**Relatório IV – Transistor MOS**

Este experimento visa o estudo do transistor MOSFET (transistor de efeito de campo metal-óxido-semicondutor) ou simplesmente MOS, na qual é um dispositivo de três terminais empregado no projeto de circuitos integrados (*CIs*), que são circuitos fabricados sobre uma pastilha (*chip*) simples de silício. Um MOSFET é composto de um canal de material semicondutor (geralmente o silício) de tipo N ou de tipo P e é chamado, respectivamente, de NMOS ou PMOS.

Para o presente experimento, serão determinadas, experimentalmente, as curvas características de um transistor MOS e, também, este será empregado com amplificador e como inversor lógico.

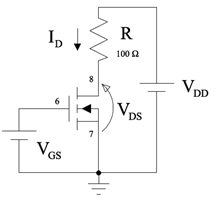
Assim como nos demais experimentos anteriores, foi utilizado o protoboard para a montagem dos circuitos. E os principais componentes utilizados foram um CI 4007 (três pares CMOS) e um resistor de 100Ω e outro de 10kΩ.

**Parte Experimental**

1. ***Curvas Características de um Transistor MOS***

Para esta parte inicial do experimento, é feita uma análise das curvas, de corrente versus tensão, geradas pelos dados obtidos pelos dois circuitos – compostos por um resistor de 100Ω e um transistor NMOS – a serem montados. Para o primeiro circuito é traçada a curva e, para o segundo circuito, a curva .

Primeiramente, foi feita a montagem do circuito da figura 1.1 – composto por um resistor de 100Ω e um transistor NMOS. Foi utilizada a fonte de tensão DC, no modo independente, para gerar as tensões e . E utilizando-se dois multímetros, um deles servindo como amperímetro para medir e o outro como voltímetro para medir , foi preenchida a tabela 1 com os dados obtidos pelas medições feitas.



**Figura 1.1:** Circuito

**Tabela 1:** Medidas de e , parametrizadas por

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | |  | |  | |  | |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0.1 | 0.0 | 0.3 | 0.043 | 0.6 | 0.76 | 1.5 | 5.4 |
| 0.2 | 0.0 | 0.6 | 0.046 | 1.2 | 1.23 | 3.0 | 8.4 |
| 0.3 | 0.0 | 0.9 | 0.048 | 1.8 | 1.48 | 4.5 | 9.1 |
| 0.4 | 0.0 | 1.2 | 0.049 | 2.4 | 1.49 | 6.0 | 9.2 |
| 0.5 | 0.0 | 1.5 | 0.050 | 3.0 | 1.49 | 7.5 | 9.25 |
| 1.0 | 0.0 | 2.0 | 0.050 | 3.6 | 1.50 | 8.0 | 9.25 |
| 2.0 | 0.0 | 3.0 | 0.051 | 4.0 | 1.53 | 9.0 | 9.25 |
| 3.0 | 0.0 | 4.0 | 0.052 | 5.0 | 1.55 | 10.0 | 9.25 |
| 4.0 | 0.0 | 5.0 | 0.052 | 6.0 | 1.57 | - | - |
| 5.0 | 0.1 | 6.0 | 0.052 | 7.0 | 1.58 | - | - |
| 6.0 | 0.1 | 7.0 | 0.053 | 8.0 | 1.58 | - | - |
| 7.0 | 0.1 | 8.0 | 0.054 | 9.0 | 1.59 | - | - |
| 8.0 | 0.1 | 9.0 | 0.054 | 10.0 | 1.60 | - | - |
| 9.0 | 0.1 | 10.0 | 0.055 | - | - | - | - |
| 10.0 | 0.1 | - | - | - | - | - | - |

Em seguida, com os dados da tabela, foi traçado o gráfico, da figura 1.2, das curvas do transistor NMOS, parametrizadas por , e, no próprio gráfico, foram indicadas as regiões de operação – triodo e saturação – do transistor. As características de cada região de operação de um transistor de enriquecimento do tipo n são apresentadas abaixo:

* **Operação na região de corte:**

*Condições:*

* **Operação na região de triodo:**

*Condições:*



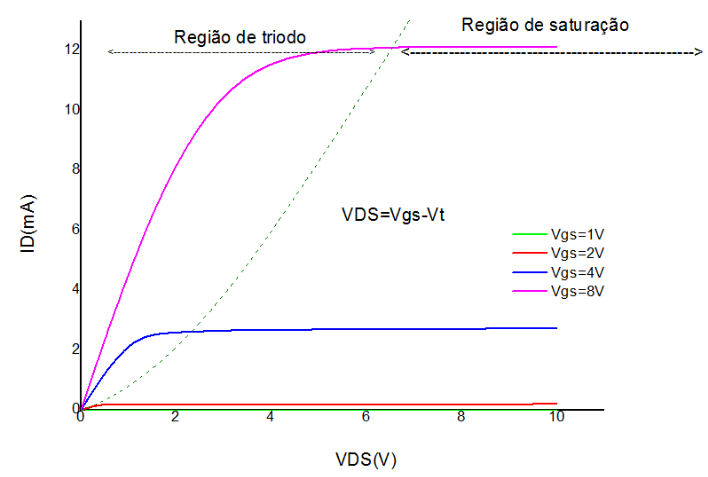
*Características :*

* **Operação na região de saturação:**

*Condições:*



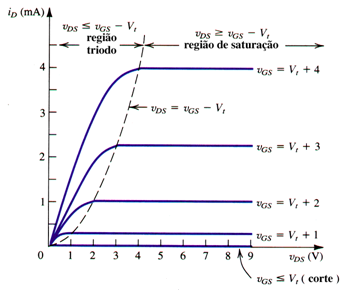
*Características :*



**Figura 1.2:** Curva característica de para o circuito da figura 1.1

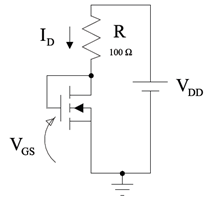
Inicialmente, observa-se que na reta horizontal coincidente com o eixo das abscissas (correspondente a ) o transistor está em corte, não havendo um canal induzido e contínuo. As regiões de triodo () e de saturação () da figura 1.2 podem ser definidas segundo o gráfico teórico da figura 1.3. Para encontrar o limite entre as duas regiões (triodo e saturação), iguala-se .

A figura 1.3 mostra um gráfico teórico com as regiões de um transistor MOSFET tipo *n*.



**Figura 1.3:** Características para um NMOS

Analisado o circuito da figura 1.1, faz-se a montagem do segundo circuito, conforme a figura 1.4. Como feito no circuito anterior, foi utilizado um multímetro como um amperímetro para medir a corrente e variou-se até encontrar a medida de , medida por outro multímetro usado como voltímetro, estabelecida na tabela 2. As medidas de foram anotadas na tabela 2.

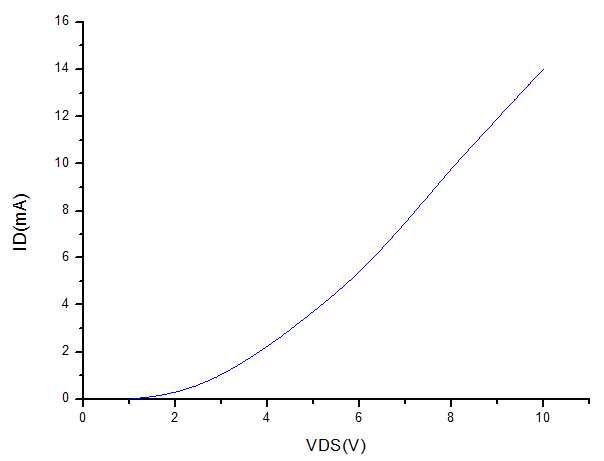


**Figura 1.4:**

**Tabela 2:** Medidas de , parametrizadas por

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1.0 | 0.0 |
| 2.0 | 0.2 |
| 3.0 | 0.97 |
| 4.0 | 2.2 |
| 5.0 | 3.7 |
| 6.0 | 5.33 |
| 7.0 | 7.45 |
| 8.0 | 9.8 |
| 9.0 | 11.9 |
| 10.0 | 14.0 |

Com os dados da tabela 2, foi traçado a curva .

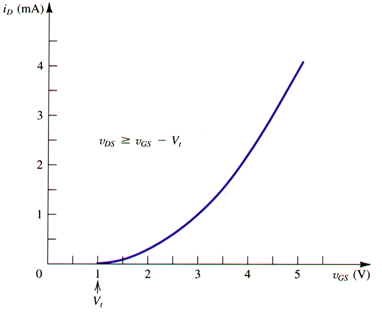


**Figura 1.5:** Curva característica de para o circuito da figura 1.4

Pela análise do gráfico, pode-se concluir que o transistor encontra-se na região de saturação, ou seja, para o MOSFET operar na região de saturação, um canal tem de ser induzido – (canal induzido) – e estrangulado no final do dreno pelo aumento em até um valor que resulte na queda da tensão porta-dreno abaixo de – (estrangulamento do canal). Essa condição pode ser expressa explicitamente em termos de como: (canal estrangulado).

Portanto, o MOSFET tipo enriquecimento canal n opera na região de saturação quando for maior que e a tensão de dreno não cair abaixo da tensão na porta por mais de volts.

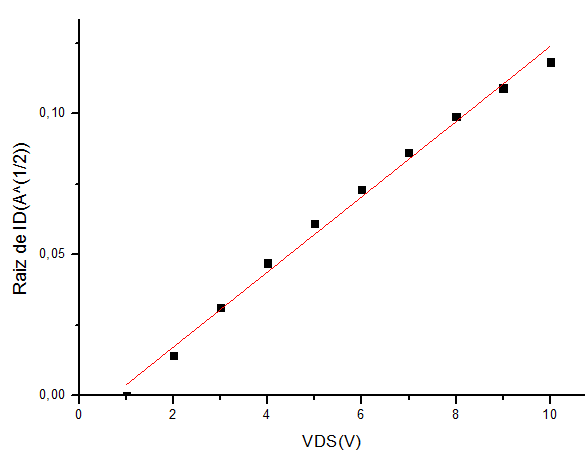
A figura abaixo mostra o gráfico teórico para um transistor que se encontra no modo de saturação.



**Figura 1.6:** Características para transistor NMOS na saturação

Para determinar os valores dos parâmetros e do transistor MOSFET, foi feito um ajuste da reta – pelo método dos mínimos quadrados – usando-se os dados da tabela 2 e sabendo-se que, na saturação, .

O resultado pra este ajuste encontra-se no gráfico a seguir.



**Figura 1.7:** Curva característica para o circuito da figura 1.4

Sabendo-se que a equação de é da forma de uma equação de reta , pode-se ver que o termo na fórmula corresponde ao coeficiente angular da reta e que corresponde ao coeficiente linear. Portanto, tais coeficientes foram calculados para que seja possível descobrir os parâmetros e .

Os valores dos coeficientes angular e linear são, respectivamente, e . Logo:

e

Conclui-se que os valores de [A/V2] e de [V] são, respectivamente, e .

A partir dos parâmetros obtidos acima, compara-se as curvas experimentais obtidas pelo circuito da figura 1 com as curvas teóricas do MOSFET.

1. ***Aplicações Analógicas***

Para esta parte do experimento, foi montado o circuito amplificador da figura 3. Foi aplicado um sinal de entrada senoidal de 60 mVpp e freqüência de 1kHz e foi monitorada as tensões e no osciloscópio, variando o offset da entrada, até que fosse observado um ganho de para o amplificador. A curva encontrada para o amplificador encontra-se ilustrada abaixo e junto a ela, foi registrado o valor ajustado para . Este valor foi comparado com o valor teórico para o mesmo ganho de .

Muitos projetos de circuitos analógicos envolvem amplificadores de um ou múltiplos estágios. Entre os amplificadores de um único estágio, um dos mais simples é o Fonte Comum, ilustrado na Figura 3. O mesmo apresenta um ganho inversor, ou seja, a tensão de saída possui sinal oposto à tensão de entrada. Isso pôde ser comprovado no osciloscópio, tal como mostra a imagem obtida dos sinais de entrada e saída mais abaixo. Essa montagem também sofre efeito Miller, ou seja, a capacitância de entrada pode ser elevada, levando o circuito a ter um pólo dominante em baixa freqüência. Essa última característica pode se tornar um problema se o circuito deve operar em altas freqüências, pois o ganho diminuirá a partir dessa freqüência de corte vista da entrada.

Nessa montagem (Amplificador Fonte Comum), que foi realizada em aula, é possível deduzir facilmente, a partir do modelo de pequenos sinais, que o ganho de malha é :

Av = -R.ro.gm/(R+ro)

Como geralmente ro>>R, é possível aproximar o ganho Av :

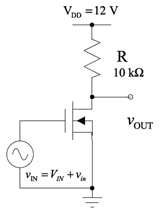
Av = -R.gm

Av = -10 = -10^4.gm

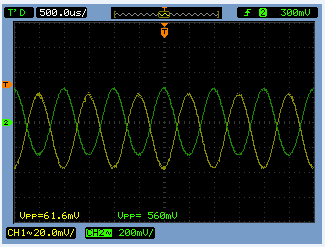
gm = (un.Cox).(W/L).Vov = 10^-3

Vov = *V*IN - Vt = 10^-3/[(un.Cox).(W/L)] = 10^-3/(3.6\*10^-4) = 2.78 V

*V*IN = Vov + Vt = 2.78 + 0.71 = 3.49 V



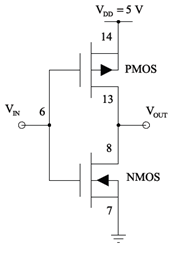
**Figura 2.1:** Amplificador



**Figura 2.2:** Curvas e

1. ***Aplicações Digitais***

Inicialmente, foi montado o circuito inversor lógico, como esquematizado na figura 3.1.



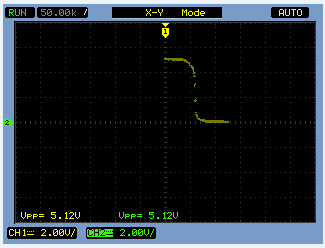
**Figura 3.1:** Circuito inversor lógico

Um inversor CMOS básico utiliza dois transistores MOSFETs do tipo enriquecimento casados: um , com um canal *n* e outro , com um canal *p*. O corpo de cada dispositivo está conectado à sua fonte e, portanto, nenhum efeito de corpo deve ser considerado.

Um inversor lógico funciona da seguinte maneira: quando a entrada está em nível alto (), a tensão de saída será de zero volts (0 V); quando a entrada estiver em nível baixo (), a saída terá uma tensão igual a .

Na entrada do circuito foi aplicado um sinal senoidal com as seguintes características: , e .

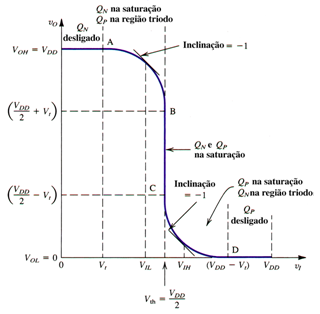
A imagem ilustrada abaixo (figura 3.2), da curva característica de transferência deste inversor, foi obtida utilizando-se o modo de operação XY do osciloscópio.



**Figura 3.2:** Característica de transferência de tensão do inversor CMOS

Observa-se que inicialmente, quando está em nível baixo, o transistor canal está em corte e a tensão de saída é aproximadamente VDD = . Já no outro extremo, com em nível alto (próximo de VDD), o transistor canal está em corte e a tensão de saída está em nível baixo, . Percebe-se ainda, que quando encontra-se muito próximo de VDD/2, ambos os transistores estão na saturação e é nessa região (linear) que operam os amplificadores. Antes desse trecho, o transistor NMOS encontra-se em saturação e o PMOS na região de triodo, e depois desse trecho os papéis se invertem, com o NMOS em triodo e o PMOS em saturação.

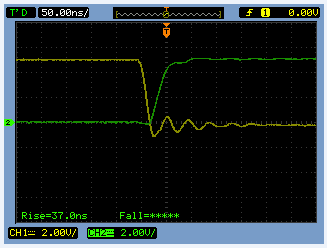
A figura 3.3, na qual esboça uma curva característica teórica de um inversor, mostra as regiões de operação dos transistores NMOS e PMOS casados.



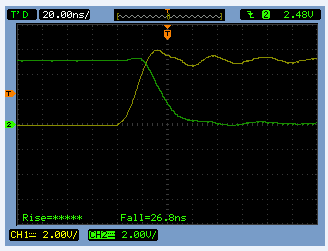
**Figura 3.3:** Característica de transferência de tensão do inversor CMOS (curva teórica)

Em seguida, foi aplicada na entrada uma forma de onda quadrada com as mesmas características anteriores (, e ) e o osciloscópio foi retirado do modo XY e visualizou-se a entrada e a saída em função do tempo.

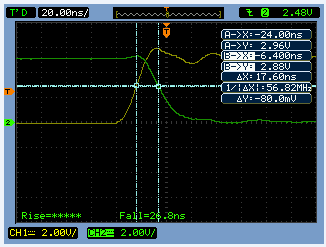
Foram medidos os tempos de subida, de descida e de atraso da saída, todos ilustrados a seguir.



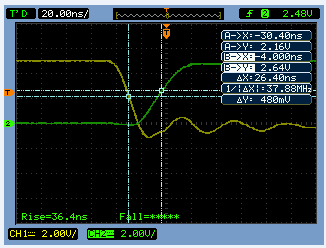
**Figura 3.4:** Tempo de subida



**Figura 3.5:** Tempo de descida



**Figura 3.6:** Tempo de **a**traso de low pra high



**Figura 3.7:** Tempo de atraso de high pra low

Foi obtido um valor de tempo de subida (tempo para o sinal mudar de um nível baixo de tensão (Vout =0 V) para um alto (Vout = VDD ))de 37,0 ns e um tempo de descida (tempo para o sinal mudar de um nível alto (Vout = VDD) de tensão para um nível baixo de tensão (V=0 V)) de 26,8 ns. Caso a entrada fosse ideal e os dois transistores MOSFETs possuíssem exatamente as mesmas características, o tempo de subida e descida deveriam ser iguais devido à simetria do circuito.

Posteriormente, mediu-se o atraso de propagação que determina a velocidade de operação de um circuito digital e é influenciado pelo tempo de subida e descida, já que utiliza a diferença de tempo entre o momento em que a onda de entrada está no meio da transição entre o valor máximo e mínimo ou o contrário, e o momento em que a onda de saída também estiver no meio da transição. Assim, se o tempo de subida e descida da saída for alto, maior será o atraso de propagação.

A mudança de uma voltagem alta para uma baixa do sinal de entrada possui como atraso o tempo de enquanto que a mudança de um sinal baixo para um alto possui como atraso . Logo, o tempo de propagação vale a média entre ambos os atrasos, ou seja, , implicando em uma freqüência máxima de operação de .