

Capítulo 1 – Amplificador Diferencial com Transistores

Nesse capítulo você conhecerá o Amplificador Diferencial com Transistor (A.D) que é o primeiro estágio de um Amplificador Operacional (A.O). Para compreender o Amplificador Operacional, você pode pular esse capítulo.

1.1. Introdução

O amplificador diferencial (AD) é importante no estudo dos amplificadores operacionais (AO) pois ele é o primeiro estágio de um AO, estabelecendo algumas de suas principais características.

Por definição um AD é um circuito que tem duas entradas nas quais são aplicadas duas tensões v_1 e v_2 e uma saída v_s . Se considerarmos a condição ideal se $v_1 = v_2$ a saída será nula, isto é, um AD é um circuito que amplifica só a diferença entre duas tensões rejeitando os sinais de entrada quando estes forem iguais.

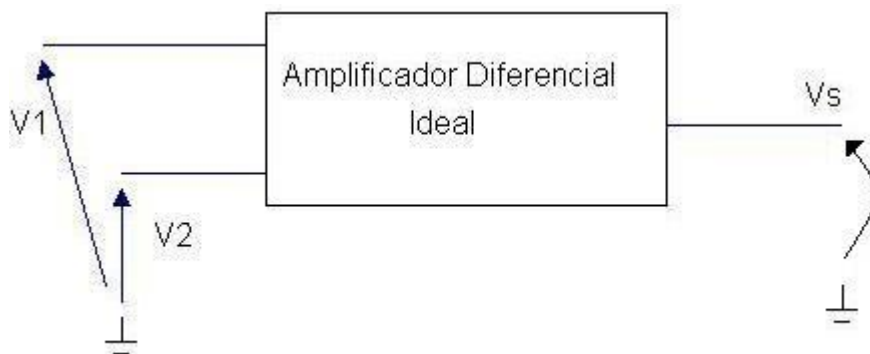


Figura 1.1 – Amplificador diferencial ideal

No caso ideal $V_s = A_d \cdot V_d = A_d \cdot (V_1 - V_2)$

onde

A_d = Ganho diferencial de tensão

$V_d = V_1 - V_2$ = sinal diferença ou sinal erro

Se $V_1 = V_2$ então $V_d = 0$ e, portanto, $V_s = 0$

Na prática existirá sempre uma pequena tensão na saída quando $V_1=V_2$ (situação chamada de modo comum). No caso de um AD real a expressão da tensão de saída em função das entradas é dada por:

$$V_s = A_d \cdot V_d + A_c \cdot V_c$$

Onde

$V_c = (V_1 + V_2) / 2 =$ sinal em modo comum e $A_c =$ Ganho em modo comum.

Está claro pelo exposto que no caso de um AD ideal o valor de $A_c = 0$.

Na prática, os valores de A_d e A_c dependem dos componentes usados na construção do AD, como será mostrado a seguir. No circuito da Figura 1.2 admitindo que os transistores são iguais e que a fonte de corrente é ideal então $I_{E1} + I_{E2} = I_O =$ constante.

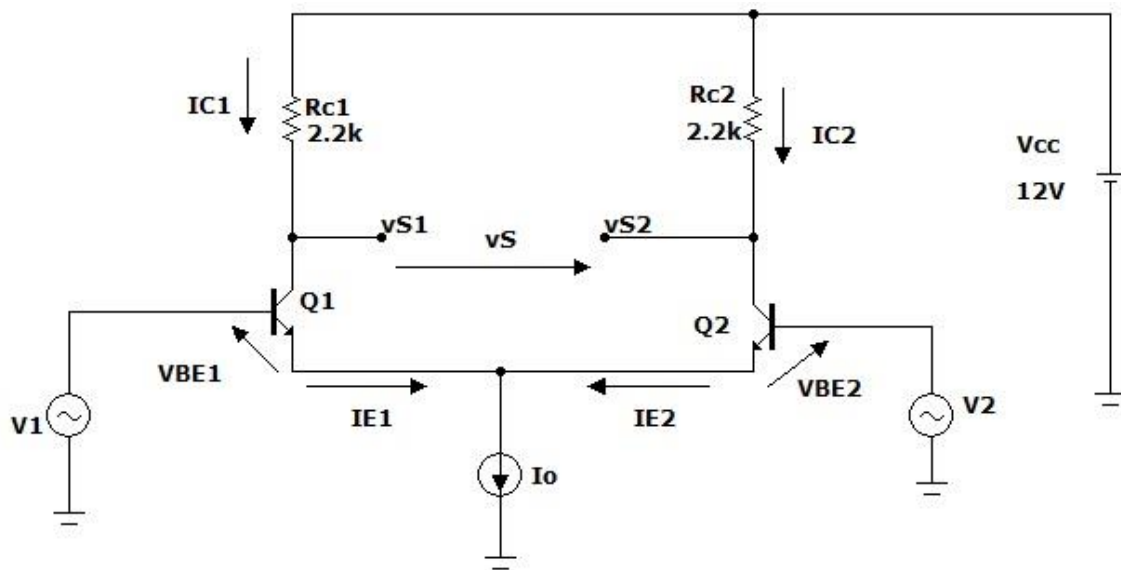


Figura 1.2 – Amplificador diferencial discreto com fonte de corrente ideal

Considere a tensão na entrada 2 (V_2) constante ($V_2 = E$) e a tensão na entrada 1 como sendo igual a $V_1 = V_{M1} \cdot \text{sen}(\omega t) + E$, isto é, uma tensão alternada senoidal com um nível médio E .

A Figura 1.3 mostra as principais formas de onda do circuito considerando essas entradas.

Quando $V_1 = V_2 = E$, os dois transistores conduzirão a mesma corrente ($I_{E1} = I_{E2} = I_0/2$), pois admitimos inicialmente transistores idêntico, nessas condições a tensão do coletor para o terra de cada transistor será igual a:

$$V_{S1} = V_{S2} = V_{CC} - R_C \cdot I_0/2$$

e, portanto, a tensão entre os coletores valerá:

$$V_s = V_{S1} - V_{S2} = 0.$$

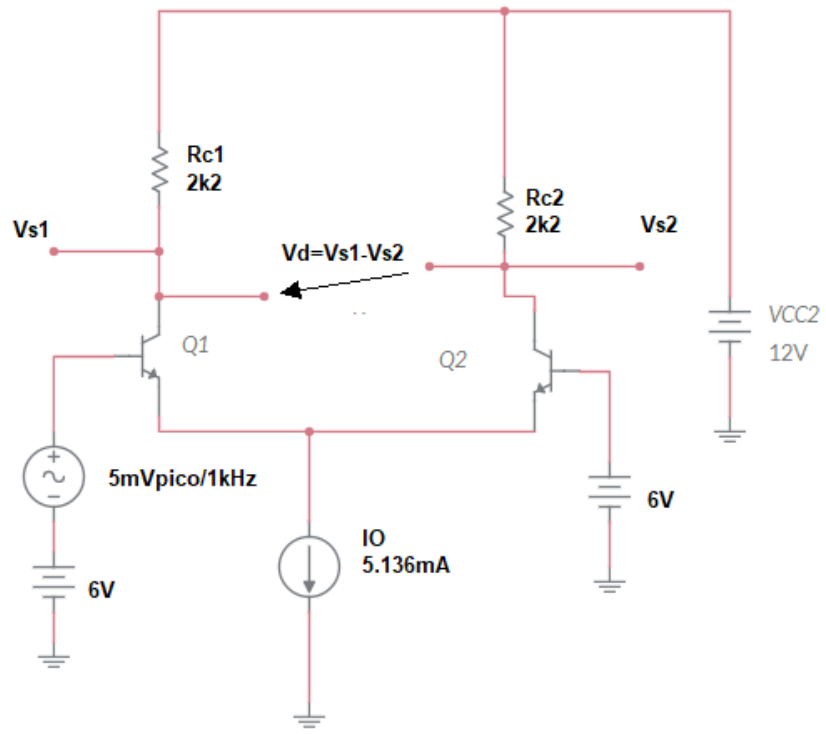
Quando $V_1 > V_2$ o transistor Q1 conduzirá mais que Q2 e portanto I_{C1} aumentará, diminuindo V_{S1} (não esqueça $V_{S1} = V_{CC} - R_C \cdot I_{C1}$) e por força da fonte de corrente, I_{C2} diminuirá (não esqueça que $I_0 = I_{E1} + I_{E2} = \text{constante}$, se I_{E1} aumentar I_{E2} deve diminuir), aumentando V_{S2} .

Na Figura 1.2 e considerando que os transistores são idênticos e que a fonte de corrente é ideal se conclui que:

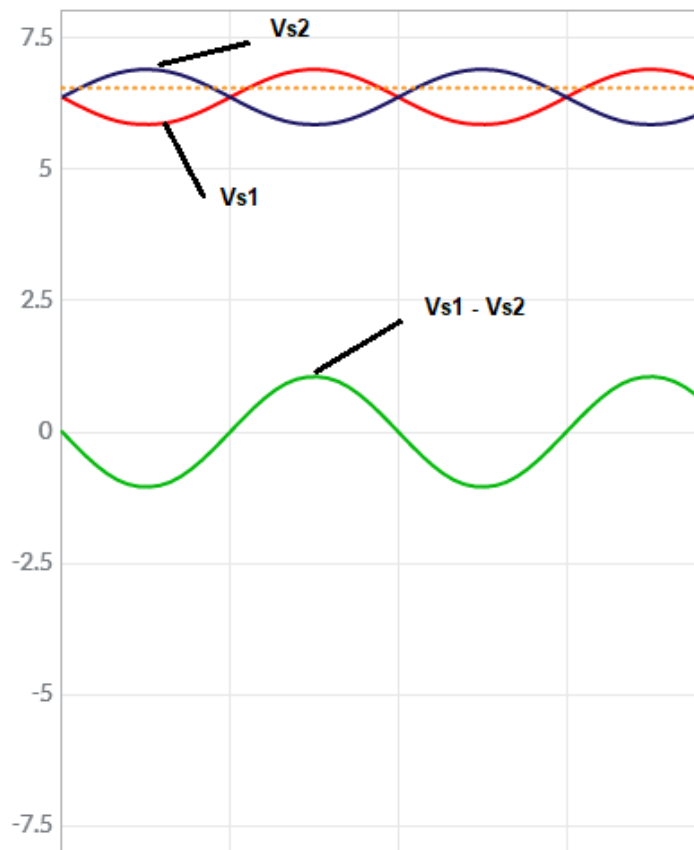
O ganho diferencial (A_d) de tensão, considerando a saída nos coletores, é igual a :

$$A_d = V_{S1pp}/V_{M1} = V_{S2pp}/V_{M1} \quad V_{S1pp} = V_{S2pp}$$

Se a saída for entre os coletores o ganho será duas vezes maior. A Figura 1.3 mostra as principais formas de onda, $V_{s1}(t)$, $V_{s2}(t)$ e $V_s = V_{s1} - V_{s2}$.



(a)



(a)

(b)

Figura 1.3 – (a) A.D ideal (b) Formas de onda

Arquivo Multisim Live

<https://www.multisim.com/content/inxcF738iJdwuTGELSCnW4/amplificador-diferencial-com-transistores-iguais-e-fonte-de-corrente-ideal/open/>

O sinal na saída 1, V_{s1} , está defasado de 180° em relação à entrada 1, V_1 , e o sinal na saída 2, V_{s2} , está em fase com a entrada 1. Por isso mesmo é que, se considerarmos a saída no coletor de Q2 a entrada 1 será chamada de não-inversora (+) e a entrada 2 chamada inversora (-).

1.2. Amplificador diferencial com fonte de corrente real

Na prática os transistores nunca serão iguais e a fonte de corrente não será ideal. A Figura 1.4 mostra o circuito de um AD com fonte de corrente real. Neste circuito a fonte $-V_{CC}$ junto com R_E são a fonte de corrente.

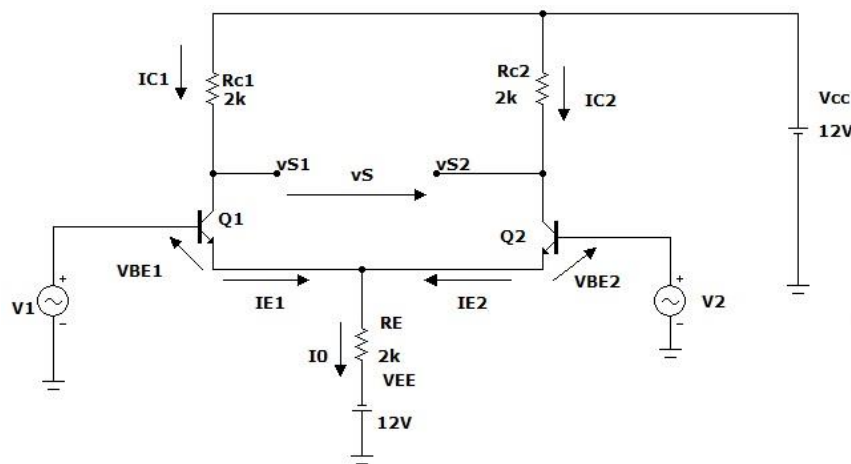


Figura 1.4 – Amplificador diferencial real

Arquivo Multisim Live

<https://www.multisim.com/content/Q5BZyrWsVF2odEFpJ3jCCL/amplificador-diferencial-fonte-de-corrente-real/open/>

O valor da fonte de corrente é calculado fazendo-se $V_1=V_2= 0$ (condições quiescentes), resultando:

$$I_O = (V_{CC} - 0,7)/R_E = V_{CC}/R_E$$

Para esse circuito o ganho diferencial, considerando a saída nos coletores, será calculado por:

$$A_d = V_{S1}/(v_1 - v_2) = V_{S2}/(v_1 - v_2) = R_C/2.r_e$$

onde

r_e = resistência incremental da junção base emissor podendo o seu valor ser estimado por:

$$r_e = 25\text{mV}/I_E \text{ a } 25^\circ\text{C}$$

sendo I_E = a corrente quiescente de emissor.

Ou em função dos parâmetros h (híbridos)

$$A_d = h_{fe}.R_C/2.h_{ie} \quad \text{sendo} \quad r_e = h_{ie}/h_{fe}$$

Lembrando que $h_{fe} = \beta$

O ganho em modo comum (A_c) do circuito é calculado por:

$$A_c = R_C/2.R_E$$

Como é desejável um A_c o menor possível (ideal zero) estaríamos tentados a aumentar R_E o máximo possível, mas isso provocaria uma diminuição nas correntes de polarização, diminuindo o ganho. Para manter o mesmo valor de corrente, se R_E aumentar, devemos aumentar proporcionalmente V_{CC} , o que na prática não é possível.

1.3. Polarização por Espelho de Corrente

Uma possível solução para obter um R_E e valor alto, é substituir R_E por um transistor Q3 que simula uma alta resistência, sem que seja necessário um valor alto de V_{CC} . Desta forma se obtém um valor de A_c muito baixo. O circuito da Figura 1.5 é chamado de amplificador diferencial com polarização por espelho de corrente, sendo

muito usado em circuitos integrados e permite obter ganhos elevados. A condição para fazer o espelhamento é $Q_3=Q_4$. O transistor Q4 é polarizado com $I_{E4}=(24V-0,7V)/6k=3,88\text{ mA}=I_{E3}=I_O$ pois o V_{BE} é o mesmo.

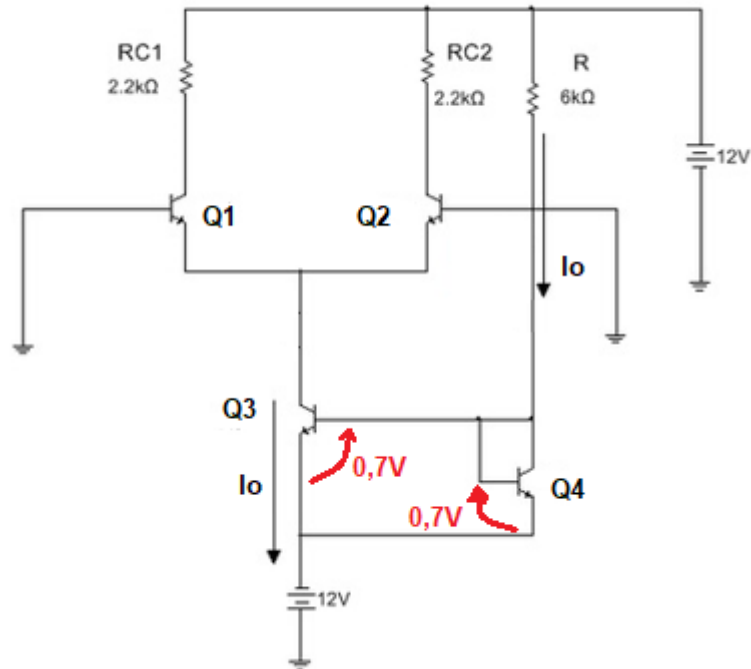


Figura 1.5 – Amplificador diferencial discreto com polarização por espelho de corrente

Arquivo Multisim Live

<https://www.multisim.com/content/Lt6J3McfFKwVKPjdpreTUg/amplificador-diferencial-com-fonte-de-corrente-espelho-de-corrente/open/>

A polarização por espelho de corrente é eficaz quando existe casamento perfeito entre os dois transistores Q3 e Q4, isto é, o V_{BE} é o mesmo.

1.4. Amplificador diferencial com realimentação

Os circuitos vistos apresentam um ganho e ponto de polarização instável, pois dependem dos parâmetros do transistor, por exemplo (r_e e beta) e nem sempre são iguais. Uma forma de contornar o problema é aplicar **realimentação negativa** ao circuito, como na Figura 1.6. Neste circuito a realimentação existente através de R_{E1} e

R_{E2} diminui o ganho, mas deixa-o estável, isto é, se os transistores forem trocados e/ou a temperatura variar o **valor do ganho não muda** (ou varia pouco).

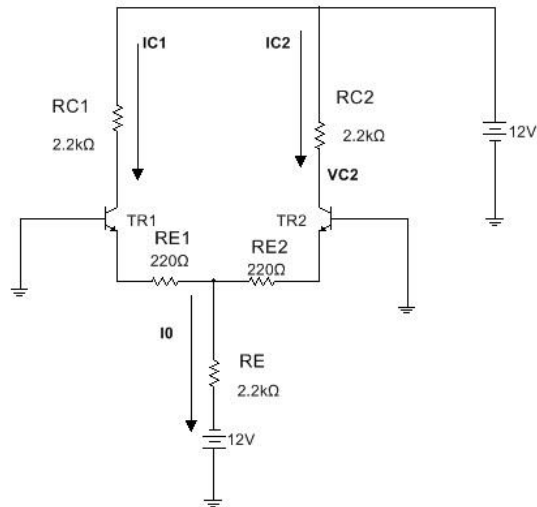


Figura 1.6 – Amplificador diferencial com realimentação negativa

O ganho de tensão considerando a saída nos coletores é dado por:

$$A_d = R_C / 2 \cdot (r_e + R_E) \quad \text{onde } R_E = R_{E1} = R_{E2}$$

Se $R_E \gg r_e$ as variações em r_e provocadas pela troca de transistor ou variação na temperatura serão encobertas por R_E e desta forma o ganho será estável e será dado **aproximadamente** por:

$$A_d = R_C / 2 \cdot R_E$$

Para complementar o estudo do A.D algumas experiencias virtuais usando o Multisim serão feitas.

1.6. Amplificador Diferencial Parte 2: Medida das correntes em condições quiescentes com transistores diferentes

Abra o arquivo fornecido e identifique o circuito da Figura 1.8. **Meça** todos os valores pedidos da Tabela 2. Observe que os transistores são diferentes pois apresentam corrente de saturação diferentes (Q1 tem $I_S=5\text{ nA}$ $\beta_1=100$ e Q2 tem $I_S=10\text{ nA}$ $\beta_2=200$). Os transistores são diferentes.

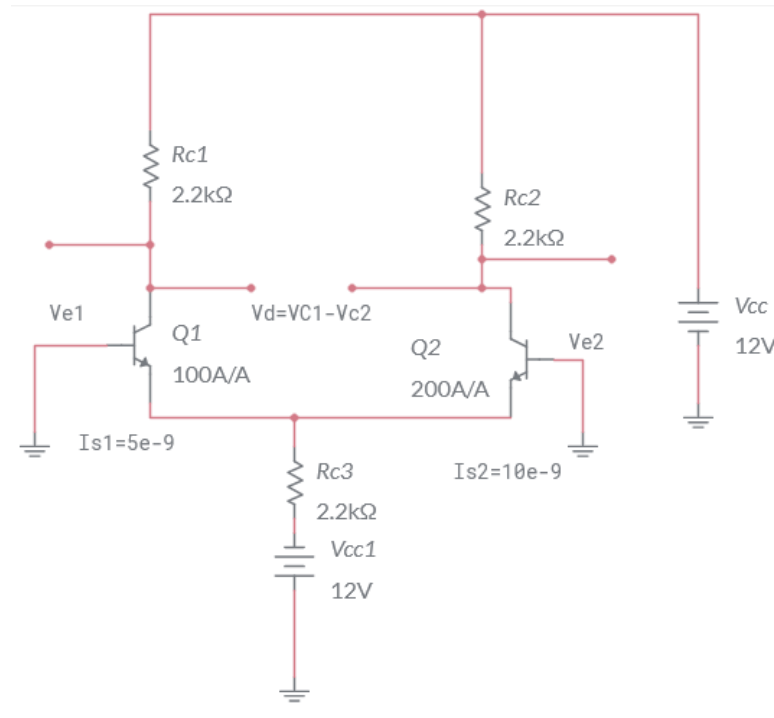


Figura 1.8 - Amplificador diferencial com transistores diferentes

Arquivo Multisim Live

<https://www.multisim.com/content/ZZHNqxtXv8pxK7DGw7GPR/amplificador-diferencial-com-transistores-diferentes-sem-realimentacao-ponto-de-polarizacao/open>

Tabela 2 – Amplificador diferencial - medida dos valores quiescentes - transistores diferentes

Valores		Medidos		
I_{C1} (mA)	I_{C2} (mA)	V_{CE1} (V)	V_{CE2} (V)	I_O (mA)

1.7. Amplificador Diferencial Parte 3: Medida das correntes em condições quiescentes com realimentação e transistores diferentes

Abra o arquivo cujo link é fornecido, identifique o circuito da Figura 1.9, (amplificador diferencial com realimentação e transistores diferentes). **Meça** todos os

valores indicados da Tabela 3. . Observe que existe uma realimentação negativa através dos resistores RE1 e RE2 que tem como finalidade diminuir a diferença entre as correntes de coletor provocada pelo descasamento entre os transistores.

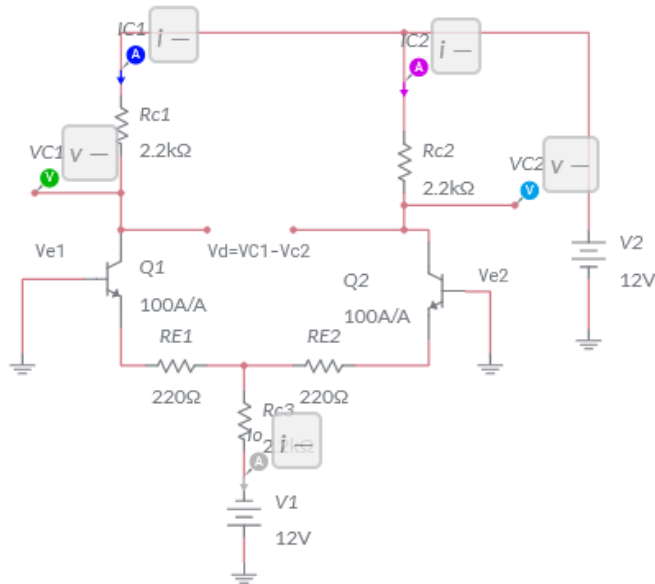


Figura 1.9 – Amplificador diferencial com transistores diferentes e com realimentação negativa

Arquivo Multisim Live

<https://www.multisim.com/content/3JT4V5bWyhhszsc8QY5FT/amplificador-diferencial-com-transistores-diferentes-com-realimentacao-ponto-de-polarizacao/open>

Tabela 3 – Amplificador diferencial - medida dos valores quiescentes - transistores diferentes circuito com realimentação

Valores Calculados					Valores Medidos				
IC1(mA)	IC2(mA)	VCE1(V)	VCE2(V)	I0(mA)	IC1(mA)	IC2(mA)	VCE1(V)	VCE2(V)	I0(mA)

1.8. Amplificador Diferencial Parte 4: Transistores iguais - Medida do ganho

Abra o arquivo usando o link fornecido. Identifique o circuito da Figura 1.10. **Calcule** o ganho diferencial considerando a saída (V_s) em um dos coletores e anote o resultado na Tabela 4.

Meça o valor de pico a pico (use os cursores Y AXIS) da tensão de entrada (V_{e1}) e da tensão de pico a pico nos coletores, VC1 e VC2 anotando os valores na Tabela 4.

Observe que as amplitudes são iguais nos dois coletores, mas defasadas de 180 graus.

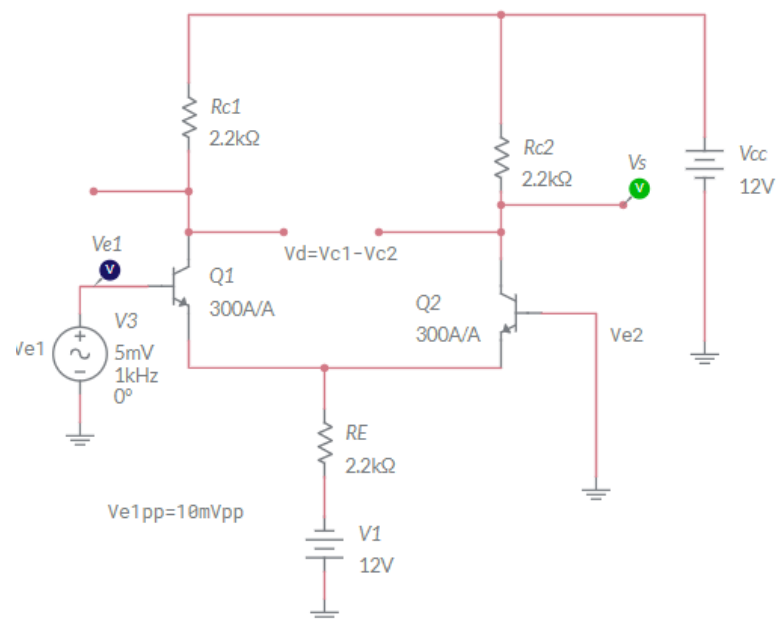


Figura 1.10 – Amplificador diferencial com transistores iguais - Medida do ganho

Arquivo Multisim Live

<https://www.multisim.com/content/Ko49a59qdQgDp68vgtFqv8/amplificador-diferencial-com-transistores-iguais-sem-realimentacao-medida-do-ganho-diferencial/open>

Tabela 4 – Amplificador diferencial com transistores iguais - calculo e medida do ganho de tensão

Valores Calculados			Valores Medidos		Valores Medidos
IE (mA)	$r_e = 25\text{mV}/I_E$	$A_d = R_C/2.r_e$	$A_{d1} = V_{C1}/V_e$	$A_{d2} = V_{C2}/V_e$	$A_d = V_{C1} - V_{C2}$

1.9. Amplificador Diferencial Parte 5: Transistores diferentes - Medida do ganho

Abra o arquivo usando o link fornecido. Identifique o circuito da Figura 1.11. **Calcule** o ganho diferencial considerando a saída (V_S) em um dos coletores e anote o resultado na Tabela 5. Use os valores medidos de I_{E1} e I_{E2} em para calcular o ganho em cada coletor.

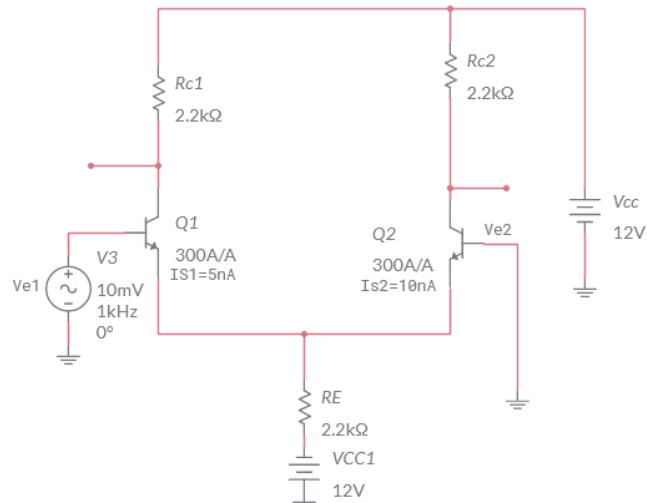


Figura 1.11 – Amplificador diferencial com transistores diferentes - Medida do ganho

Arquivo Multisim Live

<https://www.multisim.com/content/UmPd5RmcfXnvc5Ns2H77nJ/amplificador-diferencial-com-transistores-diferentes-sem-realimentacao-medida-do-ganho/open>

Tabela 5 – Amplificador diferencial com transistores iguais - calculo e medida do ganho de tensão

Valores Calculados			Valores Medidos		Valores Medidos
IE (mA)	$r_e = 25\text{mV}/I_E$	$A_d = R_c/2.r_e$	$A_{d1} = V_{C1}/V_e$	$A_{d2} = V_{C2}/V_e$	$A_d = V_{C1} - V_{C2}$

1.10. Amplificador Diferencial Parte 6: Transistores diferentes com realimentação - Medida do ganho

Abra o arquivo através do link fornecido identifique o circuito da Figura 1.12 Inicie a simulação e anote as formas de onda de entrada, e nos coletores (VC1 e VC2). Anote na tabela 6 os valores calculados e simulados do ganho. Observe que os transistores são diferentes. Use os valores medidos de I_{E1} e I_{E2} para calcular o ganho em cada coletor.

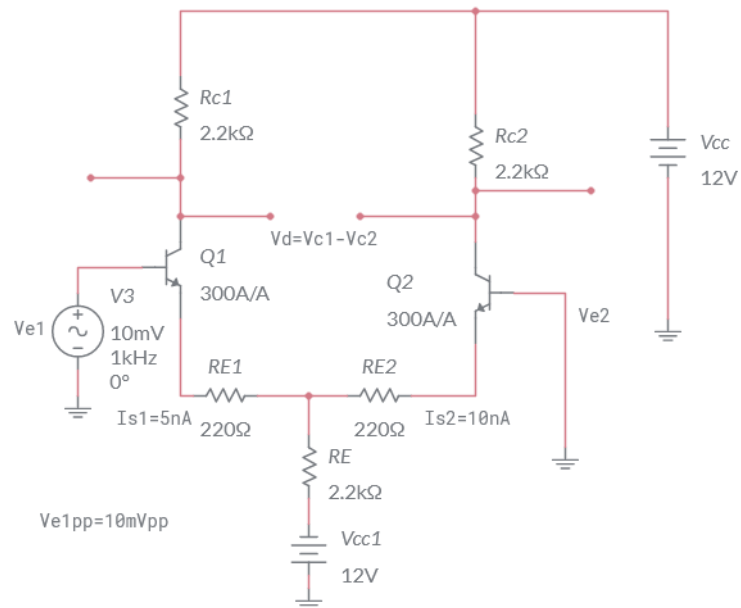


Figura 1.12 – Amplificador diferencial com transistores diferentes e com realimentação - Medida do ganho

Arquivo Multisim Live

<https://www.multisim.com/content/MUhyQzUt5Db2u6W4kk2TKB/amplificador-diferencial-com-transistores-diferentes-com-realimentacao-medida-do-ganho/open>

Tabela 6 – Amplificador diferencial com realimentação com transistores diferentes - calculo e medida do ganho de tensão

Valores Calculados			Valores Medidos		Valores Medidos
IE (mA)	$r_e = 25mV/I_E$	$A_d = R_C/2.r_e$	$Ad1=VC1/Ve$	$Ad2=VC2/Ve$	$Ad= VC1 -Vc2$

1.11. Exercícios Resolvidos

a) Quais são as tensões e correntes no circuito da Figura 1.13?

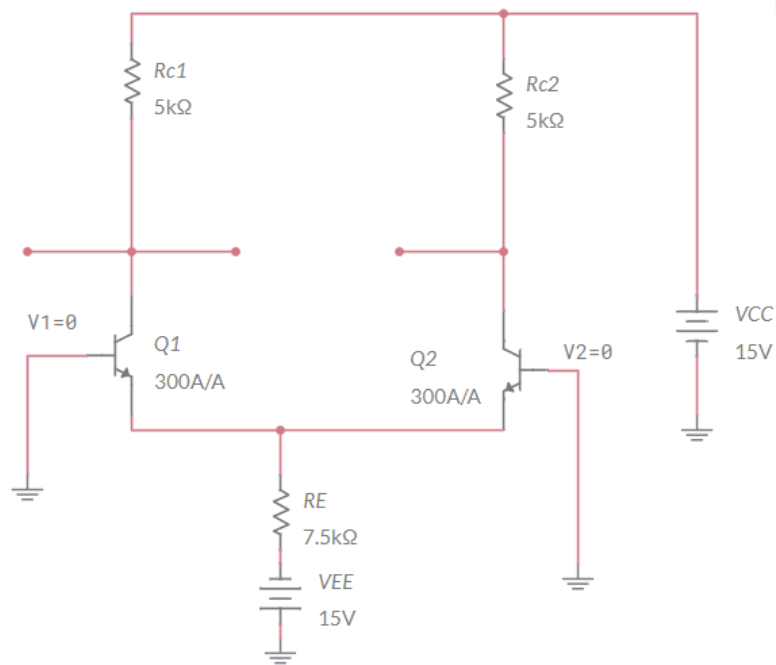


Figura 1,13 – Circuito para exercício 1.11

Solução: $I_O = (15 - 0,7) / 7,5k = 1,9 \text{ mA}$ $I_{E1} = 1,9 \text{ mA} / 2 = 0,95 \text{ mA} = I_{E2}$

A tensão nos coletores vale aproximadamente:

$$V_{c1} = V_{c2} = 15 - 5k \cdot 0,95 \text{ mA} = 10,25 \text{ V}$$

Arquivo Multisim Live

<https://www.multisim.com/content/Lwm7LMJHnxQPWAJoUWocDj/amplificador-diferencial-exercicio-resolvido-1a/open/>

b) No circuito da Figura 1.14 qual a amplitude de pico a pico do sinal na saída V_{c2} se o sinal a ser amplificado é de 20 mV_p ?

