

**GUIA DE LABORATÓRIO
PARA AS AULAS PRÁTICAS DE
ELETRÔNICA II**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE COMPUTAÇÃO
ESCOLA POLITÉCNICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

1ª AULA PRÁTICA

ESTUDO DO TRANSISTOR BIPOLAR DE JUNÇÃO

[1] Objetivo

- Obter as características de corrente contínua (CC) de um transistor bipolar de junção (BJT) NPN.
- Fazer um projeto de polarização.

[2] Trabalho Preparatório

[2.1] Fundamentos Teóricos

Descreva sucintamente o funcionamento físico do transistor bipolar de junção NPN em seus três principais modos de operação, apresentando o seu modelo matemático CC — em particular, a corrente de coletor I_C em função das tensões V_{BE} e V_{CE} , a mesma corrente I_C em função da corrente de base I_B e a influência do Efeito Early sobre a corrente I_C no modo ativo.

[2.2] Projeto

No circuito da Fig. 1, calcule os resistores R_1 , R_2 , R_C e R_E , usando valores comerciais, para que o circuito satisfaça às seguintes especificações: $V_C = 9\text{ V}$, $V_E = 3\text{ V}$ e $I_C = 2\text{ mA}$; de forma que esses valores independam razoavelmente dos parâmetros do transistor utilizado. Considere transistores bipolares BC546/7/8 e $V_{CC} = 12\text{ V}$.

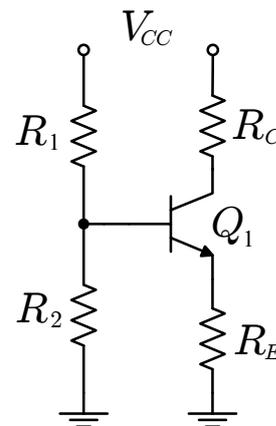
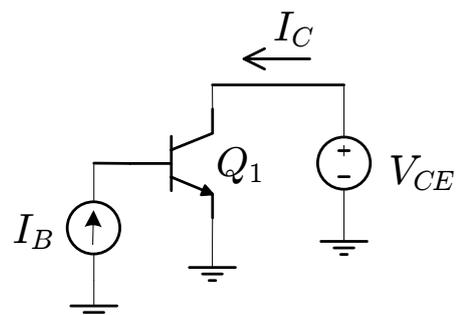


Figura 1

[2.3] Simulações

- Simulando o circuito ao lado através de uma análise *DC Sweep*, apresente um gráfico com as curvas características $I_C \times V_{CE}$ @ $I_B = 0, 5, 10, 15, 20\ \mu\text{A}$ do transistor BC546 (varie a tensão V_{CE} de 0 a 5 V com incrementos de 0,01 V).
- Usando novamente uma análise *DC Sweep* no circuito da figura ao lado, apresente um gráfico com a curva característica $V_{BE} \times I_B$ @ $V_{CE} = 5\text{ V}$ do transistor BC546 (varie a corrente I_B de 0 a 20 μA , com incrementos de 0,1 μA).



- Simule o circuito projetado no item 2.2 e apresente os valores obtidos para V_{CE} , V_{BE} e I_C (use valores comerciais de resistores que serão empregados na construção do circuito em laboratório).

Comentários sobre os Resultados Obtidos

[4] Monte o circuito da Fig. 3.

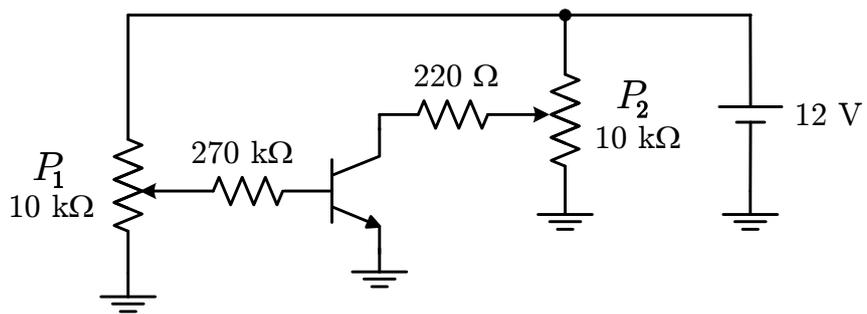


Figura 3

[5] Tendo ajustado todas as correntes I_B através da variação de P_1 , ajuste V_{CE} através da variação de P_2 e meça I_C , completando a tabela abaixo. Esboce os gráficos das curvas características $I_C \times V_{CE}$ com os valores da tabela.

Correntes de Coletor I_C (mA)						
V_{CE} (V) \ I_B (μA)	0	1	2	3	4	5
0						
5						
10						
15						
20						

[7] Após montar o circuito da Fig. 1 projetado do preparatório, meça as tensões e correntes de polarização e compare com os valores previstos teoricamente e os obtidos por simulação e comente os resultados.

Medições	Valor Teórico	Valor Simulado	Valor Experimental
V_{BE} (V)			
V_C (V)			
V_E (V)			
I_C (mA)			

Comentários sobre os Resultados Obtidos

2ª AULA PRÁTICA

O TRANSISTOR BIPOLAR COMO AMPLIFICADOR

[1] Objetivo

- Caracterizar o transistor bipolar de junção para a operação de pequenos sinais.
- Comparar as características de pequenos sinais das três configurações básicas
- Projetar um amplificador de tensão em emissor comum.

[2] Trabalho Preparatório

[2.1] Fundamentos Teóricos

A partir de um esboço das curvas características de entrada e saída ($i_B \times V_{BE}$ e $i_C \times V_{CE} @ i_B$), mostre a operação do transistor bipolar como amplificador de tensão (isto é, mostre as variações dos sinais sobre os gráficos). Em seguida, descreva o modelo matemático do transistor para pequenos sinais (através de g_m ou β , r_π e r_o), apresentando um circuito equivalente linearizado e as expressões para o cálculo dos parâmetros.

[2.2] Projeto

Para o circuito da Fig. 4, calcule os resistores R_1 , R_2 , R_C e R_E para que o amplificador na configuração emissor comum (isto é, Y em terra, entrada em X e saída em Z) satisfaça às seguintes especificações: $I_C = 1,0 \text{ mA}$, $V_{CE} = 5 \text{ V}$ e $|A_v| \approx 200$, de forma que a polarização independa razoavelmente dos parâmetros do transistor. Utilize um transistor BC546/7/8 e considere uma alimentação $V_{CC} = 12 \text{ V}$. Encontre os valores de resistores comerciais (ou associações em série ou paralelo dos mesmos) que aproximam os valores calculados.

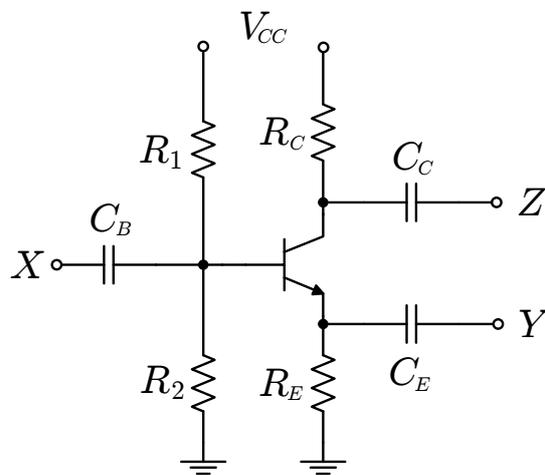


Figura 4

Calcule os capacitores de acoplamento usando as seguintes relações: $C_B (R_1 // R_2 // r_\pi) = 30 \text{ ms}$, $C_E (R_E // r_e) = 3 \text{ ms}$ e $C_C R_C = 30 \text{ ms}$, adotando os piores casos dos parâmetros especificados pelo fabricante do transistor. Atribua aos capacitores projetados valores comerciais que sejam obrigatoriamente maiores que as capacitâncias calculadas e explique o motivo dessa escolha.

[2.3] Análise

Considerando o circuito projetado no item 2.2, calcule os valores teóricos para o ganho de tensão, os limites máximos de excursão de sinal na saída, a impedância de entrada e a impedância de saída de cada configuração (nos cálculos teóricos, considere valores médios dos parâmetros do transistor fornecidos pelo fabricante):

- Emissor comum (Y em terra, entrada em X e saída em Z);
- Base comum (X em terra, entrada em Y e saída em Z);
- Coletor comum (Z em terra, entrada em X e saída em Y).

[2.4] Simulações

- Aterrando todos os terminais X, Y e Z, obtenha a polarização do circuito medindo V_{BE} , V_{CE} e I_C do transistor em uma análise DC.
- Para cada uma das três configurações básicas (emissor comum, base comum e coletor comum) realize as seguintes simulações:
 - Aplique uma fonte de tensão senoidal com amplitude de 10 mV e frequência de 1,0 kHz na entrada, conecte um resistor de 1 M Ω ao terminal de saída (para simular a impedância de entrada do osciloscópio) e apresente, em um mesmo gráfico, as formas de onda da tensão na entrada e na saída do amplificador. Medindo a amplitude de ambas as formas de onda obtidas, calcule o ganho de tensão.
 - Aumente a amplitude do sinal aplicado à entrada do amplificador até que o transistor deixe de operar na região ativa em ambos os extremos da forma de onda da tensão na saída. Meça os limites máximo e mínimo para a tensão na saída.
 - Ajustando novamente a amplitude do sinal de entrada em 10 mV, adicione um resistor de teste em série com a fonte de tensão na entrada do amplificador. Apresente um gráfico com a forma de onda da tensão na saída quando o resistor de teste assume valor igual ao calculado teoricamente para a impedância de entrada no item 2.3. Assim, calcule a impedância de entrada do amplificador simulado de acordo com o Apêndice A.
 - Conectando agora o resistor de teste ao terminal de saída (substituindo o resistor de 1 M Ω empregado nos itens anteriores), apresente um gráfico a forma de onda da tensão na saída quando o resistor de teste assume o valor calculado teoricamente para a impedância de saída do amplificador no item 2.3. Calcule a impedância de saída do amplificador simulado de acordo com o Apêndice A.

Experiência 02 – O BJT como Amplificador	
Nome: _____	Nota
Nome: _____	
Nome: _____	

[1] Polarização:

Monte o circuito da Fig. 4 com os componentes calculados no item 2.2 do preparatório e meça a polarização. Compare com os valores teóricos e simulados e comente.

Medições	Valor Teórico	Valor Simulado	Valor Experimental
V_{BE} (V)			
V_C (V)			
V_E (V)			
I_C (mA)			

Comentários sobre os Resultados Obtidos

[2] Configuração Emissor Comum

[2.1] Conecte o circuito na configuração em emissor comum e aplique um sinal de tensão senoidal à entrada do circuito, com uma amplitude que satisfaça a condição de pequenos sinais e com frequência de 1,0 kHz e amplitude de 20 mV pico a pico. Meça o ganho do amplificador e compare o valor medido com os valores teórico e simulado. Comente os resultados obtidos.

Ganho de Tensão (V/V)		
Valor Teórico	Valor Simulado	Valor Experimental

Comentários sobre os Resultados Obtidos

[2.2] Varie a amplitude do sinal de entrada até atingir os limites de excursão de sinal na saída do amplificador. Meça a máxima excursão do sinal na saída e compare com o valor previsto teoricamente e com o valor obtido na simulação. Comente os resultados obtidos.

Limite de Excursão de Sinal na Saída (V_{pp})		
Valor Teórico	Valor Simulado	Valor Experimental

Comentários sobre os Resultados Obtidos

[2.3] Ajuste a amplitude do sinal de entrada de forma que o amplificador volte à operação linear. Meça as impedâncias de entrada e de saída e complete a tabela abaixo. Compare com os valores previstos teoricamente e os obtidos por meio de simulação e comente.

Medidas	Valor Teórico	Valor Simulado	Valor Experimental
Impedância de Entrada (Ω)			
Impedância de Saída (Ω)			

Comentários sobre os Resultados Obtidos

[3] Configuração Base Comum

Conecte o amplificador na configuração base comum e, usando um sinal senoidal com frequência de 1,0 kHz, meça o ganho de tensão, o limite para a excursão de sinal na saída, a impedância de entrada e impedância de saída. Preencha a tabela abaixo com os valores medidos e compare com os valores previstos teoricamente e com os obtidos através de simulação. Explique as diferenças verificadas.

Medidas	Valor Teórico	Valor Simulado	Valor Experimental
Ganho de Tensão (V/V)			
Impedância de Entrada (Ω)			
Impedância de Saída (Ω)			
Limite de Excursão na Saída (V_{pp})			

Comentários sobre os Resultados Obtidos

[4] Configuração Coletor Comum

Conecte o amplificador na configuração coletor comum e, usando um sinal senoidal com frequência de 1,0 kHz, meça o ganho de tensão, o limite para a excursão de sinal na saída, a impedância de entrada e impedância de saída. Preencha a tabela abaixo com os valores medidos e compare com os valores previstos teoricamente e com os obtidos através de simulação. Explique as diferenças verificadas.

Medidas	Valor Teórico	Valor Simulado	Valor Experimental
Ganho de Tensão (V/V)			
Impedância de Entrada (Ω)			
Impedância de Saída (Ω)			
Limite de Excursão na Saída (V_{PP})			

Comentários sobre os Resultados Obtidos

3ª AULA PRÁTICA

ESTUDO DO TRANSISTOR DE EFEITO DE CAMPO MOSFET

[1] Objetivo

- Obter as características de corrente contínua (CC) de um transistor de efeito de campo MOSFET de canal N e extrair os parâmetros do seu modelo quadrático.
- Fazer um projeto de polarização.

[2] Trabalho Preparatório

[2.1] Fundamentos Teóricos

Descreva sucintamente o funcionamento físico do MOSFET de canal N nos seus três principais modos de operação, apresentando o seu modelo matemático CC — em particular a corrente de dreno I_D em função das tensões V_{GS} e V_{DS} , e a influência dos efeitos Early e de corpo na corrente I_D do transistor operando no modo de saturação.

[2.2] Circuito Integrado CD4007

O MOSFET utilizado nesta aula prática faz parte do circuito integrado CD4007 da família lógica digital CMOS, cujo circuito interno é apresentado na Fig. 5. Note que o circuito integrado é composto por três transistores de canal N (M1, M3 e M5) e outros três de canal P (M2, M4 e M6).

Os transistores de canal N no CD4007 foram construídos com dimensões $W = 200 \mu\text{m}$ e $L = 10 \mu\text{m}$, enquanto que os transistores de canal P apresentam $W = 400 \mu\text{m}$ e $L = 10 \mu\text{m}$. Além disso, todos os transistores de canal N compartilham o mesmo corpo (substrato), cujo terminal é o pino 7 do chip. No caso dos transistores de canal P, todos eles também compartilham o mesmo corpo, cujo terminal é o pino 14 do chip.

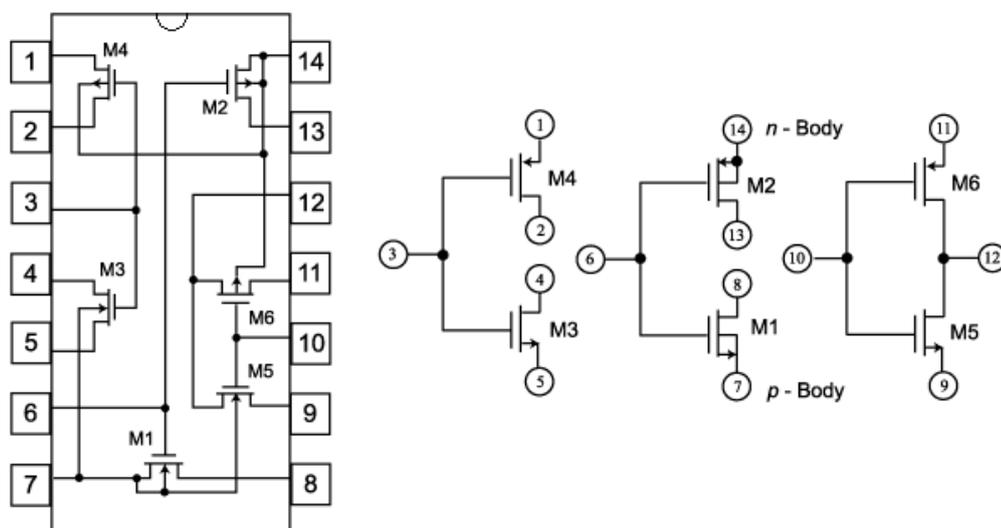


Figura 5

[2.3] Projeto

No circuito da Fig. 6, calcule os resistores R_1 , R_2 , R_D e R_F para que o circuito satisfaça às seguintes especificações: $V_D = 7,0 \text{ V}$, $V_S = 2,0 \text{ V}$ e $I_D = 1,0 \text{ mA}$. Considere um MOSFET de canal N do CD4007 (M1 ou M3), tensão de alimentação $V_{DD} = 12 \text{ V}$.

OBSERVAÇÃO: Nos cálculos do projeto, utilize os parâmetros k_N e V_{th} medidos na aula prática para o MOSFET de canal N do circuito integrado CD4007.

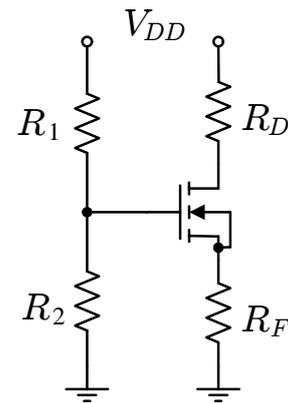
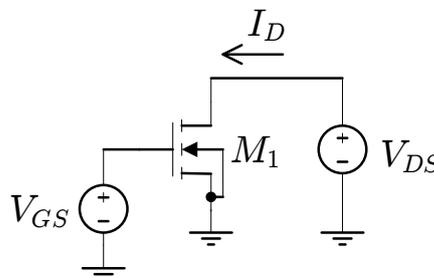


Figura 6

[2.4] Simulações

Antes de realizar qualquer simulação, abra o arquivo de biblioteca *CD4007.lib* em um editor de texto e altere os valores dos parâmetros KP e VT0 no modelo Spice CMOSN, de modo que eles assumam, respectivamente, os valores dos parâmetros k_N e V_{th} medidos experimentalmente para o transistor de canal N do circuito integrado CD4007. Salve o arquivo de biblioteca e realize as simulações abaixo:

- Usando uma análise tipo *DC Sweep*, simule o circuito abaixo e apresente um gráfico com as curvas características $I_D \times V_{DS}$ @ $V_{GS} = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 \text{ V}$ do MOSFET de canal N do CD4007 (nessa simulação, varie a tensão V_{DS} de 0 a 6,0 V, com incrementos de 0,01 V).



Simulando esse mesmo circuito, obtenha também a curva característica $I_D \times V_{GS}$ @ $V_{DS} = 6,0 \text{ V}$ do MOSFET de canal N do CD4007 (nessa simulação, varie a tensão V_{GS} de 0 a 6,0 V, com incrementos de 0,01 V).

- Simule o circuito de polarização projetado no item 2.3 e apresente os valores obtidos para V_{GS} , V_D , V_S e I_D (use valores comerciais de resistores que serão empregados na construção do circuito em laboratório).

Experiência 03 – Estudo do MOSFET (Canal N)	
Nome: _____	Nota
Nome: _____	
Nome: _____	

[1] Nos experimentos dos itens [1] a [3], polarize o amplificador operacional TL072 com uma alimentação simétrica, onde $V_{DD} = + 6,0 \text{ V}$ e $V_{SS} = - 6,0 \text{ V}$. No circuito integrado CD4007, o pino 14 (poço N) deve ser conectado à V_{DD} e o pino 7 (substrato P) deve ser conectado à terra através de um resistor de $1,0 \text{ k}\Omega$, conforme mostrado na Fig. 7.

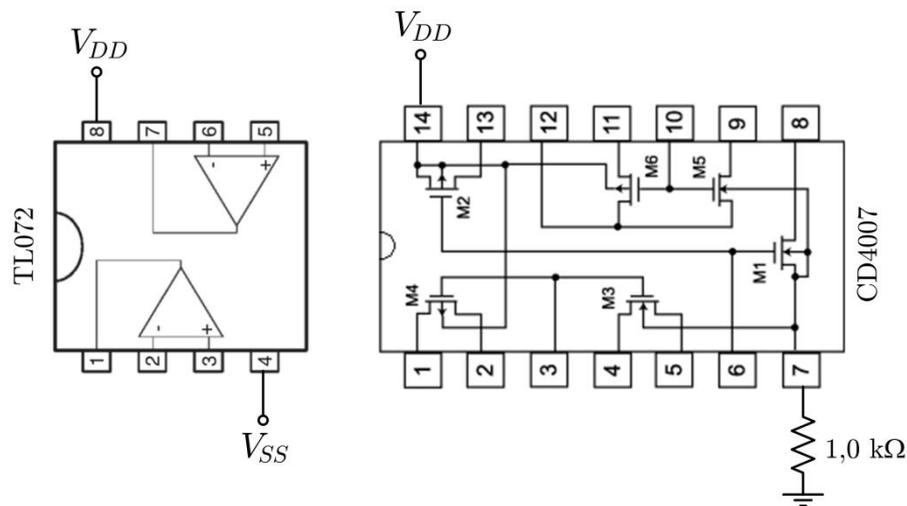


Figura 7

Utilizando os circuitos integrados acima, monte o circuito traçador da curva característica $I_D \times V_{DS}$, apresentado na Fig. 8, e aplique um sinal de entrada v_{in} do tipo dente de serra, com amplitude de $6,0 \text{ V}_{PP}$ (pico a pico), *offset* de $3,0 \text{ V}$ e frequência de 100 Hz .

Meça a tensão na entrada com o canal 1 (CH1) do osciloscópio e a saída com o canal 2 (CH2) invertido. Para visualizar a curva característica $I_D \times V_{DS}$ do MOSFET, use o modo de visualização XY do osciloscópio e registre a imagem que aparece na tela.

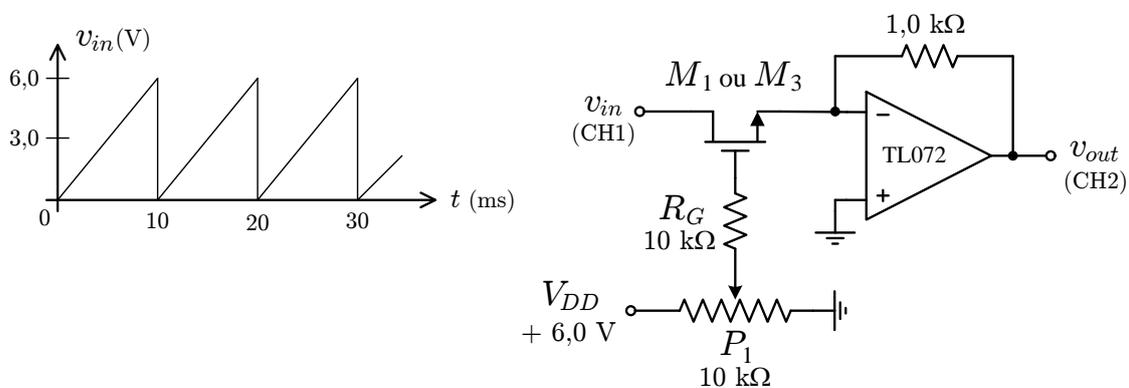


Figura 8

No circuito da Fig. 8, varie a tensão V_{GS} do MOSFET, através do potenciômetro P_1 , e observe o que acontece com a curva característica $I_D \times V_{DS}$ na tela do osciloscópio.

Comentários

[2] Monte agora o circuito traçador da curva característica $I_D \times V_{GS}$, apresentado na Fig. 9, e aplique um sinal de entrada v_{in} do tipo dente de serra, com amplitude de 6,0 V_{PP} (pico a pico), *offset* de 3,0 V e frequência de 100 Hz.

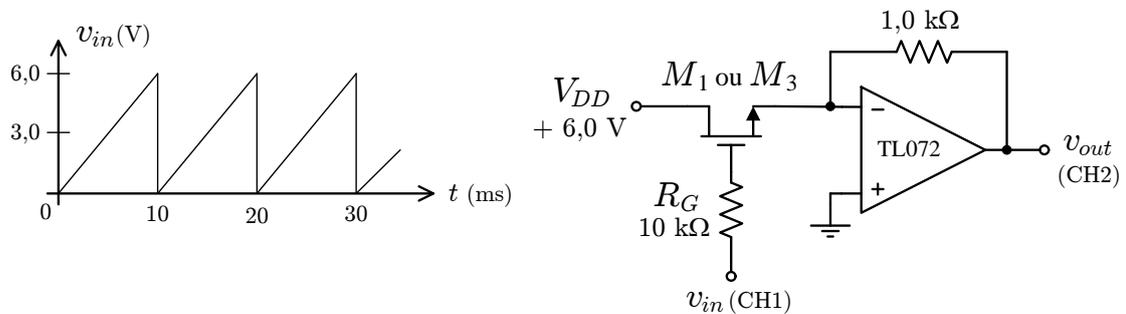


Figura 9

Meça a tensão na entrada com o canal 1 (CH1) do osciloscópio e a saída com o canal 2 (CH2). Para visualizar a curva característica $I_D \times V_{GS}$ do MOSFET, use o modo de visualização XY do osciloscópio e registre a imagem que aparece na tela. Caso a saída do amplificador operacional sature, diminua a amplitude e o *offset* da onda dente de serra.

Comentários

[3] Para caracterizar o MOSFET, monte o circuito da Fig. 10. Ajuste o potenciômetro P_1 para variar a tensão V_{GS} aplicada ao transistor e meça a tensão na saída do amplificador operacional para obter indiretamente a corrente I_D que circula pelo dispositivo. Assim, com esse aparato experimental, preencha a tabela a seguir com os valores de tensão V_{GS} necessários para obter cada um dos valores de corrente I_D listados.

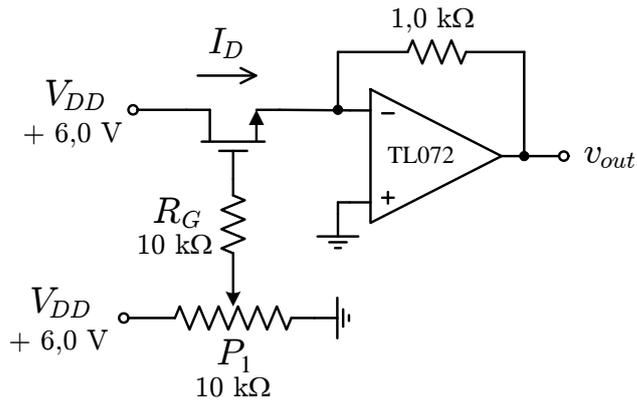


Tabela $I_D \times V_{GS}$

I_D (mA)	V_{GS} (V)
1,0	
2,0	

Figura 10

A partir dos resultados registrados na Tabela $I_D \times V_{GS}$, calcule o valor do parâmetro de transcondutância k_N e da tensão de limiar V_{th} para que a corrente de dreno I_D do MOSFET de canal N do CD4007 seja descrita pela lei quadrática no modo de saturação:

$$I_D = \frac{1}{2} k_N \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{th})^2.$$

Considere nos seus cálculos que o MOSFET de canal N do CD4007 foi construído com uma largura $W = 200 \mu\text{m}$ e um comprimento $L = 10 \mu\text{m}$.

$V_{th} =$

$k_N =$

Espaço para Realizar o Cálculo dos Parâmetros do MOSFET

[4] Monte o circuito da Fig. 6, projetado no item 2.2 do preparatório. Nessa montagem, você deve remover o resistor de 1,0 kΩ usado na Fig. 7 para proteger o substrato do CD4007 e deve alimentar o circuito com $V_{DD} = 12\text{ V}$.

IMPORTANTE: Caso você esteja usando o transistor M3 do CD4007 nesta aula prática, você deve conectar o corpo deste transistor (pino 7) ao terminal de fonte (pino 5 ou 4) para evitar a ocorrência do Efeito de Corpo. No transistor M1, essa conexão já é feita internamente no circuito integrado.

Neste circuito de polarização, meça V_{GS} , V_D , V_S e I_D e compare com os valores previstos teoricamente e com os obtidos por simulação e comente.

Medições	Valor Teórico	Valor Simulado	Valor Experimental
V_{GS} (V)			
V_D (V)			
V_S (V)			
I_D (mA)			

Comentários sobre os Resultados Obtidos

4ª AULA PRÁTICA

O MOSFET COMO AMPLIFICADOR

[1] Objetivo

- Caracterizar o MOSFET para a operação de pequenos sinais.
- Comparar as características de pequenos sinais das três configurações básicas.
- Projetar um amplificador de tensão em fonte comum.

[2] Trabalho Preparatório

[2.1] Fundamentos Teóricos

A partir de um esboço das curvas características de entrada e saída ($i_D \times v_{DS}$ @ v_{GS} e $i_D \times v_{GS}$), mostre a operação do MOSFET como amplificador de tensão (isto é, mostre as variações dos sinais sobre os gráficos). Em seguida, descreva o modelo matemático do transistor para pequenos sinais (através de g_m e r_o), apresentando um circuito equivalente linearizado e as expressões para o cálculo dos parâmetros.

[2.2] Projeto

Para o circuito da Fig. 11, calcule os resistores R_D , R_F , R_1 e R_2 para que o amplificador na configuração fonte comum (isto é, Y em terra, entrada em X e saída em Z) satisfaça às seguintes especificações: $I_D = 1,0$ mA, $V_S = 2,0$ V, $|A_v| \approx 5,0$ V/V e impedância de entrada de 100 k Ω . Para a realização deste projeto, utilize os parâmetros do transistor de canal N do CD4007 medidos na aula anterior e considere uma tensão de alimentação $V_{DD} = 12$ V. Encontre os valores de resistores comerciais (ou associações em série/paralelo dos mesmos) que aproximam os valores calculados.

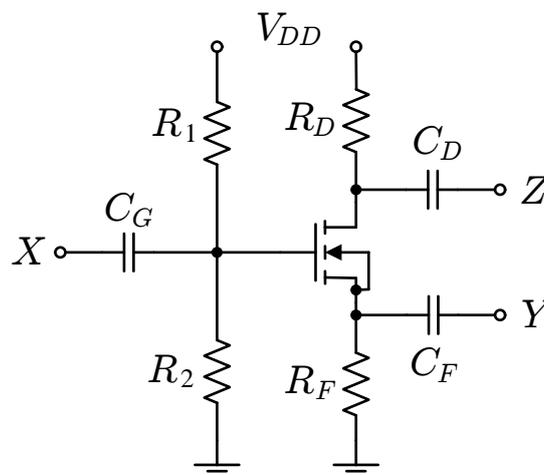


Figura 11

Calcule os capacitores de acoplamento usando as seguintes relações: $C_G R_1/R_2 = 300$ ms, $C_S (R_F/(1/g_m)) = 30$ ms e $C_D R_D = 300$ ms. Atribua aos capacitores valores comerciais que sejam sempre imediatamente superiores aos valores calculados.

[2.3] Análise

Considerando o circuito projetado no item 2.2, calcule os valores teóricos para o ganho de tensão, a impedância de entrada e a impedância de saída de cada configuração (nos cálculos teóricos, considere valores dos parâmetros k_N e V_{th} do transistor medidos na aula prática anterior):

- Fonte comum (Y em terra, entrada em X e saída em Z);
- Porta comum (X em terra, entrada em Y e saída em Z);
- Dreno comum (Z em terra, entrada em X e saída em Y).

Obtenha também os limites de excursão de sinal na saída das três configurações básicas de amplificador.

[2.4] Simulações

Nessas simulações, deve ser usado o arquivo de biblioteca *CD4007.lib* com os parâmetros do modelo do MOSFET corrigidos para refletir os parâmetros medidos na aula anterior, durante a caracterização do circuito integrado CD4007.

- Aterrando todos os terminais X, Y e Z, obtenha a polarização do circuito medindo V_{GS} , V_D , V_S e I_D do transistor em uma análise DC do tipo *Bias Point*.
- Para cada uma das três configurações básicas (fonte comum, porta comum e dreno comum) realize as seguintes simulações:
 - Aplique uma fonte de tensão senoidal com amplitude de 200 mV e frequência de 100 Hz na entrada, conecte um resistor de 1,0 M Ω ao terminal de saída (para simular a impedância de entrada do osciloscópio) e apresente, em um mesmo gráfico, as formas de onda da tensão na entrada e na saída do amplificador. Medindo a amplitude de ambas as formas de onda obtidas, calcule o ganho de tensão.
 - Aumente a amplitude do sinal aplicado à entrada do amplificador até que o transistor deixe de operar na região de saturação em ambos os extremos da forma de onda da tensão na saída. Meça os limites máximo e mínimo para a excursão de sinal na saída.
 - Ajustando novamente a amplitude do sinal de entrada em 200 mV, adicione um resistor de teste em série com a fonte de tensão na entrada do amplificador. Apresente um gráfico com a forma de onda da tensão na saída quando o resistor de teste assume o valor calculado teoricamente para a impedância de entrada no item 2.3. Calcule a impedância de entrada do amplificador simulado de acordo com o procedimento apresentado no Apêndice A.
 - Conectando agora o resistor de teste ao terminal de saída (substituindo o resistor de 1,0 M Ω empregado nos itens anteriores), apresente um gráfico com a forma de onda da tensão na saída quando o resistor de teste assume o valor calculado teoricamente para a impedância de saída do amplificador no item 2.3. Calcule a impedância de saída do amplificador simulado de acordo com o procedimento apresentado no Apêndice A.

Experiência 04 – O MOSFET como Amplificador	
Nome: _____	Nota
Nome: _____	
Nome: _____	

[1] Polarização:

Monte o circuito da Fig. 11 com os componentes calculados no item 2.2 do preparatório. No circuito integrado CD4007, o pino 14 (poço N) deve ser conectado à V_{DD} e o pino 7 (substrato P) deve ser conectado ao terminal de fonte do MOSFET utilizado nesta experiência, conforme mostrado na Fig. 12 (se o transistor utilizado nesta aula prática for o M1, essa conexão do pino 7 é desnecessária).

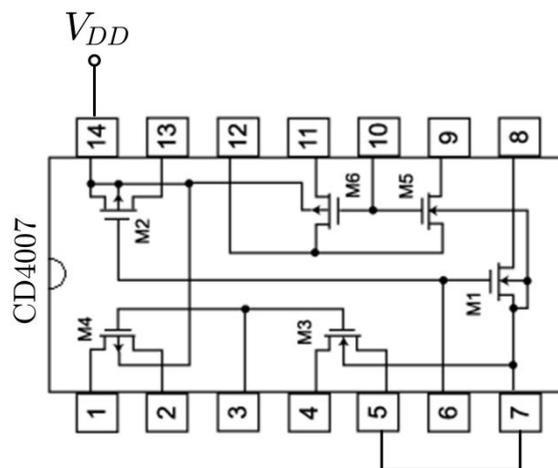


Figura 12

Alimentando o circuito amplificador com $V_{DD} = 12\text{ V}$, meça a polarização do transistor e compare com os valores teóricos e simulados e comente.

Medições	Valor Teórico	Valor Simulado	Valor Experimental
V_{GS} (V)			
V_D (V)			
V_S (V)			
I_D (mA)			

Comentários sobre os Resultados Obtidos

[2] Configuração Fonte Comum

[2.1] Conecte o amplificador na configuração fonte comum e aplique um sinal de tensão senoidal com frequência de 100 Hz e amplitude de 400 mV pico a pico à entrada do circuito e meça o ganho do amplificador em operação linear. Compare o valor medido com os valores teórico e simulado e comente os resultados.

Ganho de Tensão (V/V)		
Valor Teórico	Valor Simulado	Valor Experimental

Comentários sobre os Resultados Obtidos

[2.2] Varie a amplitude do sinal de entrada até atingir os limites da excursão de sinal na saída do amplificador. Meça a máxima excursão e compare com o valor previsto teoricamente e com o valor obtido na simulação. Comente os resultados obtidos.

Limite de Excursão de Sinal na Saída (V_{pp})		
Valor Teórico	Valor Simulado	Valor Experimental

Comentários sobre os Resultados Obtidos

[2.3] Ajuste a amplitude do sinal de entrada de forma que o amplificador volte à operação linear. Meça as impedâncias de entrada e de saída e complete a tabela abaixo. Compare com os valores previstos teoricamente e os obtidos por meio de simulação e comente.

Medidas	Valor Teórico	Valor Simulado	Valor Experimental
Impedância de Entrada (Ω)			
Impedância de Saída (Ω)			

Comentários sobre os Resultados Obtidos

[3] Configuração Porta Comum

Conecte o amplificador na configuração porta comum e, usando um sinal senoidal com frequência de 100 Hz, meça o ganho de tensão, a impedância de entrada, impedância de saída e os limites de excursão de sinal na saída. Preencha a tabela abaixo com os valores medidos e compare com os valores previstos teoricamente e com os obtidos através de simulação. Comente os resultados.

Medidas	Valor Teórico	Valor Simulado	Valor Experimental
Ganho de Tensão (V/V)			
Impedância de Entrada (Ω)			
Impedância de Saída (Ω)			
Limite de Excursão na Saída (V_{PP})			

Comentários sobre os Resultados Obtidos

[4] Configuração Dreno Comum

Conecte o amplificador na configuração dreno comum e, usando um sinal senoidal com frequência de 100 Hz, meça o ganho de tensão, a impedância de entrada, impedância de saída e os limites de excursão de sinal na saída. Preencha a tabela abaixo com os valores medidos e compare com os valores previstos teoricamente e com os obtidos através de simulação. Comente os resultados.

Medidas	Valor Teórico	Valor Simulado	Valor Experimental
Ganho de Tensão (V/V)			
Impedância de Entrada (Ω)			
Impedância de Saída (Ω)			
Limite de Excursão na Saída (V_{PP})			

Comentários sobre os Resultados Obtidos

5ª AULA PRÁTICA

AMPLIFICADOR DE DOIS ESTÁGIOS COM BOOTSTRAP

[1] Objetivo

- Realizar o projeto de um amplificador de dois estágios incluindo um *bootstrap* no primeiro estágio.
- Verificar a vantagem do *bootstrap*.

[2] Trabalho Preparatório

[2.1] Análise Preliminar

Para o amplificador da Fig. 13, encontre as expressões analíticas listadas a seguir, realizando as aproximações sugeridas em cada caso.

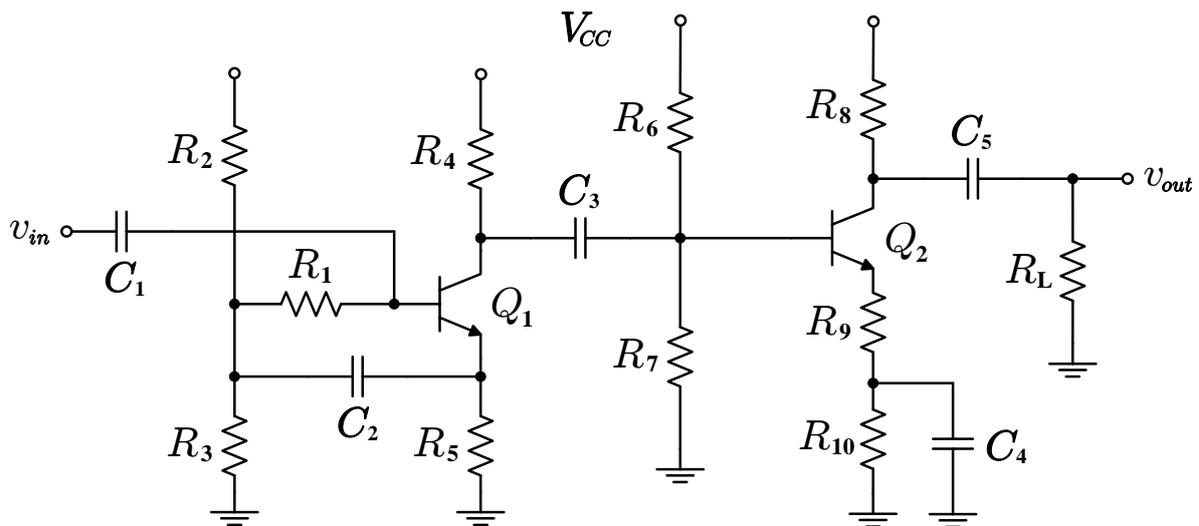


Figura 13

- A corrente de polarização I_{C1} , considerando $\beta_1 \gg 1$ e $(R_1 + R_2//R_3) \ll \beta_1 R_5$;
- A corrente de polarização I_{C2} , considerando $\beta_2 \gg 1$ e $R_6//R_7 \ll \beta_2 (R_9 + R_{10})$;
- O ganho de tensão do segundo estágio A_{V2} , considerando $\beta_2 \gg 1$ e $r_{\pi 2} \ll \beta_2 R_9$;
- A impedância de entrada Z_{IN2} do segundo estágio;
- O ganho de tensão do primeiro estágio A_{V1} , considerando $\beta_1 \gg 1$, $R_1 \gg R_2//R_3//R_5$ e $r_{\pi 1} \ll \beta_1 (R_2//R_3//R_5)$;
- A impedância de entrada Z_{IN} do amplificador (e do primeiro estágio), considerando $\beta_1 \gg 1$, $R_1 \gg R_2//R_3//R_5$, $r_{\pi 1} \ll \beta_1 (R_2//R_3//R_5)$ e $R_1 \gg r_{\pi 1}$;
- Os limites máximo e mínimo para a excursão de sinal na saída do amplificador;
- O ganho de tensão e a impedância de entrada do primeiro estágio quando o capacitor de acoplamento C_2 é removido do circuito (ou seja, sem o *bootstrap*).

[2.2] Projeto

No circuito da Fig. 13, considere $V_{CC} = 10\text{ V}$, $Q_1 = Q_2 = \text{BC546/8/9}$ e $R_L = 10\text{ k}\Omega$. Dessa forma, dimensione todos os resistores do circuito (empregando valores comerciais e/ou associações dos mesmos) de forma a satisfazer às seguintes especificações:

- Corrente de polarização $I_{C1} = 2,0\text{ mA}$, independentemente de β .
- Tensão de polarização $V_{E1} = 2,0\text{ V}$ no emissor de Q_1 .
- Módulo do ganho do primeiro estágio $|A_{V1}| \approx 2,5\text{ V/V}$.
- Impedância de entrada $Z_{IN} \geq 50\text{ k}\Omega$.
- Corrente de polarização $I_{C2} = 1,0\text{ mA}$, independentemente de β .
- Módulo do ganho do segundo estágio $|A_{V2}| \approx 10\text{ V/V}$.
- Máxima amplitude do sinal na saída simétrica e igual a $5,0\text{ V}$ pico a pico.

Uma vez que todos os resistores estejam calculados, obtenha os valores dos capacitores de acoplamento de acordo com as seguintes expressões:

- $Z_{IN} C_1 = 300\text{ ms}$;
- $[R_1//R_2//R_3 + R_5//(r_{\pi 1}/(\beta_1+1))]$ $C_2 = 10\text{ ms}$;
- $[R_4 + R_6//R_7/(r_{\pi 2} + (\beta_2+1)R_9)]$ $C_3 = 30\text{ ms}$;
- $[R_{10}/(R_9 + (r_{\pi 2} + R_4//R_6//R_7)/(\beta_2+1))]$ $C_4 = 3\text{ ms}$;
- $(R_8 + R_L)$ $C_5 = 100\text{ ms}$.

Sugestão: Para o projeto, use as expressões simplificadas obtidas no item 2.1 e inicie os cálculos dimensionando os componentes do segundo estágio, para posteriormente dimensionar os componentes do primeiro estágio.

[2.3] Análise do Circuito Projetado

A partir dos valores comerciais dos resistores projetados no item 2.2, calcule os valores numéricos de todos os ganhos, impedâncias de entrada e limites de excursão de sinal usando as expressões obtidas no item 2.1.

[2.4] Simulações

Simule o circuito projetado e obtenha os seguintes resultados:

- Sem aplicar nenhum sinal de entrada ($v_{in} = 0$), realize uma simulação do tipo *Bias Point* para obter o ponto de polarização dos transistores.
- Aplique um sinal com frequência de $1,0\text{ kHz}$ e amplitude de 50 mV à entrada do amplificador e apresente, em um mesmo gráfico, as formas de onda do sinal de entrada e da tensão na saída do primeiro estágio. A partir desse gráfico, meça as amplitudes dos sinais e obtenha o valor do ganho do primeiro estágio.
- Apresente em um mesmo gráfico as formas de onda da tensão na entrada do segundo estágio e da tensão na saída do amplificador. A partir da medição da amplitude de ambas as formas de onda, obtenha o ganho do segundo estágio.
- Conecte um resistor de teste em série com a fonte de tensão de entrada com um valor igual ao estimado para a impedância de entrada do amplificador. Apre-

sente o gráfico com a forma de onda da tensão na saída para esse caso. Medindo a amplitude dessa forma de onda e considerando a amplitude da tensão na saída medida sem o resistor de teste no item anterior, obtenha o valor da impedância de entrada de acordo com o método descrito no Apêndice A.

- Eleve a amplitude do sinal de entrada até que a tensão na saída atinja os limites mínimo e máximo de excursão de sinal. Apresente o gráfico com a forma de onda da tensão na saída e meça os limites de excursão.
- Usando os mesmos procedimentos descritos acima, apresente os respectivos gráficos e meça o ganho de tensão e a impedância de entrada do primeiro estágio quando o capacitor de acoplamento C_2 é removido do circuito.

Experiência 05 – Amplificador com dois Estágios	
Nome: _____	Nota
Nome: _____	
Nome: _____	

[1] Monte o circuito amplificador da Fig. 13 e meça a polarização de cada um dos transistores Q_1 e Q_2 do amplificador projetado no item 2.2. Compare os valores medidos com os previstos teoricamente e com os obtidos nas simulações. Comente os resultados.

Transistor Q_1			
Medições	Valor Teórico	Valor Simulado	Valor Experimental
V_{BE} (V)			
V_{CE} (V)			
I_C (mA)			

Transistor Q_2			
Medições	Valor Teórico	Valor Simulado	Valor Experimental
V_{BE} (V)			
V_{CE} (V)			
I_C (mA)			

Comentários sobre os Resultados Obtidos

[2] Aplique na entrada do amplificador um senoidal com frequência de 1,0 kHz e amplitude grande o suficiente para atingir os limites de excursão de sinal na saída. Compare com os resultados previstos teoricamente e com aqueles obtidos por simulação.

Limite de Excursão de Sinal na Saída (V_{pp})		
Valor Teórico	Valor Simulado	Valor Experimental

Comentários sobre os Resultados Obtidos

[3] Ajustando a amplitude do sinal de entrada em 100 mV pico a pico, meça os ganhos de tensão A_{V1} e A_{V2} . Compare com os valores previstos teoricamente e com os obtidos por simulação. Comente os resultados.

Medidas	Valor Teórico	Valor Simulado	Valor Experimental
A_{V1} (V/V)			
A_{V2} (V/V)			

Comentários sobre os Resultados Obtidos

[4] Meça a impedância de entrada do amplificador e compare com os valores previstos teoricamente e com aqueles obtidos por simulação. Comente os resultados.

Medidas	Valor Teórico	Valor Simulado	Valor Experimental
Impedância de Entrada (Ω)			

Comentários sobre os Resultados Obtidos

[5] Retire o capacitor C_2 do circuito e meça novamente o ganho A_{V1} e a impedância de entrada do amplificador. Compare com os resultados previstos teoricamente e com os obtidos por simulação. Comente os resultados.

Medidas	Valor Teórico	Valor Simulado	Valor Experimental
Ganho A_{V1} (V/V)			
Impedância de Entrada (Ω)			

Comentários sobre os Resultados Obtidos

6ª AULA PRÁTICA

AMPLIFICADOR DE TENSÃO COM ENTRADA DIFERENCIAL

[1] Objetivo

- Analisar o funcionamento de um amplificador de tensão com dois estágios e entrada diferencial.
- Ajustar a tensão de *offset* na saída de um amplificador diferencial.

[2] Trabalho Preparatório

[2.1] Análise

No amplificador diferencial da Fig. 14, considere que os transistores Q_1 e Q_2 são perfeitamente idênticos (os transistores utilizados são BC546, ou similares, para Q_1 e Q_2 , e BC556, ou similar, para Q_3). Assim, calcule:

- As correntes de polarização nos coletores de Q_1 , Q_2 e Q_3 . Utilize os parâmetros médios dos dispositivos, especificados pelo fabricante.
- O ganho de tensão diferencial $A_{Vd} = v_o / (v_+ - v_-)$.
- A impedância diferencial de entrada Z_{id} .
- O ganho de modo comum $A_{VCM} = v_o / v_{cm}$.
- Os limites máximo e mínimo da excursão de sinal na saída.

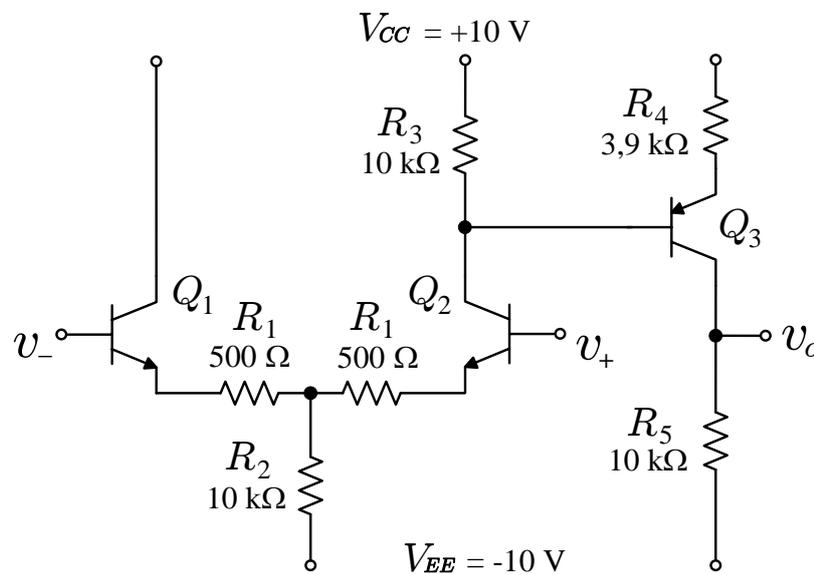


Figura 14

[2.2] Simulações

- Aterrando os terminais de entrada, obtenha a polarização do circuito medindo V_{BE} , V_{CE} e I_C de cada transistor em uma análise DC do tipo *Bias Point*.

- Para medir o ganho de tensão diferencial será necessário aplicar apenas a parcela diferencial de sinais à entrada do amplificador, de forma que o ganho de modo comum não influencie a medida. Para isso, deve ser utilizado o circuito apresentado na Fig. 15, onde as fontes de tensão controladas são as responsáveis por replicar a tensão da fonte de sinal de forma balanceada em ambas as entradas v_+ e v_- do amplificador. Ajuste a amplitude do sinal diferencial de entrada em 100 mV e a frequência em 1,0 kHz e simule o amplificador. Apresente, no mesmo gráfico, a forma de onda da tensão diferencial de entrada e a da tensão na saída e meça o ganho de tensão diferencial.

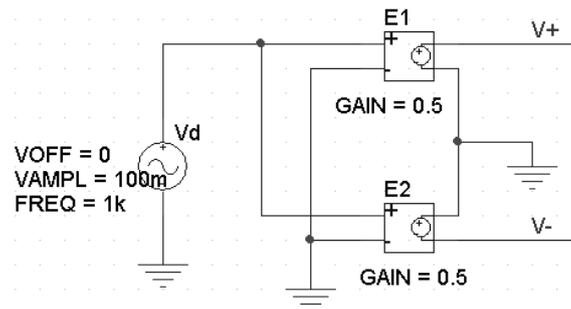


Figura 15

- Aumente a amplitude do sinal diferencial aplicado à entrada do amplificador até atingir os limites máximo e mínimo para a excursão de sinal na saída. Apresente o gráfico com a forma de onda da tensão na saída distorcida e meça os limites máximo e mínimo de excursão.
- Usando novamente um sinal de entrada com amplitude de 100 mV, conecte um resistor de teste em série com a entrada positiva e outro igual em série com a entrada negativa. Os valores de ambos os resistores devem ser iguais à metade do valor estimado teoricamente para a impedância diferencial de entrada. Esse esquema tem como objetivo medir a impedância de entrada sem desbalancear a entrada diferencial. Simule o circuito usando uma análise no tempo e apresente o gráfico da forma de onda da tensão na saída do amplificador. A partir da medida da amplitude da tensão na saída do amplificador com os resistores de teste e da medida da amplitude da mesma forma de onda sem resistores de teste (realizada no primeiro item de simulações), obtenha o valor medido para a impedância diferencial de entrada do amplificador, usando o procedimento descrito no Apêndice A.
- Para medir o ganho de modo comum, descarte o esquema da Fig. 15 e aplique o sinal de entrada simultaneamente às duas entradas do amplificador. Simule o circuito e apresente, em um mesmo gráfico, as forma de onda da tensão de entrada e a de saída. Medindo a amplitude de ambas, obtenha o ganho de tensão de modo comum do amplificador.

Experiência 06 – Amplificador de Tensão com Entrada Diferencial	
Nome: _____	Nota
Nome: _____	
Nome: _____	

[1] Monte o circuito da Fig. 16 e conecte ambas as entradas do amplificador à terra. Ajuste o potenciômetro P_1 até que a tensão de polarização CC na saída do amplificador (*offset*) seja nula. Explique o motivo do aparecimento de uma tensão de *offset* na saída do amplificador e por que o uso do potenciômetro P_1 foi capaz de zerá-la.

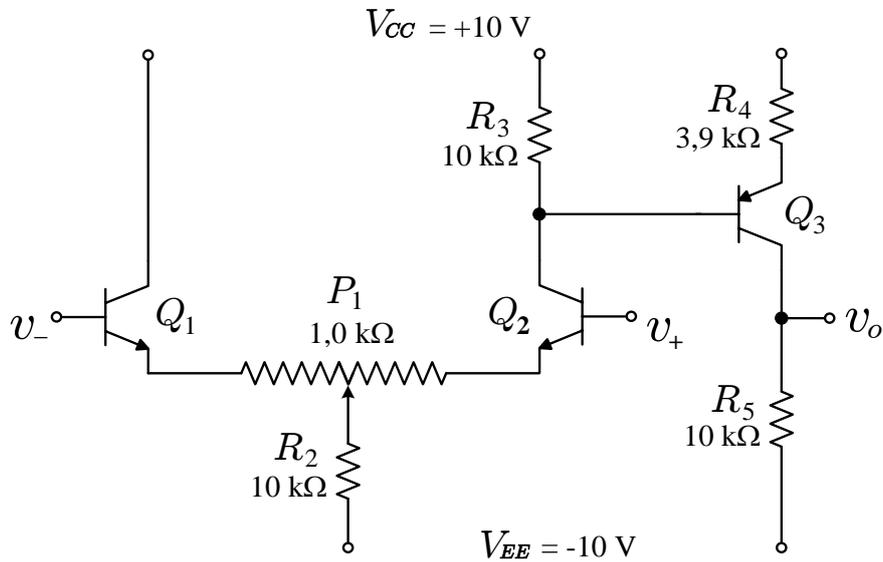


Figura 16

Resposta

[2] Meça a polarização do amplificador da Fig. 16 e preencha as tabelas abaixo com V_{BE} , V_{CE} e I_C para cada um dos transistores do amplificador. Compare os valores medidos com os valores previstos teoricamente e com os obtidos através de simulação. Comente os resultados e explique as diferenças verificadas nas tensões V_{BE} do par diferencial.

Transistor NPN da Entrada Positiva			
Medições	Valor Teórico	Valor Simulado	Valor Experimental
V_{BE} (V)			
V_{CE} (V)			
I_C (mA)			

Transistor NPN da Entrada Negativa			
Medições	Valor Teórico	Valor Simulado	Valor Experimental
V_{BE} (V)			
V_{CE} (V)			
I_C (mA)			

Transistor PNP da Saída			
Medições	Valor Teórico	Valor Simulado	Valor Experimental
V_{BE} (V)			
V_{CE} (V)			
I_C (mA)			

Comentários sobre os Resultados Obtidos			

[3] Usando o circuito da Fig. 17 (necessário para balancear os sinais aplicados à entrada), aplique um sinal diferencial senoidal com frequência de 1,0 kHz na entrada do amplificador e ajuste a amplitude deste sinal até que a tensão na saída atinja os limites de excursão de sinal. Preencha a tabela abaixo com os limites medidos e compare com os limites previstos teoricamente e os medidos na simulação. Comente os resultados obtidos.

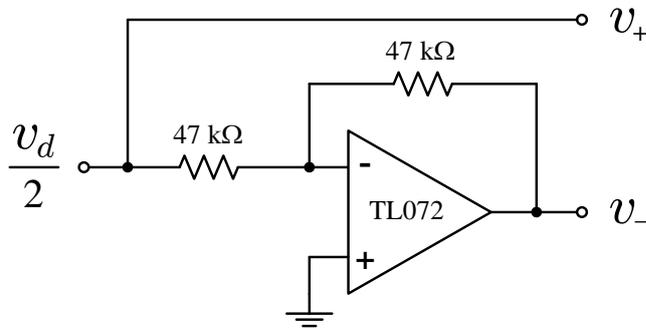


Figura 17

OBSERVAÇÃO: Alimente o circuito integrado do amplificador operacional com as mesmas tensões V_{CC} e V_{EE} empregadas na polarização do circuito da Fig. 16.

Máxima Excursão de Sinal na Saída (V_{pp})		
Valor Teórico	Valor Simulado	Valor Experimental

Comentários sobre os Resultados Obtidos

[4] Usando o circuito da Fig. 17 para produzir uma entrada balanceada e mantendo a amplitude do sinal de entrada em 100 mV pico a pico, meça o ganho de tensão e a impedância de entrada diferencial. Compare com os valores previstos teoricamente e com os obtidos através das simulações. Comente os resultados.

Medidas	Valor Teórico	Valor Simulado	Valor Experimental
Ganho de Tensão (V/V)			
Impedância de Entrada (Ω)			

Comentários sobre os Resultados Obtidos

[5] Aplicando o sinal de entrada simultaneamente às duas entradas do amplificador da Fig. 16 e mantendo a amplitude do sinal de entrada em 100 mV pico a pico, meça o ganho de tensão de modo comum do amplificador e compare com os valores previstos teoricamente e com os obtidos através das simulações. Comente os resultados.

Medidas	Valor Teórico	Valor Simulado	Valor Experimental
Ganho de Tensão (V/V)			

Comentários sobre os Resultados Obtidos

APÊNDICE A

MEDINDO IMPEDÂNCIAS DE ENTRADA E DE SAÍDA

Um amplificador qualquer pode ser caracterizado pelos seus principais parâmetros: o ganho de tensão e as impedâncias de entrada e de saída. Dessa forma, um amplificador pode ser genericamente representado como na Fig. A1, onde A_V é o ganho de tensão sem carga, Z_{IN} é a impedância de entrada e Z_O é a impedância de saída.

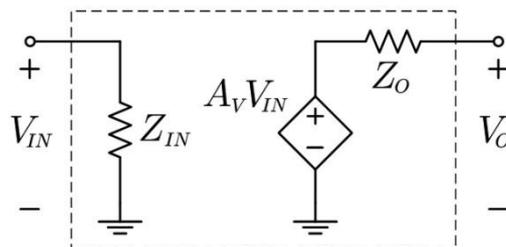


Figura A1

O processo de medição do ganho de tensão A_V é bastante intuitivo: aplicando um sinal de tensão à entrada do amplificador, sem conectar nenhuma carga na saída (para que a tensão v_o seja exatamente igual a $A_V v_{in}$), mede-se, com o auxílio de um osciloscópio, a amplitude da tensão v_{in} na entrada e a amplitude da tensão v_o na saída. O ganho A_V é, então, obtido efetuando-se a razão entre os dois valores de amplitude medidos: $A_V = v_o/v_{in}$.

Por outro lado, a medição das impedâncias de entrada e de saída não é tão direta assim. Primeiramente, as impedâncias que desejamos medir se devem ao comportamento de pequenos sinais do amplificador. Dessa forma, não é possível usar um simples ohmímetro para realizar a medida, já que este instrumento aplica uma tensão CC ao dispositivo testado e os capacitores de acoplamento do amplificador irão operar como circuitos abertos. Ao invés disso, é necessário manter o amplificador polarizado em seu ponto de operação e verificar como este se comporta quando um sinal *lhe* é aplicado. Intuitivamente, alguém poderia pensar em simplesmente medir a amplitude da forma de onda da tensão no terminal de entrada e dividir pela amplitude da forma de onda da corrente entrando nesse mesmo terminal. No entanto, o osciloscópio realiza exclusivamente medições de tensão, inviabilizando essa abordagem.

Portanto, o objetivo deste apêndice é descrever a metodologia mais comumente empregada na medição das impedâncias de entrada e de saída de um amplificador.

A.1 – MEDINDO A IMPEDÂNCIA DE ENTRADA

Para medir a impedância de entrada, montamos circuito apresentado na Fig. A2, onde um resistor de teste é conectado em série com a entrada e a amplitude da fonte de sinal é ajustada de forma que o amplificador opere em sua região linear.

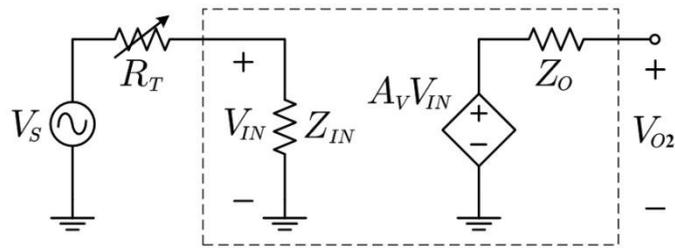


Figura A2

Primeiramente, mede-se a amplitude da forma de onda da tensão na saída quando R_T é igual à zero. Esse valor de amplitude será designado por V_{O1} , o qual será dado por:

$$V_{O1} = A_V \cdot V_{IN} = A_V \cdot V_S, \quad (1)$$

onde V_S é a amplitude do sinal na fonte de sinal. Com um resistor de teste não nulo, a amplitude da tensão na saída passa a ser dada por:

$$V_{O2} = A_V \cdot V_{IN} = A_V \frac{Z_{IN}}{R_T + Z_{IN}} V_S = \frac{Z_{IN}}{R_T + Z_{IN}} V_{O1}. \quad (2)$$

O processo de medição da impedância de entrada Z_{IN} consiste simplesmente em ajustar o resistor de teste R_T até que a amplitude da forma de onda da tensão na saída V_{O2} atinja a metade do valor medido com $R_T = 0$. Assim, de acordo com (2), quando $V_{O2} = 0,5 V_{O1}$, teremos que $R_T = Z_{IN}$. Consequentemente, uma vez que R_T tenha sido ajustado, o valor de Z_{IN} poderá ser obtido desconectando-se R_T do circuito e medindo-o com um simples ohmímetro.

Caso não haja nenhum resistor variável disponível para ser empregado como resistor de teste, a medição acima também pode ser realizada empregando-se um R_T fixo, cujo valor é conhecido e próximo ao valor da impedância a ser medida – que pode ser estimada teoricamente. Dessa forma, mede-se a amplitude das tensões V_{O1} e V_{O2} na saída, respectivamente sem ($R_T = 0$) e com o resistor de teste conectado ao circuito, e calcula-se Z_{IN} através de (2). Essa abordagem é particularmente útil quando se deseja aplicar o método descrito acima em uma simulação numérica.

A.2 – MEDINDO A IMPEDÂNCIA DE SAÍDA

O procedimento mais comumente adotado na medição da impedância de saída é bastante similar ao procedimento descrito na Seção A.1 para a medição da impedância de entrada. Entretanto, para medir a impedância de saída, o resistor de teste R_T deve ser conectado à saída do amplificador como se fosse a sua resistência de carga, conforme apresentado na Fig. A3.

Assim como no procedimento anterior, aplicamos uma fonte de sinal à entrada com a amplitude V_S ajustada de forma a garantir a operação linear do amplificador. Sem conectar o resistor de teste R_T – isto é, com a saída em aberto – medimos a amplitude da tensão na saída

do amplificador e a designamos por V_{O1} . Da mesma forma que na seção anterior, essa amplitude será dada por (1).

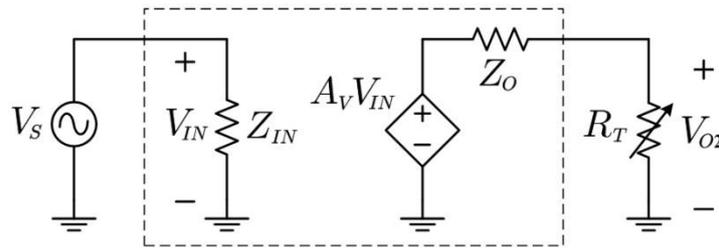


Figura A3

Uma vez que V_{O1} tenha sido medida, conectamos o resistor de teste R_T conforme mostrado na Fig. A3. Assim, a nova amplitude da forma de onda de tensão na saída será dada por:

$$V_{O2} = A_v \frac{R_T}{Z_O + R_T} V_{IN} = A_v \frac{R_T}{Z_O + R_T} V_S = \frac{R_T}{Z_O + R_T} V_{O1}, \quad (3)$$

onde Z_O é a impedância de saída do amplificador.

Analogamente, o método de medição da impedância de saída consiste em variar o resistor de teste R_T até que a amplitude da forma de onda da tensão na saída V_{O2} atinja metade do valor V_{O1} medido inicialmente. De acordo com (3), quando $V_{O2} = 0,5 V_{O1}$, teremos que $R_T = Z_O$. Dessa forma, uma vez ajustado o valor do resistor de teste, o valor da impedância de saída será diretamente obtido medindo-se R_T .

Assim como no caso da impedância de entrada, a impedância de saída também pode ser medida empregando-se um resistor de teste fixo, cujo valor é conhecido. Escolhendo-se um valor de R_T próximo daquele estimado teoricamente para a impedância de saída, medem-se as amplitudes V_{O1} e V_{O2} , respectivamente sem ($R_T \rightarrow \infty$) e com o resistor de teste. Então, usando (3), calcula-se o valor experimental de Z_O .

A.3 – MEDINDO A IMPEDÂNCIA DE ENTRADA DIFERENCIAL

Na Seção A.1, foi mostrado com realizar a medição da impedância de entrada de um amplificador com entrada simples. No entanto, frequentemente é necessário medir a impedância de entrada de amplificadores diferenciais. Nesse tipo de amplificador, existem dois tipos de impedância de entrada: a impedância de entrada diferencial, que afeta apenas a parcela diferencial dos sinais de entrada, e a impedância de entrada de modo comum.

Para medir a impedância de entrada de modo comum, devemos conectar ambas as entradas do amplificador em um único nó e tratar o circuito como sendo um amplificador com entrada simples. Dessa forma, o procedimento de medição será exatamente o mesmo descrito na Seção A.1.

No entanto, para medir a impedância de entrada diferencial, devemos garantir que as entradas do circuito estejam balanceadas, mesmo com a inclusão de resistores de teste. Essa

condição é necessária para evitar que a resistência de modo comum afete o valor medido para a impedância de entrada diferencial. Portanto, o circuito para a medição da impedância de entrada diferencial requer **dois resistores de teste iguais**, conforme mostrado na Fig. A4.

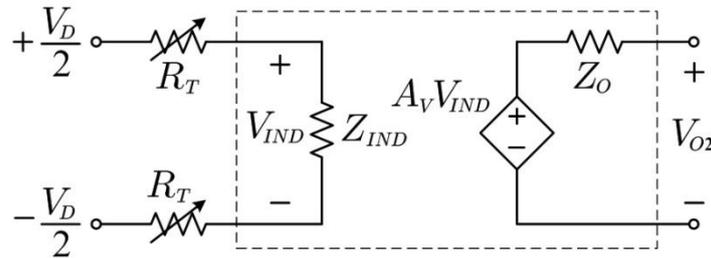


Figura A4

Inicialmente, aplica-se apenas a parcela diferencial do sinal à entrada do amplificador, sem os resistores de teste ($R_T = 0$) e ajusta-se a amplitude deste até garantir a operação linear do amplificador. Assim, mede-se a amplitude do sinal de tensão na saída V_{O1} , que é dada por:

$$V_{O1} = A_{VD} \cdot V_D \quad (4)$$

Ao se adicionar os resistores de teste, a amplitude da tensão na saída V_{O2} passará a ser dada por:

$$V_{O2} = A_{VD} \cdot V_{IND} = A_{VD} \frac{Z_{IND}}{2R_T + Z_{IND}} V_D = \frac{Z_{IND}}{2R_T + Z_{IND}} V_{O1} \quad (5)$$

Analogamente aos procedimentos descritos anteriormente, para encontrar o valor da impedância de entrada diferencial, devem-se variar ambos os resistores de teste, de modo que os dois permaneçam iguais, até que a amplitude da forma de onda da tensão na saída V_{O2} seja reduzida à metade do valor V_{O1} , medido sem os resistores de teste ($R_T = 0$). De acordo com (5), quando $V_{O2} = 0,5 V_{O1}$, teremos que $R_T = 0,5 Z_{IND}$. Dessa forma, uma vez que os resistores de teste tenham sido ajustados, o valor da impedância de entrada diferencial pode ser obtido medindo-se o valor de R_T .

Entretanto, na prática, é relativamente complicado variar igualmente dois resistores isoladamente. Portanto, nesse caso, é mais adequado realizar a medição acima empregando dois resistores R_T fixos, cujos valores são iguais e conhecidos. Novamente, o valor de resistência escolhido para R_T deve ser próximo da metade da impedância de entrada diferencial a ser medida – a qual pode ser estimada teoricamente. Dessa forma, mede-se a amplitude das tensões V_{O1} e V_{O2} na saída, respectivamente sem ($R_T = 0$) e com os resistores de teste conectados ao circuito, e calcula-se Z_{IND} através de (5).

APÊNDICE B

VALORES COMERCIAIS DE RESISTORES

– RESISTORES DE 5%

Valores de resistências obtidos multiplicando-se os números abaixo por potências de dez.
Exemplo: 18 → 180 Ω; 1,8 kΩ; 18 kΩ e outros.

10	16	27	43	68
11	18	30	47	75
12	20	33	51	82
13	22	36	56	91
15	24	39	62	

- RESISTORES DE 10%

10	18	33	56
12	22	39	68
15	27	47	82