

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA

Gean Lucas Rafael Espindola
Leocardia Szeskoski
Paulo José da Rosa Neto



Departamento Acadêmico de Eletrônica
Eletrônica Analógica I
Professor Daniel Lohmann

ESTUDO DE TRANSISTORES - NMOS

Florianópolis
2020



Parte 1

1. Quais os os parâmetros L, W, u_o , C_{ox} , V_A e V_t ?



$L = 1\mu m$ $W = 1\mu m$ $u_o = 400\text{ cm}^2/V$ $C_{ox} = \frac{0,4654}{400 * 10^{-2}} = 1,16 * 10^{-1} F/m^2$ $V_A =$ Valor não encontrado $V_{t0} = 2,154\text{ V}$ [$V_{tmin} = 1,0\text{ V}$ $V_{tmax} = 2,5\text{ V}$]	
$L = 0,1\mu m$ $W = 0,3\mu m$ $u_o = 650\text{ cm}^2/V$ $C_{ox} = \frac{3,09 * 10^{-7}}{650 * 10^{-2}} = 4,75 * 10^{-8} F/m^2$ $V_A =$ Valor não encontrado $V_{t0} = 2,014\text{ V}$ [$V_{tmin} = 1,0\text{ V}$ $V_{tmax} = 2,5\text{ V}$]	

2. Calcule o valor de R_{DS} para as tensões V_{GS} de 2V, 3V, 4V, 5V e 10V.

Utilizando os valores de k_p , conforme retirado do datasheet e aplicando a equação $R_{DS} = 1/(k_p * W/L * (V_{GS} - V_T))$ obtêm-se os seguintes valores.

FABRICANTE	R_{DS} [Ω]	V_{GS} [V]
	-13,953	2
	2,5398	3
	1,164	4
	0,75499	5
	0,27386	10
	-693,48	2
	9,8466	3
	4,8886	4
	3,2514	5
	1,2157	10

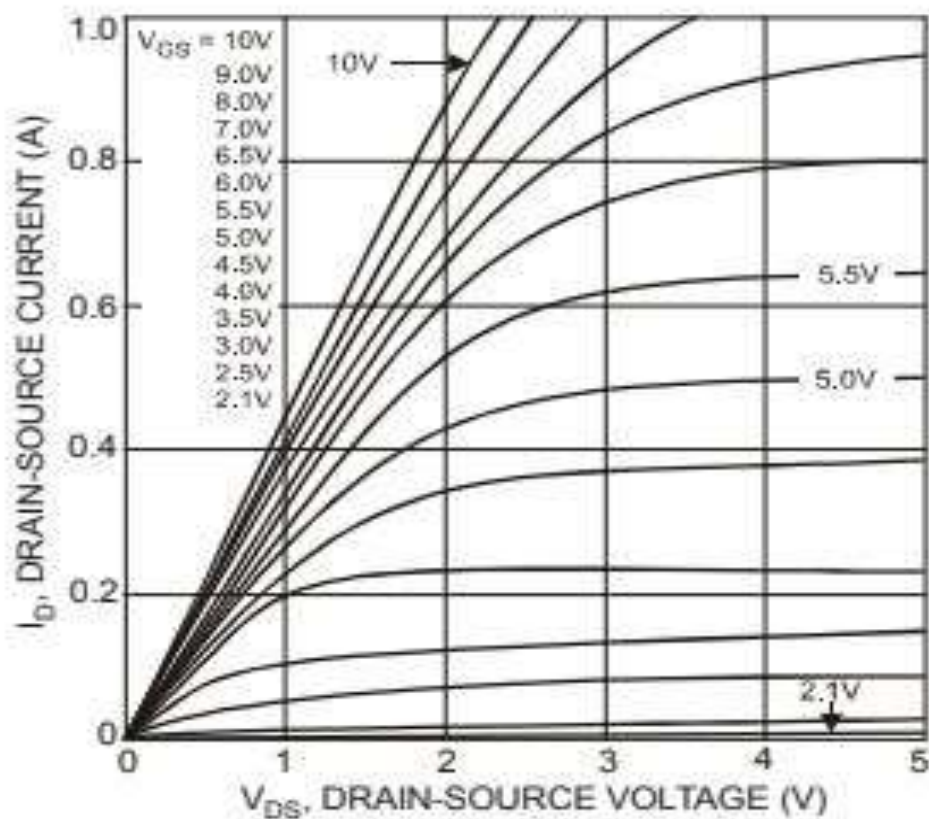
3. Quais as tensões máximas de operação deste componente?

$V_{DS} = 60\text{ V}$ $V_{DG} = 60\text{ V}$ $V_{GS} = + - 20\text{ V}$	
$V_{DS} = 60\text{ V}$ $V_{DG} = 60\text{ V}$ $V_{GS} = + - 30\text{ V}$	

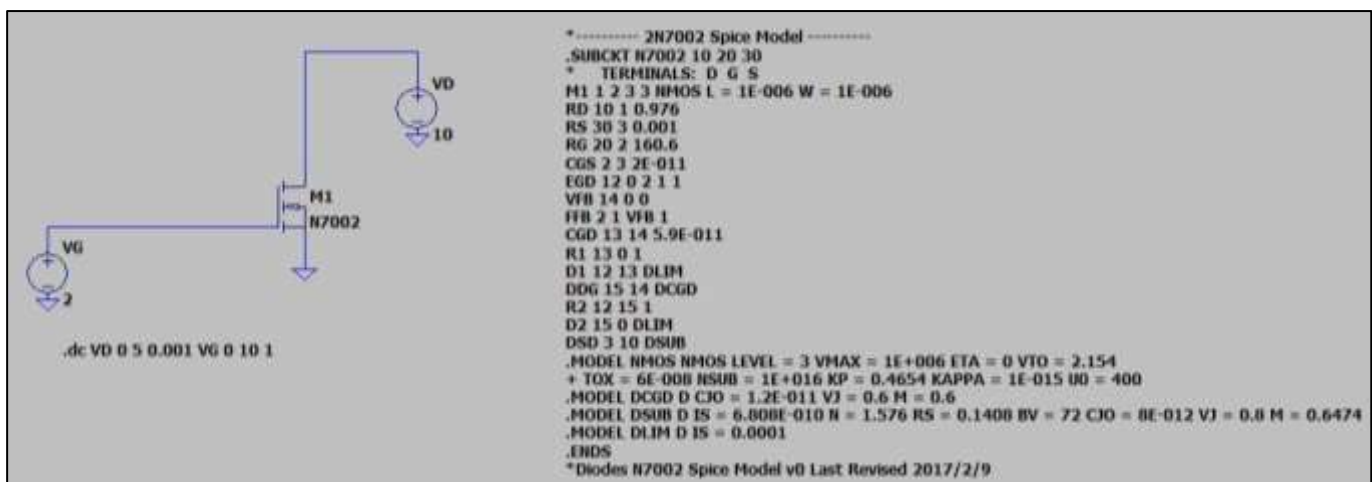
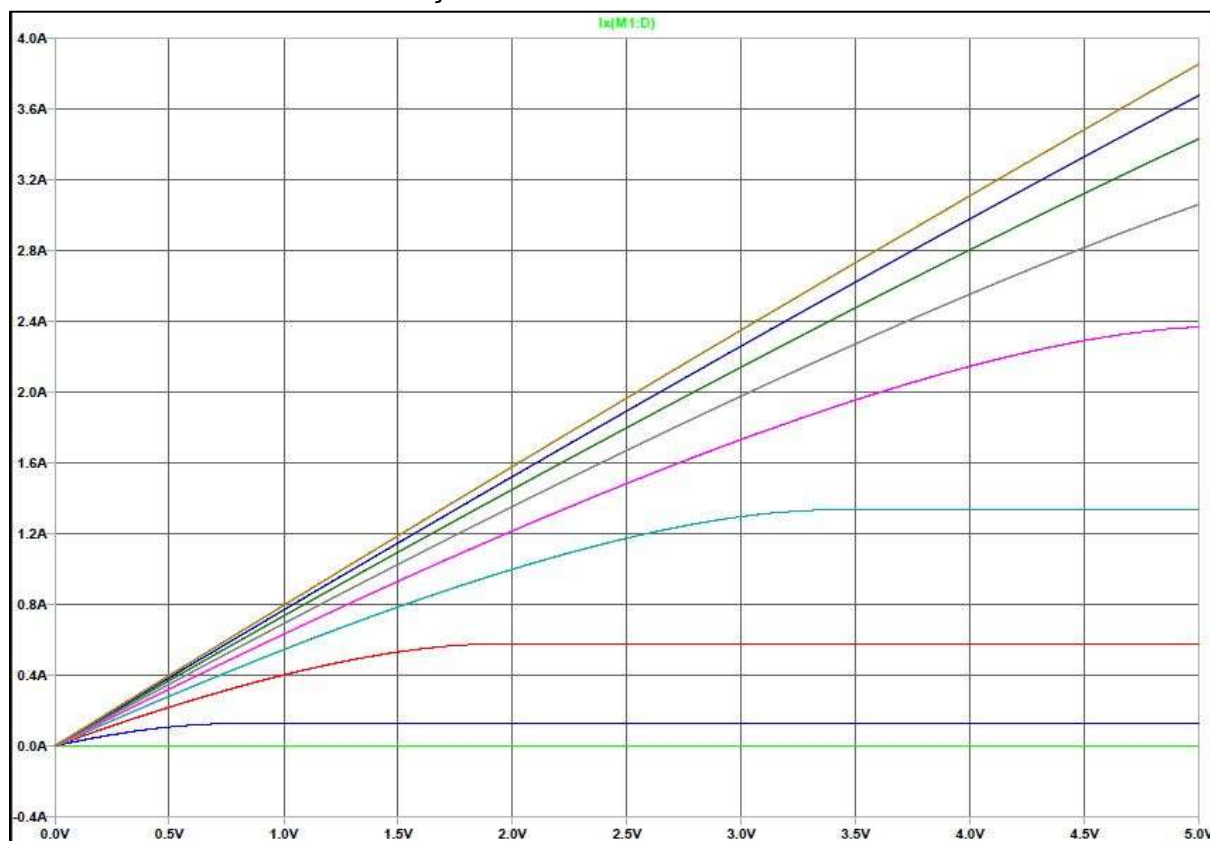
4. Obtenha as curvas I_D x V_{DS} para esse componente para as tensões V_{GS} de 2V, 3V, 4V, 5V e 10V e compare os resultados com as curvas presentes no Datasheet.

DIODES:

Curva I_D x V_{DS} do datasheet:

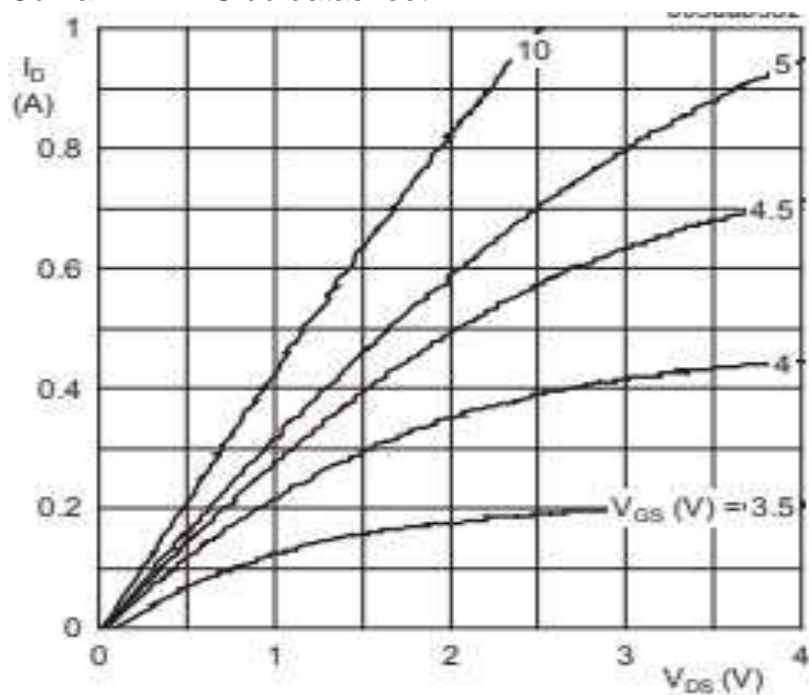


Curva ID x VDS simulação:

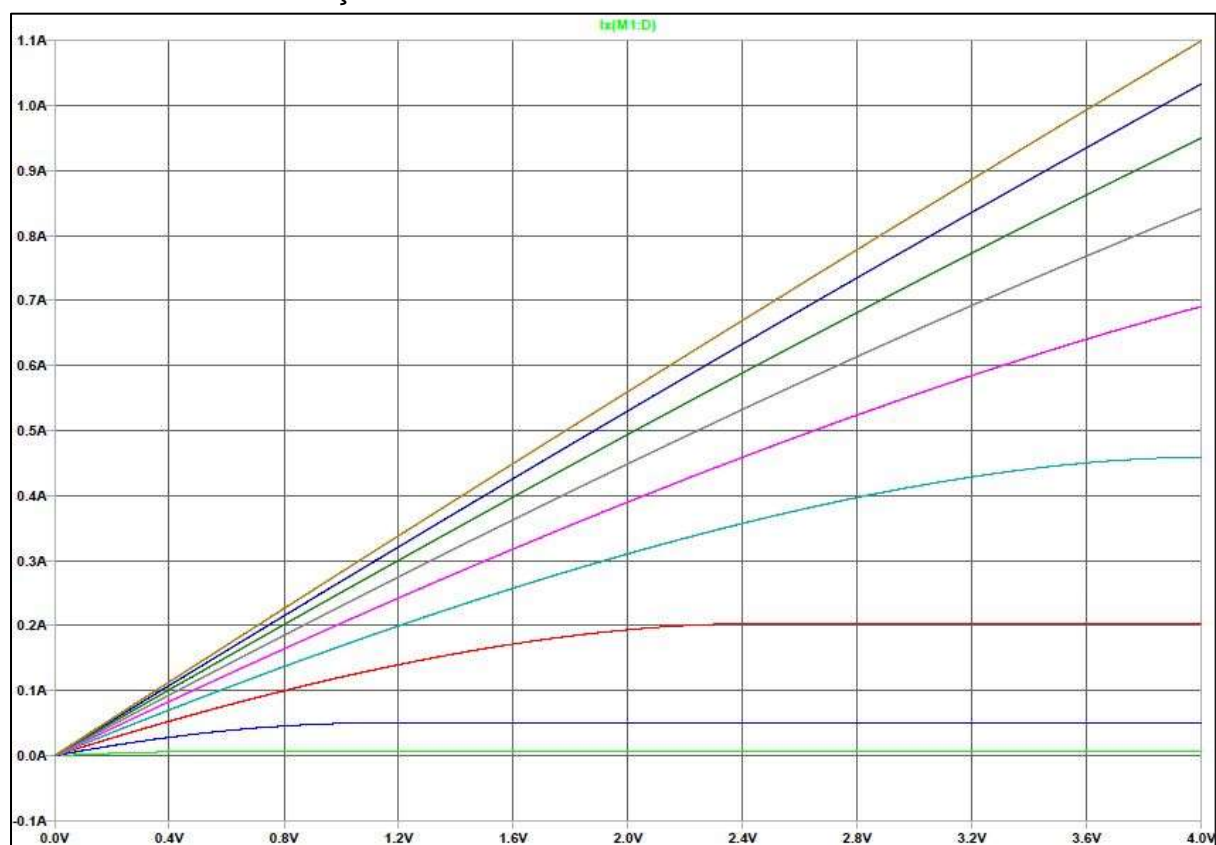


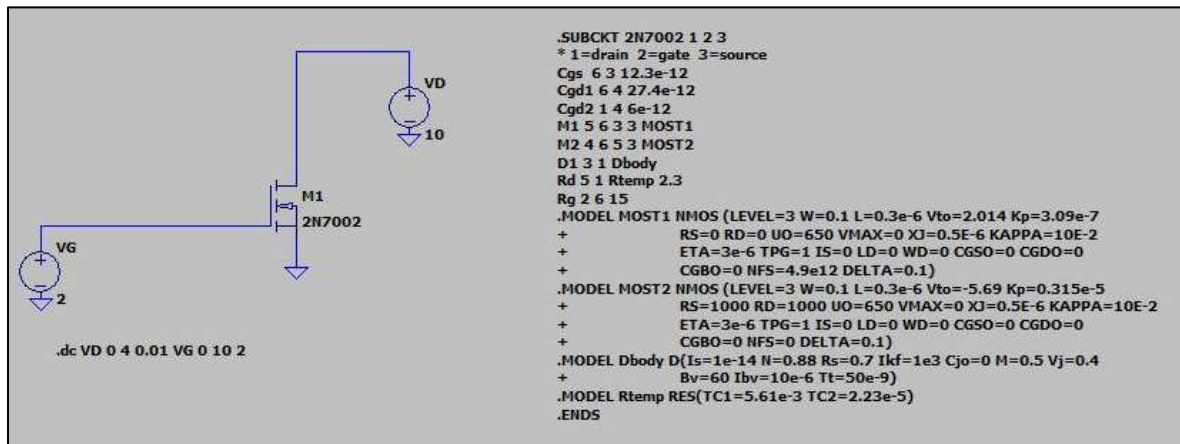
NEXPERIA:

Curva ID x VDS do datasheet:



Curva ID x VDS simulação:





Ambas as curvas simuladas ficaram um pouco diferentes das curvas do datasheet por conta de alguns parâmetros externos que o software de simulação não considera, por exemplo a temperatura dos componentes, acarretando em algumas diferenças das curvas.

- Utilizando a curva ID x VDS obtenha os valores RDS e compare com os valores teóricos.

Resultados calculados de RDS		
VT0	VGS	RDS
2,154	2	-13,95
2,154	3	2,54
2,154	4	1,16
2,154	5	0,75
2,154	10	0,27



Resultados de RDS obtidos pelas curvas geradas pela simulação					
VGS	VDS1	VDS2	IDS1	IDS2	RDS
2	0,0962	1,2131	4,5130E-10	6,2788E-10	6,3E+09
3	0,0041	0,0127	1,1638E-03	3,5918E-03	3,54203
4	0,0092	0,0254	4,2925E-03	1,1829E-02	2,14964
5	0,0095	0,0714	5,4824E-03	4,1073E-02	1,73923
10	1,3619	2,5738	1,0796E+00	2,0233E+00	1,28416

Resultados calculados de RDS		
VT0	VGS	RDS
2,014	2	-693,48
2,014	3	9,85
2,014	4	4,89
2,014	5	3,25
2,014	10	1,22

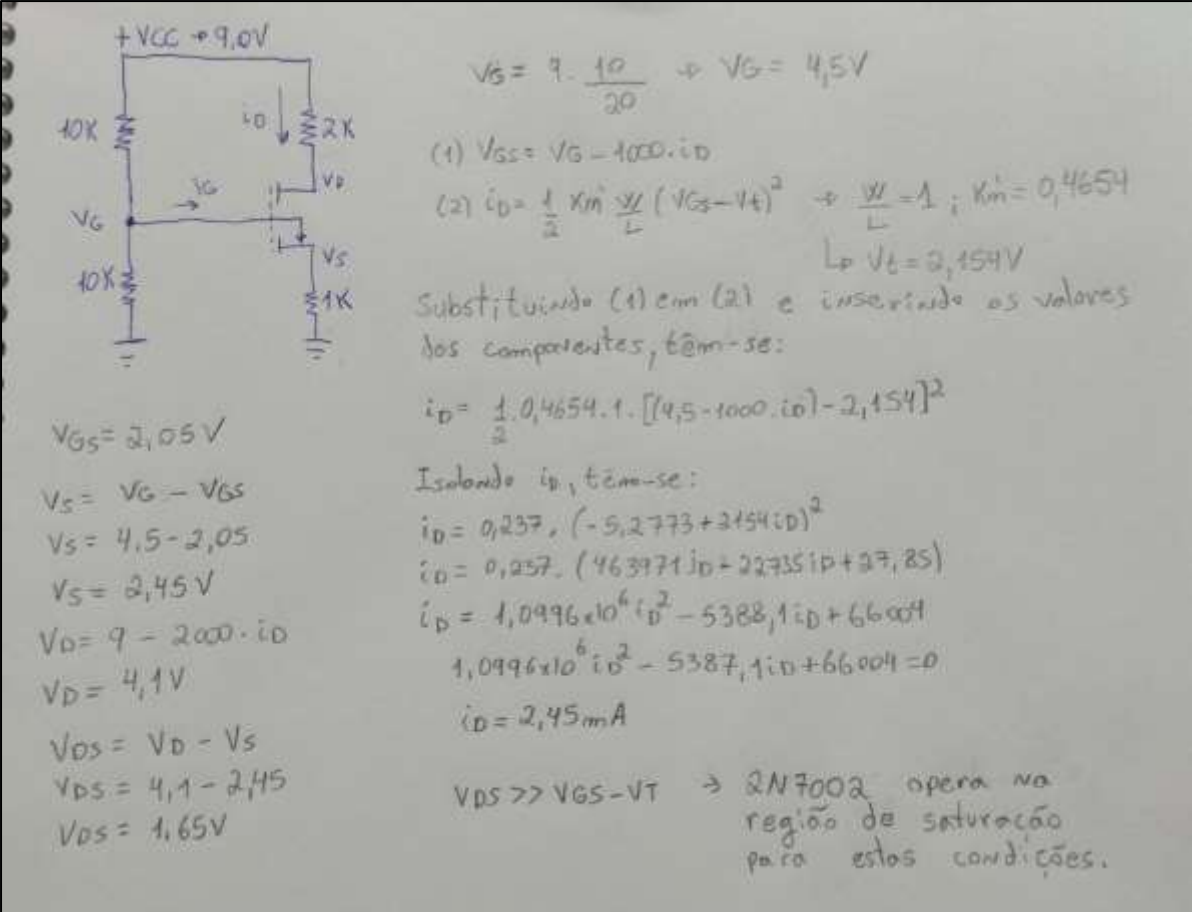


Resultados de RDS obtidos pelas curvas geradas pela simulação					
VGS	VDS1	VDS2	IDS1	IDS2	RDS
2	0,0038	0,0133	8,18779E-05	0,000284563	46,8707
3	0,002	0,0371	0,000164546	0,003016393	12,3078
4	0,472	0,8496	0,06181699	0,1052697	8,68991
5	0,8837	1,2846	0,150471	0,2122815	6,48595
10	1,2109	3,4545	0,06181699	0,9543518	2,51374

Os valores de R_{DS} encontrados a partir das curvas do gráfico $I_D \times V_{DS}$ não são iguais aos valores encontrados teoricamente através da equação $R_{DS} = 1/(k_p * W/L * (V_{GS} - V_T))$, isto se dá pelo mesmo motivo citado anteriormente, o software não considera parâmetros externos na simulação. O valor de R_{DS} para $V_{GS}=2V$ encontrado teoricamente através da equação não deve ser considerado, já que $V_{GS} < V_T$, portanto o valor encontrado na simulação é mais coerente, já que apenas quando V_{GS} é maior que V_T a corrente circula no Dreno de forma significativa.

Parte 2 A - Polarização de transistores do tipo NMOS

1. Simule o circuito da Figura 01, com os seguintes valores: $V_{CC} = 9,0 V$, $R_3 = R_4 = 10 k\Omega$, $R_1 = 2 k\Omega$, $R_2 = 1 k\Omega$.
2. Em qual região o transistor se encontra polarizado?



The image shows a handwritten solution to a circuit problem. On the left is a circuit diagram of an NMOS transistor. The gate is connected to a voltage divider consisting of two 10kΩ resistors connected to a 9.0V source. The drain is connected to a 2kΩ resistor connected to the 9.0V source. The source is connected to a 1kΩ resistor connected to ground. The gate voltage is labeled V_G , the drain voltage is V_D , and the source voltage is V_S . The drain current is i_D .

Below the diagram, the following calculations are shown:

$$V_{GS} = 2,05 V$$

$$V_S = V_G - V_{GS}$$

$$V_S = 4,5 - 2,05$$

$$V_S = 2,45 V$$

$$V_D = 9 - 2000 \cdot i_D$$

$$V_D = 4,1 V$$

$$V_{DS} = V_D - V_S$$

$$V_{DS} = 4,1 - 2,45$$

$$V_{DS} = 1,65 V$$

On the right, the following calculations are shown:

$$V_G = 9 \cdot \frac{10}{20} \Rightarrow V_G = 4,5 V$$

$$(1) V_{GS} = V_G - 1000 \cdot i_D$$

$$(2) i_D = \frac{1}{2} K'_m \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \Rightarrow \frac{W}{L} = 1; K'_m = 0,4654$$

$L_D V_t = 2,154 V$

Substituindo (1) em (2) e inserindo os valores dos componentes, tem-se:

$$i_D = \frac{1}{2} 0,4654 \cdot 1 \cdot [4,5 - 1000 \cdot i_D - 2,154]^2$$

Isolando i_D , tem-se:

$$i_D = 0,237, (-5,2773 + 2154 i_D)^2$$

$$i_D = 0,237 \cdot (463971 i_D^2 + 22735 i_D + 27,85)$$

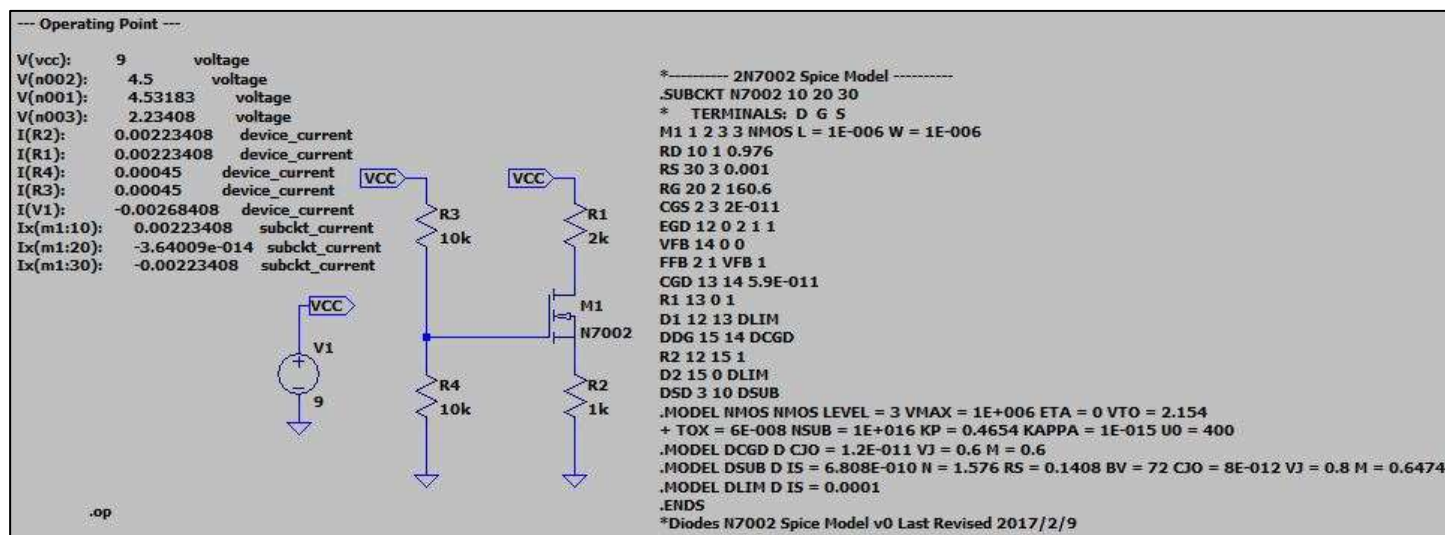
$$i_D = 1,0996 \times 10^6 i_D^2 - 5388,1 i_D + 66004$$

$$1,0996 \times 10^6 i_D^2 - 5387,1 i_D + 66004 = 0$$

$$i_D = 2,45 mA$$

$V_{DS} \gg V_{GS} - V_T \rightarrow 2N7002$ opera na região de saturação para estas condições.

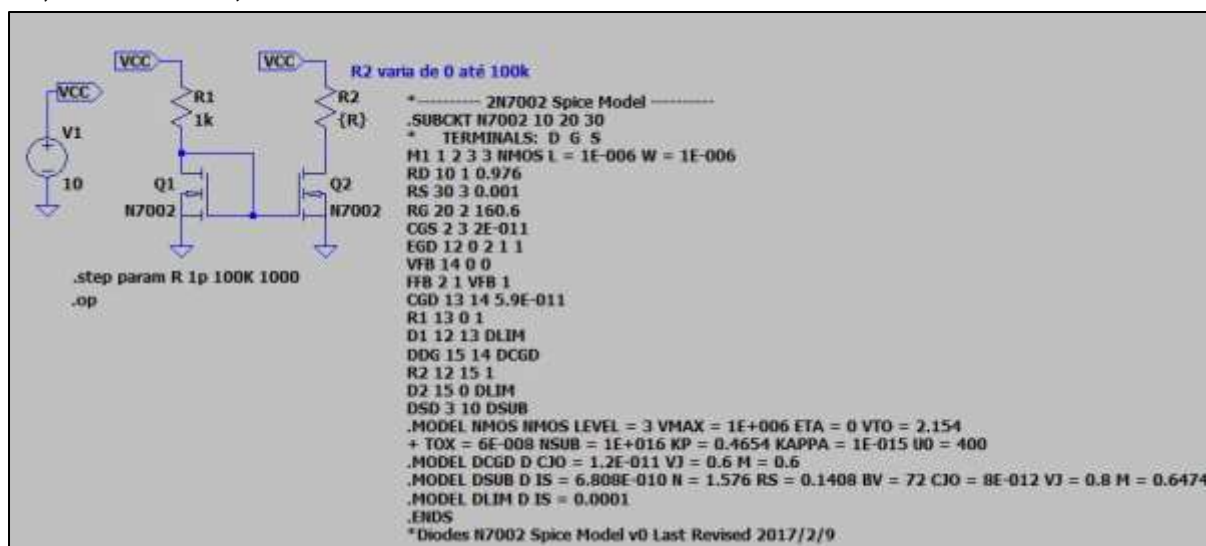
3. Compare os resultados obtidos com os valores teóricos.



Os valores calculados e simulados estão bem próximos.

Parte 2 B - Espelho de corrente com transistores do tipo NMOS

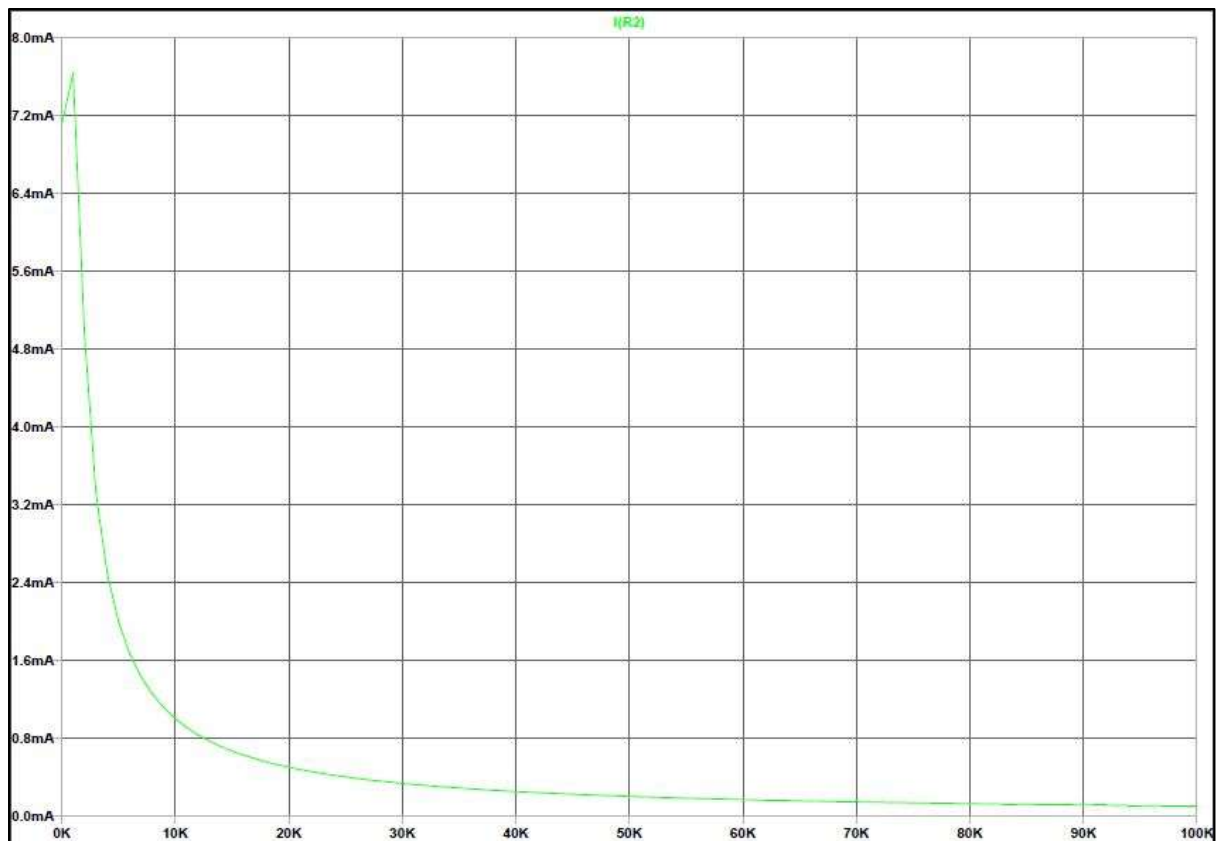
1. Simule o circuito da Figura 02, com os seguintes valores: $R1 = 1,0 \text{ k}\Omega$, $VCC = 10,0 \text{ V}$. Para $R2$, variando entre 0 e $100 \text{ k}\Omega$.



2. Explique o funcionamento deste circuito comparando as correntes $ID1$ e $ID2$.

O terminal Dreno de $Q1$ está ligado no terminal Gate, como a corrente $ID1$ que passa por $Q1$ gera uma tensão V_{GS} (igual para $Q1$ e $Q2$) a corrente $ID2$ que é controlada pela tensão de Gate passa a ser a mesma corrente $ID1$ já que os transistores são idênticos (possuem os mesmos parâmetros).

3. Variando a resistência R2, trace a curva ID2 x V2.



4. Obtenha o máximo valor de R2 para o espelho de corrente funcionar corretamente.

$$I_{REF} = \frac{10 - V_{GS}}{1K} = I_{D2}$$

$$I_{D2} = \frac{1}{2} K_m (V_{GS} - V_t)^2 \rightarrow \frac{V}{L} = 1$$

Para operar corretamente $V_{D2} < V_t$

$$\frac{10 - V_{GS}}{1000} = \frac{1}{2} K_m (V_{GS} - V_t)^2$$

$V_t = 2,154V$
 $K_m = 0,4654$

Isolando V_{GS} , encontra-se

$$V_{GS} = 1,9856V$$

$$V_{GS}' = 2,3188V$$

$$V_{GS}' > V_t \rightarrow I_{REF} = \frac{10 - 2,3188}{1K}$$

$$I_{REF} = 7,6812mA$$

Então $R_2 = \frac{10 - 2,154}{I_{REF}}$

$$R_2 = 10215 \Omega$$

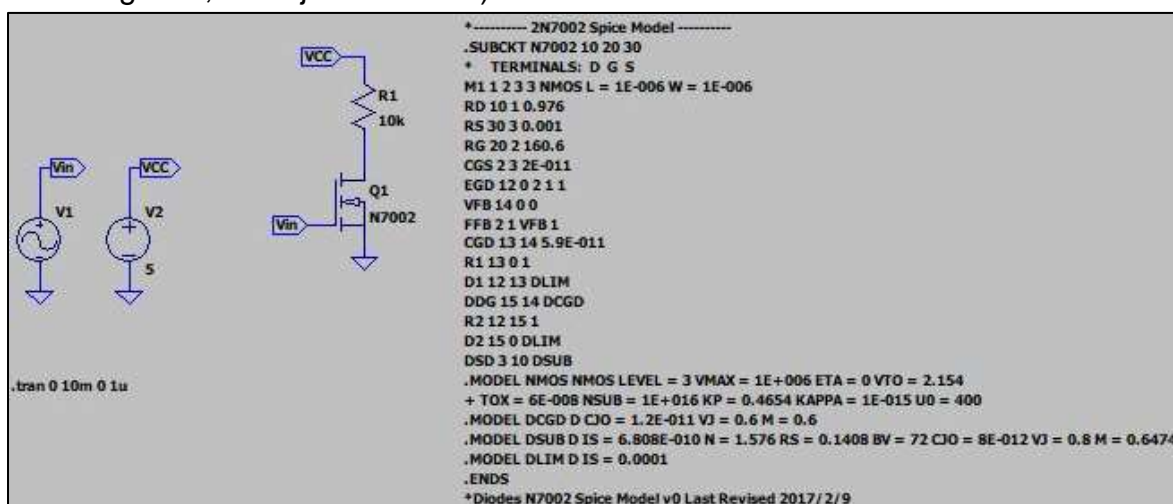
5. Compare os resultados obtidos com a teoria.

R2 = 1021 --- Operating Point ---			R2= 1288 --- Operating Point ---		
V(vcc):	10	voltage	V(vcc):	10	voltage
V(n001):	2.36125	voltage	V(n001):	2.36125	voltage
V(n002):	2.20084	voltage	V(n002):	0.163811	voltage
I(R2):	0.00763875	device_current	I(R2):	0.00763679	device_current
I(R1):	0.00763875	device_current	I(R1):	0.00763875	device_current
I(V1):	-0.0152775	device_current	I(V1):	-0.0152755	device_current

O resultado calculado de máximo valor de R2 para o circuito ainda funcionar como espelho de corrente foi de 1021 ohms, mas através do simulador obtivemos que este máximo se estende para 1288 ohms, isto pode ocorrer pelos mesmos motivos de divergência de dados obtidos através de cálculo e simulação citados anteriormente (motivado por fatores externos).

Parte 3 - Inversor com transistor do tipo NMOS (NMOS Inverter)

1. Simule o circuito da Figura 03, com os seguintes valores: R1 = 10 kΩ e VCC= 5,0 V. VIN = forma de onda quadrada com 1kHz e amplitude de 5,0 Vpp (sem valor negativo, ou seja de 0 a 5V).



2. Compare as formas de onda de entrada e de saída.



3. Obtenha o valor de R_{DS} para esse transistor para esta condição de operação.

$$\begin{aligned}
 V_{GS} &= V_G - V_S \\
 V_{GS} &= 5 - 0 \\
 V_{GS} &= 5V \\
 I_D &= \frac{K'_m}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{th})^2 \\
 I_D &= \frac{0,4654}{2} \cdot (5 - 2,154)^2 \\
 I_D &= 1,8848A \\
 R_{DS} &= [K'_m (V_{GS} - V_{th})]^{-1}; \quad \frac{W}{L} = 1 \\
 \boxed{R_{DS} = 754,99 \text{ m}\Omega}
 \end{aligned}$$

4. Caso sinal de entrada tenha (VIN) a amplitude reduzida para 2,5 V, qual o valor de RDS?

$$\begin{aligned}
 V_{GS} &= V_G - V_S \\
 V_{GS} &= 2,5 - 0 \\
 V_{GS} &= 2,5 \text{ V} \\
 I_D &= \frac{0,4654}{2} \cdot (2,5 - 2,154)^2 ; \frac{W}{L} = 1 \\
 I_D &= 27,858 \text{ nA} \\
 R_{DS} &= [k'_n (V_{GS} - V_{t1})]^{-1} ; \frac{W}{L} = 1 \\
 R_{DS} &= 6,21 \, \Omega
 \end{aligned}$$

5. Compare os resultados obtidos com a teoria.

Para Vin = 5V --- Operating Point ---			Para Vin = 2.5V --- Operating Point ---		
V(vcc):	5	voltage	V(vcc):	5	voltage
V(n001):	4.99999	voltage	V(n001):	4.99999	voltage
V(vin):	0	voltage	V(vin):	0	voltage
I(R1):	7.00821e-010	device_current	I(R1):	7.00821e-010	device_current
I(V2):	-7.00821e-010	device_current	I(V2):	-7.00821e-010	device_current
I(V1):	5.00989e-012	device_current	I(V1):	5.00989e-012	device_current
Ix(q1:10):	7.00821e-010	subckt_current	Ix(q1:10):	7.00821e-010	subckt_current
Ix(q1:20):	-5.00989e-012	subckt_current	Ix(q1:20):	-5.00989e-012	subckt_current
Ix(q1:30):	-6.9581e-010	subckt_current	Ix(q1:30):	-6.9581e-010	subckt_current

A tensão em ambos os casos de manteve constante em aproximadamente 5V. Isto por causa que o RDS é muito pequeno comparado ao R1, acarretando em uma queda de tensão muito pequena.