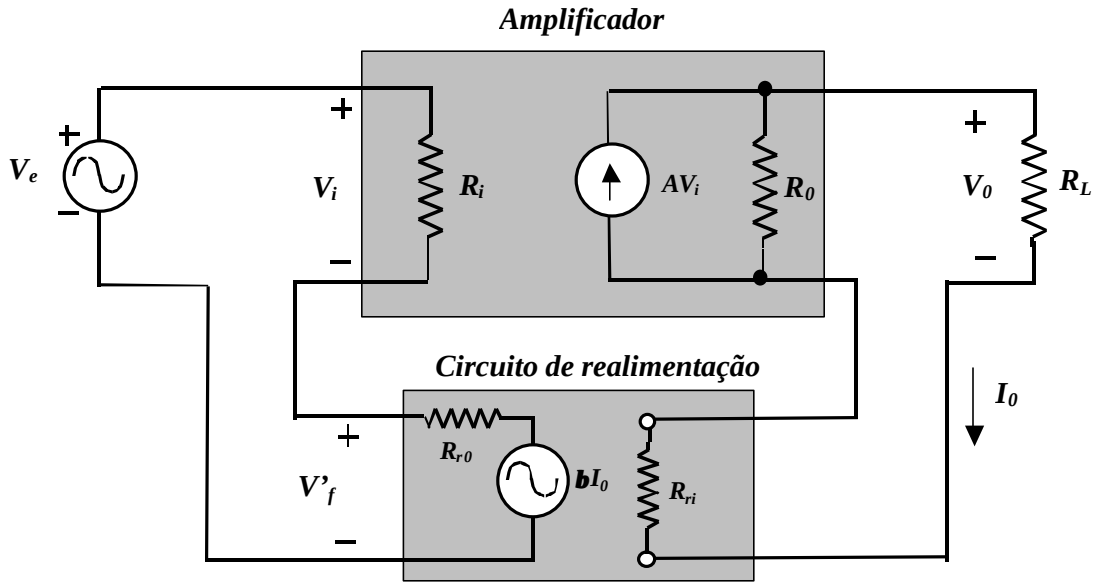
- *Se o circuito de realimentação apresente uma impedância de saída diferente de zero, R_{r0}, podemos considerar esta em série com a impedância de entrada, e ainda considerar a conexão como a mostrada acima, agora com a impedância de entrada do amplificador $R'_i = R_i + R_{r0}$.*

- *Ainda, caso o circuito de realimentação apresente uma impedância de entrada finita, R_{ri}, podemos considerar esta em série com a impedância de saída R_0, e ainda considerar a conexão como a mostrada acima, agora com um ganho reduzido $A' = AR_0/(R_0+R_{ri})$ e uma impedância de saída $R'_0 = R_0 + R_{ri}$.*

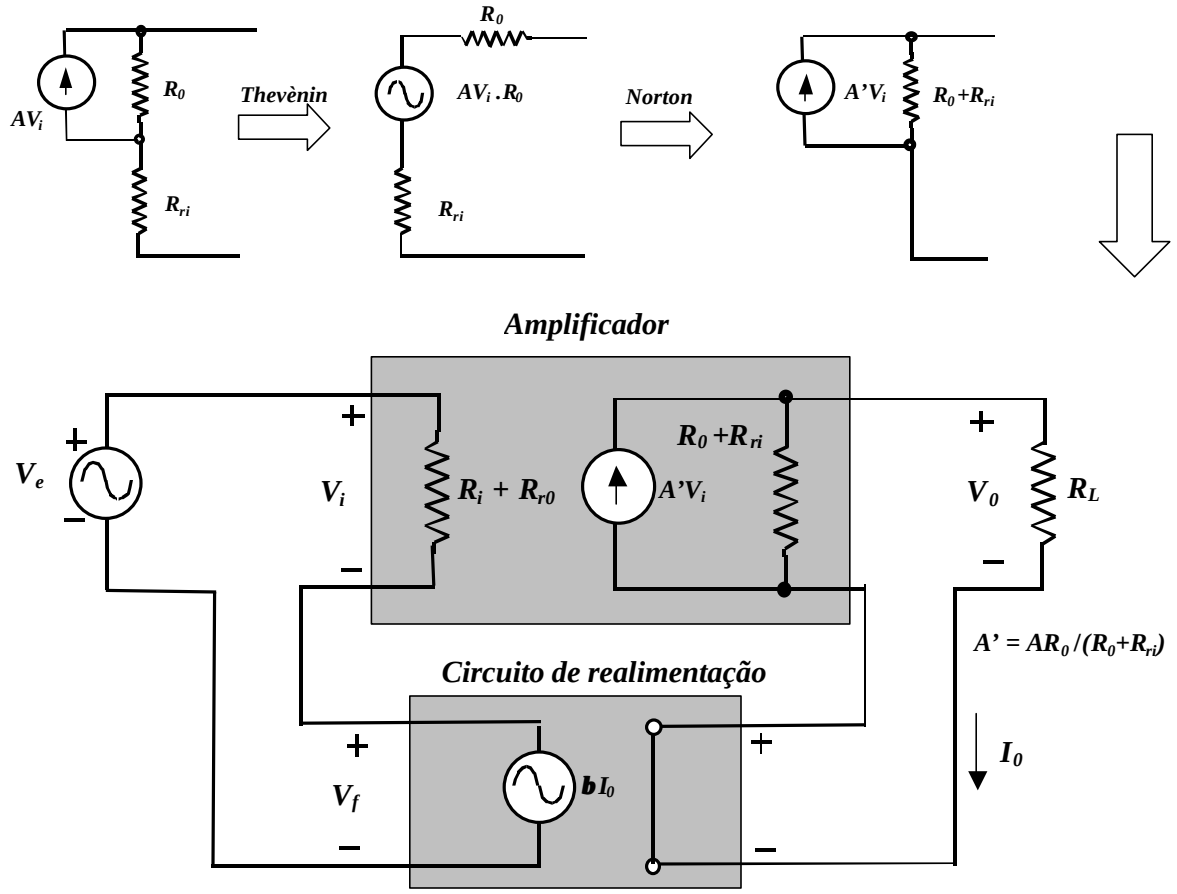
- *O ganho reverso (I_0/V_f) do circuito de realimentação é sempre de desprezado.*

Obs: Normalmente $R_{ri} << R_0$ e $R_{r0} << R_i$

As figuras abaixo ilustram as considerações acima.



Conexão para realimentação de corrente em série (série-série) com impedância de entrada e saída no circuito de realimentação



Conexão para realimentação de corrente em série (série-série) com impedância de entrada e saída no circuito de realimentação equivalente

Vamos determinar para esta conexão, o ganho de malha fechada, a impedância de entrada e a impedância de saída.

- ***Ganho de malha fechada***

Para esta análise vamos nos reportar as figuras anteriores. Se não houver realimentação (V_f =0), o ganho do estágio amplificador com R_L =0 (ganho de malha aberta) é

$$A = I_0 / V_e = I_0 / V_i$$

Se um sinal de realimentação, V_f, for conectado em série com a entrada, então

$$V_i = V_e - V_f$$

Uma vez que

$$I_0 = A\, V_i = A\,(V_e - V_f) = A\, V_e - A\, V_f = A\, V_e - Ab\, I_0$$

então

$$I_0\,(1 + Ab) = A\, V_e$$

e o ganho de malha fechada é dada por

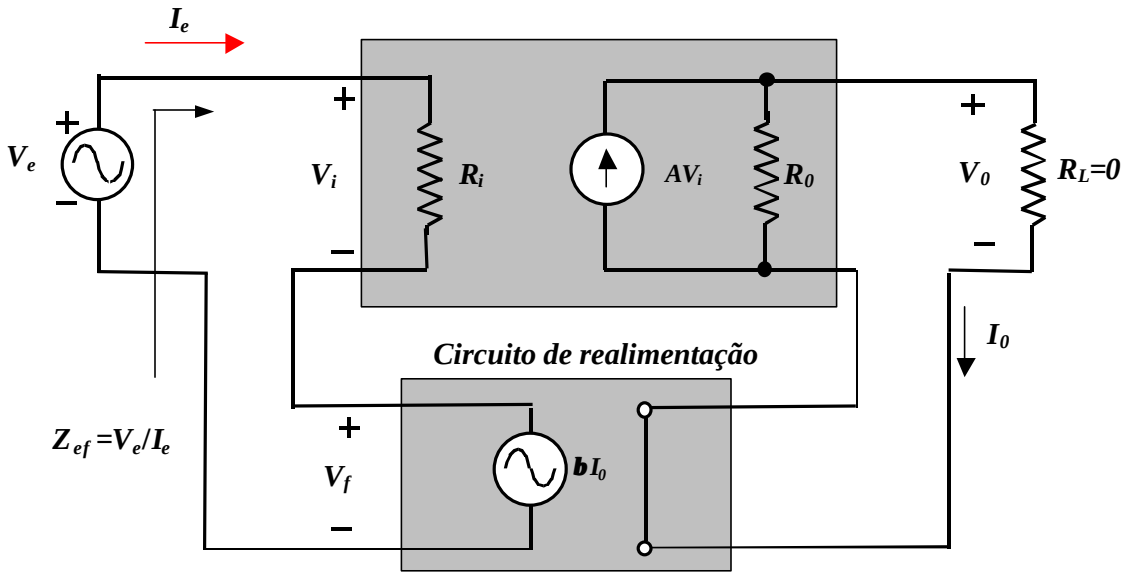
$$\boxed{A_f = I_0 / V_e = A / (1 + Ab)} \qquad (414)$$

A equação (414) mostra que o ganho com realimentação (ganho de malha fechada) é o ganho do amplificador reduzido pelo fator ***(1+ Ab).***

É importante observar que o ganho neste caso é uma transcondutância e não um ganho de tensão ou corrente.

- ***Impedância de entrada***

Para determinar a impedância de entrada vamos repetir a conexão com a indicação da impedância de entrada como mostra a figura abaixo.



Determinação da impedância de entrada para a conexão realimentação de corrente em série (série-série)

A impedância de entrada pode ser determinada da seguinte forma: ***(com $R_L = 0$)***

$$I_e = V_i/R_i = (V_e - V_f)/R_i = V_e/R_i - b\, I_0/R_i$$

$$R_i\, I_e = V_e - b\, I_0$$

$$V_e = R_i\, I_e + b\, I_0 = R_i\, I_e + b\, AR_i Ie$$

$$V_e = (1+bA)R_i\, I_e$$

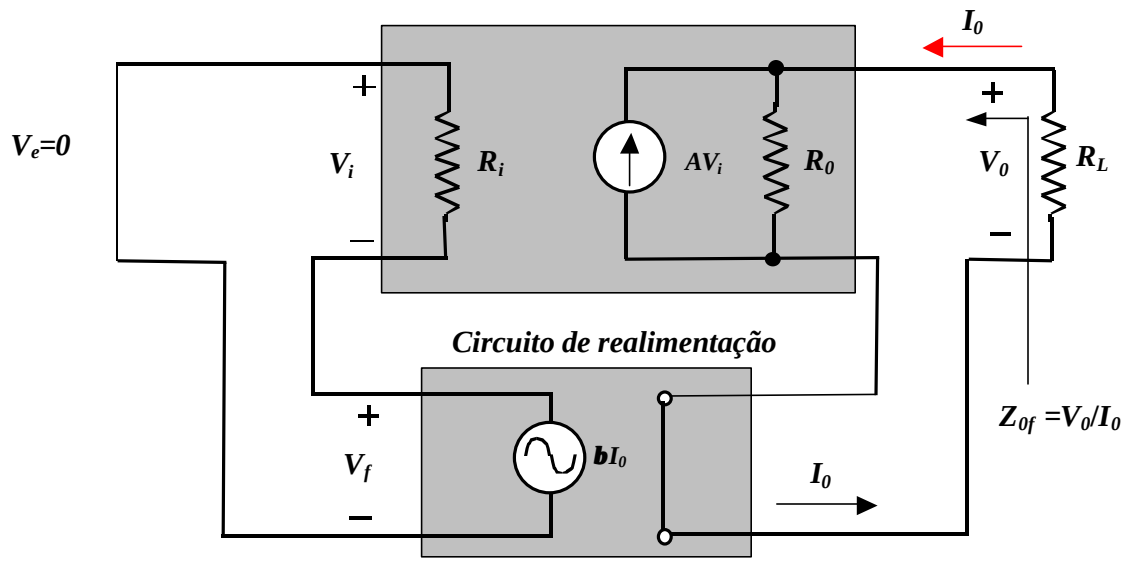
Portanto

$$\boxed{Z_{ef} = V_e / I_e = (1+bA)\, R_i} \qquad (415)$$

*Esta equação mostra que a impedância de entrada de um circuito com realimentação de corrente em série(**série-série**) é igual a impedância de entrada sem realimentação multiplicada pelo fator **(1+bA)**.*

- ***Impedância de saída***

Para determinar a impedância de entrada vamos repetir a conexão com a indicação da impedância de saída como mostra a figura abaixo.



Determinação da impedância de saída para a conexão realimentação de corrente em série (série-série)

A impedância de saída pode ser determinada da seguinte forma:

$V_0 = R_0 (I_0 + AV_i)$

para $V_e = 0$ $\quad V_i = -V_f$

$V_f = -bI_0$ *(Obs:note que o sentido da corrente está invertido)*

portanto

$V_0 = R_0I_0 - R_0 AV_f = R_0I_0 + R_0AbI_0$

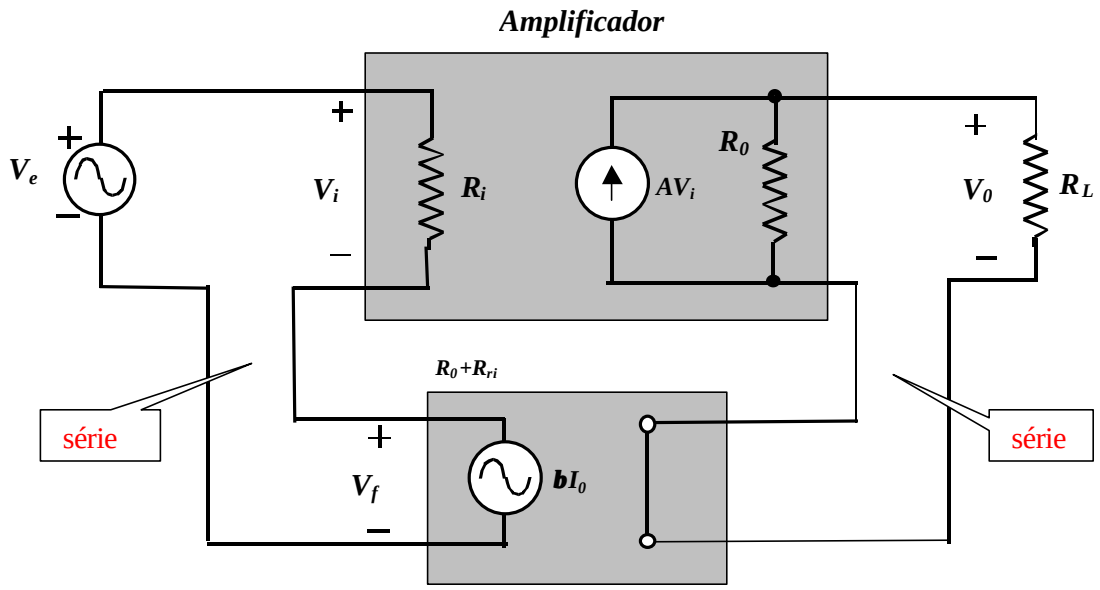
$V_0 = R_0I_0(1+ Ab$

portanto

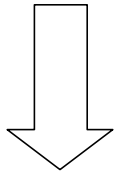
$$Z_{0f} = V_0 / I_0 = R_0 (1+ Ab) \qquad (416)$$

*Esta equação mostra que a impedância de saída de um circuito com realimentação de corrente em série (**série-série**) é igual a impedância de saída sem realimentação multiplicada pelo fator **(1+bA)**.*

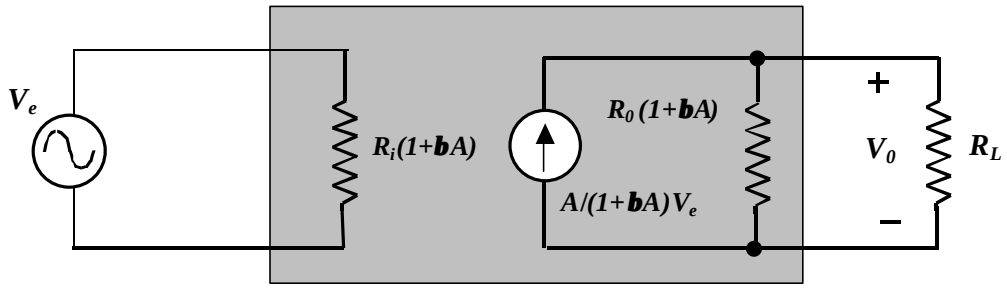
A figura abaixo mostra o circuito equivalente da conexão com realimentação de corrente em série.



Conexão com realimentação de corrente em série (série-série)



Amplificador com realimentação



Circuito equivalente