

# LABORATÓRIO 1 - SIMULAÇÃO SPICE DO TRANSISTOR

Prof. Fernando Gehm Moraes – Revisão: 05/março/2025

## Exemplo de ajuda para descrição SPICE

<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`

(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  $\mu\text{m}$ ). 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

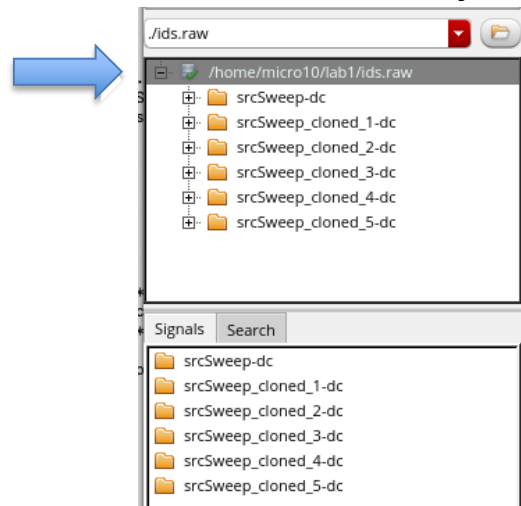
- Simular o arquivo **ids.sp**. Para simular executar no terminal o comando:

**spectre ids.sp**

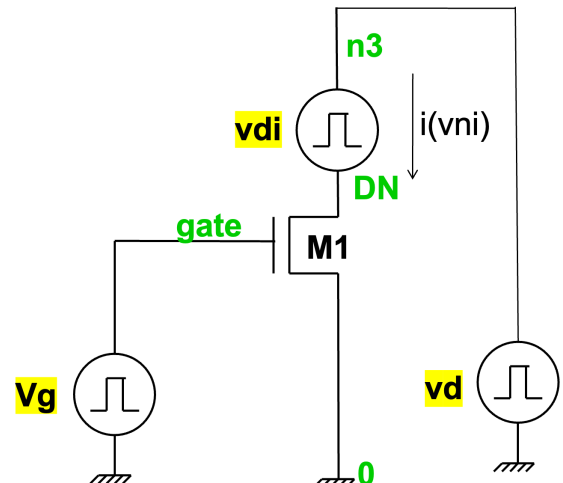
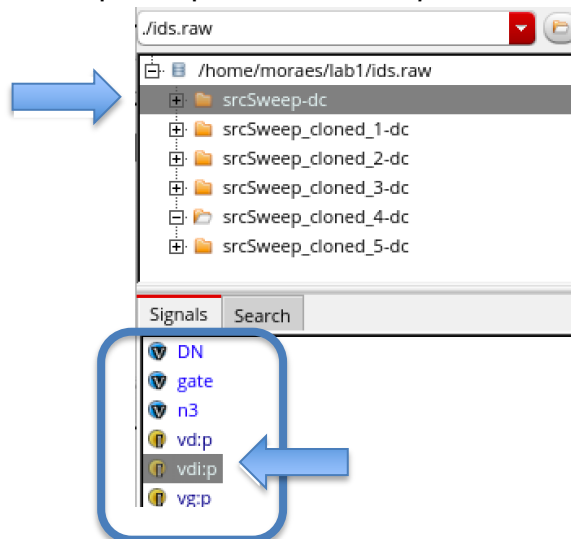
Após a simulação concluir, são impressas as seguintes mensagens:

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

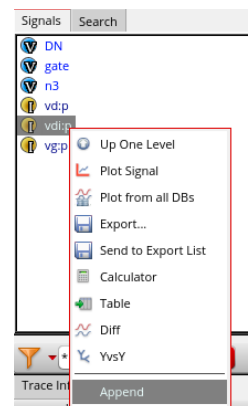


- Duplo clique em **i(vdi:p)** (:p significa corrente positiva) para abrir a corrente sobre o transistor (corrente sobre a fonte auxiliar – *vdi*). Esta primeira curva obtida corresponde ao IDS da simulação com  $V_{GS}=0$ . Depois selecione *srcSweep\_cloned\_1-dc* e acrescente a nova corrente clicando sobre o mesmo sinal. Repita o processo para todas as correntes. Olhar o arquivo SPICE. A tensão aplicada ao *gate* varia de 0,5 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.

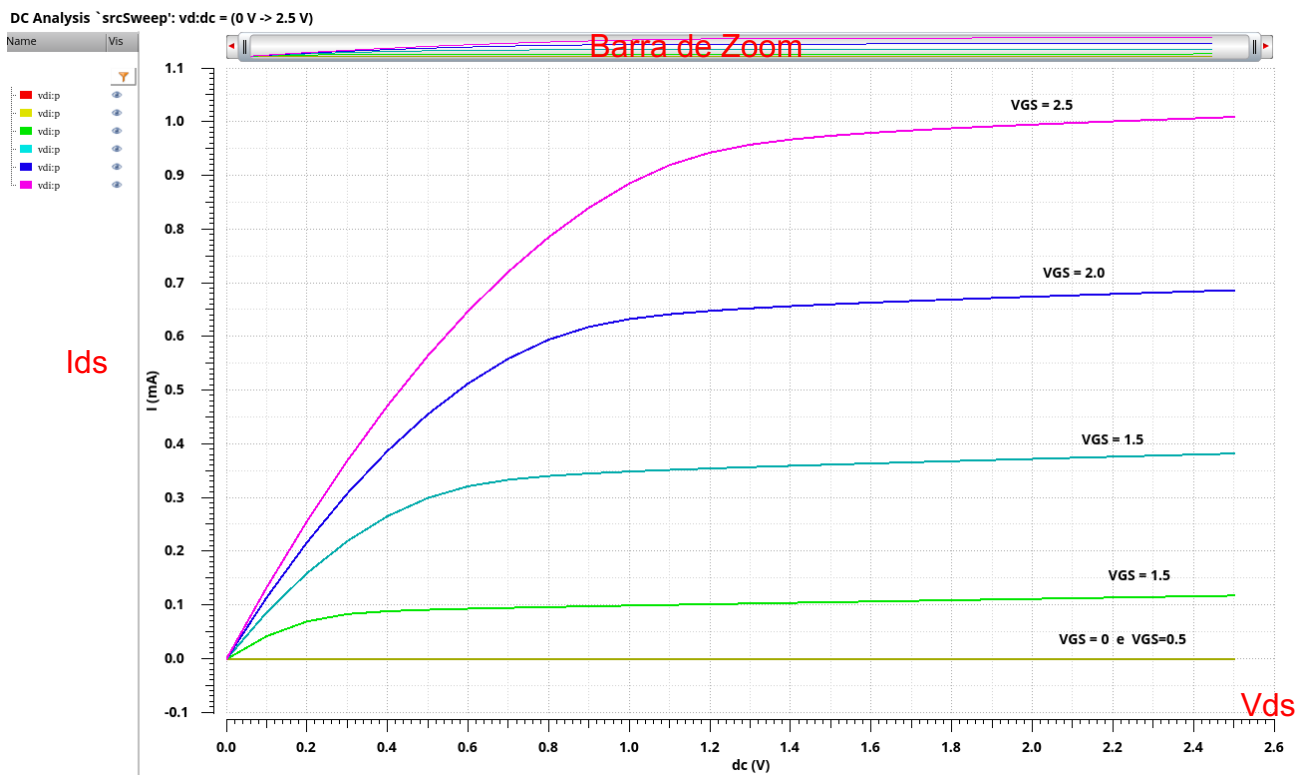
```

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**.



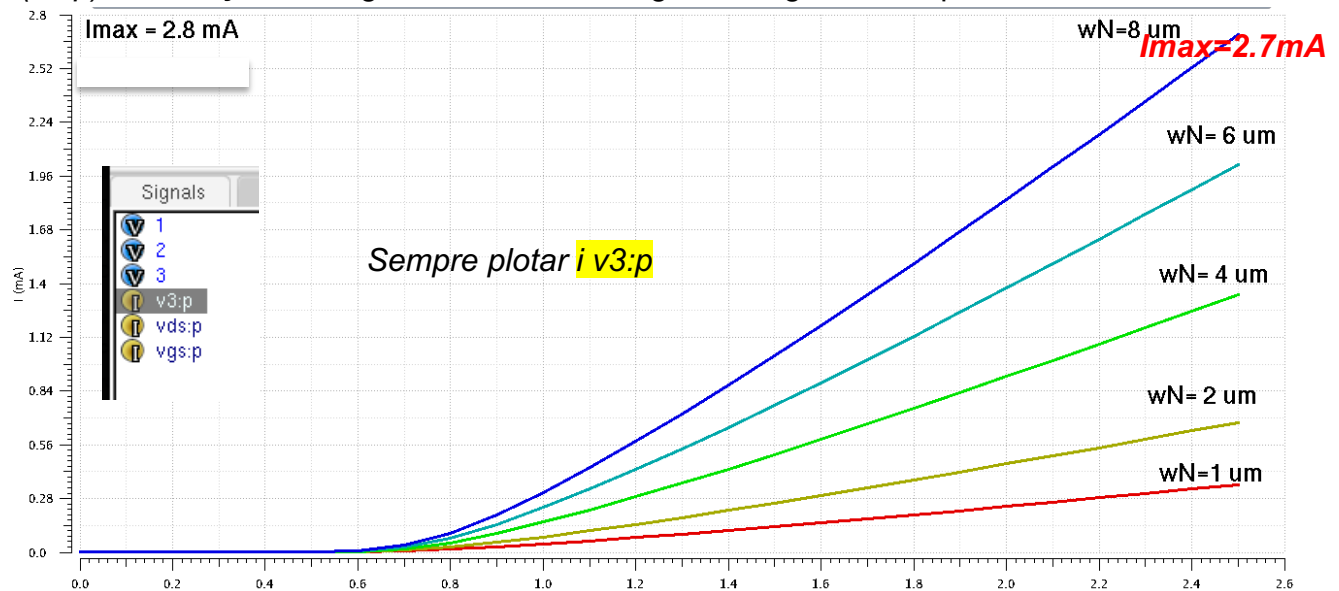
Observar que no eixo x temos  $V_{DS}$  variando de 0 a 2.5 volts, e no eixo y a corrente  $I_{DS}$ . Cada simulação é dada por uma cor.

### 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 – buscar no livro texto a equação de corrente (apresentar no relatório) para embasar a resposta.

## 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:

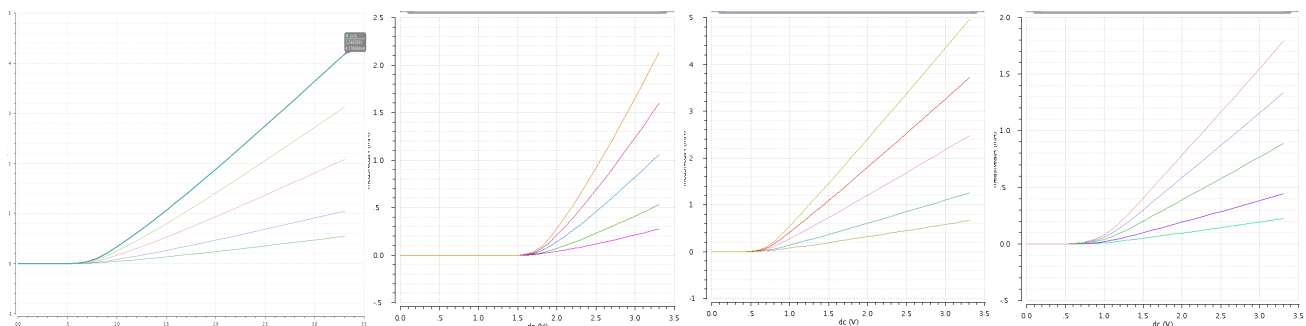


Observar na simulação o momento em que o transistor começa a conduzir ( $V_{TH0} = 0.5048265$ ), e o efeito do tamanho do transistor (W) na corrente. Observar que o W não influi na tensão de *threshold*, pois este é um parâmetro da tecnologia.

**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

VTH0 = XXX (alterado) U0=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: “**U0= 1245 (\*3)**” (mobilidade multiplicada por três). **Além de inserir os labels de W nas 4 simulações, inserir label com a corrente máxima, como acima (Imax=2.7 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 dreno 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**