

Diodos e Fontes de Tensão Contínua

Bianca Yoshie Itiroko - 164923, Luiz Eduardo Cartolano - 183012, Seong Eun Kim - 177143
EE534 - Turma Y - Grupo 2

Setembro de 2018

Resumo

Esse experimento tem como objetivo estudar o funcionamento do transistor *MOSFET*, por meio da análise de seu comportamento nas diferentes regiões (corte, saturação e triodo) e aplicá-lo na construção de um amplificador de áudio. Através dele, calculou-se V_{th} de 1,4V e verificou-se um ganho de tensão de aproximadamente 8.

1 Introdução

O transistor *MOSFET*, é o tipo mais comum de transistores de efeito de campo em circuitos digitais ou analógicos. Ele é composto de 4 terminais, Dreno, Fonte, Porta e Substrato. São normalmente compostos de um canal de material semicondutor de tipo N (NMOS) ou de tipo P (PMOS). Geralmente o semicondutor escolhido é o silício, mas alguns fabricantes, principalmente a IBM, começaram a usar uma mistura de silício e germânio (SiGe).

O *MOSFET* possui uma série de aplicações práticas que pode-se observar no nosso cotidiano, eles podem ser usados como *switches*, em circuitos amplificadores de banda larga, seguidores de fonte ou ainda em osciloscópios.

Neste experimento, será estudado, com mais detalhes, as características do *MOSFET*, e também, o seu uso no projeto de um circuito amplificador de áudio. Busca-se entender as relações entre o comportamento das tensões V_{GS} e V_{DS} , e como elas se comportam com relação a corrente I_D .

2 Procedimentos

Para a realização dos experimentos propostos, foram utilizados os seguintes componentes e ferramentas: Osciloscópio digital de dois canais, gerador de ondas/funções, fonte de tensão contínua, cabos com plugs banana e coaxial, multímetro digital, placa de contatos, transistores *BSS100*, um resistor de potência de $100\Omega(5W)$, capacitores de $680nF$ e resistores de 47Ω , 55Ω , 68Ω , 82Ω , $240k\Omega$, $270k\Omega$, $1M\Omega$ e $3,9M\Omega$.

A primeira parte consiste na familiarização dos alunos com o *MOSFET*, para isso montou-se o circuito que pode ser observado na Figura 1. Nesta etapa buscou-se encontrar a tensão "limiar" do transistor, V_{TH} . E depois, fixando um valor para V_{GS} , fez-se medições de V_{DS} , a fim de determinar a curva $V_{DS} \times I_D$. Também nessa etapa buscou-se encontrar características básicas do transistor. Um detalhe importante ao qual deve-se atentar nesse momento é a presença do resistor de potência, e também a tensão de V_{CC} (corrente contínua), já que em valores muito altos ela pode queimar o transistor.

Na segunda etapa do laboratório, buscou-se estudar uma das aplicações práticas do transistor. Para isso, projetou-se um amplificador de áudio, como o que pode ser observado na Figura 2. Para isso, dimensionou-se um resistor de carga, R_D de 82Ω , um resistor R_1 de $3,9M\Omega$ e um R_2 de $1M\Omega$ (valores teóricos). Além dos capacitores e do transistor abordados no primeiro parágrafo. Novamente, deve-se reiterar o cuidado com a tensão contínua V_{CC} e com o posicionamento dos canais do transistor no circuito, afinal, esses pequenos detalhes são fundamentais para garantir a integridade do circuito.

3 Discussão

Na primeira parte do experimento, montou-se o circuito da Figura 1 buscando determinar a tensão limiar do *MOSFET*. Para tal, aumentou-se a tensão de V_{GS} aos poucos afim de descobrir em que tensão a corrente começaria a ser conduzida. Obteve-se um valor entre 1,3V e 1,4V, sendo que a inexatidão dessa medição pode ser atribuída ao fato de que a fonte de tensão não tinha muitas casas decimais, de forma que o valor era arredondado.

A fim de obter dados para uma análise da entrada e da saída do *MOSFET* utilizou-se o gerador de funções (utilizando a função dente-de-serra) e o osciloscópio. Fixou-se uma tensão de alimentação em 12V, um offset de 3V e variou-se a tensão de V_{GS} . Assim, obteve-se o Gráfico 6, onde pode-se observar o comportamento do transistor à medida que o V_{GS} varia: quando temos tensões menores do que V_{TH} , não há condução de corrente e portanto podemos concluir que o mesmo estaria na região de corte (Figura 4). Logo após V_{TH} , é perceptível que a curva de saída tem comportamento próximo ao de uma parábola (Figura 3), esse comportamento, se dá, muito provavelmente, pela ocorrência de um "estrangulamento" no canal do dreno, reduzindo a corrente que passa por lá, e desse modo, a tensão de saída se modifica em relação a de entrada, e pode-se concluir que estamos na região de saturação. Por fim, quando V_{GS} ultrapassa algo em torno de 2,5V, o sinal de saída volta a ser constante em relação à entrada (Figura 5), e neste caso, ele encontra-se na região de triodo. Um gráfico com as três regiões indicadas pode ser encontrado na Figura 7.

Visando construir a relação corrente x tensão para o transistor, fixou-se valores constantes de V_{GS} , inicialmente 2V, depois 1V e por fim 4V. E, alterou-se, gradativamente, a tensão de alimentação V_{CC} , ao mesmo tempo que medíamos a tensão de V_{DS} , construindo as tabelas observadas (Tabelas 1, 2 e 3).

A partir dos dados obtidos nas Tabelas 1, 2 e 3, foi possível montar o gráfico para o *MOSFET* nas regiões de corte ($V_{GS} = 1V$, Figura 8), saturação ($V_{GS} = 2V$, Figura 9) e triodo ($V_{GS} = 4V$, Figura 10). Da literatura, [3], pode-se chegar para o transistor em saturação, na Equação 1, que permite calcular o valor da constante k , para o qual chegamos em $0,034 A/V^2$. A partir do valor de K , é possível calcular o parâmetro da modulação de tamanho de canal (Λ), usando a Equação 2, para o qual obtemos um valor $0,028 1/V$. A partir do parâmetro da modulação de tamanho de canal pode-se também encontrar a tensão de Early (V_A) do nosso transistor, mais detalhes podem ser observados em 1, para o qual obtemos 35V.

A fim de comparar os dados encontrados experimentalmente para a corrente no dreno I_D , buscou-se obter os valores teóricos para a corrente. Para isso, usou-se [3], de onde encontrou-se as equações para a corrente no dreno para o *MOSFET* nas regiões de saturação e triodo, Equações 3 e 4. A partir delas, e usando os parâmetros anteriormente encontrados, plotou-se os gráficos do *MOSFET* em saturação, triodo e corte, que podem ser observados nas Figuras 11, 13 e 12. Comparando os gráficos obtidos com valores teóricos e experimentais, é possível perceber uma pequena diferença. Para a região de corte, por exemplo, os valores experimentais não foram exatamente iguais a zero, o que pode ser causado por falhas na medição de V_{DS} . Para a região de triodo, é possível observar que o gráfico experimental começa a se curvar um pouco antes, novamente, uma boa justificativa, seria a baixa precisão das medições feitas com o multímetro. A maior diferença, entretanto, está na região de saturação, o gráfico teórico se mostrou muito mais linear do que o experimental, uma provável razão é o *range* de valores para a corrente, que se mostrou muito mais variado nas medições feitas.

Após as análises, pode-se concluir que a região de atuação do *MOSFET* que melhor funciona como amplificador é a de saturação, uma vez que para as regiões de corte e de triodo tem-se praticamente um comportamento constante, logo não fariam efeito no amplificador.

Para a segunda parte do experimento (circuito da Figura 2), usou-se o valor de k calculado anteriormente e, usando a Equação 5, obteve-se o ganho do *MOSFET* (g_m). A partir dele, pode-se calcular o valor esperado de R_1 e R_D (Equações 7 e 6), que foram de $245,1\Omega$ e $5M\Omega$, respectivamente. Dessa forma, usou-se no circuito valores próximos a eles, com R_D de 82Ω e R_1 de $3,9\Omega$.

Um detalhe importante para o circuito amplificador, é o o desejo por trabalhar no ponto de máxima excursão do circuito, ou seja, aproveitar a maior parte do tempo possível na região de saturação. Para isso, é preciso montar um gráfico como o da Figura 14, e calcular o ponto desejado como sendo a metade do caminho entre o ponto em que a curva de carga se encontra com a parábola, e o ponto no qual ela cruza o eixo X.

Aplicando-se uma onda senoidal de $100mV_{pp}$ e uma frequência de $1kHz$, obteve-se no osciloscópio o gráfico da Figura 15 e, com base nele, pode-se então concluir que o ganho do amplificador foi de 8 a 9,

aproximadamente.

Elevando-se gradativamente o valor da amplitude de entrada, quando chegou-se a $900mV_{pp}$ pode-se notar o sinal de saída apresentou distorções, as quais iam aumentando conforme a amplitude aumentava, como pode-se observar na Figura 16.

Ao conectar-se a carga de baixa impedância, no caso um alto falante, o amplificador tem seu ponto de operação alterado devido a quantidade de corrente puxada pelo novo elemento. Agora despolarizado, o ganho de tensão diminui, como pode ser observado na Figura 17.

Para obter melhores valores de resistências, poderia-se ter calculado o valor real de R_D no experimento da Figura 1 e do R_2 da Figura 2. Dessa forma, possivelmente obteria-se valores diferentes de I_D e calcularia-se um valor diferente para k (Equação 1), o que, portanto, mudaria os valores das resistências (Equações 6 e 7).

4 Conclusão

Neste experimento, buscou-se estudar o funcionamento do transistor *MOSFET* e analisar seu comportamento de acordo com a tensão limiar para seu funcionamento V_{th} . Assim, conclui-se que o experimento foi bem sucedido, uma vez que o comportamento do *MOSFET* foi condizente com o valor de V_{th} calculado de 1,4V. Pelos gráficos citados no decorrer deste relatório foi possível classificar as regiões de atuação do transistor (corte, saturação e triodo). Tendo isso, verificou-se o funcionamento do circuito como um amplificador e obteve-se o ganho: pelo gráfico gerado, foi possível observar que houve amplificação do sinal em fatores de 8 a 9, que foi de acordo com o esperado. Utilizando o mesmo circuito numa aplicação prática de um alto falante, pode-se checar o comportamento para o caso de despolarização, em que o ganho de tensão diminui, como foi apontado anteriormente.

Referências

- [1] Tensão de early. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Early_effect, Acesso em: 20-09-2018.
- [2] MASIERO Bruno. Roteiro experimento 3. Disponível em: <https://bit.ly/2vQliWx>, Acesso em: 10-08-2018.
- [3] Adel S. Sedra and Kenneth C. Smith. *Microelectronic Circuits*. Oxford University Press, fifth edition, 2004.

Anexos

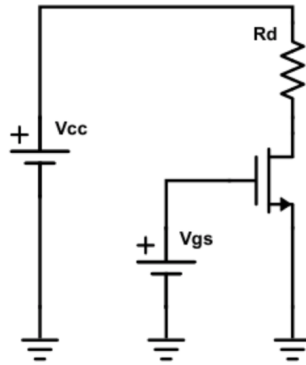


Figura 1: Circuito para caracterização do transistor MOSFET.

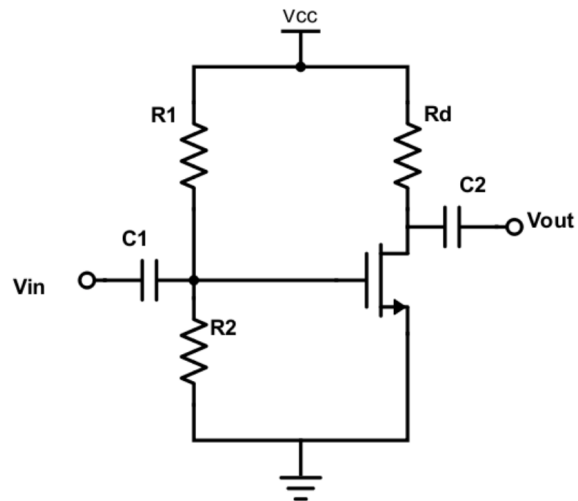


Figura 2: Circuito amplificador com transistor NMOS.

$$k = \frac{I_{D,On}}{(V_{GS,On} - V_{TH})^2} \quad (1)$$

Equation 1: Parâmetro K do *MOSFET*

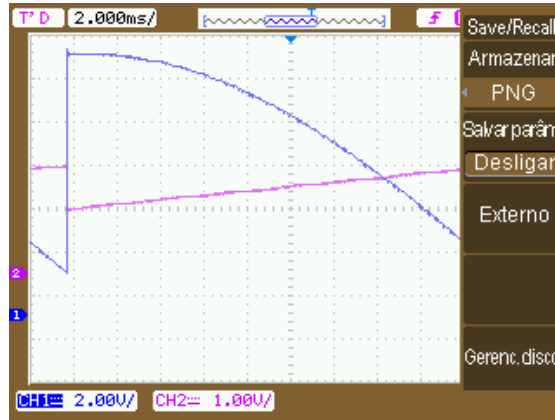


Figura 3: Comportamento do *MOSFET* na região de saturação.

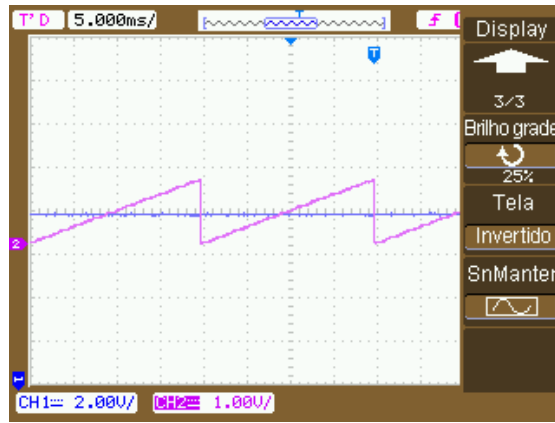


Figura 4: Comportamento do *MOSFET* na região de corte.

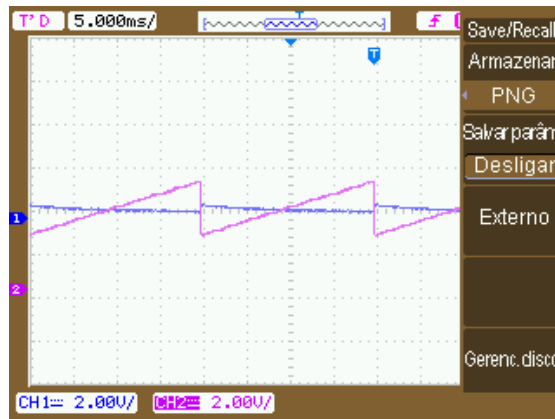


Figura 5: Comportamento do *MOSFET* na região de triodo.

$$\lambda = \frac{I_{D,Sat}}{V_{DS}K(V_{GS} - V_{TH})^2} - \frac{1}{V_{DS}} \quad (2)$$

Equation 2: Modulação de tamanho de canal do *MOSFET*

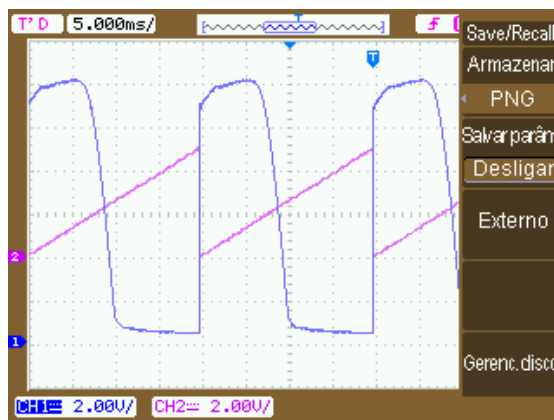


Figura 6: Comportamento do *MOSFET* sob valores variados de V_{GS} .

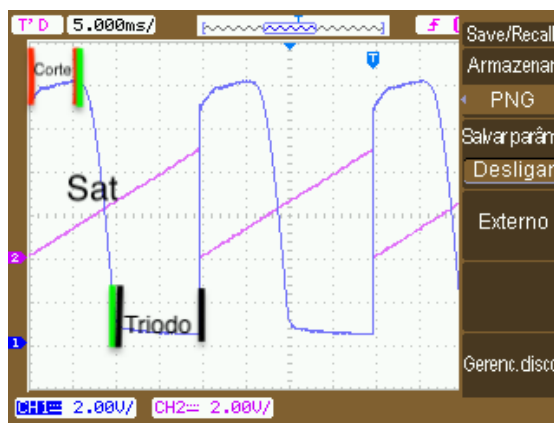


Figura 7: Comportamento do *MOSFET* sob valores variados de V_{GS} , com as regiões indicadas.

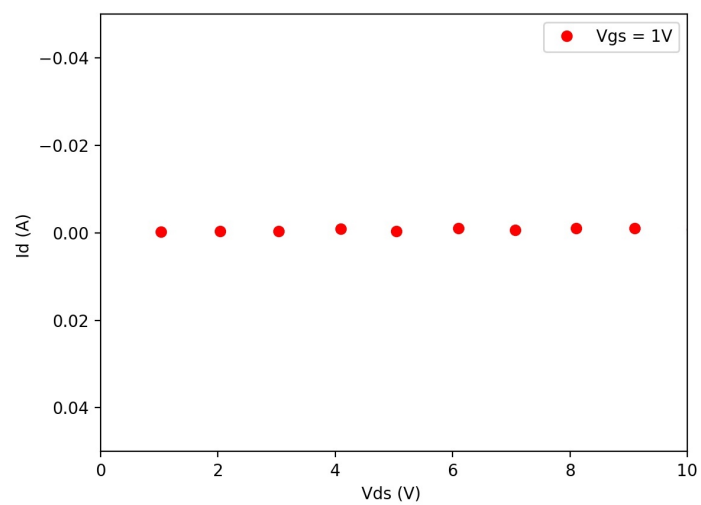


Figura 8: Gráfico obtido experimentalmente de $V_{DS} \times I_D$ para o *MOSFET* na região de corte.

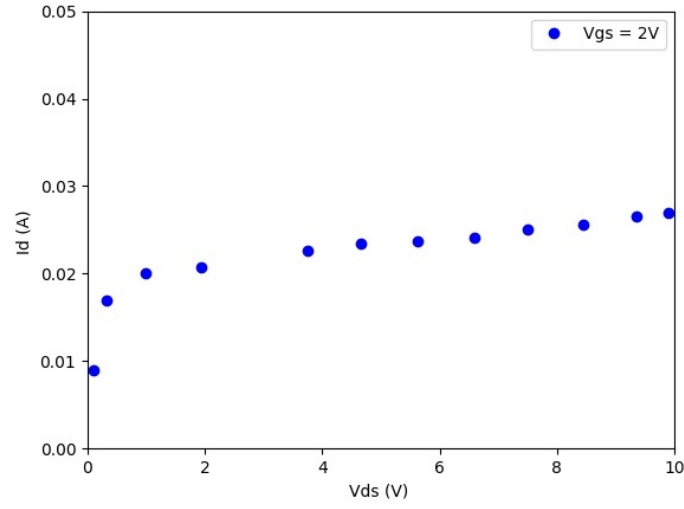


Figura 9: Gráfico obtido experimentalmente de $V_{DS} \times I_D$ para o *MOSFET* na região de saturação.

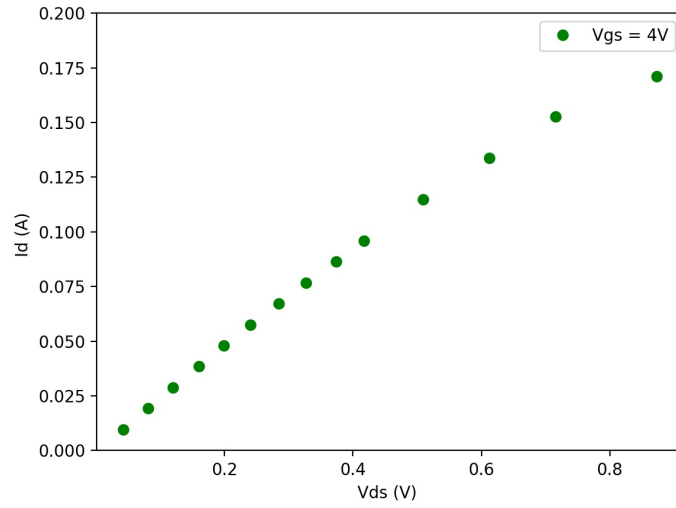


Figura 10: Gráfico obtido experimentalmente de $V_{DS} \times I_D$ para o *MOSFET* na região de triodo.

$$I_{D,Sat} = K(V_{GS} - V_{TH})^2(1 + \lambda V_{DS}) \quad (3)$$

Equation 3: Corrente do *MOSFET* na região de saturação

$$I_{D,Tri} = K(2(V_{GS} - V_{TH})V_{DS} - (V_{DS})^2) \quad (4)$$

Equation 4: Corrente do *MOSFET* na região de triodo

$$g_m = 2 * k * (V_{GS} - V_{TH}) \quad (5)$$

Equation 5: Ganho de tensão do *MOSFET*.

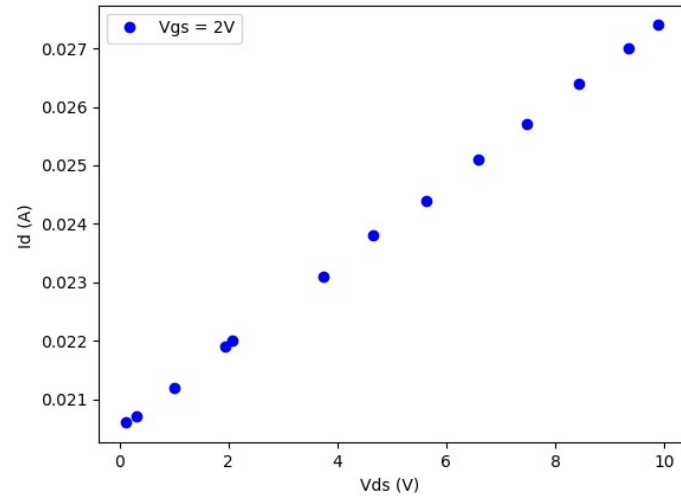


Figura 11: Gráfico teórico de $V_{DS} \times I_D$ para o *MOSFET* na região de saturação.

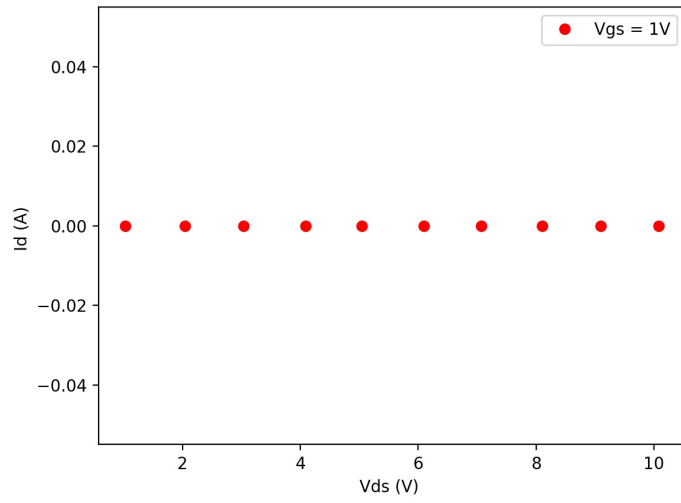


Figura 12: Gráfico teórico de $V_{DS} \times I_D$ para o *MOSFET* na região de corte.

$$R_d = \frac{A_v}{g_m} \quad (6)$$

Equation 6: Cálculo de R_d

$$V_{GS} = V_{CC} * \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (7)$$

Equation 7: Divisor de tensão no V_{GS} para o cálculo de R_1 .

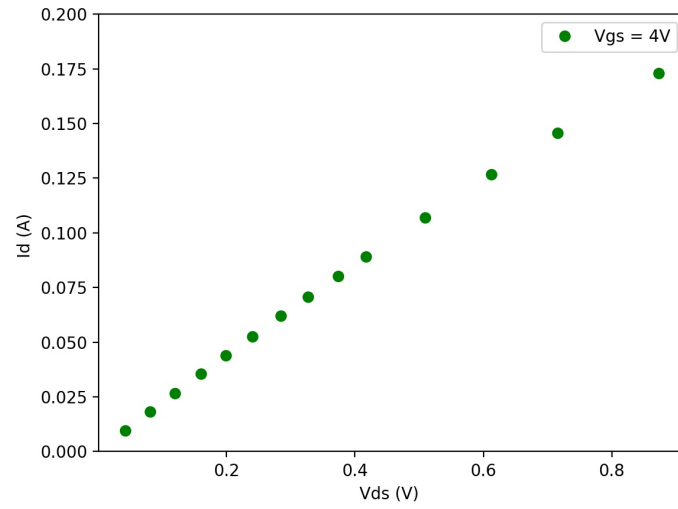


Figura 13: Gráfico teórico de $V_{DS} \times I_D$ para o *MOSFET* na região de triodo.

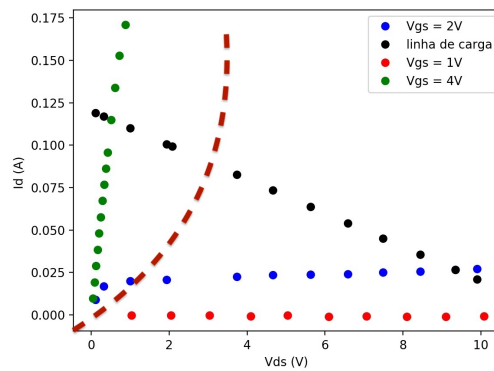


Figura 14: Gráfico de $I_D \times V_{DS}$, com a curva de carga e a parábola que delimita o limiar entre saturação e triodo traçadas.

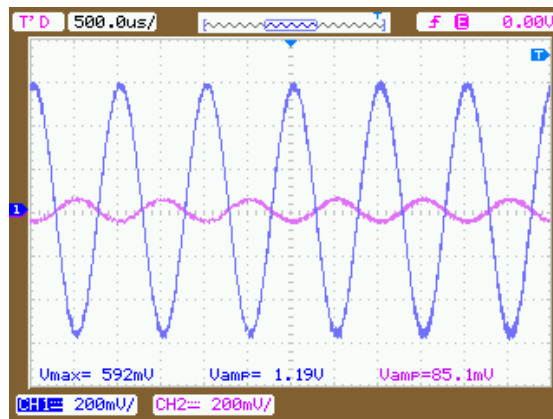


Figura 15: Comportamento do circuito amplificador classe A.

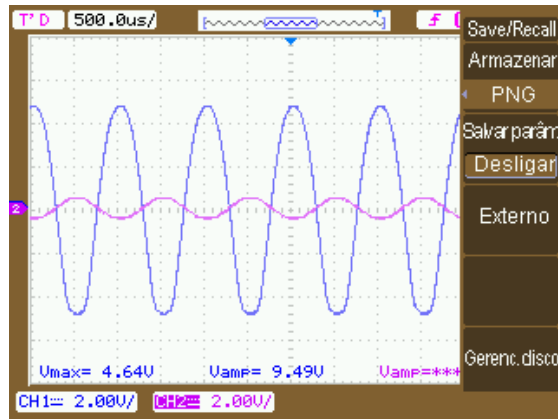


Figura 16: Início de distorção da curva se saída do circuito amplificador classe A.

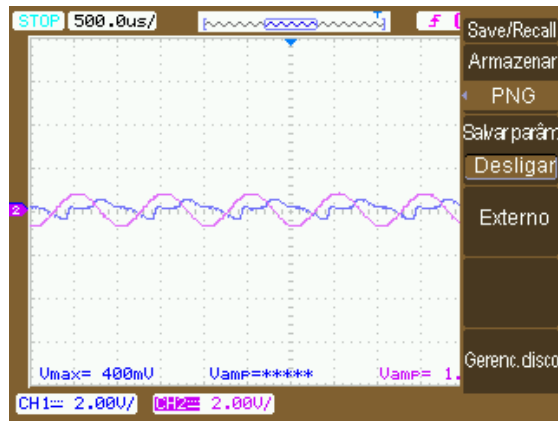


Figura 17: Comportamento do circuito amplificador classe A quando conectado a uma caixa de som.

V_{CC} (V)	V_{DS} (V)	V_R (V)	I_D (A)
1	0.11	0.89	0.009
2	0.31	1.69	0.017
3	0.99	2.00	0.020
4	1.93	2.07	0.021
5	2.07	2.93	0.029
6	3.74	2.26	0.023
7	4.66	2.34	0.023
8	5.63	2.37	0.024
9	6.59	2.41	0.024
10	7.49	2.51	0.025
11	8.44	2.56	0.026
12	9.35	2.65	0.026
12.6	9.90	2.70	0.027

Tabela 1: Valores de V_{DS} e I_D para V_{GS} de 2V

V_{CC} (V)	V_{DS} (V)	V_R (V)	I_D (A)
1	1.03	-0.03	-0.0003
2	2.04	-0.04	-0.0004
3	3.04	-0.04	-0.0004
4	4.09	-0.09	-0.0009
5	5.04	-0.04	-0.0004
6	6.10	-0.10	-0.0010
7	7.07	-0.07	-0.0007
8	8.10	-0.10	-0.0010
9	9.10	-0.10	-0.0010
10	10.08	-0.08	-0.0008

Tabela 2: Valores de V_{DS} e I_D para V_{GS} de 1V

V_{CC} (V)	V_{DS} (V)	V_R (V)	I_D (A)
1	0.04	0.96	0.010
2	0.08	1.92	0.019
3	0.12	2.88	0.029
4	0.16	3.84	0.038
5	0.20	4.80	0.048
6	0.24	5.76	0.058
7	0.28	6.72	0.067
8	0.33	7.67	0.077
9	0.37	8.63	0.086
10	0.42	9.58	0.096
12	0.51	11.49	0.115
14	0.61	13.39	0.134
16	0.72	15.28	0.153
18	0.87	17.13	0.171

Tabela 3: Valores de V_{DS} e I_D para V_{GS} de 4V