

LABORATÓRIO 1 - SIMULAÇÃO SPICE DO TRANSISTOR

Prof. Fernando Gehm Moraes – Revisão: 04/agosto/2025

Exemplo de ajuda para descrição SPICE - SPICE - A Brief Tutorial

<http://www.seas.upenn.edu/~jan/spice/spice.overview.html>

Todas as atividades de laboratório de microeletrônica serão executadas em máquinas do grupo de pesquisa GAPH (Grupo de pesquisa de Apoio ao Projeto de Hardware). As máquinas a serem utilizadas são: *kriti*, *paxos* ou *hydra* (preferência pela máquina *hydra*).

(1) Logar no sistema operacional LINUX do laboratório (conta *micro* – fornecida pelo professor).

(2) Acessar, via terminal, máquina do grupo GAPH (*kriti*, *paxos*, ou *hydra*)

ssh -X <micro>@hydra.inf.pucrs.br -p 8888 (permite acesso também de casa)

Exemplo: ssh -X micro1@hydra.inf.pucrs.br -p 8888

Virtualizado de fora da PUC (instalar o **xpra** na máquina local e **kitty**)

xpra start ssh:micro1@paxos.inf.pucrs.br:8888 --exit-with-children --start-child="kitty" \n

(3) Configurar o ambiente para utilizar o simulador spice

module load spectre ic

(4) Baixar os arquivos necessários à execução deste laboratório

wget https://fgmoraes.github.io/microel/lab1/lab1.zip ; unzip lab1; cd lab1

Há 4 arquivos no diretório lab1:

```
lab1
├── ids.sp
├── ids_p.sp
├── tsmc035.mod
└── vds.sp
```

Os arquivos com sufixo. **sp** contêm a descrição *spice* do circuito, e o arquivo **tsmc035.mod** define a tecnologia que iremos empregar (0,35 μm). O arquivo de tecnologia deve estar no mesmo diretório do arquivo contendo as descrições *spice*. Os arquivos *spice* fazem um *include* no arquivo de tecnologia.

1) SIMULAÇÃO PARA VISUALIZAR IDS EM FUNÇÃO DE VGS

- Simular o arquivo **ids.sp**. Para simular executar no terminal o comando:

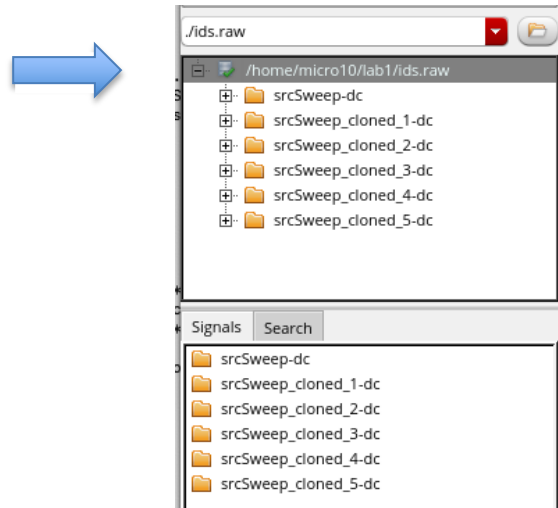
Após a simulação concluir, são impressas as seguintes mensagens:

```
Spectre (R) Circuit Simulator
Version 23.1.0.063 64bit -- 10 Jun 2023
Copyright (C) 1989-2023 Cadence Design Systems, Inc. All rights
reserved.

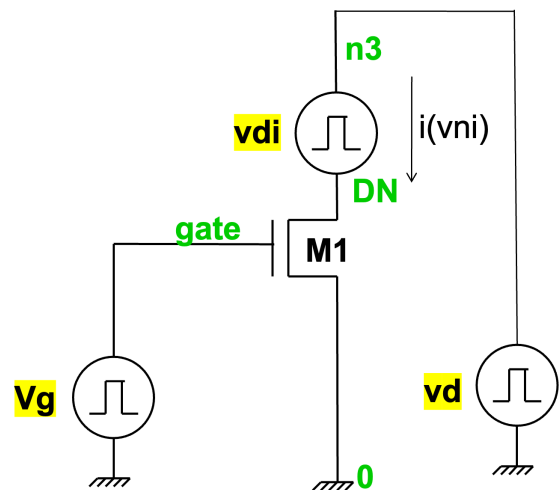
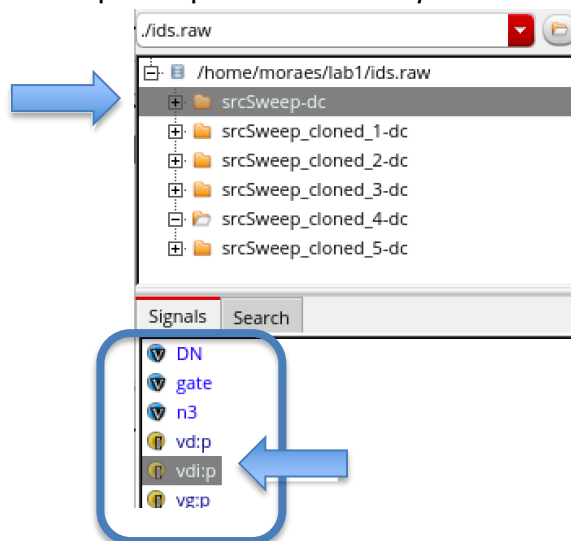
....
spectre completes with 0 errors, 0 warnings, and 13 notices.
```

- Abrir a interface gráfica: **viva &**

- File → Open Results → ids.raw
- Clique no + : abrem os 6 resultados de simulação.



- duplo clique em *srcSweep-dc* – abre os sinais que podemos visualizar.

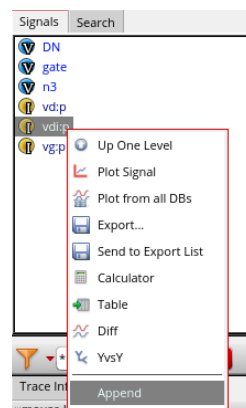


- Duplo clique em **i(vdi:p)** (:p significa corrente positiva) para abrir a corrente sobre o transistor (corrente sobre a fonte auxiliar – *vdi*). Esta primeira curva obtida corresponde ao IDS da simulação com $V_{GS}=0$. Depois selecione *srcSweep_cloned_1-dc* e acrescente a nova corrente clicando sobre o mesmo sinal. Repita o processo para todas as correntes. **Olhar o arquivo SPICE**. A tensão aplicada ao *gate* varia de 0 V a 2,5 V, e *vds* de 0 a 2,5 (.dc vd 0 2.5 .1). Dado que o *source* está conectado à *gnd*, $v_g = V_{GS}$, neste exemplo.

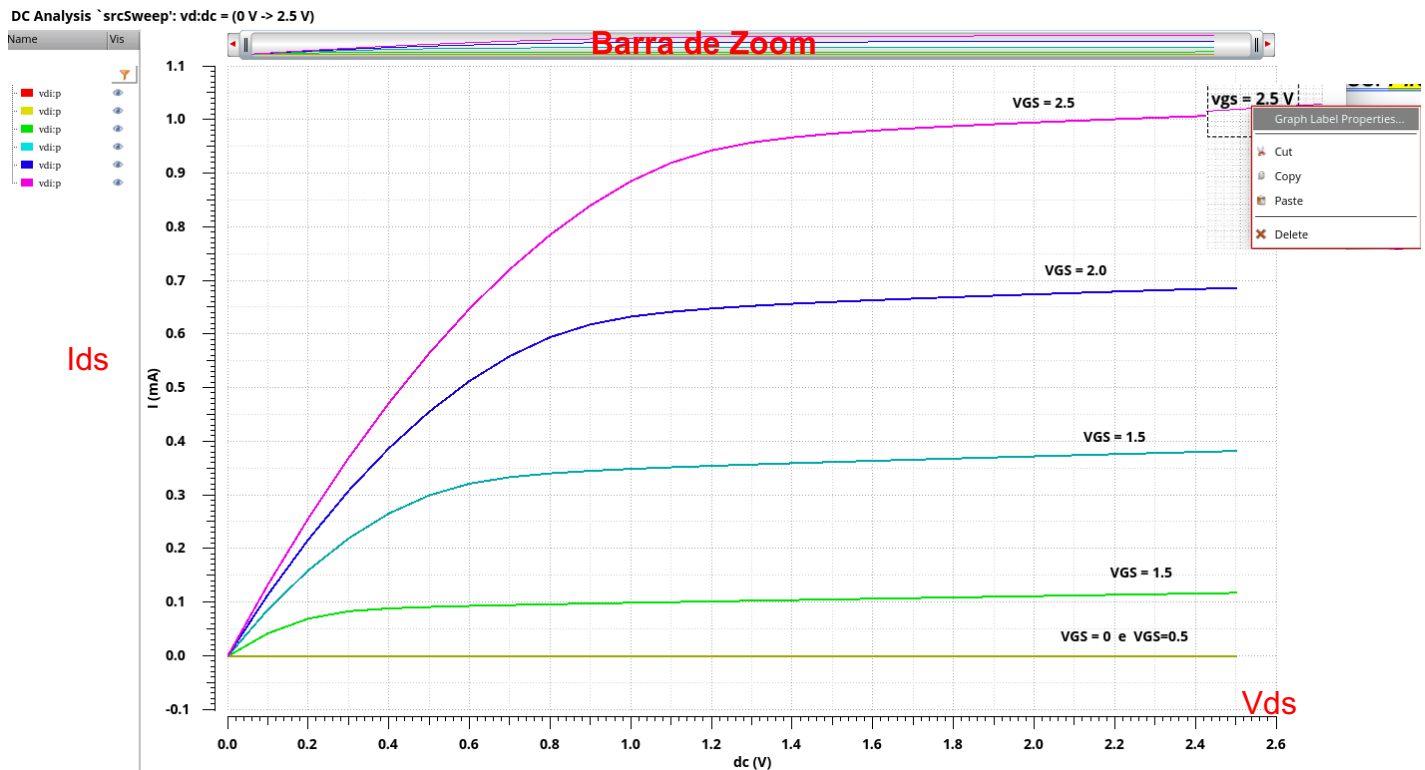
```

vg gate 0 dc 0
.alter
vg gate 0 dc 0.5
.alter
vg gate 0 dc 1.0
.alter
vg gate 0 dc 1.5
.alter
vg gate 0 dc 2.0
.alter
vg gate 0 dc 2.5
.END

```



O resultado obtido é o apresentado abaixo. (usei **File → Window Properties** para trocar a cor de fundo). **Inserir labels** com **graph → add label**.



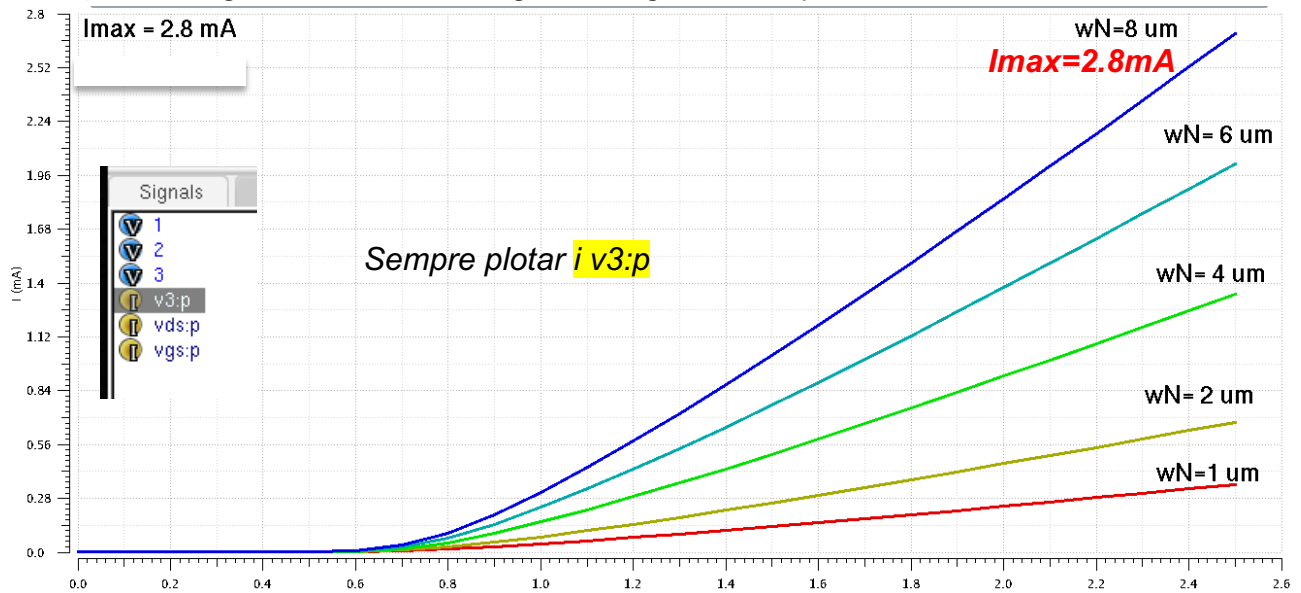
Observar que no eixo x temos V_{DS} variando de 0 a 2.5 volts, e no eixo y a corrente I_{DS} . Cada simulação é dada por uma cor.

RESPONDA NO RELATÓRIO [5 pts]:

- [1,0 pt] Qual o objetivo desta simulação?
- [1,0 pt] No relatório plotar a curva de simulação (figura acima) e **identificar** as regiões de transistor cortado, linear e saturado nas curvas. Observar que a corrente máxima foi de 1 mA.
- [1,5 pt] Altere de tensão de *threshold* do transistor N para 1.5 V (alterar no arquivo tsmc035.mod o parâmetro VTH0 do transistor N), **simule novamente**, e explique o novo comportamento das curvas. No relatório mostrar as curvas, identificando as regiões de operação. Compare com a simulação original, **explicando** as principais diferenças observadas. **Ao final da simulação retorne o VTH0 para o valor original**. Qual a corrente máxima observada? Compare com o item 2 e explique a razão – **buscar no livro texto a equação de corrente (apresentar no relatório) para embasar a resposta**.
- [1,5 pt] **Simular** o arquivo **ids_p.sp** (transistor P sendo avaliado). Apresentar as formas de onda, plotando $i(vdi:p)$ e inserindo **o valor de VGS** (diferença de potencial entre o *gate* e o *source*) na forma de *label* sobre as curvas, e **explicar** o comportamento do circuito. Observar que o *source* está conectado em vcc (2,5 V), logo, quando $V_G=0$, $V_{GS}= -2,5V$. Qual a corrente máxima observada? Compare com o item 2 e explique a razão.

2) SIMULAÇÃO PARA VISUALIZAR IDS EM FUNÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DO TRANSISTOR

- **Simular o arquivo vds.sp.** Esta simulação aplica uma tensão no *gate* (VGS, eixo x), que varia de 0 a 2.5 volts, para 5 condições de W (largura de canal). Plotar a corrente $i(v3:p)$. A variação da largura do transistor N gera o seguinte comportamento:

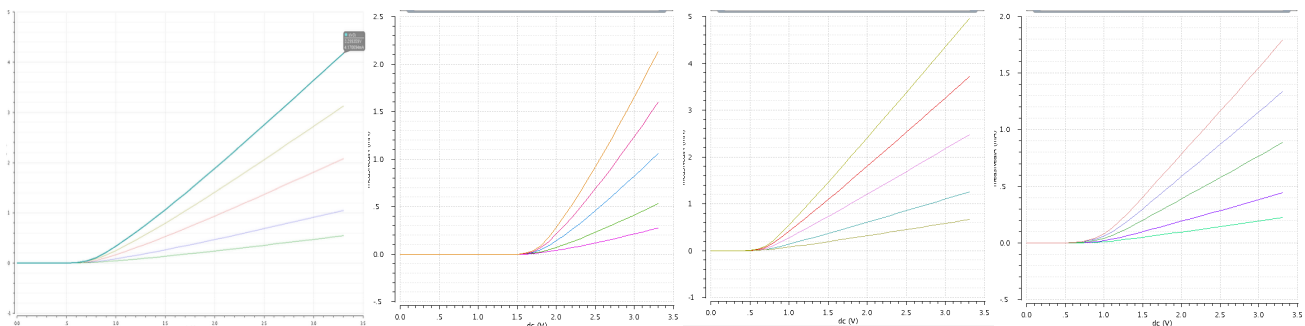


Observar na simulação o momento em que o transistor começa a conduzir ($V_{TH0} = 0.5048265$), e o efeito do tamanho do transistor (W) na corrente. Observar que o W não influi na tensão de *threshold*, pois este é um parâmetro da tecnologia.

Anotar a corrente máxima observado no plot (passando o mouse sobre a curva).

RESPONDA NO RELATÓRIO:

- [0,5 pt] Obtenha a gráfico acima, a partir da simulação do arquivo **vds.sp**.
- [1,5 pt] Variar (**individualmente**) os seguintes parâmetros do arquivo de tecnologia, para o transistor N. Pode-se multiplicar ou dividir por um dado valor (por exemplo 4) cada parâmetro do arquivo de tecnologia.
 - tensão de threshold - **VTH0** (alterar VTH0 para novo valor)
 - mobilidade - **U0** (alterar U0 para novo valor, e voltar ao VTH0 original)
 - espessura do óxido – **TOX** (alterar TOX para novo valor, e voltar ao U0 original)



Parâmetros originais

$V_{TH0} = XXX$ (alterado) $U_0 = XXX$ (alterado) $TOX = XXX$ (alterado)

Apresentar o gráfico das quatro simulações, cada uma variando um dado parâmetro. Adicionar um título no gráfico, indicando o parâmetro alterado, por exemplo: “ $U_0 = 1245 (*3)$ ” (mobilidade multiplicada por três). **Além de inserir os labels de W nas 4 simulações, inserir label com a corrente máxima, como acima ($I_{max} = 2.7 \text{ mA}$).**

7. [1,5 pt] Relacionar as variações de corrente I_{ds} acima com a equação de corrente do transistor MOS, explicando os comportamentos observados na questão ‘6’ com a equação. Apresentar no relatório a equação de corrente utilizada, **e a referência** de onde ela foi obtida. **Consultar o livro texto, ou outro livro de microeletrônica.**
8. [1,0 pt] Comente no arquivo vds.sp o transistor N (acrescentando um ‘*’ no início da linha) e acrescente um transistor P como abaixo:

*M1 ...

M2 dren0 gate 0 vds pmos I=0.35e-6 W=wtr AD=4.0P AS=4.0P PD=6.0U PS=6.0U

Plote a curva para o transistor P, e explique o comportamento observado. Porque entre 1.8V e 2.5V não há corrente?

9. [0,5 pt] Calcular a relação de mobilidade entre o transistor N ($U_0 = 415.8570638$) e o transistor P ($U_0 = 150.6275733$)? O que indica esta relação de mobilidade? **Consultar o livro texto, ou outro livro de microeletrônica.**

FIM DO LABORATÓRIO 1