



## Experimento: **Amplificador diferencial com TJB**

### 1 Introdução

O presente relatório visa detalhar o experimento laboratorial realizado na disciplina laboratório de circuitos eletrônicos no dia 3 de setembro de 2019 sobre amplificador diferencial com transistores de junção bipolar (TJBs).

Esse tipo de amplificador diferencial é utilizado para amplificação com rejeição de ruído devido à sua configuração diferencial, assim promovendo um sinal diferencial nas saídas dos transistores que além do benefício mencionado anteriormente, permite uma maior excursão do sinal de saída.

A prática objetiva a medição do ganho de modo comum ( $A_{CM}$ ) e o ganho diferencial ( $A_d$ ) de um amplificador diferencial com TJB pelo esquemático da figura 1. Também foi objetivada a medição da impedância de entrada vista por cada uma das entradas do amplificador para a outra entrada aterrada. Para isso foram utilizados três transistores BC 547B, sendo os dois pertencentes ao par diferencial com fatores de multiplicação de corrente de base o mais próximos possíveis ( $Q_1 : \beta = 271$ ,  $Q_2 : \beta = 271$  e  $Q_3 : \beta = 251$ ).

Inicialmente realizou-se a análise DC, medindo o ponto de operação de cada um dos transistores. Logo após, na análise AC uma senoide 1kHz de frequência e amplitude variável foi injetada em diferentes configurações para a medição dos ganhos, sempre com o cuidado de não saturar a saída. Inicialmente visando medir o ganho  $A_{CM}$ , foi inserido o mesmo sinal em ambas as entradas. Logo após para a medição do ganho  $A_d$ , uma entrada foi alimentada com o sinal senoidal e outra aterrada, assim permitindo encontrar uma aproximação do ganho diferencial.

O ideal para este último caso seria utilizar o mesmo sinal aplicado a outra entrada, porém defasado de  $180^\circ$ , mas devido a inexperiência dos discentes com o uso de circuitos inversores com amplificadores operacionais, essa possibilidade foi deixada de lado.

Com auxílio do multímetro digital da bancada foi medido o ponto de operação  $V_{CE}$  e  $I_C$  de cada estágio do circuito para cada transistor. Na análise AC a forma de onda

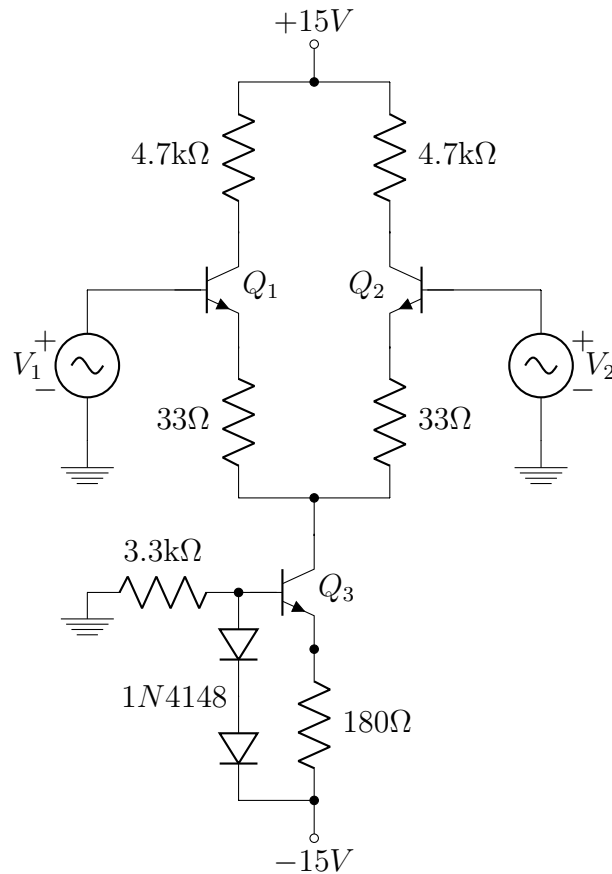


Figura 1: Esquemático do amplificador diferencial.

de entrada foi gerada no gerador de sinais e as saídas foram observadas no osciloscópio digital.

## 2 Análise teórica

### 2.1 Análise DC

Considera-se o circuito mostrado na figura ?? e a notação usada para cada componente. Dito isso, pode-se iniciar a primeira parte da análise do circuito, que é a análise DC, permitindo descobrir o ponto de operação de cada um dos transistores.

Primeiramente, considera-se que o transistor  $Q_3$  está em modo ativo, teremos:

$$V_{BE3} \approx 0.7 \text{ V}$$

Além disso considerando que a queda em cada diodo seja de 0.7 V, obteremos percorrendo a malha para encontrar  $I_{E3}$ .

$$I_{E3} = \frac{V_{D1} + V_{D2} - V_{BE3}}{R_{E3}} = \frac{0.7 + 0.7 - 0.7}{180} \approx 3.89 \text{ mA}$$

Considerando que o  $\beta_3$  é muito grande temos que  $I_{E3} \approx I_{C3}$ , portanto teremos que:

$$I_{C3} \approx 3.89 \text{ mA}$$

Logo:

$$V_{CE3} = 13.53 \text{ V}$$

Como o circuito do amplificador diferencial é perfeitamente simétrico, podemos considerar que toda a corrente que chega no coletor do transistor  $Q_3$  (fonte de corrente não ideal), é igual ao dobro da corrente do emissor dos transistores  $Q_1$  e  $Q_2$ . Teremos a expressão dada por:

$$I_{E1} = I_{E2} = \frac{I_{C3}}{2} \approx 1.945 \text{ mA}$$

Como os  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são muito grandes teremos que  $I_{E1} = I_{C1}$  e  $I_{E2} = I_{C2}$

$$I_{C1} = I_{C2} \approx 1.945 \text{ mA}$$

Como ambas as bases na análise DC do sistema estão aterradas logo  $V_{B1} = V_{B2} = 0$

Considerando que ambos os transistores ( $Q_1$  e  $Q_2$ ) estão em modo ativo teremos que:

$$V_{BE1} = V_{BE2} \approx 0.7 \text{ V}$$

Portanto teremos que a tensão no emissor será de:

$$V_{E1} = V_{E2} \approx -0.7 \text{ V}$$

Para se calcular a tensão no coletor de  $Q_1$  e  $Q_2$ , devemos percorrer a malha da fonte de 15 V até a tensão no coletor, logo teremos que:

$$V_{C1} = V_{C2} = V_{CC} - R_C * I_C = 15 - (4.7 \times 10^3) * (1.945 \times 10^{-3}) \approx 5.8585 \text{ V}$$

Calculando a tensão de polarização  $V_{CE1}$  e  $V_{CE2}$  teremos que:

$$V_{CE1} = V_{CE2} = V_C - V_E = 5.8585 + 0.7 \approx 6.5585 \text{ V}$$

Podemos confirmar que ambos os transistores estão em modo ativo ( $V_{CE} > V_{BE}$ ), como pressuposto anteriormente.

## 2.2 Análise AC

Para a análise AC temos que o circuito continua simétrico e, portanto, podemos utilizar o teorema do semi-circuito. Com isso obtemos dois amplificadores de emissor comum degenerados equivalentes, onde a podemos analisa-los para pequenos sinais através dos seus circuitos equivalentes para pequenos sinais para dois amplificadores diferentes de emissor comum, como analisado em práticas anteriores.

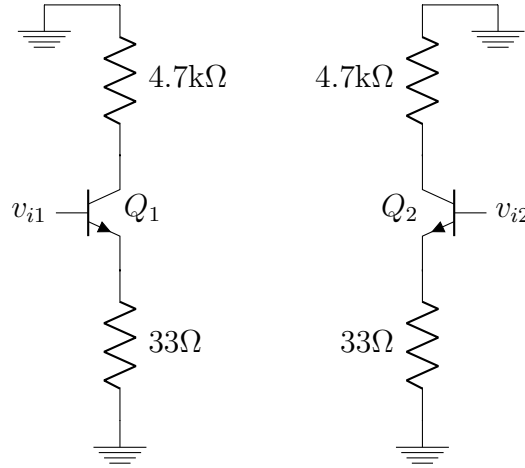


Figura 2: Circuito equivalente através do teorema do semi-circuito.

Primeiramente, o ganho diferencial ( $A_d$ ) é dado pela metade do ganho dos transistores degenerados, logo podemos dizer que  $A_d$  será:

$$A_d = -\frac{g_m \times R_C}{2 \times (1 + g_m \times R_E)}$$

Como  $g_m = \frac{I_C}{V_T}$ , onde para  $K = 300K$   $V_T \approx 26$  mV, temos que  $g_m$  será:

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{1.945 \times 10^{-3}}{26 \times 10^{-3}} \approx 7.481 \times 10^{-2} \text{ A/V}$$

Substituindo os valores na expressão de  $A_d$ , obtemos o seu valor.

$$A_d = -\frac{7.481 \times 10^{-2} \times 4.7 \times 10^3}{2 \times (1 + 7.481 \times 10^{-2} \times 33)} \approx -50.6819 \text{ V/V}$$

Para encontrar o ganho de modo comum ( $A_{CM}$  do transistor, devemos considerar que:

$$A_{CM} = \left. \frac{dv_{OCM}}{dv_{ICM}} \right|_{v_{ICM}=V_{ICM}} = -\frac{R_C}{2 \times R_{EE}}$$

Sabemos que o valor de  $A_{CM}$  é muito pequeno, quase zero, para calcular seu valor devemos olhar para a fonte de cauda, que possui uma resistência em paralelo  $R_{EE}$ , que pode ser calculada isolando o circuito da fonte aplicando valores de tensão e obtendo o valores de corrente no coletor, com a diferença entre os valores aplicados obteremos a sua resistência.

Para a diferença de potencial de 15V obtive  $I_C = 4.59mA$ , já para uma diferença de potência de 10V, obtemos um  $I_C = 4.58mA$ , substituindo os valores obtemos  $R_{EE} = 1M\Omega$ . Com isso é possível pela equação de  $A_{CM}$  obtemos seus valores.

Portanto,

$$A_{CM} = -\frac{R_C}{2 \times R_{EE}} = -\frac{4.7 \times 10^3}{2 \times (1 \times 10^6)} \approx -0.00235 \text{ V/V}$$

Quanto maior  $R_{EE}$ , ou seja quanto melhor a fonte de corrente, mais próximo de zero será  $A_{CM}$ .

### 3 Resultados e discussão

Considerando os cálculos realizados e as devidas medições, foi criada uma tabela para efeitos de comparação dos resultados.

	Valores Calculados	Valores Medidos
<b>Ponto de Operação Q1</b>	$V_{CE1} = 6,55V$ $I_{C1} = 1,945mA$	$V_{CE1} = 6,55V$ $I_{C1} = 1,97mA$
<b>Ponto de Operação Q2</b>	$V_{CE2} = 6,55V$ $I_{C2} = 1,945mA$	$V_{CE2} = 6,35V$ $I_{C2} = 1,98mA$
<b>Ponto de Operação Q3</b>	$V_{CE3} = 13.53V$ $I_{C3} = 3,89mA$	$V_{CE3} = 13,56V$ $I_{C3} = 3,97mA$
<b>Ganho <math>A_{CM}</math></b>	-2.35mV/V	2,18mV/V
<b>Ganho <math>A_d</math></b>	-50.68V/V	41,99 V/V

Tabela 1: Valores calculados e medidos para os parâmetros.

Observa-se na tabela uma ótima concordância entre os valores obtidos teoricamente com aqueles medidos em laboratório. Vale destacar as leves diferenças entre os valores

medidos dos pontos de operação para os transistores  $Q_1$  e  $Q_2$ . Isso ocorre devido ao fato destes não serem totalmente iguais, divergindo, inclusive, no ganho de corrente entre base e coletor, diferença essa que não existe entre os valores obtidos teoricamente.

## 4 Conclusões

Nesta prática foi estudado o amplificador diferencial, foi possível realizar sua montagem e fazendo as suas análises DC e AC do circuito proposto para encontrar seus parâmetros de polarização e ganhos e comparar com valores calculados. Obtemos um ótimo resultado para o que nos foi proposto, assim concluímos que o amplificador diferencial é um bom circuito para amplificação, além de se ter a vantagem da eliminação do ruído. Em seguida analisamos a técnica de análise AC com o teorema do semi-circuito, o que facilitou nosso estudo, devido à complexidade imposta pelo sistema.

## 5 Anexos

Vide abaixo as formas de onda obtidas na prática:

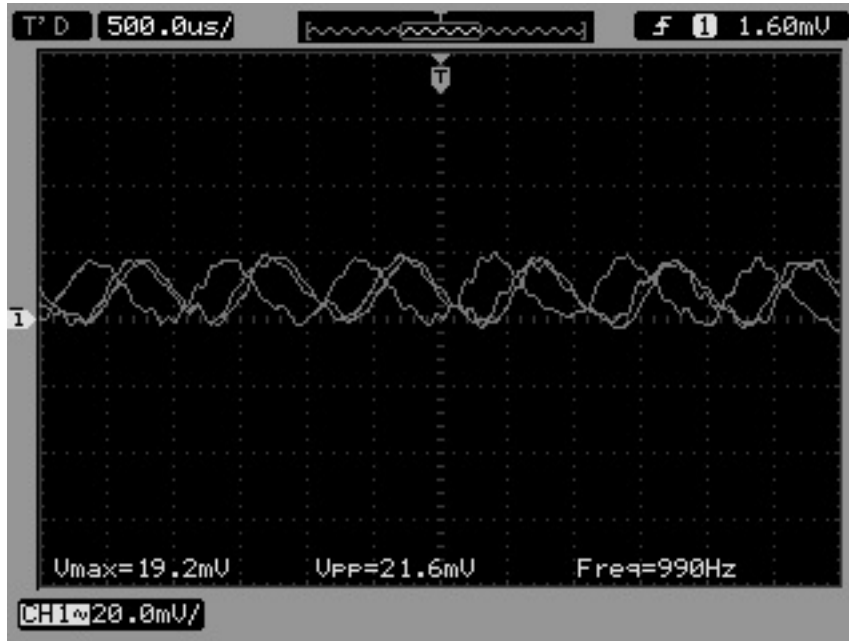


Figura 3: Tensão na saída para a medição do  $A_{CM}$ .

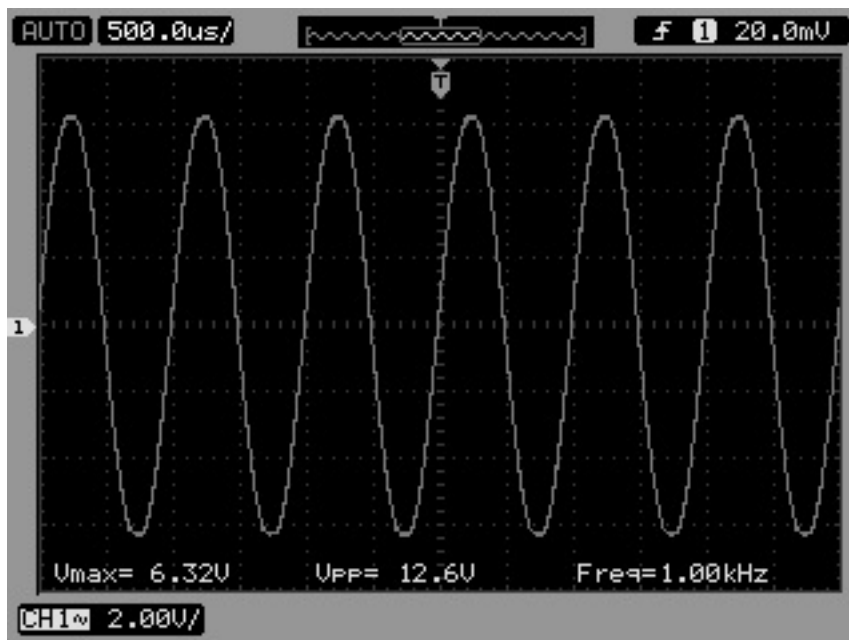
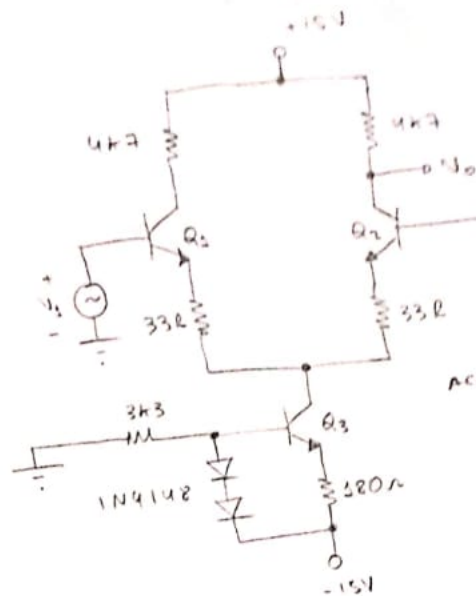


Figura 4: Tensão na saída para a medição do  $A_d$ .

Vide em anexo abaixo as folhas de cálculo utilizadas durante o experimento:



LT SPICE

$V_{CE1} = 6,42 V$   
 $V_{CE2} = 6,42 V$   
 $V_{CE3} = 13,57 V$   
 $I_{C1} = 3,96 mA$   
 $I_{C2} = 3,96 mA$   
 $I_{C3} = 8,95 mA$

ACOPPLAMENTO DIRETO

$A_{CM} =$

$A_D =$

$Z_i =$

$\beta_1 = 271$

$\beta_2 = 271$

$\beta_3 = 251$

MEDIÇÕES

$V_{CE1} = 6,55 V$

$V_{CE2} = 6,35 V$

$V_{CE3} = 13,56 V$

$I_{C1} = 3,97 mA$

$I_{C2} = 3,98 mA$

$I_{C3} = 3,97 mA$

$$v_o = (v_1 - v_2) A_D + \left( \frac{v_1 + v_2}{2} \right) A_{CM}$$

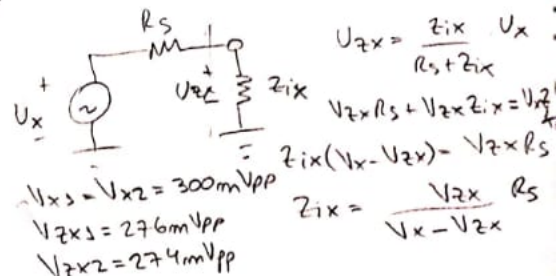
$A_{CM} = 0,00218 V/V$

$A_D = 41,99891 V/V$

$Z_{i1} = 37,95 k\Omega$

$Z_{i2} = 34,77 k\Omega$

$R_S = 3,3 k\Omega$



$v_{o1} = 12,6 V_{pp}$

$v_{i1} = 300 mV_{pp}$   $v_{i2} = 0$

$v_{o3} = 24 mV_{pp}$

$v_{i3} = v_{i2} = 11 V_{pp}$

$$v_o = (v_1 - v_2) A_D + \left( \frac{v_1 + v_2}{2} \right) A_{CM}$$

$$v_o = v_1 A_D + \frac{1}{2} v_3 A_{CM}$$

$$v_o = v_3 \left( A_D + \frac{1}{2} A_{CM} \right)$$

$$A_D = \frac{v_o}{v_1} - \frac{1}{2} A_{CM}$$

Figura 5: folha de cálculos.