

ET65A – Eletrônica A

Transistores de Efeito de Campo

Transistores MOSFET

- Transistor de Efeito de Campo (**F**ield **E**ffect **T**ransistor)
- Atualmente é o tipo de transistor mais utilizado
- Seu nome deriva de sua estrutura física, **M**etal-**O**xido-**S**ilício
- Principal vantagem: controlado por tensão e não por corrente, não há corrente na porta (equivalente da base do TBJ)

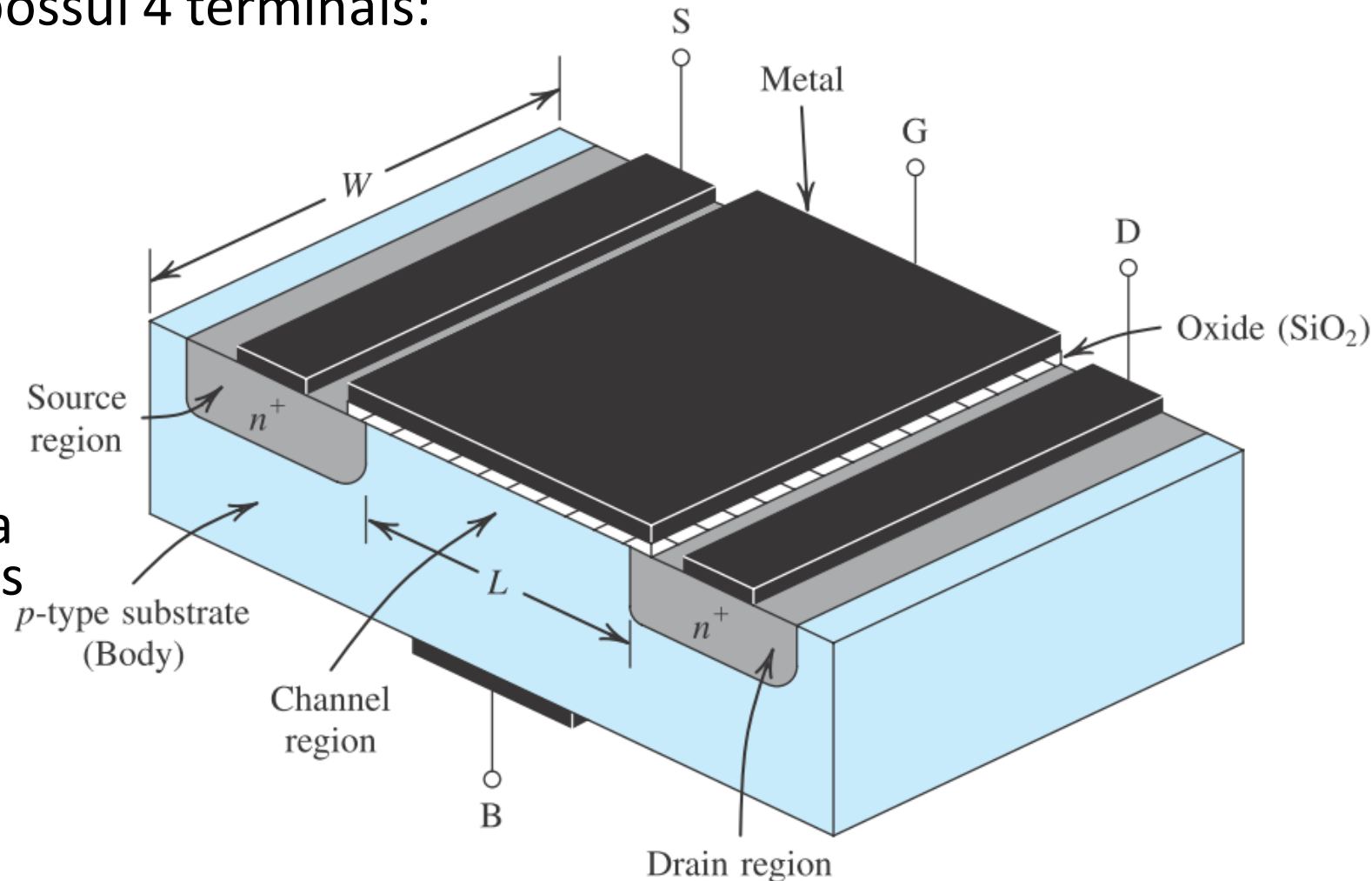
MOSFET

- Internamente o MOSFET possui 4 terminais:

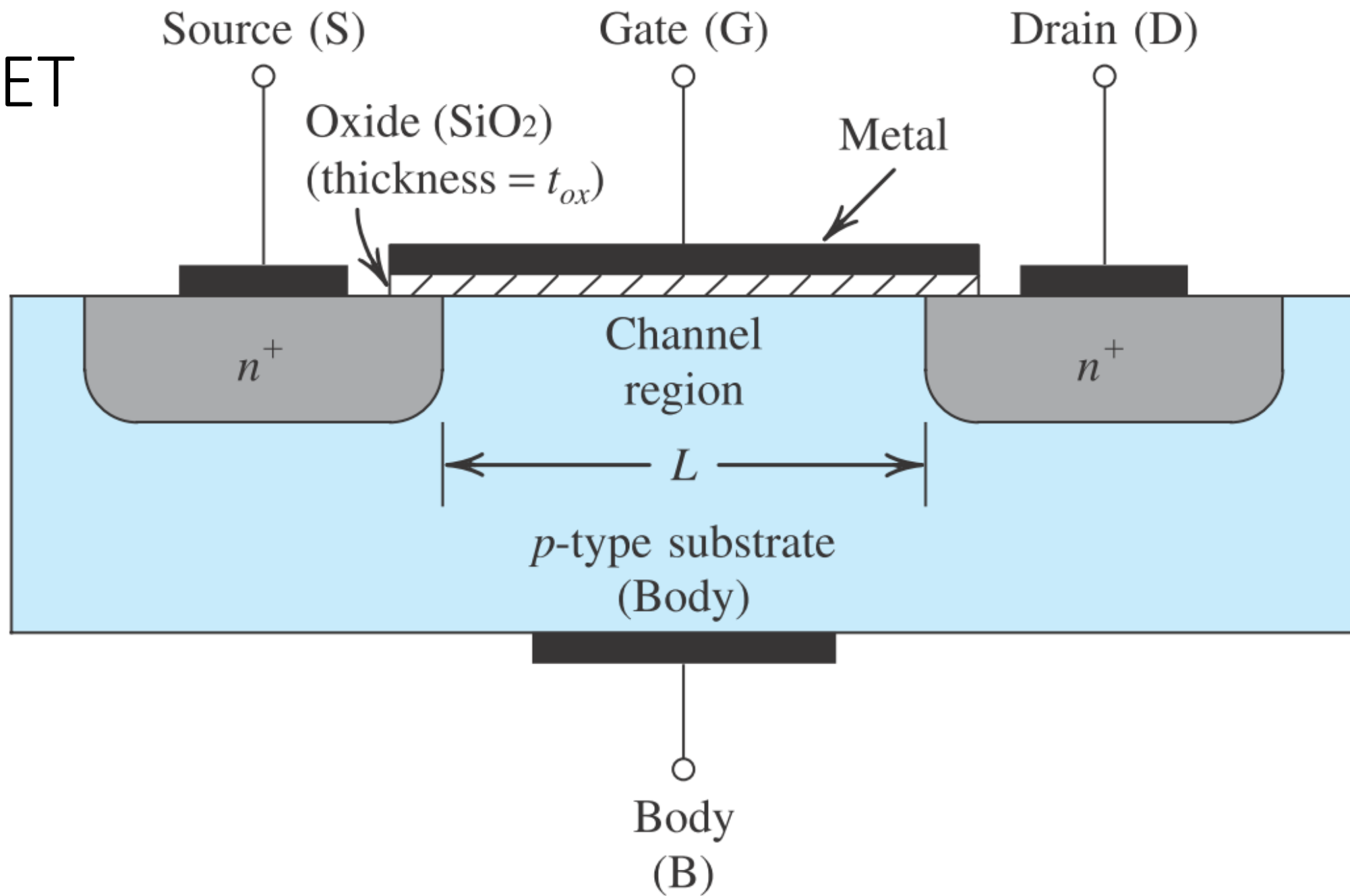
- Fonte (**S**ource)
- Dreno (**D**rain)
- Porta (**G**ate)
- Corpo (**B**ody)

- Entre o terminal de porta e o substrato de silício há uma camada de óxido
- O terminal de Porta (**G**ate) é utilizado para controlar a corrente entre os terminais de Dreno (**D**) e Fonte (**S**)

- MOSFET canal-n →

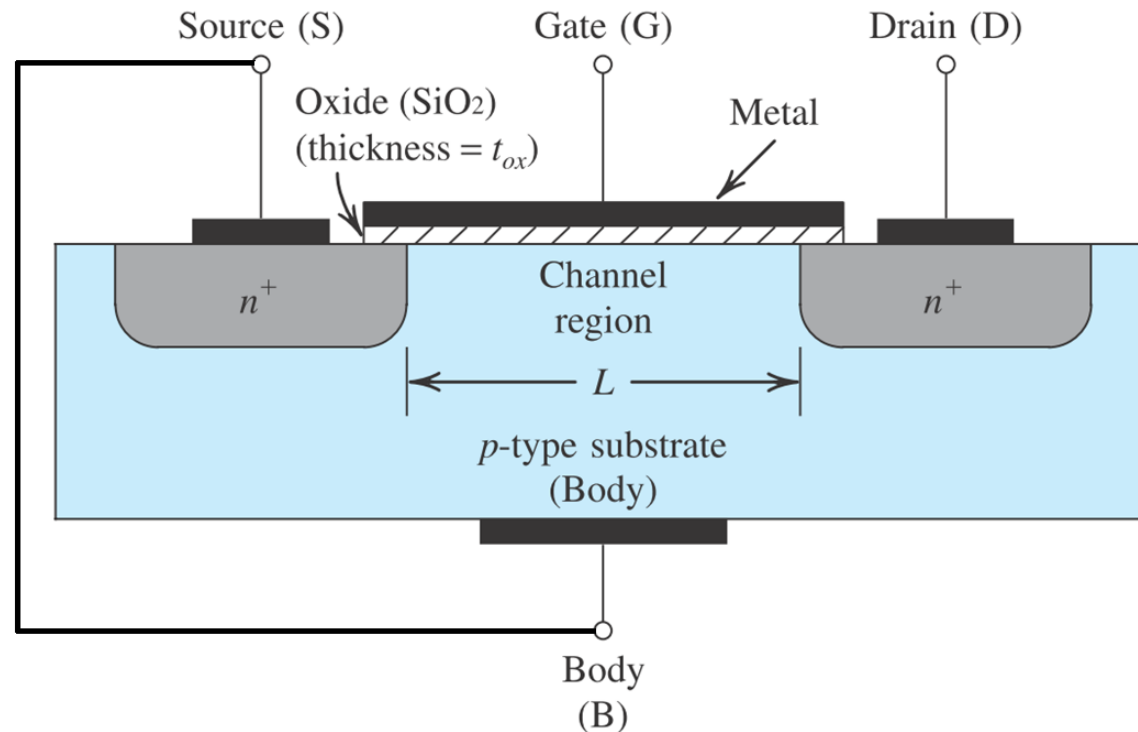


MOSFET



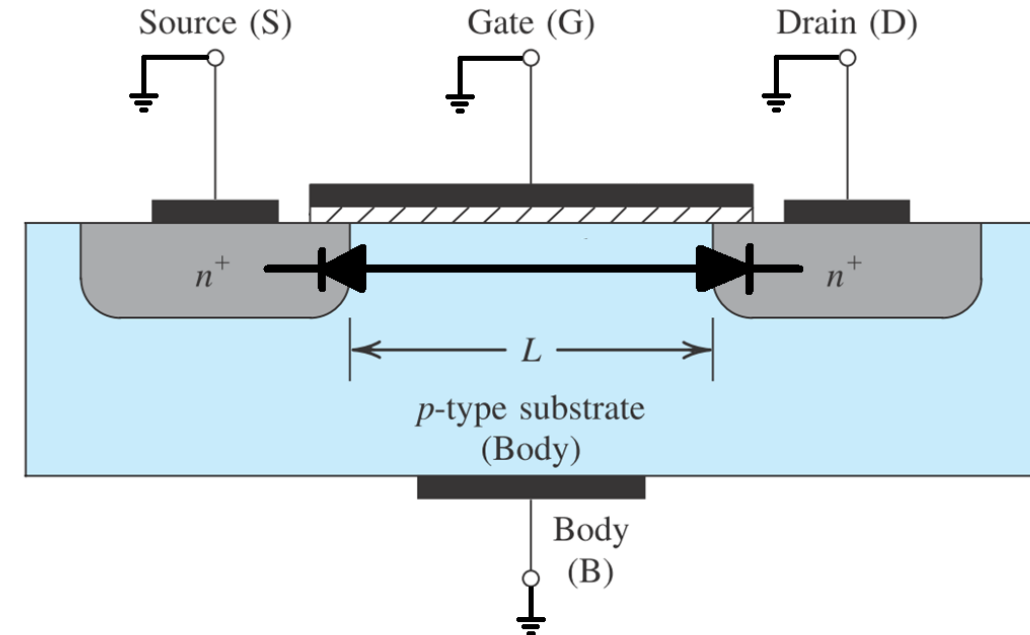
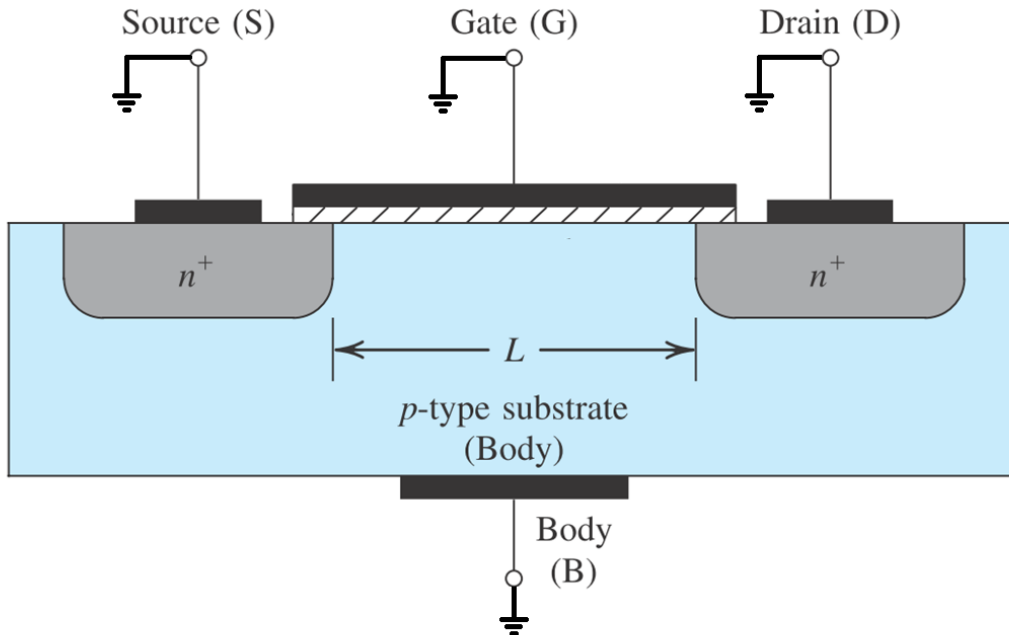
Funcionamento do MOSFET

- O substrato forma junções *pn* com a Fonte e com o Dreno
- Estas junções são mantidas polarizadas reversamente para a operação normal, ligando internamente o terminal do Corpo ao terminal da Fonte



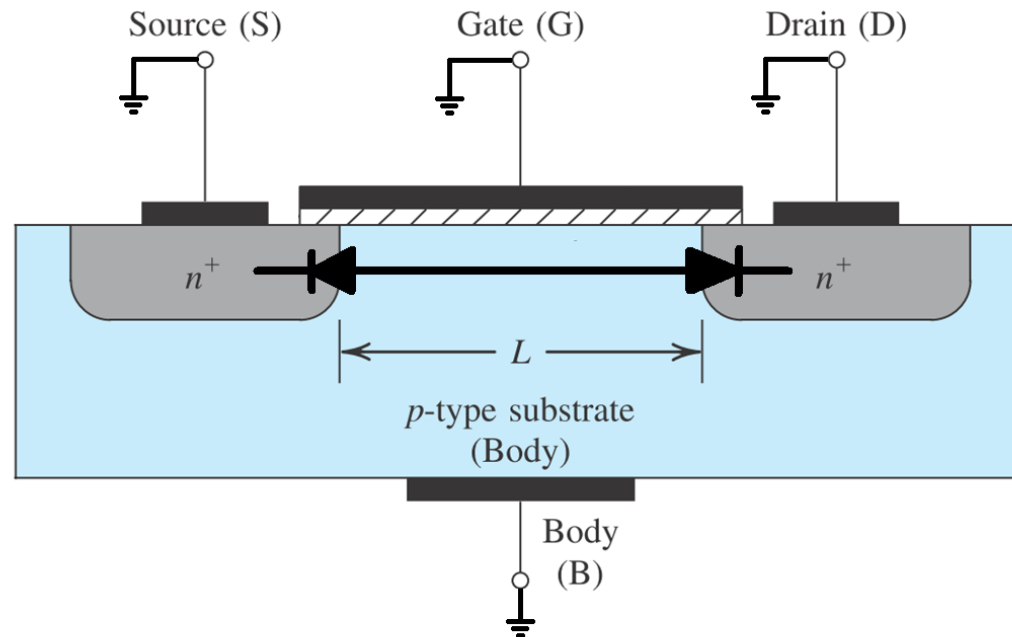
Funcionamento do MOSFET

- Para compreender o funcionamento do MOSFET vamos analisar primeiro o comportamento do dispositivo com todos os terminais aterrados.
- Nesta condição, temos dois diodos ligando o terminal de Fonte ao terminal de Dreno



Funcionamento do MOSFET

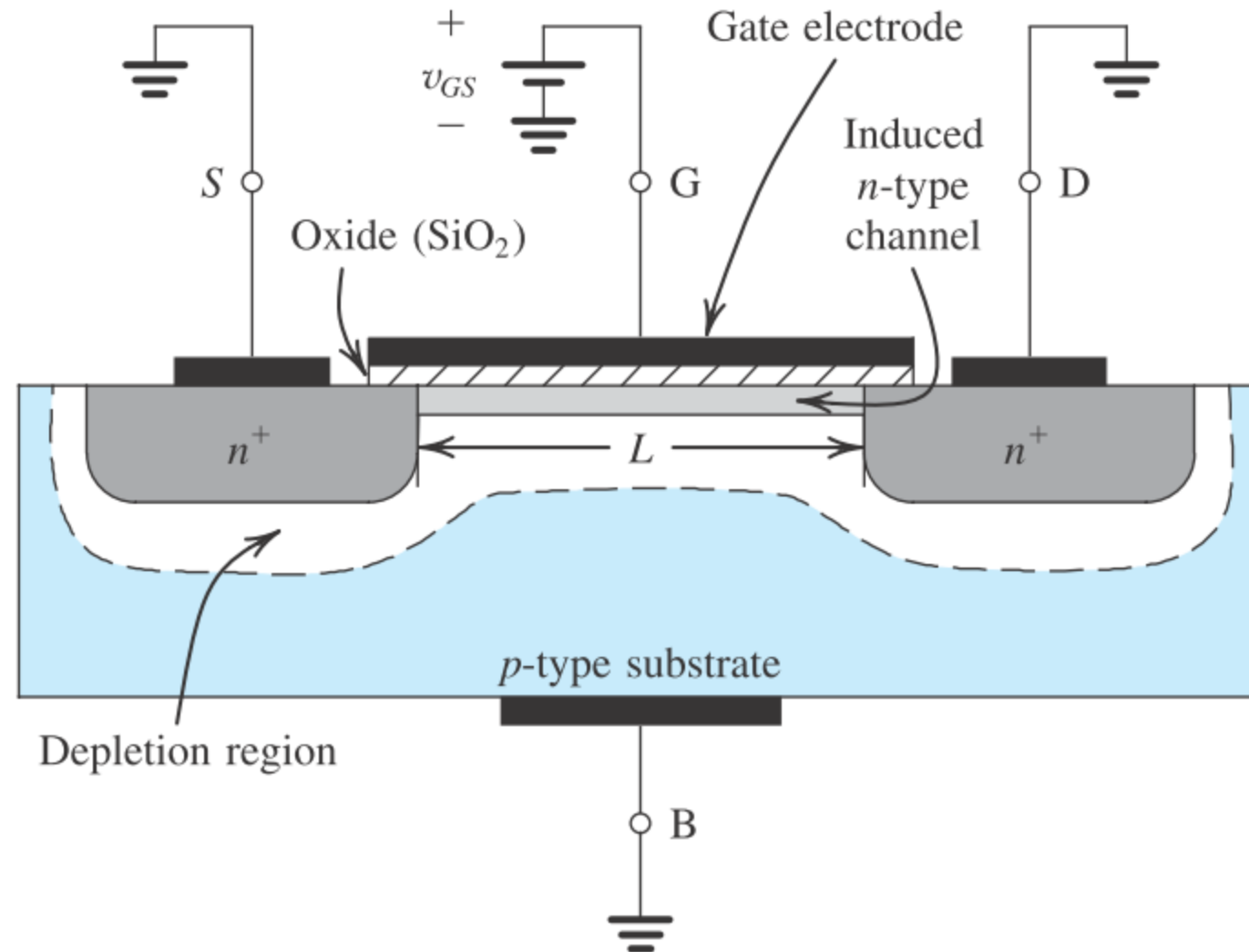
- Note que estes diodos impedem qualquer condução de corrente entre os terminais de Dreno e Fonte, para qualquer valor v_{DS}
- Este caminho apresenta altas resistências, da ordem de $10^{12}\Omega$



Funcionamento do MOSFET

- Aplicando tensão no terminal da Porta (**G**), lembrando que o óxido forma uma camada isolante, o acúmulo de cargas positivas no eletrodo repele as cargas positivas (lacunas) do substrato na região em contato com o óxido
- A carga positiva atrai para esta região os elétrons livres em abundância nas regiões n^+ do dreno e da fonte
- Com portadores o suficiente, uma região n é formada na região, formando um 'canal' entre o dreno e a fonte

Funcionamento do MOSFET



- Como o terminal de Fonte (**S**) é a referência do MOSFET, a tensão na porta (**G**) recebe a sigla v_{GS}

MOSFET

- Note que como o canal induzido forma uma região semicondutora do tipo n, por isso este MOSFET é chamado de 'canal-n', ou ainda de '**NMOS**'
- O canal só permite a passagem de corrente após o acúmulo de uma quantidade suficiente de portadores na região, que acontece na tensão de limiar (**threshold voltage**) V_t .
- A tensão de limiar V_t normalmente está entre 0,3 e 1V
- Não confundir V_t com V_I da física dos semicondutores

MOSFET

- A região do canal forma um capacitor de placas paralelas, onde a tensão controla o campo elétrico entre as placas e o acúmulo de cargas, por isso o transistor é dito como Transistor de Efeito de Campo (**F**ield **E**ffect **T**ransistor) ou **FET**
- O excesso de tensão v_{GS} em relação ao limiar V_t recebe o nome de **Overdrive voltage**, ou v_{OV} , esta tensão define a carga no canal.

$$v_{GS} - V_t \equiv v_{OV}$$

MOSFET

- A carga no canal é dada por onde:

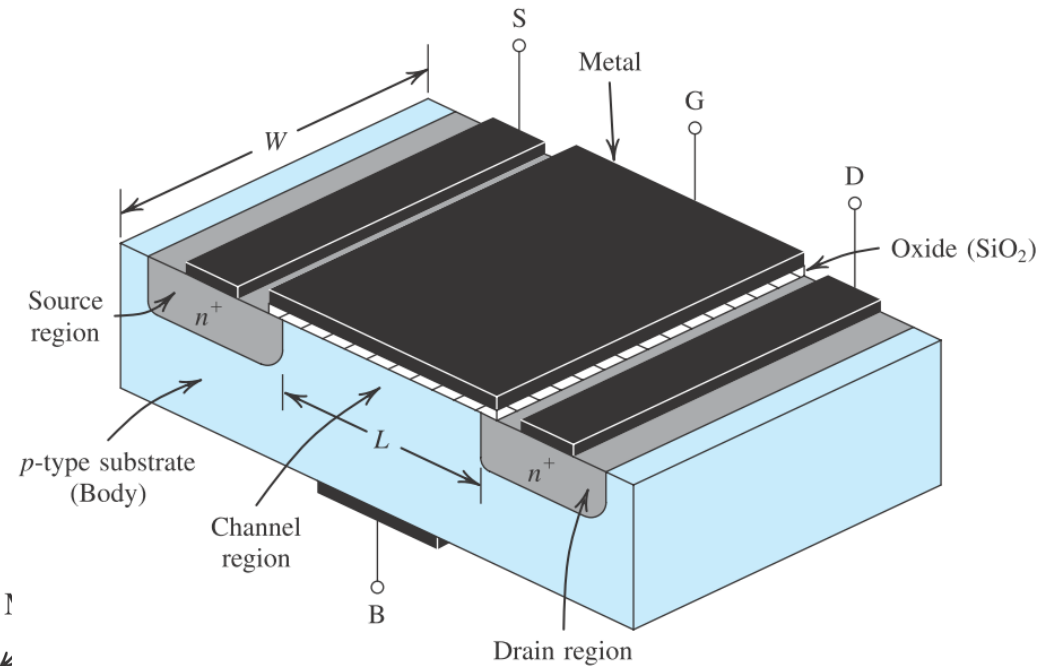
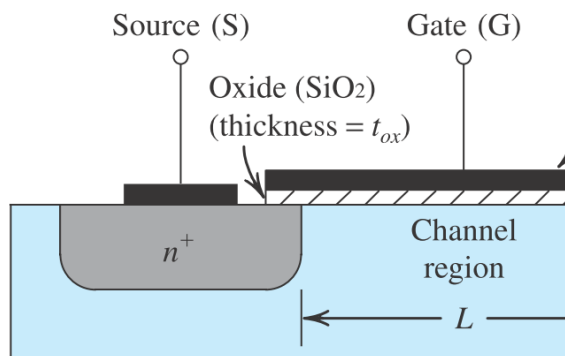
$$|Q| = C_{ox}(WL)v_{ov}$$

- C_{ox} é a capacitância do óxido por área
- **W** a largura e **L** o comprimento do canal

- A Capacitância C_{ox} :

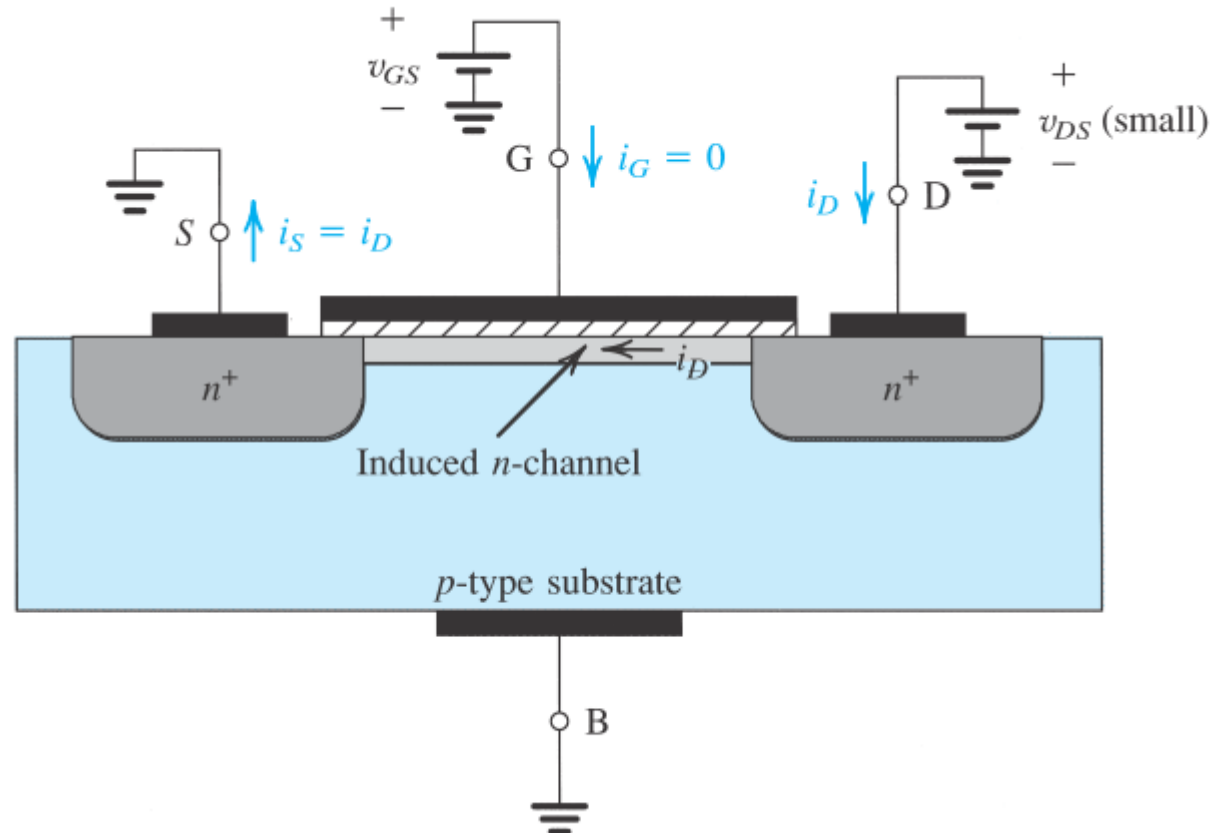
- ϵ_{ox} a permissividade do óxido de silício ($3,45 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}^2$)
- t_{ox} a espessura

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$



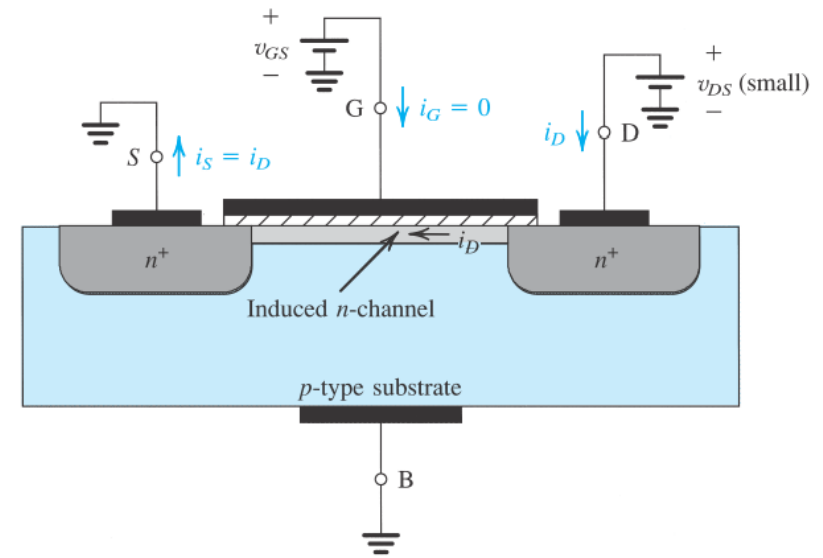
MOSFET

- Aplicando tensão entre o dreno e a fonte



MOSFET

- Com canal induzido por uma tensão maior que a tensão de limiar V_t , há um caminho para corrente entre os terminais de Dreno(D) e Fonte(S)
- Com um pequeno valor de tensão entre Dreno e Fonte teremos corrente entre os terminais, com os elétrons fluindo da Fonte (S) para o Dreno (D), por isso seus nomes.



Pequena tensão em v_{DS}

- O canal se comporta como um resistor, devido à característica do canal de conduzir corrente conforme a mobilidade de elétrons no meio.
- A corrente neste caso é definida como:

$$i_D = \left[(\mu_n C_{ox}) \left(\frac{W}{L} \right) (v_{GS} - V_t) \right] v_{DS}$$

- Portanto temos a condutância do MOSFET:

$$g_{DS} = (\mu_n C_{ox}) \left(\frac{W}{L} \right) (v_{GS} - V_t)$$

- Fica evidente que a condutância é dependente do processo de fabricação e das dimensões do dispositivo.
- O parâmetro k'_n do MOSFET é definido como **transcondutância do processo**, com unidade (A/V²) (n → canal n)

$$k'_n = \mu_n C_{ox}$$

- A transcondutância do **processo**, junto com a relação de dimensão física do MOSFET (W/L) definem o **parâmetro de transcondutância do MOSFET**, $k_n = k'_n (W/L)$ (A/V²)
- Por fim a sobretensão $v_{OV} = v_{GS} - V_t$ determina a carga no canal

$$g_{DS} = (\mu_n C_{ox}) \left(\frac{W}{L} \right) v_{OV}$$

Pequena tensão em v_{DS}

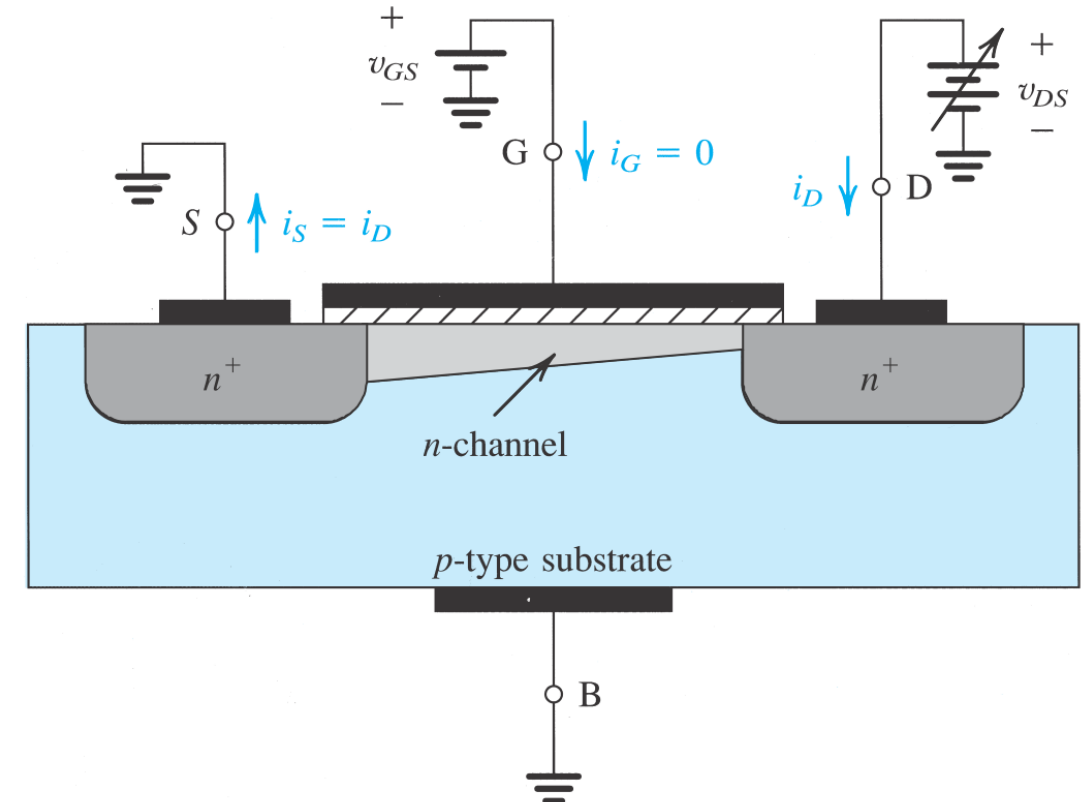
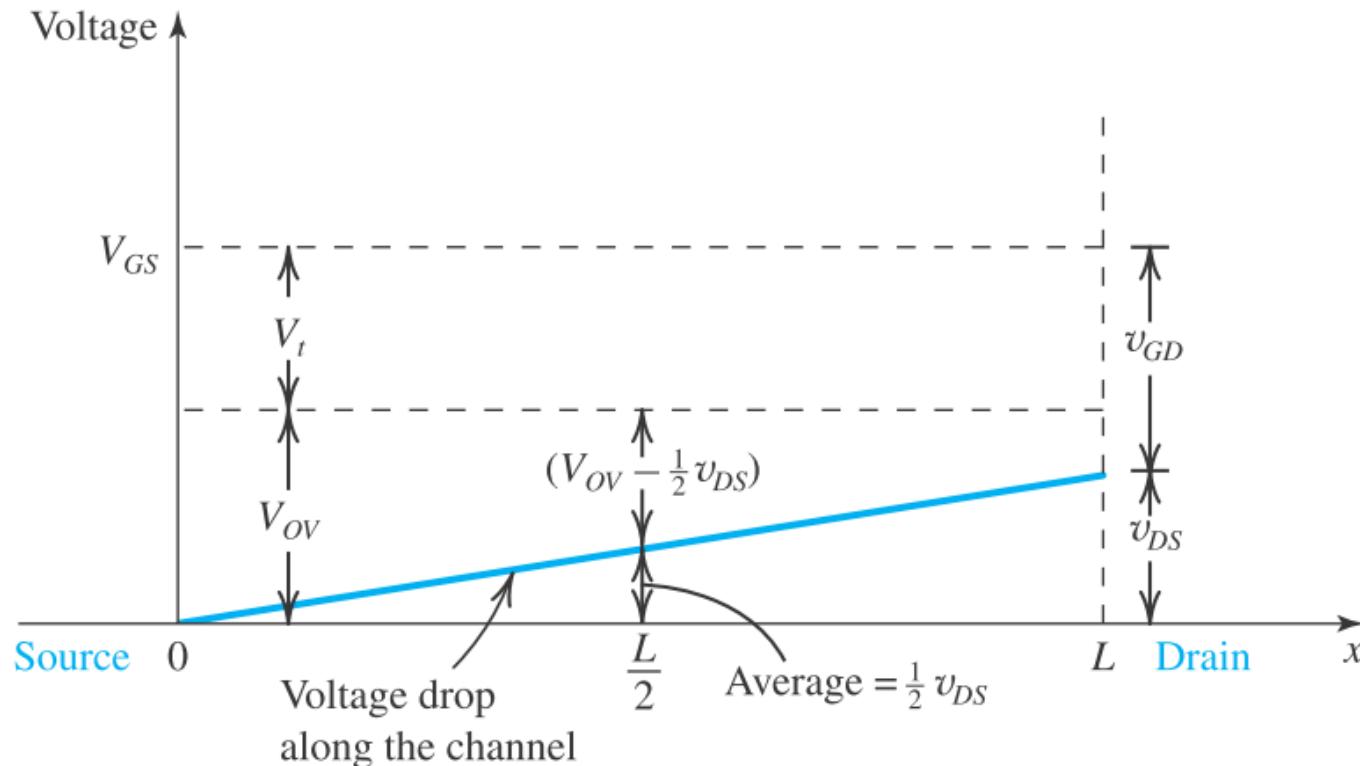
- Podemos observar que nesta condição, o MOSFET se comporta como um resistor, com valor de resistência r_{DS}

$$r_{DS} = \frac{1}{g_{DS}} = \frac{1}{(\mu_n C_{ox})(W/L)v_{OV}} = \frac{1}{(\mu_n C_{ox})(W/L)(v_{GS} - V_t)}$$

- Quanto maior a sobretensão, menor a resistência
- Com v_{GS} menor ou igual que a tensão de limiar o MOSFET apresenta resistência infinita

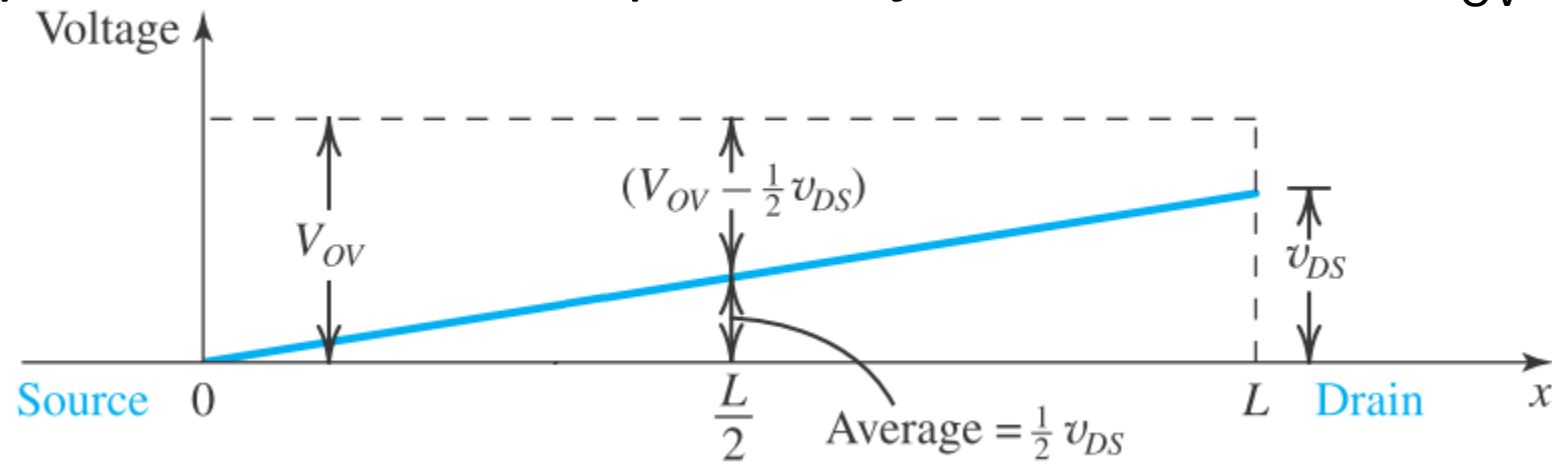
Aumentando a tensão v_{DS}

- O comportamento do canal será alterado, pois a tensão entre o Dreno e a Fonte aumenta linearmente de 0 a v_{DS} , então a concentração de cargas na região do canal, que depende da sobretensão, vai diminuir conforme a tensão aumenta no sentido do Dreno.



Aumentando a tensão v_{DS} – Região TRIODO

- Com o aumento da tensão no Dreno, o canal muda de formato, passando a algo mais parecido com um trapézio, cuja altura média é $V_{OV} - (\frac{1}{2})v_{DS}$



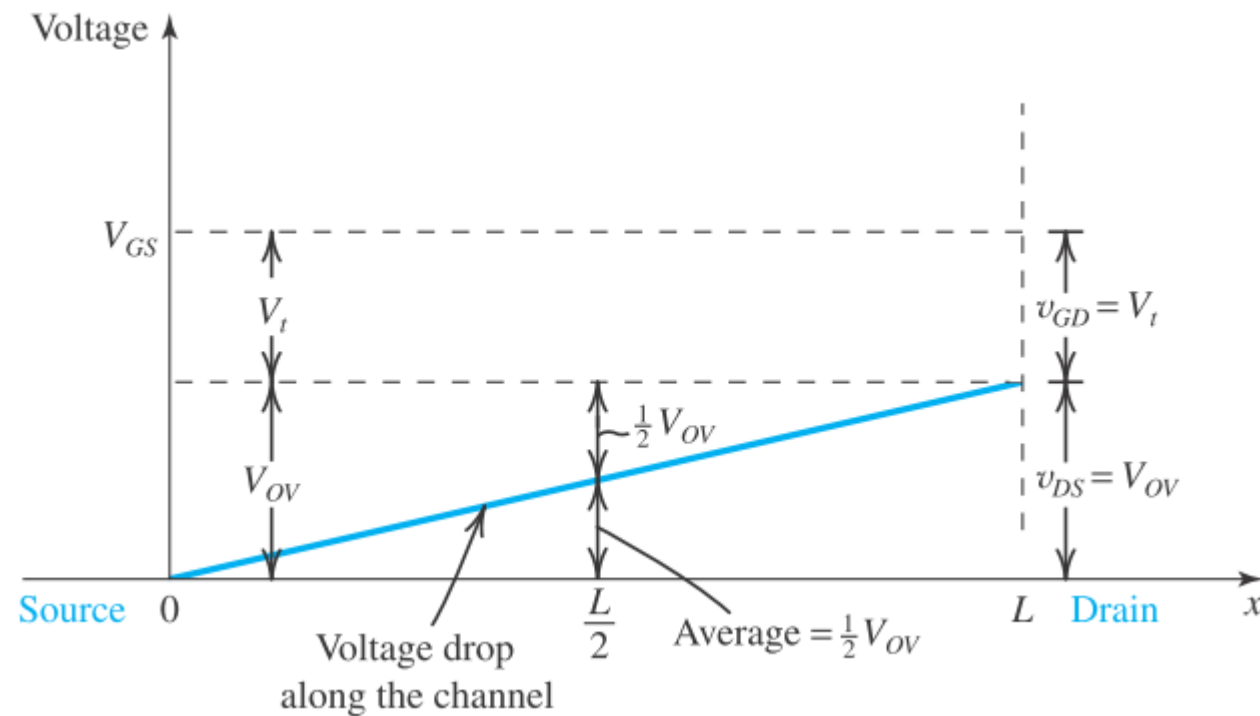
- Assim o comportamento da corrente acompanha essa relação:

$$i_D = k'_n \left(\frac{W}{L} \right) \left(V_{OV} - \frac{1}{2} v_{DS} \right) v_{DS}$$

- Quanto maior o V_{DS} , maior a resistência do canal

Aumentando V_{DS} além de V_{OV}

- Quando a tensão v_{DS} tem mesma a magnitude de V_{OV} , o canal assume a forma de um triângulo e é dito 'estrangulado'



- Aumentando a tensão V_{DS} acima deste patamar não influencia mais o canal e não altera sua resistência, a corrente satura em um valor constante.

Região de saturação

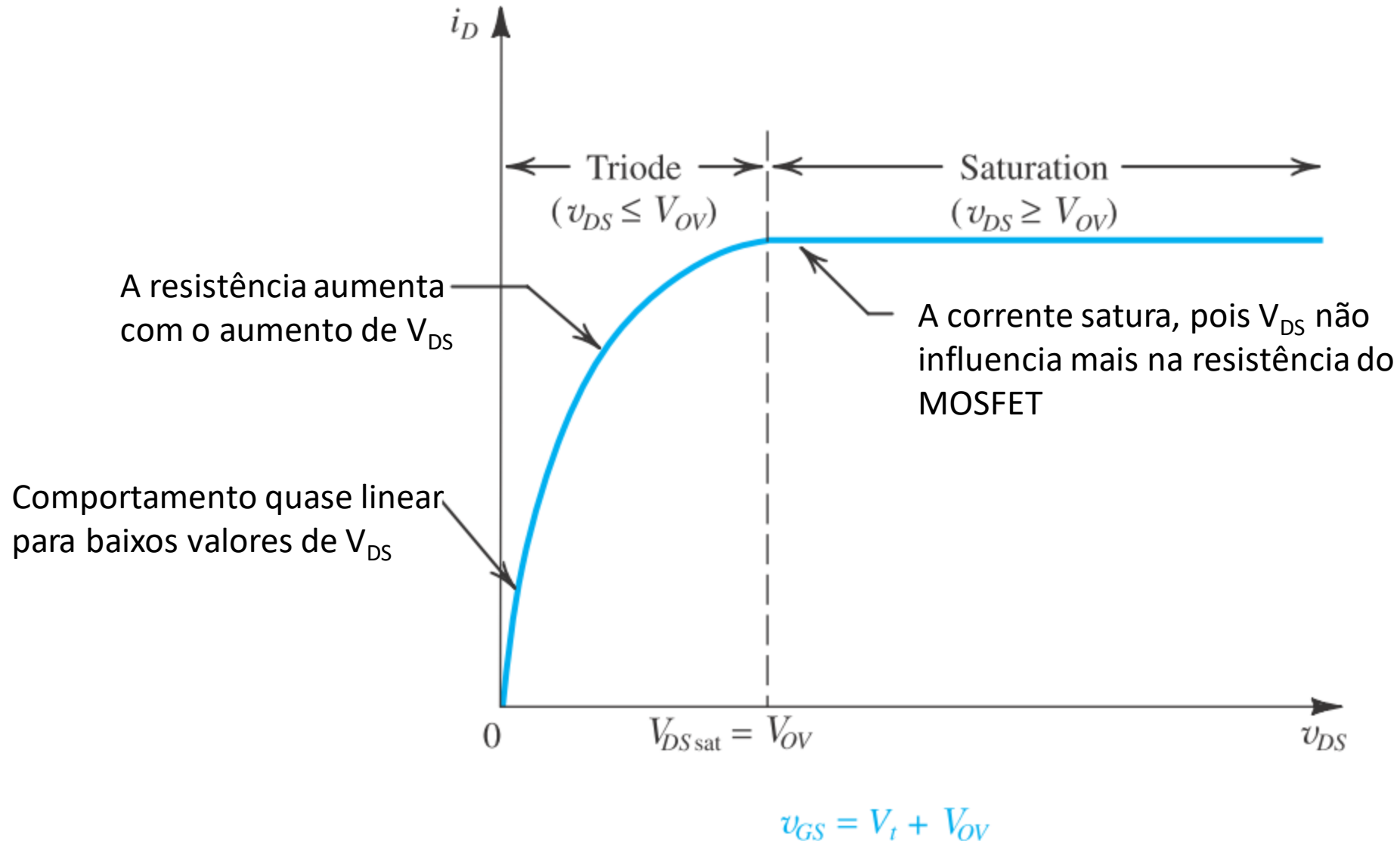
- Assim, no MOSFET, temos uma região chamada de saturação quando a tensão entre a Fonte e o Dreno é maior que a sobretensão na Porta
- A tensão onde esta transição acontece é chamada V_{DSsat}

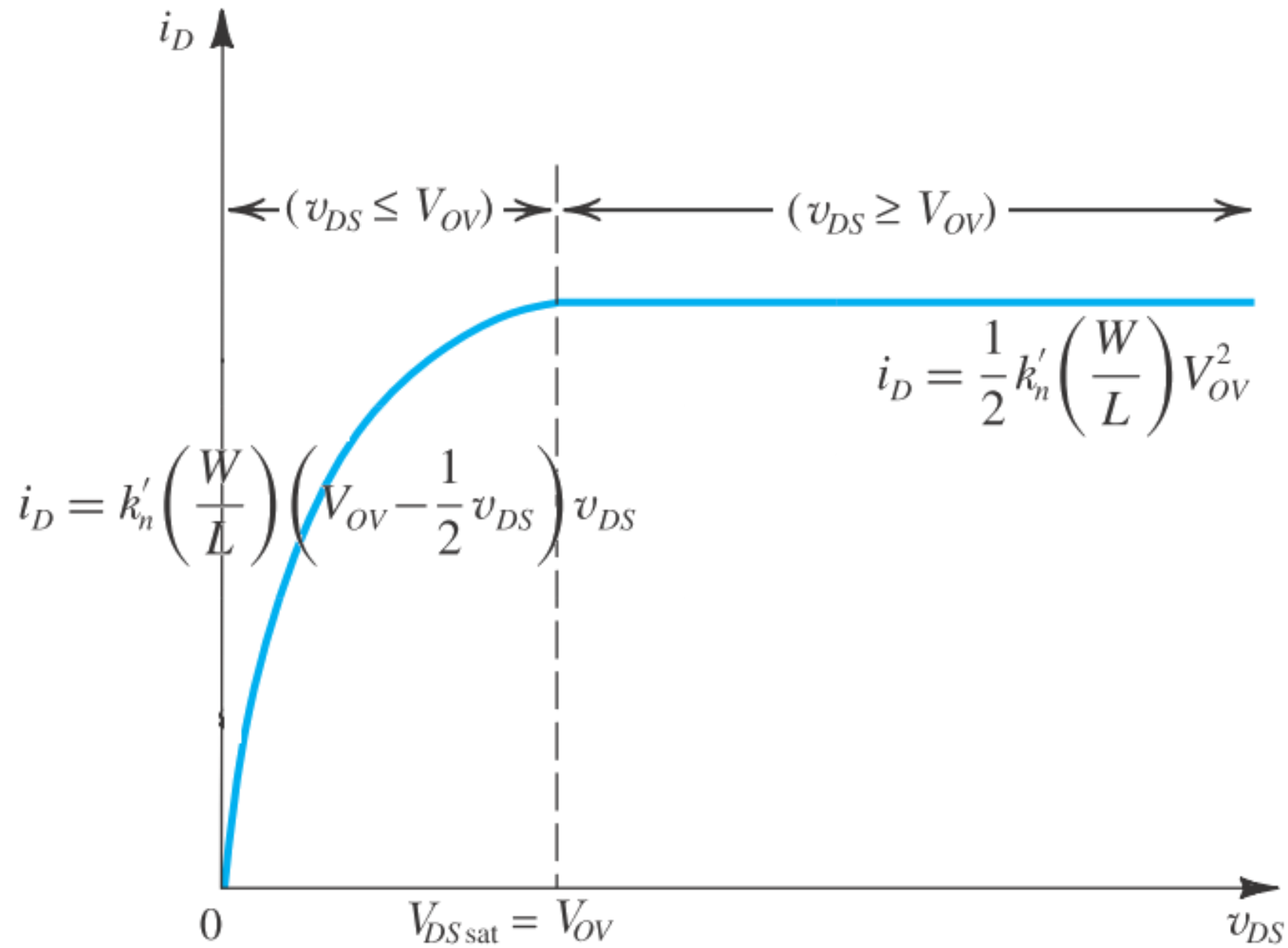
$$V_{DSsat} = V_{OV} = V_{GS} - V_t$$

- Na região de saturação a corrente se mantém constante, independente da tensão V_{DS} , variando apenas conforme a sobretensão V_{OV}

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \left(\frac{W}{L} \right) V_{OV}^2$$

Regiões de operação do MOSFET





$$v_{GS} = V_t + V_{OV}$$

Regiões de operação do MOSFET

Assim temos três regiões de operação do MOSFET:

- CORTE → Quando não há tensão suficiente para induzir o canal

- TRIODO → Comportamento resistivo
$$i_D = k'_n \left(\frac{W}{L} \right) \left(V_{OV} - \frac{1}{2} v_{DS} \right) v_{DS}$$

- SATURAÇÃO → Corrente constante controlada por tensão
$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \left(\frac{W}{L} \right) V_{OV}^2$$

Exemplo

- Considere o transistor com tecnologia:
 $L_{\min}=0.4\ \mu\text{m}$, $t_{\text{ox}}=8\text{nm}$, $\mu_n=450\text{cm}^2/\text{V.s}$ e $V_t=0,7\text{V}$
- A) Calcule C_{ox} e k'_n
- B) Para um MOSFET com $W/L=8\mu\text{m}/0,8\mu\text{m}$, calcule V_{OV} , V_{GS} e o menor valor de V_{DS} para operar em saturação com $I_D=100\mu\text{A}$.
- C) Para o MOSFET do item b), calcule V_{OV} e V_{GS} para operar a 1000Ω para um valor muito baixo de V_{DS}

Exemplo

- Considere o transistor com tecnologia:
 $L_{\min}=0.4 \mu\text{m}$, $t_{\text{ox}}=8\text{nm}$, $\mu_n=450\text{cm}^2/\text{V.s}$ e $V_t=0,7\text{V}$

- A) Calcule C_{ox} e k'_n

$$C_{\text{ox}} = \epsilon_{\text{ox}} / t_{\text{ox}} = 3,45\text{E-}11 / 8\text{E-}9 = 4,32 \text{ E-}3 \text{ F/m}^2 = 4,32\text{fF}/\mu\text{m}^2$$

$$k'_n = \mu_n C_{\text{ox}} = 450(\text{cm}^2/\text{V.s}) \cdot 4,32(\text{fF}/\mu\text{m}^2) \rightarrow \text{precisa adequar as unidades}$$

$$k'_n = 194 \mu\text{A/V}^2 \text{ (F/V.s)}$$

Exemplo

- Considere o transistor com tecnologia:
 $L_{\min}=0.4\text{ }\mu\text{m}$, $t_{\text{ox}}=8\text{nm}$, $\mu_n=450\text{cm}^2/\text{V.s}$ e $V_t=0,7\text{V}$
- B) Para um MOSFET com $W/L=8\mu\text{m}/0,8\mu\text{m}$, calcule V_{OV} , V_{GS} e o menor valor de V_{DS} para operar em saturação com $I_D=100\mu\text{A}$.

Saturação:

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \left(\frac{W}{L} \right) V_{\text{OV}}^2$$

$$100 = \frac{1}{2} \cdot 194 \cdot (8/0,8) \cdot V_{\text{OV}}^2 \rightarrow V_{\text{OV}} = 0,32\text{V}$$

$$V_{\text{OV}} = V_{\text{GS}} - V_t \rightarrow V_{\text{GS}} = 1,02\text{V}$$

O menor valor de V_{DS} para operar em saturação é $V_{\text{DS}}=V_{\text{OV}}$, neste caso: 0,32V

Exemplo

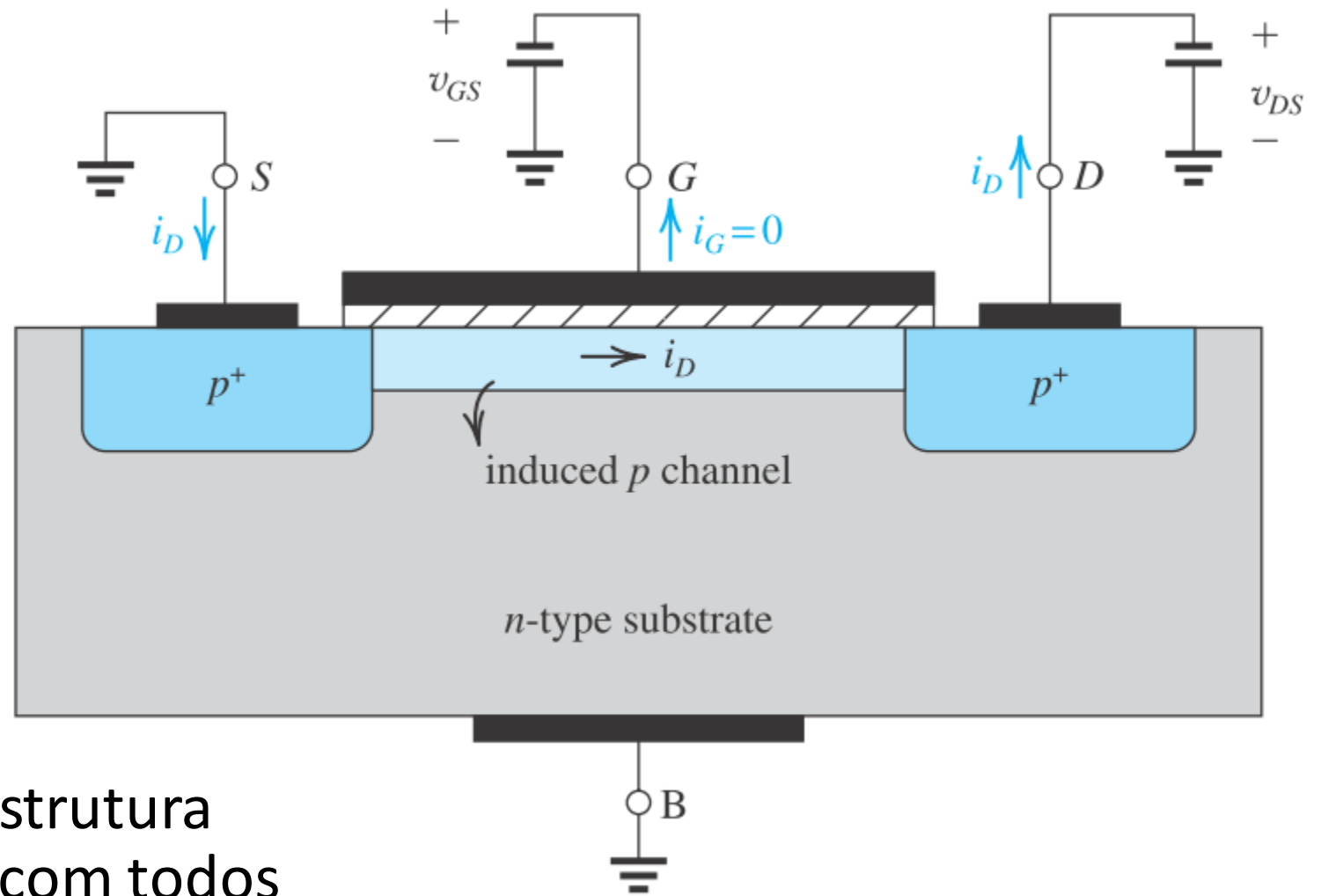
- Considere o transistor com tecnologia:
 $L_{\min}=0.4 \mu\text{m}$, $t_{\text{ox}}=8\text{nm}$, $\mu_n=450\text{cm}^2/\text{V.s}$ e $V_t=0,7\text{V}$
- C) Para o MOSFET do item b), calcule V_{OV} e V_{GS} para operar a 1000Ω para um valor muito baixo de V_{DS}

Neste caso temos operação em TRIODO, com $r_{\text{DS}} = \frac{1}{k'_n \frac{W}{L} V_{\text{OV}}}$

Calculando para $r_{\text{DS}}=1\text{k}$, $V_{\text{OV}}=0,52\text{V}$

Portanto $V_{\text{GS}}=1,22\text{V}$

MOSFET canal-p



- O MOSFET canal-p apresenta estrutura semelhante ao canal *n*, porém com todos os materiais semicondutores invertidos.
- Para induzir canal é necessário que a tensão se suficientemente negativa para induzir um canal formado por lacunas

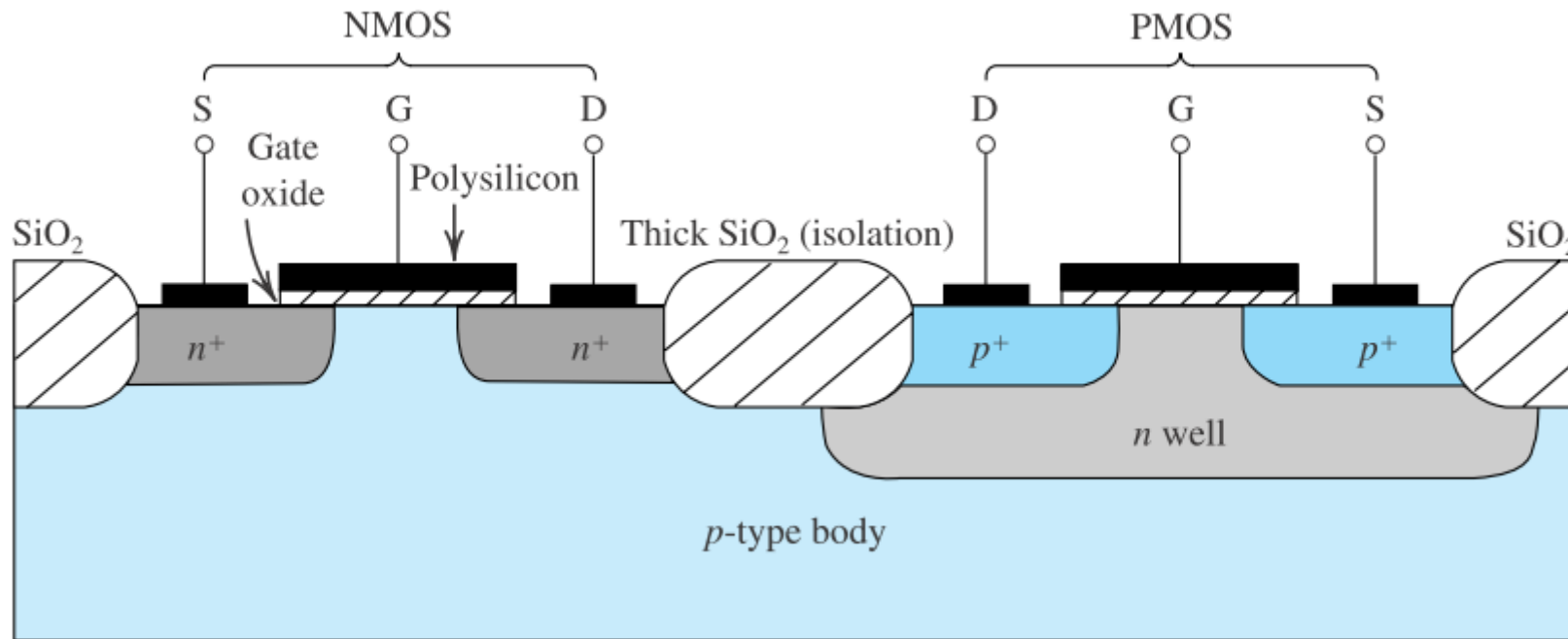
$$\Rightarrow v_{GS} \leq V_{tp}$$

$$k'_p = \mu_p C_{ox}$$

$$k_p = k'_p (W/L)$$

MOSFET complementar (CMOS)

- Uma das principais tecnologias usadas atualmente em circuitos digitais, com transistores NMOS e PMOS elaborados simultaneamente



MOSFET tipo enriquecimento

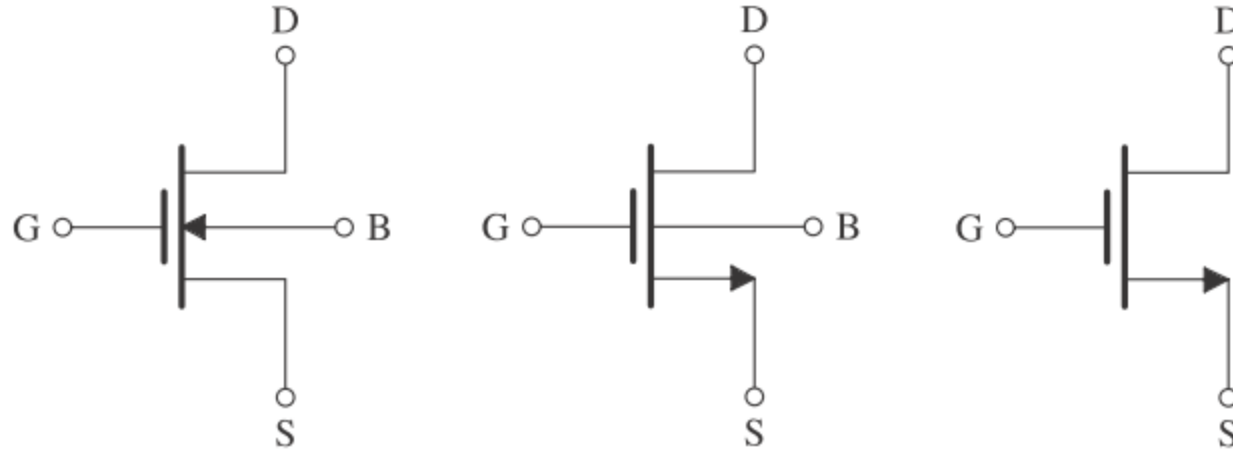
- Note que tanto o MOSFET canal-n quanto o canal-p mostrados dependem da tensão na Porta para 'Enriquecer' com portadores a região do canal, por isso são chamados de MOSFET do tipo **enriquecimento**.

MOSFET tipo enriquecimento

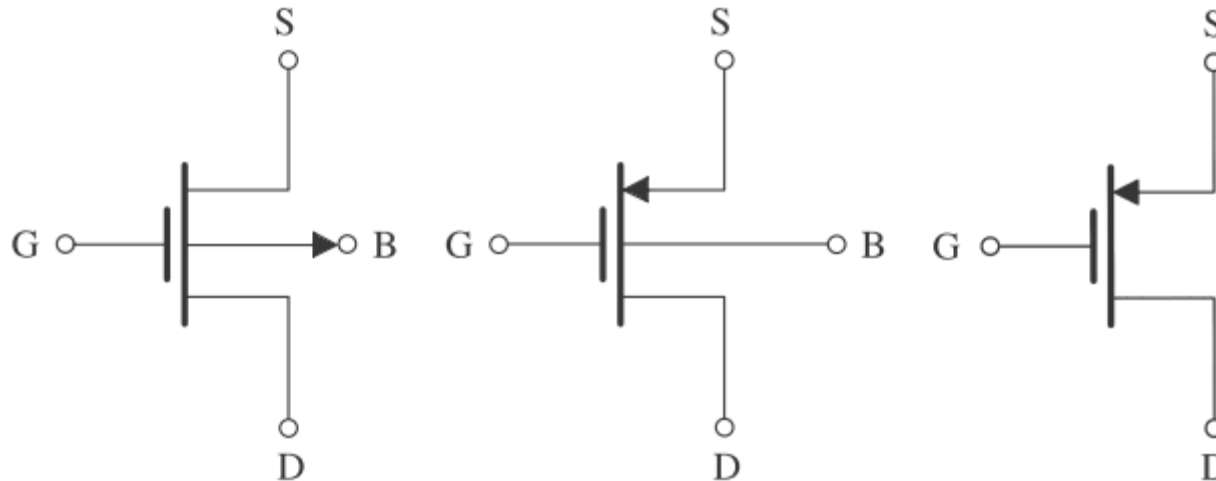
- Note que tanto o MOSFET canal-n quanto o canal-p mostrados dependem da tensão na Porta para 'Enriquecer' com portadores a região do canal, por isso são chamados de MOSFET do tipo **enriquecimento**.
- É possível elaborar MOSFET com o canal já estabelecido, com material do tipo n ou p depositado na região do canal, e usar a tensão na Porta para anular esse canal, chamado de MOSFET do tipo **depleção** ou do tipo empobrecimento.

Simbologia MOSFET tipo enriquecimiento

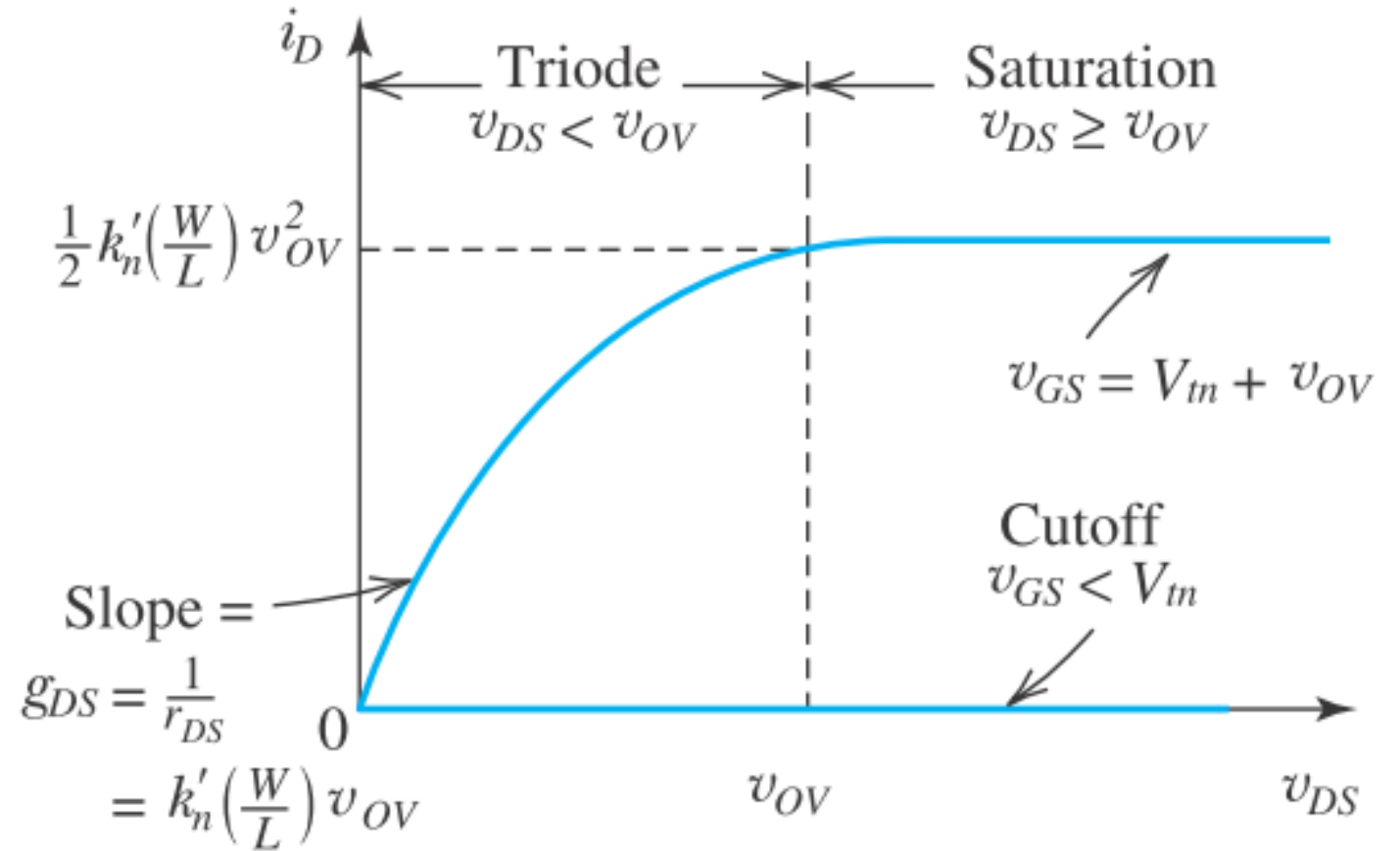
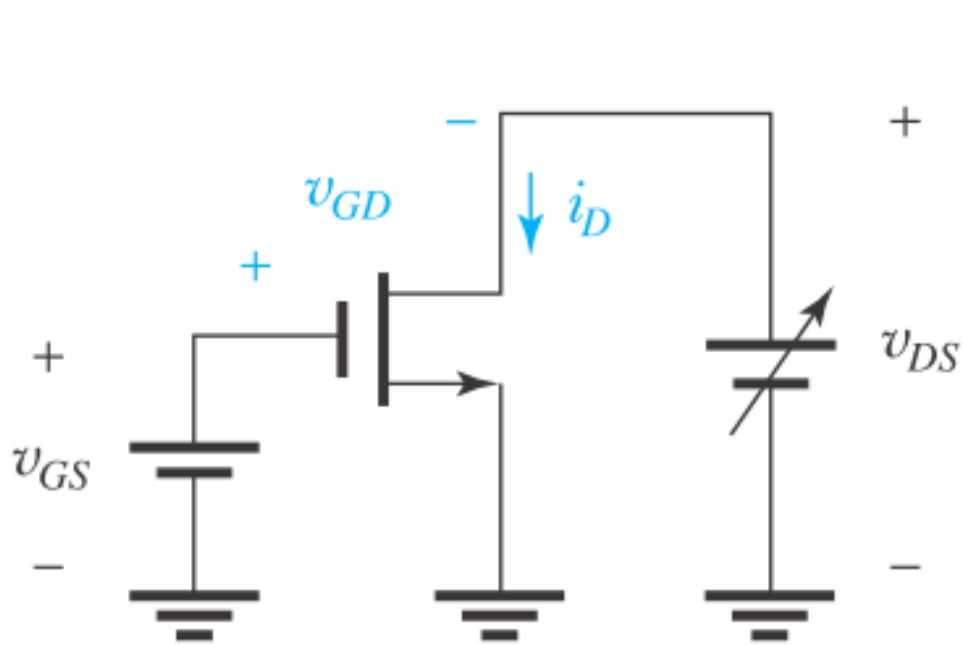
- Canal-n

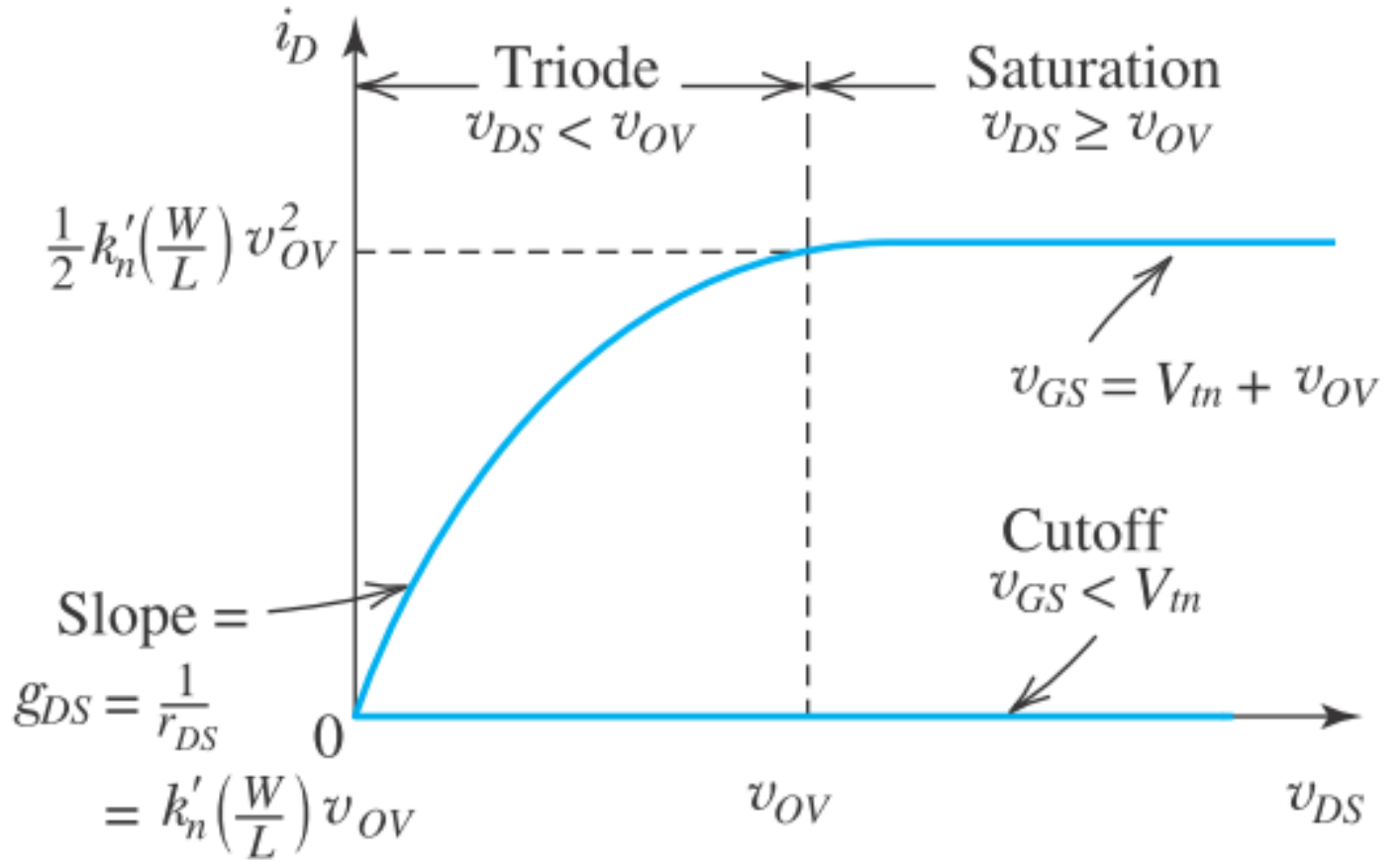
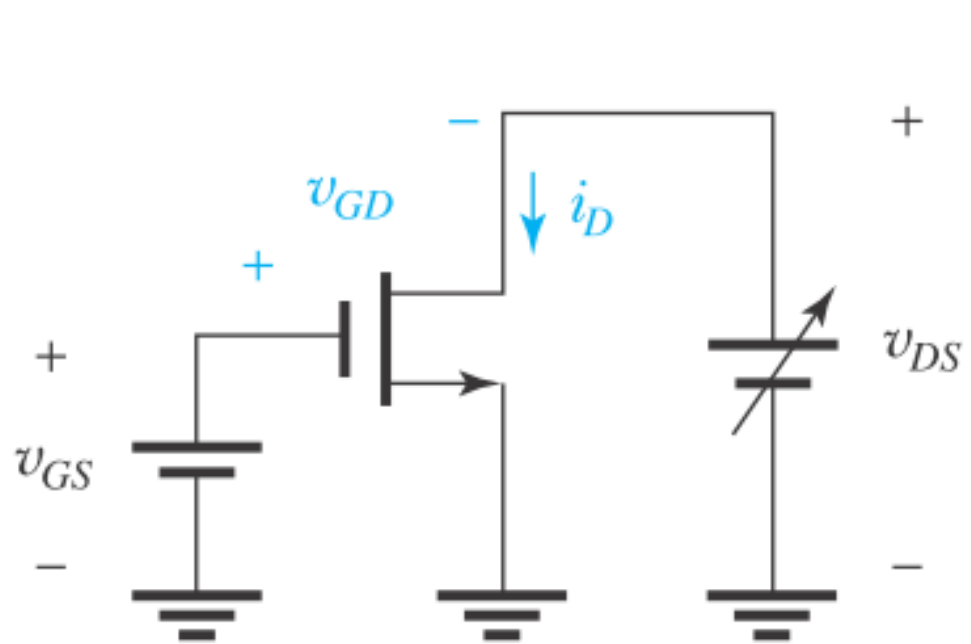


- Canal-p



Relações tensão-corrente canal-n enriquecimento





Triodo:

- $V_{GD} > V_t$
- $V_{DS} < v_{OV}$

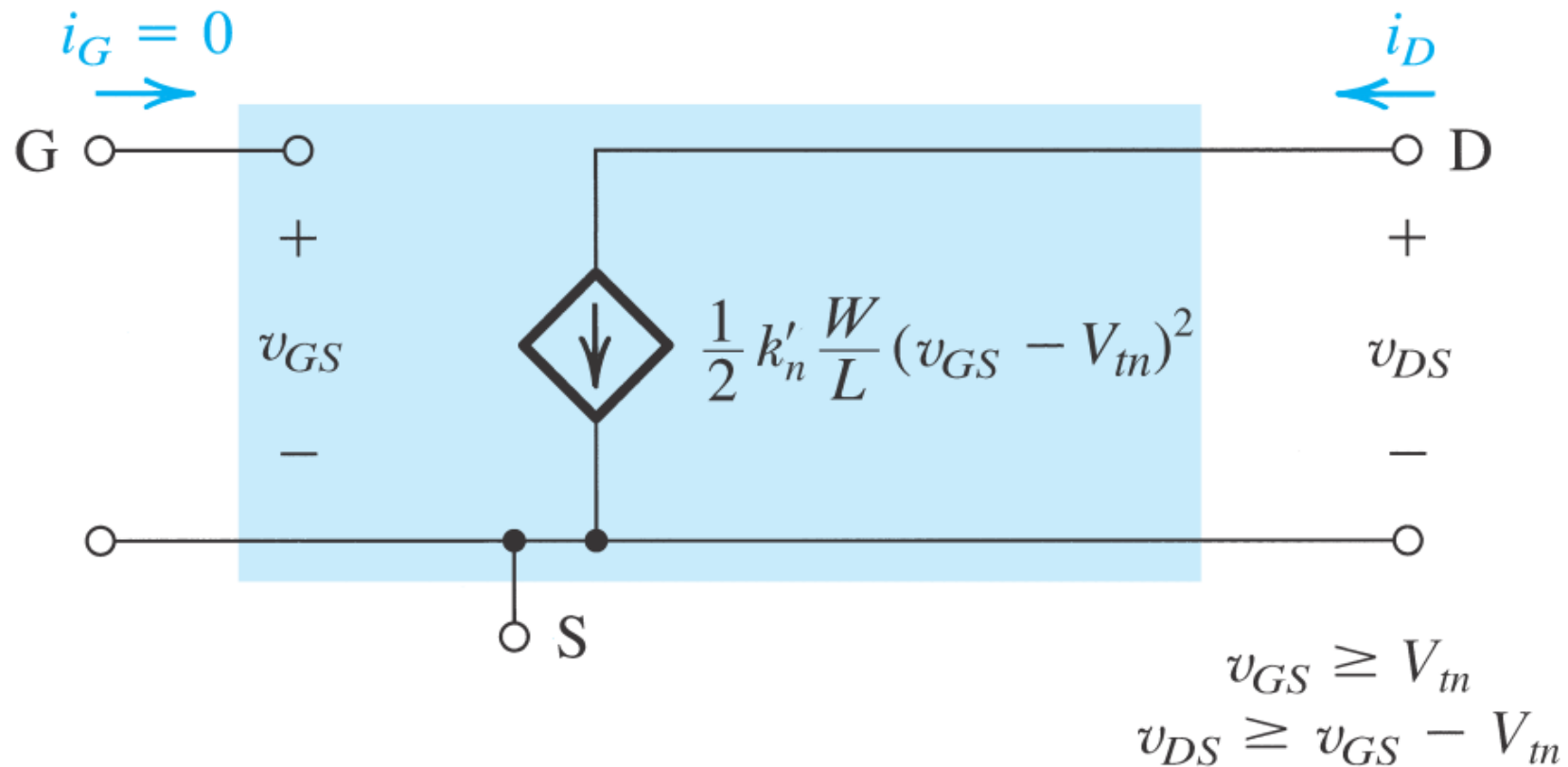
$$i_D = k'_n \left(\frac{W}{L} \right) \left(v_{OV} - \frac{1}{2} v_{DS} \right) v_{DS}$$

Saturação:

- $V_{GD} \leq V_t$
- $V_{DS} \geq v_{OV}$

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \left(\frac{W}{L} \right) v_{OV}^2$$

- Na região de saturação, o MOSFET se comporta como uma fonte de corrente controlada por tensão, como o TBJ na região ativa

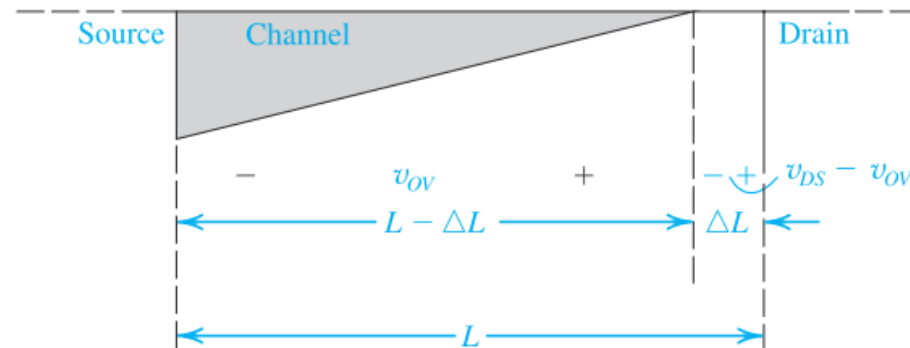


Efeito do aumento em V_{DS} – Efeito Early

- Assim como o TBJ na região ativa, apesar de idealmente o transistor apresentar corrente de Dreno constante na região de saturação (Ativa), há sim dependência em relação à magnitude de tensão V_{DS}

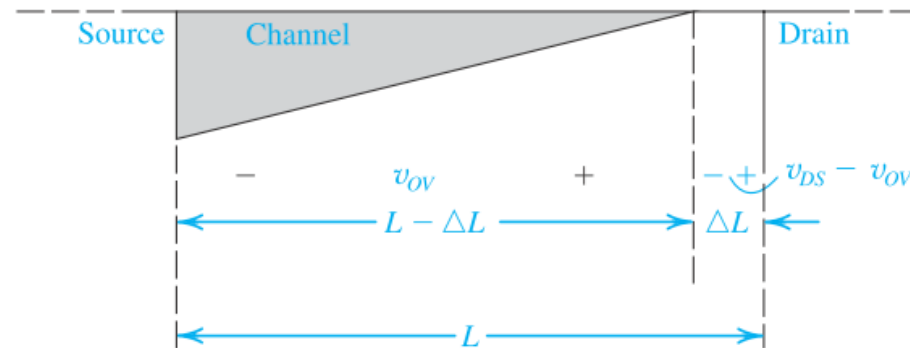
Efeito do aumento em V_{DS} – Efeito Early

- Assim como o TBJ na região ativa, apesar de idealmente o transistor apresentar corrente de Dreno constante na região de saturação (Ativa), há sim dependência em relação à magnitude de tensão V_{DS}
- Isto ocorre no MOSFET devido ao encurtamento da região efetiva do canal:



Efeito do aumento em V_{DS} – Efeito Early

- Assim como o TBJ na região ativa, apesar de idealmente o transistor apresentar corrente de Dreno constante na região de saturação (Ativa), há sim dependência em relação à magnitude de tensão V_{DS}
- Isto ocorre no MOSFET devido ao encurtamento da região efetiva do canal:

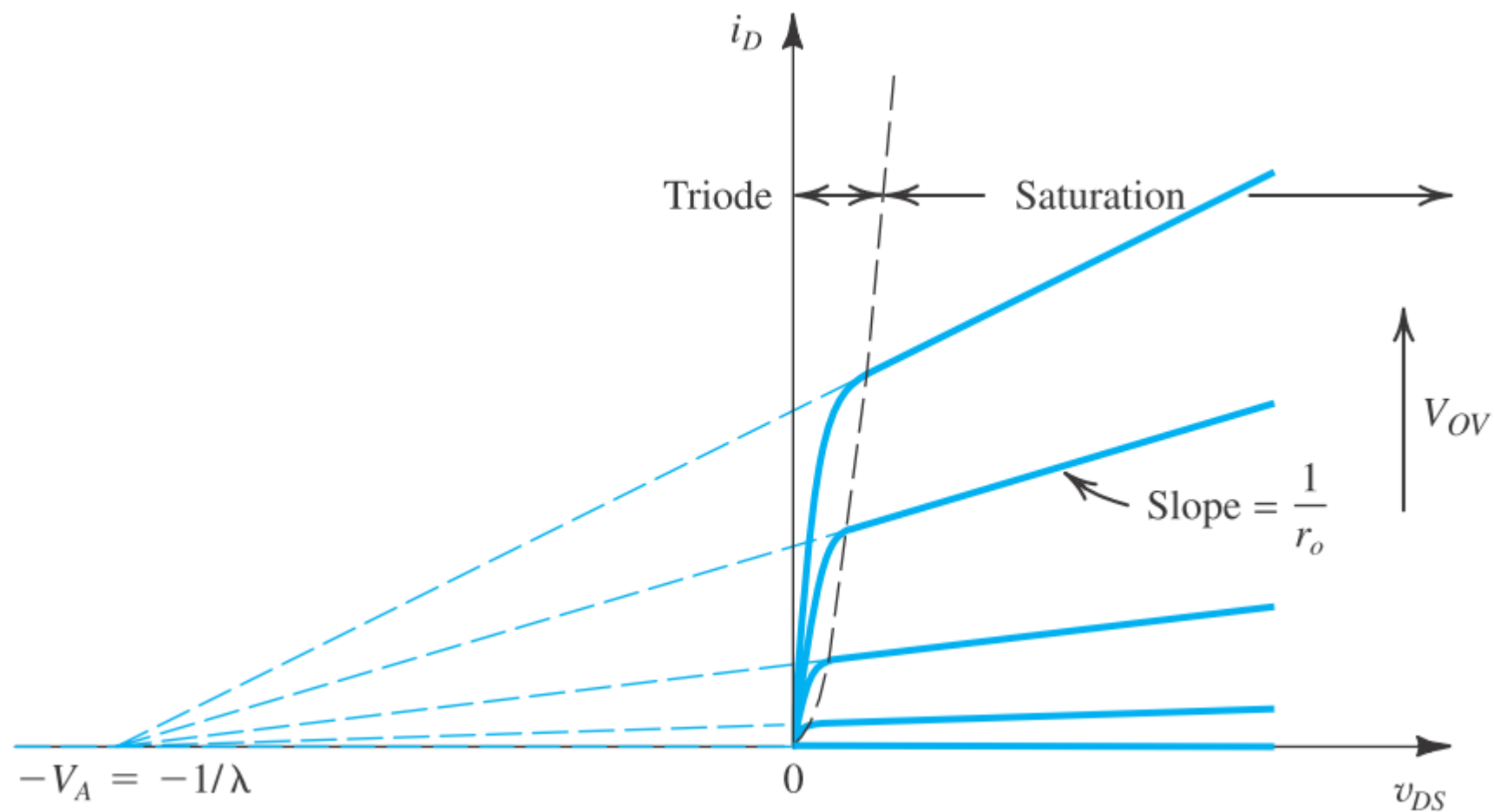


- E pode ser considerada no equacionamento da corrente de dreno:

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \left(\frac{W}{L} \right) (v_{GS} - V_{tn})^2 (1 + \lambda v_{DS}) \quad V_A = \frac{1}{\lambda} \quad V_A = V'_A L$$

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \left(\frac{W}{L} \right) (v_{GS} - V_{tn})^2 (1 + \lambda v_{DS})$$

$$V_A = \frac{1}{\lambda} \quad V_A = V'_A L$$

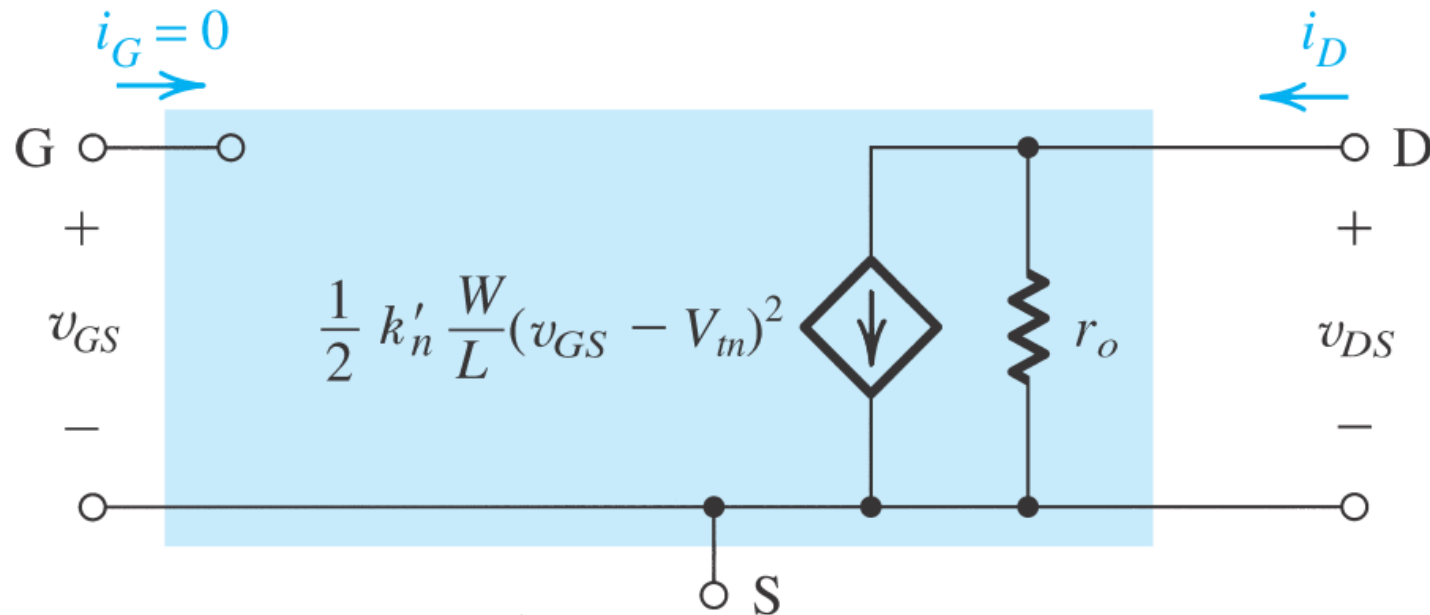


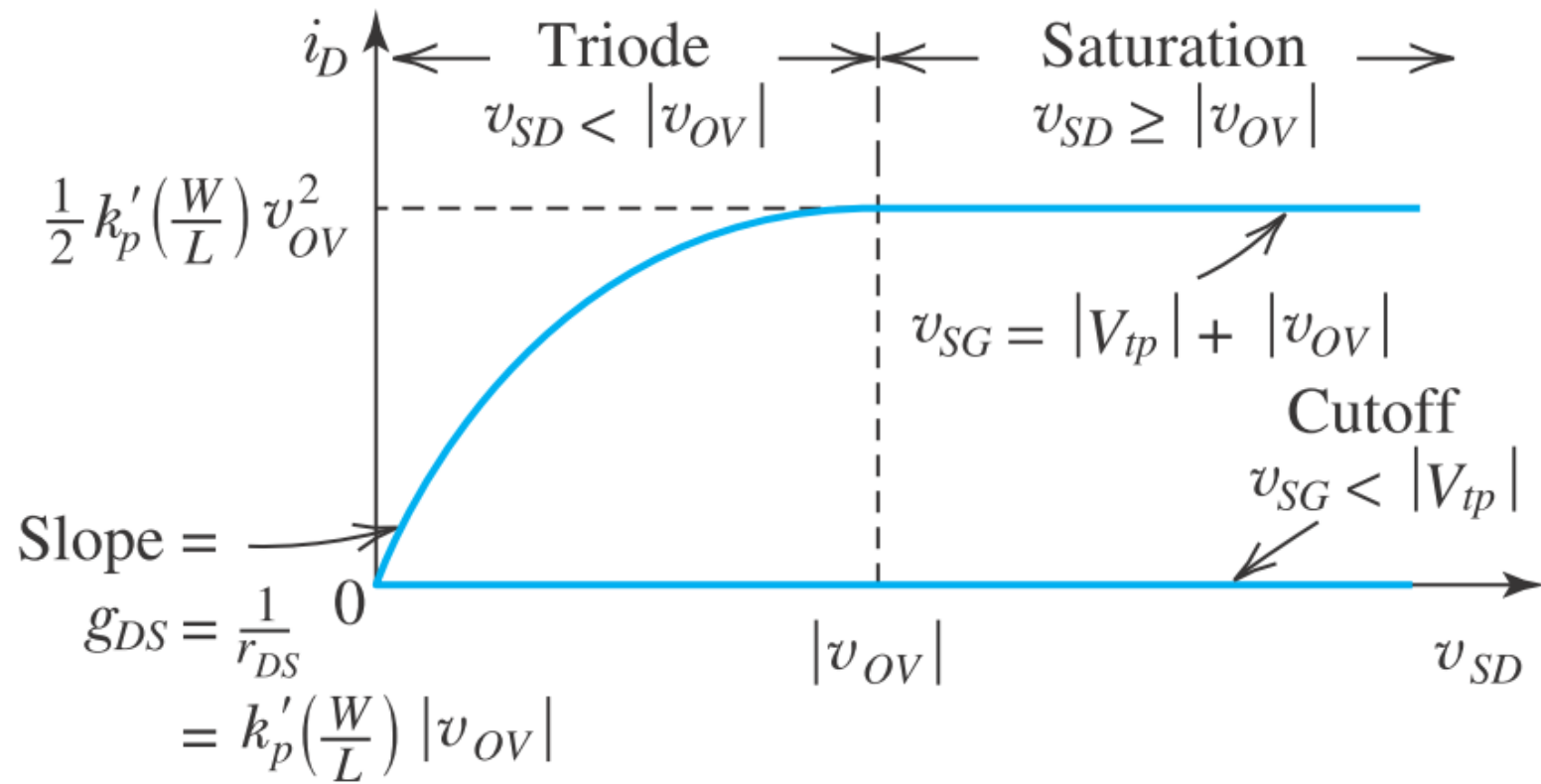
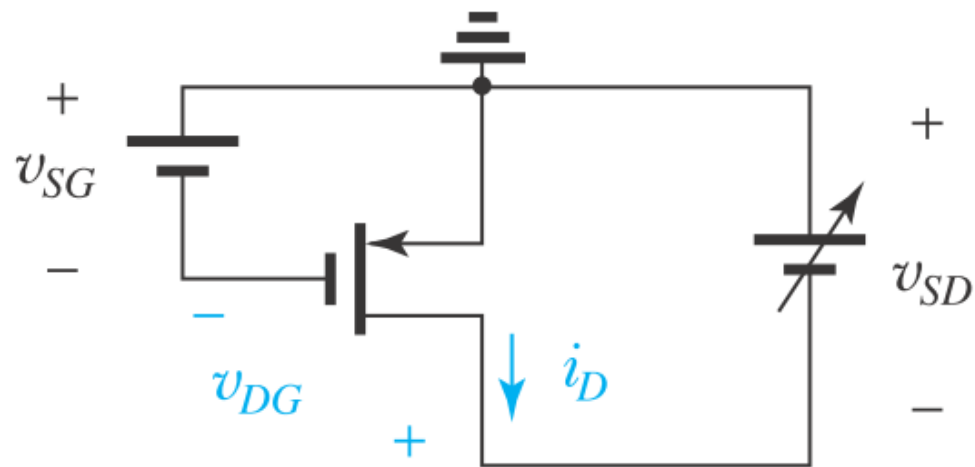
Efeito Early

- O efeito Early no MOSFET também pode ser modelado como uma resistência em paralelo com a fonte de corrente Dreno-Fonte, r_o

$$r_o = \frac{1}{\lambda I_D} = \frac{V_A}{I'_D} \quad \text{com} \quad I'_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{tn})^2 \quad \text{a corrente de Dreno com o efeito desconsiderado}$$

- Modelo:





Triodo:

- $V_{DG} > |V_{tp}|$
- $V_{SD} < |V_{OV}|$

$$i_D = k'_p \left(\frac{W}{L} \right) \left(|v_{OV}| - \frac{1}{2} v_{SD} \right) v_{SD}$$

Saturação:

- $V_{DG} \leq |V_{tp}|$
- $V_{SD} \geq |V_{OV}|$

$$i_D = \frac{1}{2} k'_p \left(\frac{W}{L} \right) v_{OV}^2$$

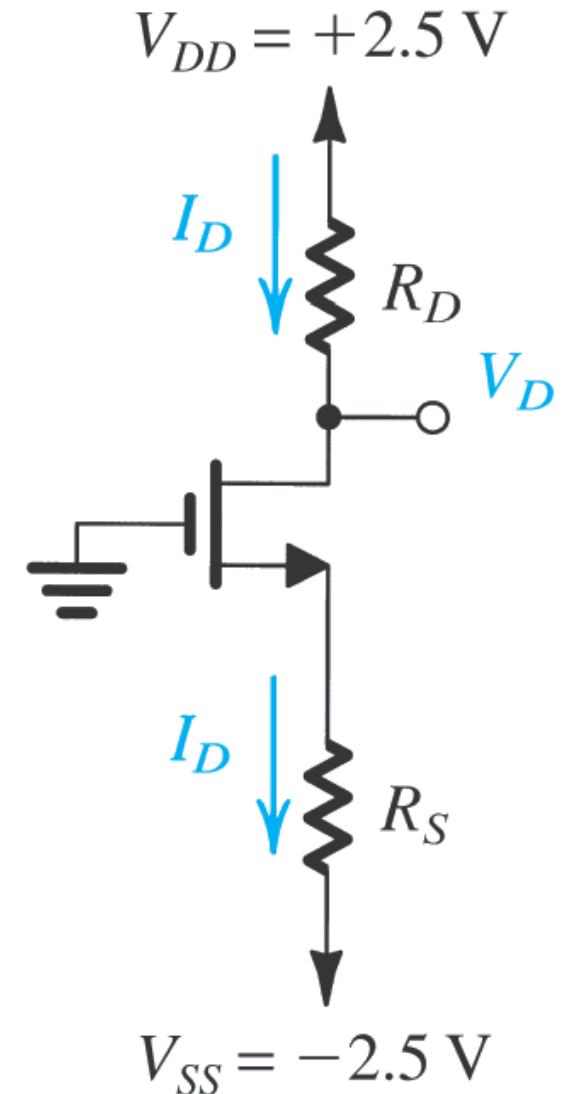
Operação em circuitos CC

- Exemplo:

Determine R_D e R_S para que o transistor opere com $I_D = 0,4\text{mA}$ e $V_D = 0,5\text{V}$.

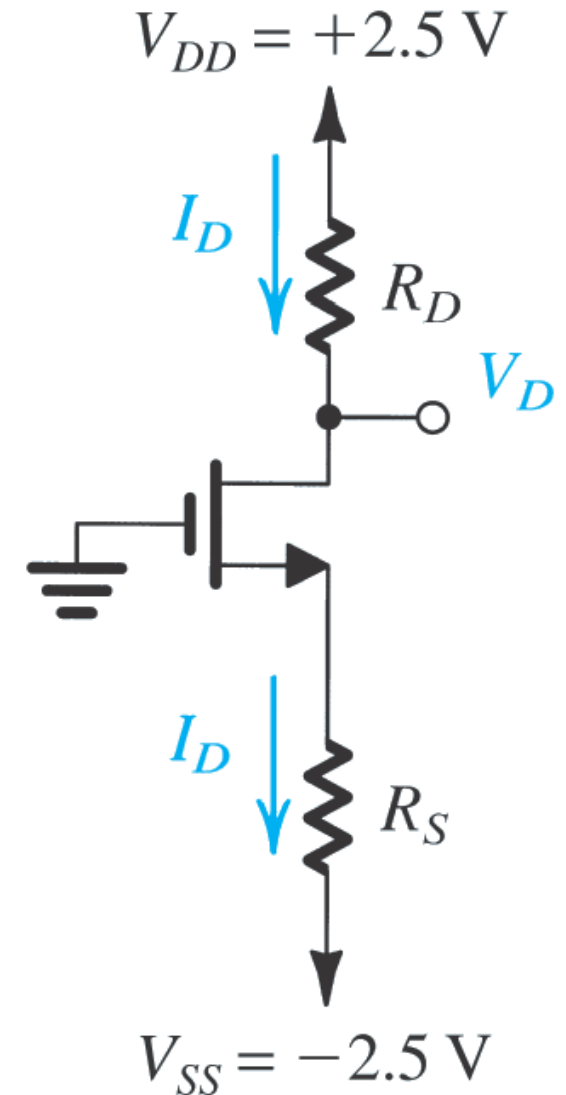
O transistor apresenta $V_t = 0,7\text{V}$, $\mu_n C_{ox} = 100\mu\text{A}/\text{V}^2$, $L = 1\mu\text{m}$ e $W = 32\mu\text{m}$.

Considere $\lambda = 0$



- Para obter $V_D = 0,5V$ com $I_D = 0,4mA$, calculamos R_D pela lei de ohm

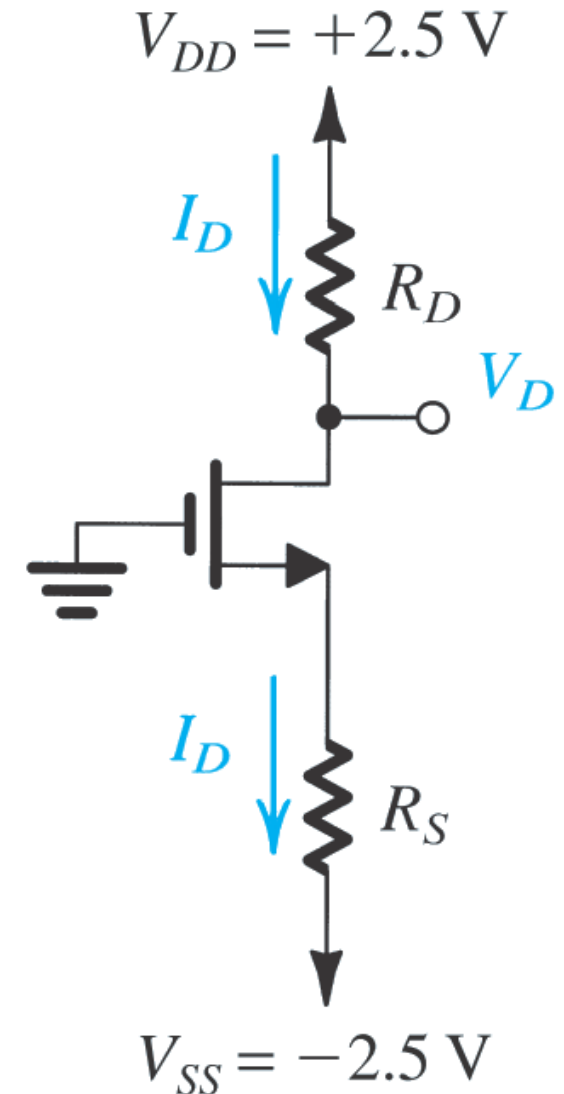
$$R_D = (V_{DD} - V_D) / I_D = (2,5 - 0,5) / 0,4m = 5k\Omega$$



- Para obter $V_D = 0,5V$ com $I_D = 0,4mA$, calculamos R_D pela lei de ohm

$$R_D = (V_{DD} - V_D) / I_D = (2,5 - 0,5) / 0,4m = 5k\Omega$$

- Para calcular R_S precisamos do valor de V_S
- Como sabemos o valor da corrente I_D , e observamos que o MOSFET está na região de saturação pois $V_D > V_G$, podemos calcular V_{GS} pela expressão da corrente

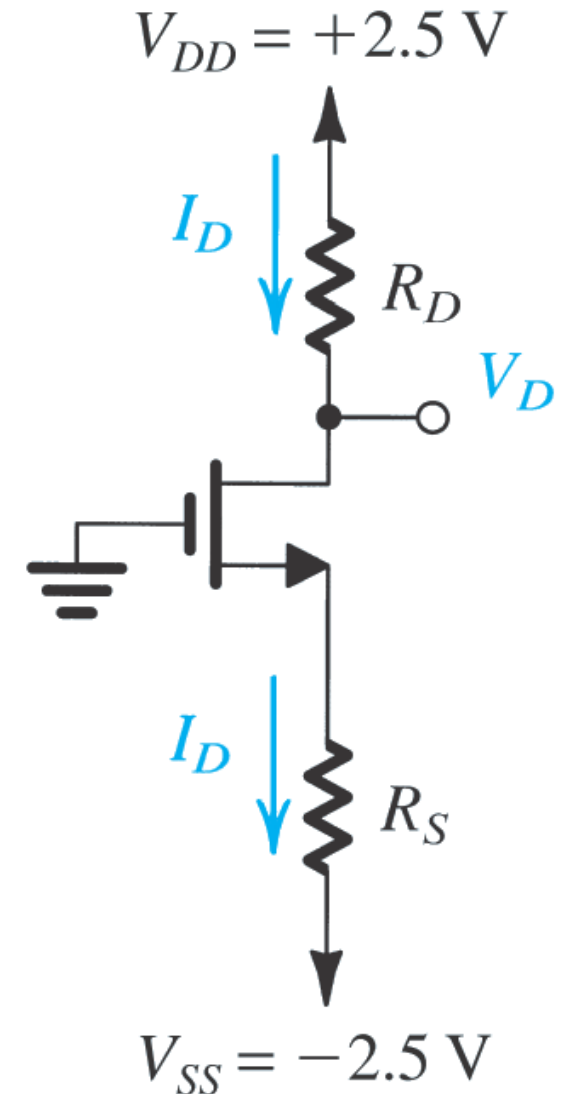


- Para obter $V_D = 0,5V$ com $I_D = 0,4mA$, calculamos R_D pela lei de ohm

$$R_D = (V_{DD} - V_D) / I_D = (2,5 - 0,5) / 0,4m = 5k\Omega$$

- Para calcular R_S precisamos do valor de V_S
- Como sabemos o valor da corrente I_D , e observamos que o MOSFET está na região de saturação pois $V_D > V_G$, podemos calcular V_{GS} pela expressão da corrente

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \left(\frac{W}{L} \right) v_{OV}^2$$



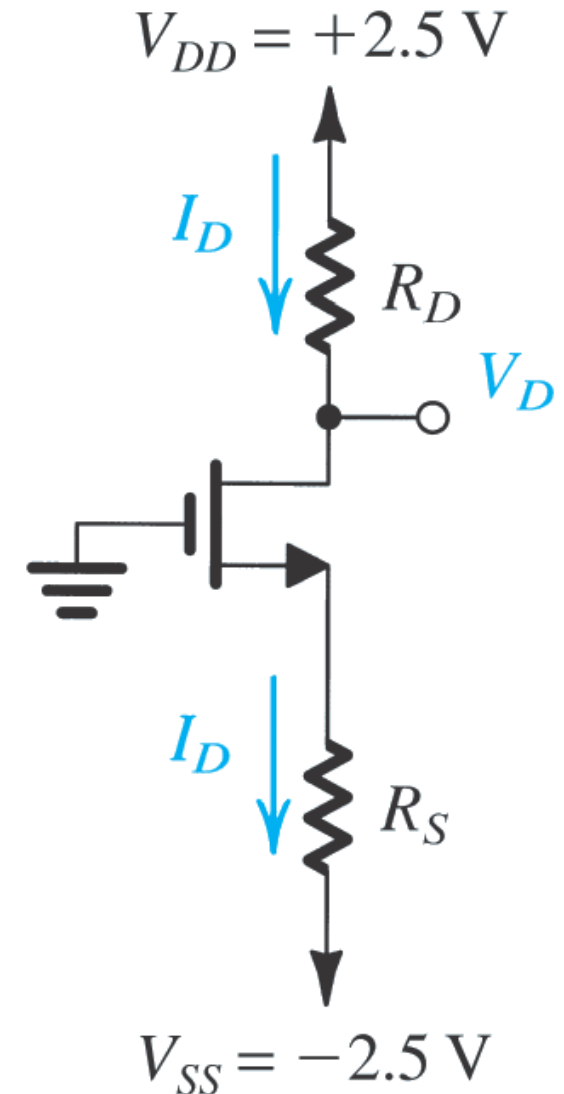
- Para obter $V_D=0,5V$ com $I_D = 0,4mA$, calculamos R_D pela lei de ohm

$$R_D = (V_{DD} - V_D) / I_D = (2,5 - 0,5) / 0,4m = 5k\Omega$$

- Para calcular R_S precisamos do valor de V_S
- Como sabemos o valor da corrente I_D , e observamos que o MOSFET está na região de saturação pois $V_D > V_G$, podemos calcular V_{GS} pela expressão da corrente

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \left(\frac{W}{L} \right) v_{OV}^2$$

- $400\mu = \frac{1}{2} \cdot 100\mu \cdot (32/1) \cdot V_{OV}^2 \rightarrow V_{OV}=0,5V$



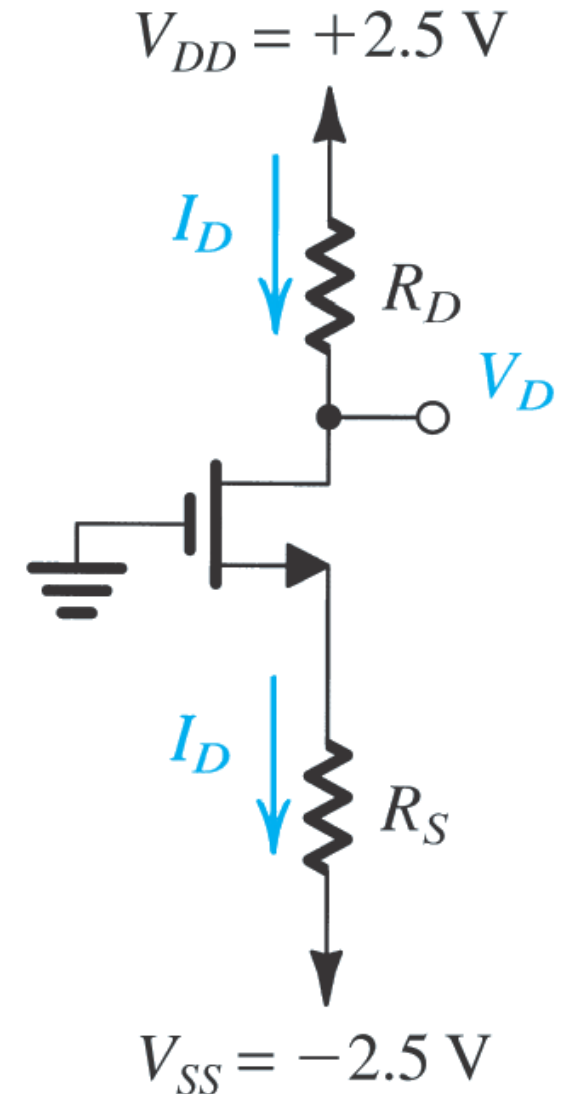
- Para obter $V_D=0,5V$ com $I_D = 0,4mA$, calculamos R_D pela lei de ohm

$$R_D = (V_{DD} - V_D) / I_D = (2,5 - 0,5) / 0,4m = 5k\Omega$$

- Para calcular R_S precisamos do valor de V_S
- Como sabemos o valor da corrente I_D , e observamos que o MOSFET está na região de saturação pois $V_D > V_G$, podemos calcular V_{GS} pela expressão da corrente

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \left(\frac{W}{L} \right) v_{OV}^2$$

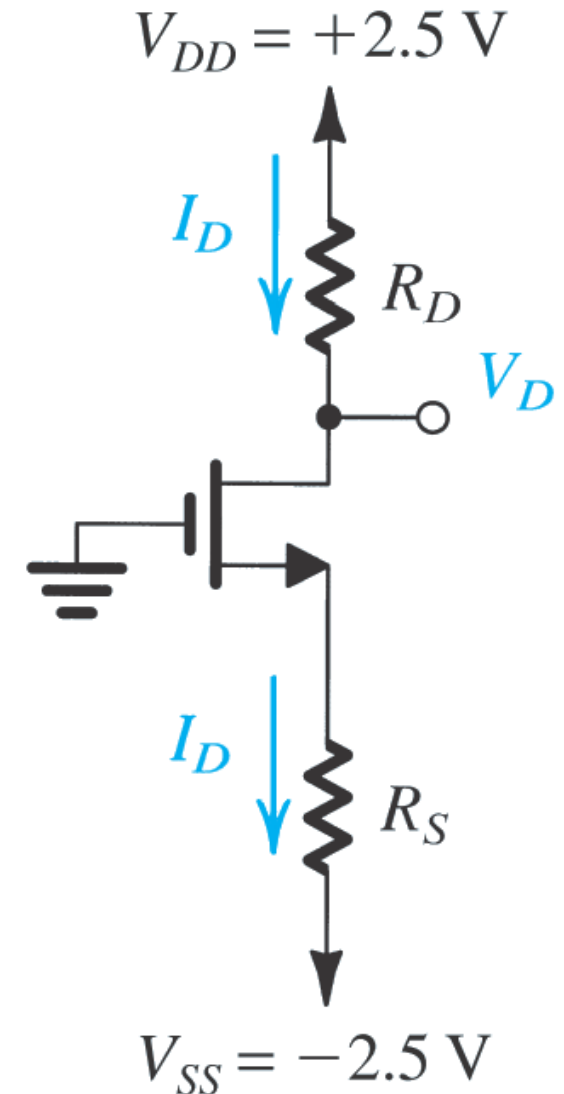
- $400\mu = \frac{1}{2} \cdot 100\mu \cdot (32/1) \cdot V_{OV}^2 \rightarrow V_{OV} = 0,5V$
- $V_{OV} = V_{GS} - V_t \rightarrow V_{GS} = 1,2V$



- Para obter $V_D=0,5V$ com $I_D = 0,4mA$, calculamos R_D pela lei de ohm

$$R_D = (V_{DD} - V_D) / I_D = (2,5 - 0,5) / 0,4m = 5k\Omega$$

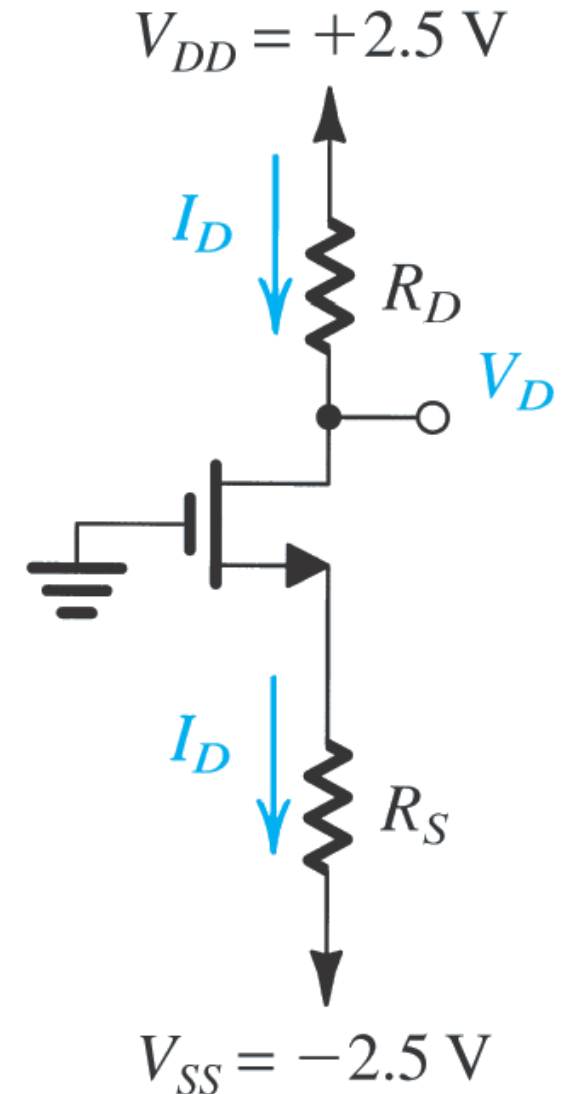
- $400\mu = \frac{1}{2} \cdot 100\mu \cdot (32/1) \cdot V_{OV}^2 \rightarrow V_{OV}=0,5V$
- $V_{OV} = V_{GS} - V_t \rightarrow V_{GS} = 1,2V$
- Como $V_G=0V$, então $V_S = -1,2V$ e calculamos R_S :
- $R_S = (V_S - V_{SS}) / I_D = (-1,2 - -2,5) / 0,4m = 3,25k\Omega$



- Para obter $V_D=0,5V$ com $I_D = 0,4mA$, calculamos R_D pela lei de ohm

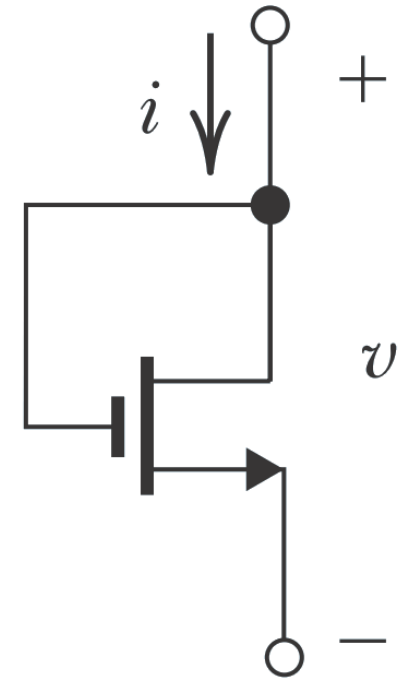
$$R_D = (V_{DD} - V_D) / I_D = (2,5 - 0,5) / 0,4m = 5k\Omega$$

- $400\mu = \frac{1}{2} \cdot 100\mu \cdot (32/1) \cdot V_{OV}^2 \rightarrow V_{OV}=0,5V$
- $V_{OV} = V_{GS} - V_t \rightarrow V_{GS} = 1,2V$
- Como $V_G=0V$, então $V_S = -1,2V$ e calculamos R_S :
- $R_S = (V_S - V_{SS}) / I_D = (-1,2 - -2,5) / 0,4m = 3,25k\Omega$
- **Para casa:** refazer com $V_t=1V$, $\mu_n C_{ox}=60\mu A/V^2$, $W/L=120\mu m/3\mu m$, $I_D=0,3mA$ e $V_D=0,4V$



MOSFET conectado como diodo

- Circuito útil em amplificadores
- O terminal da porta é conectado ao terminal de dreno
- Como $V_D = V_G$ o circuito estará sempre no modo de saturação

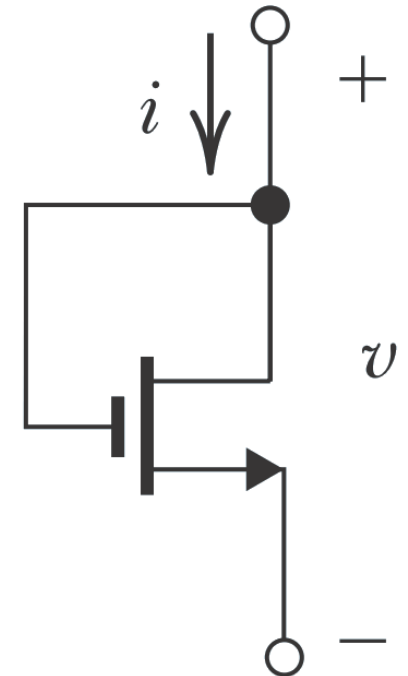


MOSFET conectado como diodo

- Circuito útil em amplificadores
- O terminal da porta é conectado ao terminal de dreno
- Como $V_D = V_G$ o circuito estará sempre no modo de saturação
- Ignorando o efeito Early, com $i=i_D$ e $v=v_{GS}$

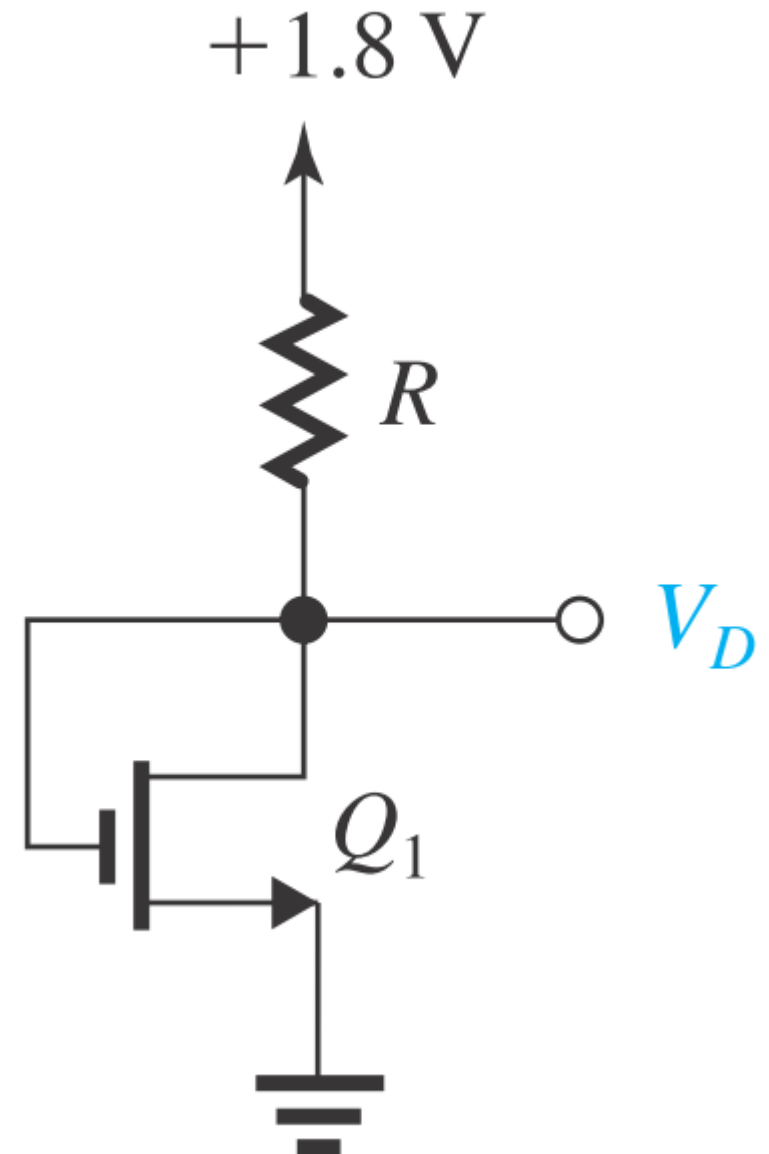
$$i = \frac{1}{2} k'_n \left(\frac{W}{L} \right) (v - V_{tn})^2$$

- Note que a corrente é função da tensão v



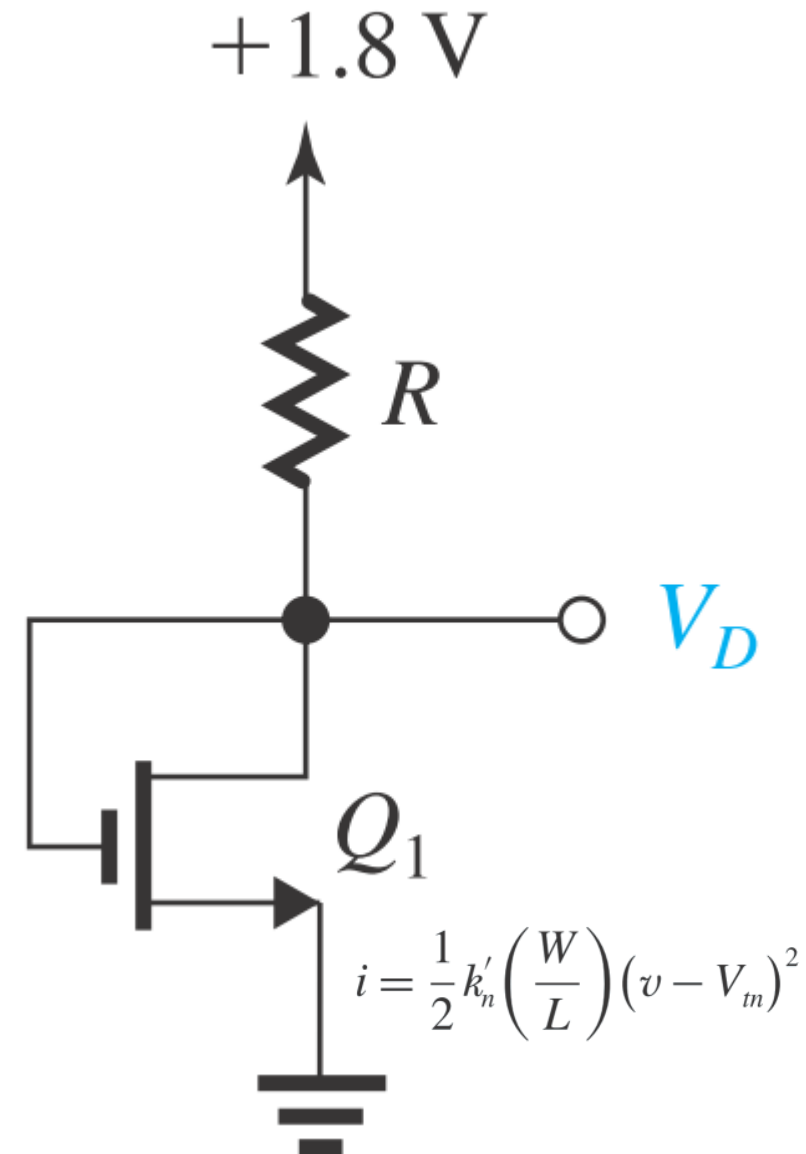
Exemplo

- Calcule R de forma a obter $V_D = 0,7V$
- Considere: $\lambda = 0$
 $V_{tn} = 0,5V$ $k'_n = 0,4mA/V^2$ $W/L = 0,72\mu m / 0,18\mu m$



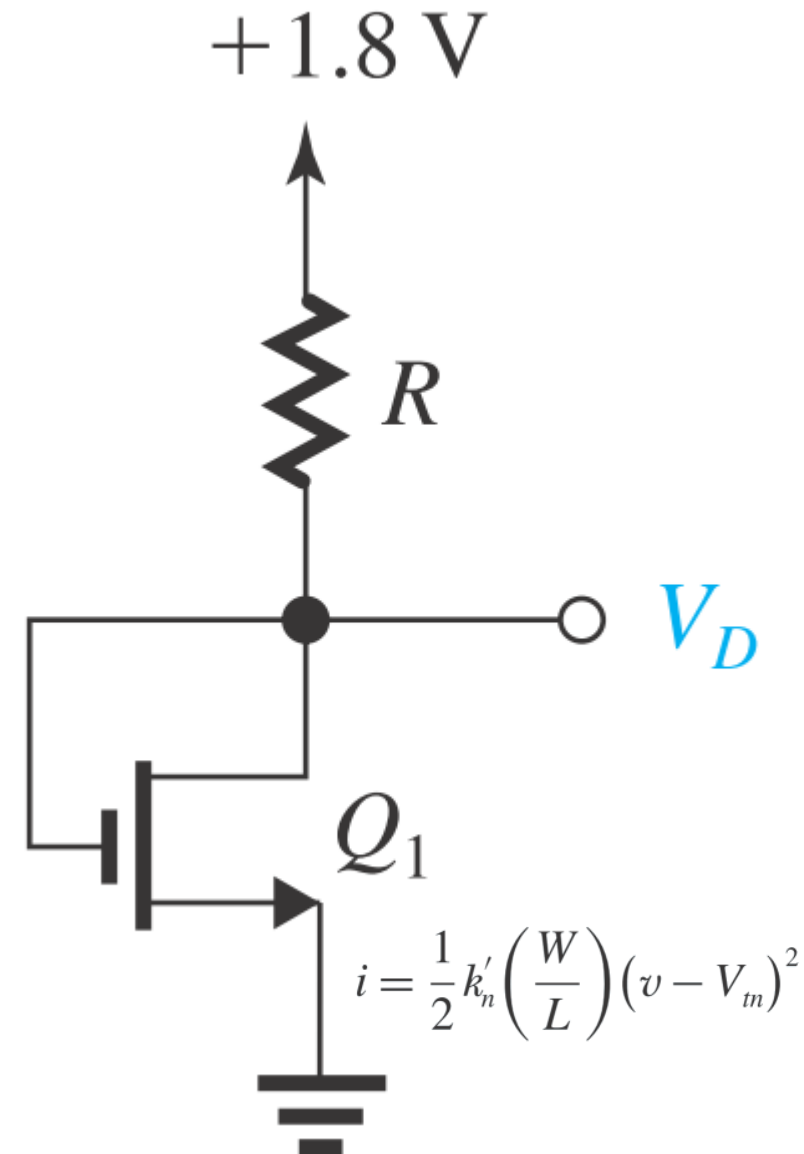
Exemplo

- Calcule R de forma a obter $V_D = 0,7V$
- Considere: $\lambda = 0$
 $V_{tn} = 0,5V$ $k'_n = 0,4mA/V^2$ $W/L = 0,72\mu m / 0,18\mu m$
- Temos que a corrente no MOSFET é a mesma que o resistor, $i = i_R$
- $i_R = (1,8 - V_D) / R$
- $i = (1/2) \cdot (0,4m) \cdot (0,72/0,18) \cdot (V_D - 0,5)$



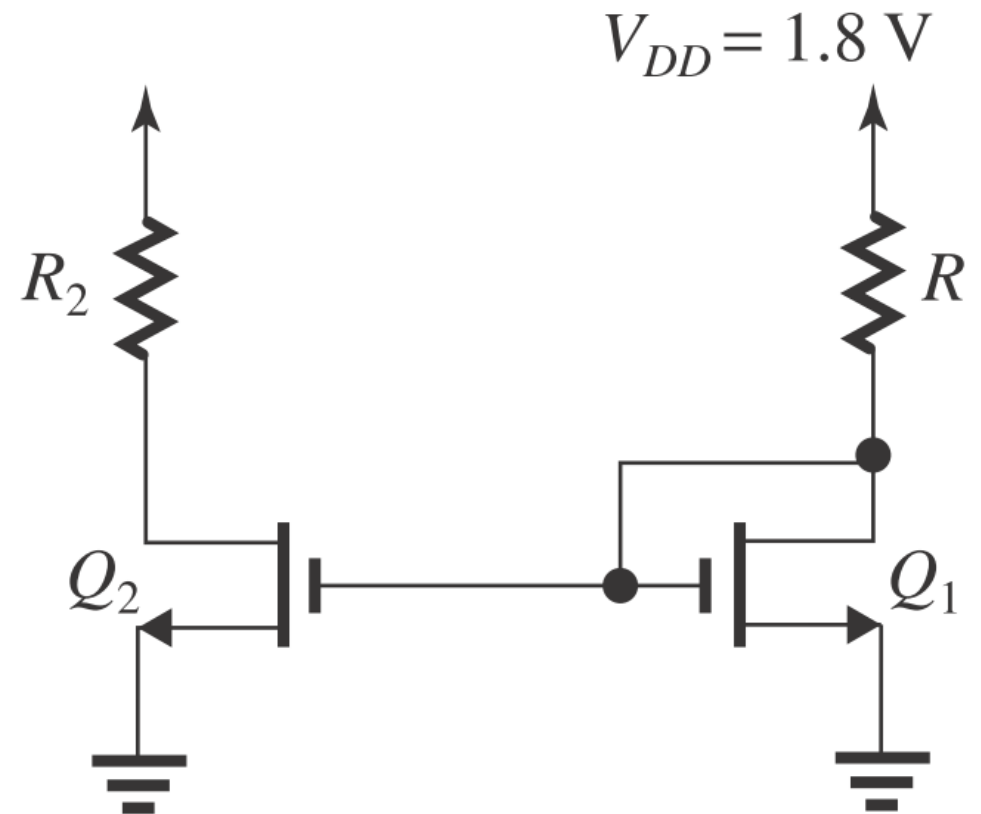
Exemplo

- Calcule R de forma a obter $V_D = 0,7V$
- Considere: $\lambda = 0$
 $V_{tn} = 0,5V$ $k'_n = 0,4mA/V^2$ $W/L = 0,72\mu m / 0,18\mu m$
- Temos que a corrente no MOSFET é a mesma que o resistor, $i = i_R$
- $i_R = (1,8 - V_D) / R$
- $i = (1/2) \cdot (0,4m) \cdot (0,72/0,18) \cdot (V_D - 0,5)^2$
- $(1,8 - 0,7) / R = (1/2) \cdot (0,4m) \cdot (0,72/0,18) \cdot (0,7 - 0,5)^2$
- $R = 34,375k\Omega$ $i = 32\mu A$



Exemplo - aumentando

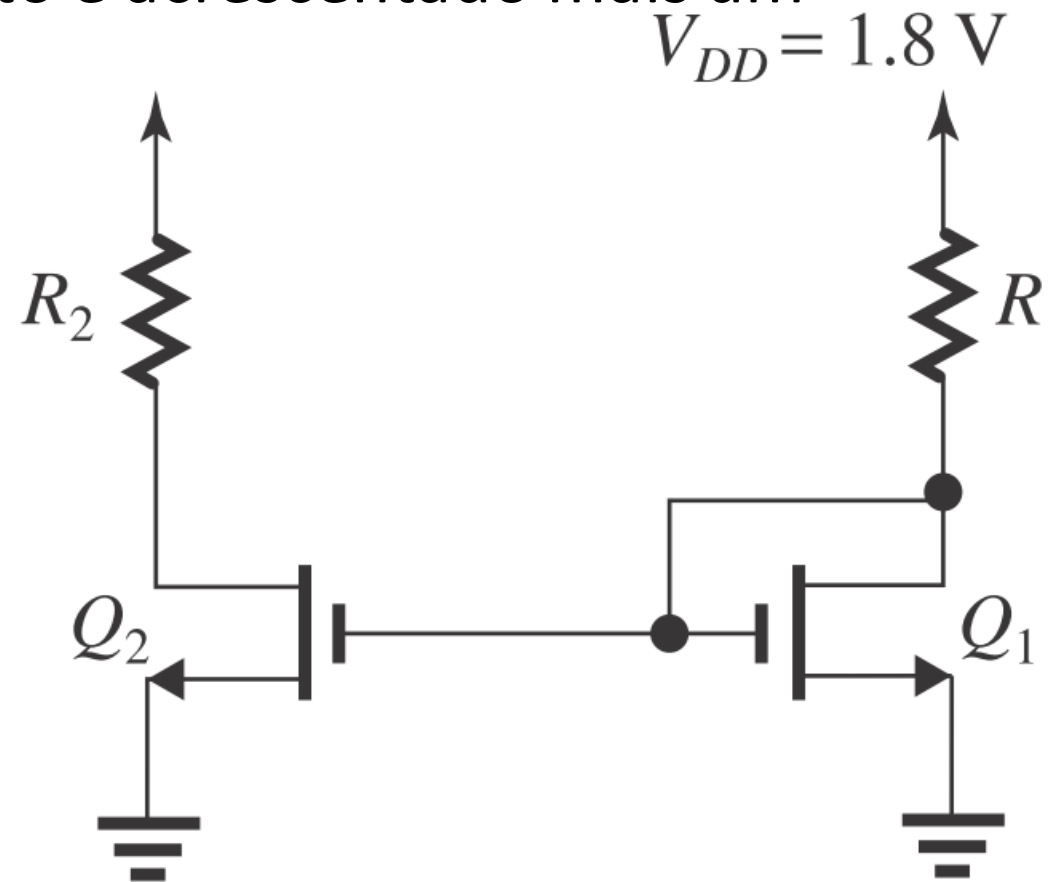
- Considere agora que ao mesmo circuito é acrescentado mais um transistor Q_2 idêntico a Q_1 , e um resistor R_2 :
- Calcule R_2 de forma que Q_2 fique no limite da saturação



Exemplo - aumentando

- Considere agora que ao mesmo circuito é acrescentado mais um transistor Q_2 e um resistor R_2 :
- Calcule R_2 de forma que Q_2 fique no limite da saturação

- No limite da saturação, $V_{DS} = V_{OV}$
- $V_{G2} = V_{G1} = 0,7V$
- V_{OV} em Q_2 é $V_{GS} - V_{tn} = 0,2V$
- E a corrente $i_2 = \frac{1}{2} \cdot k'_n \cdot (W/L) V_{OV}^2$



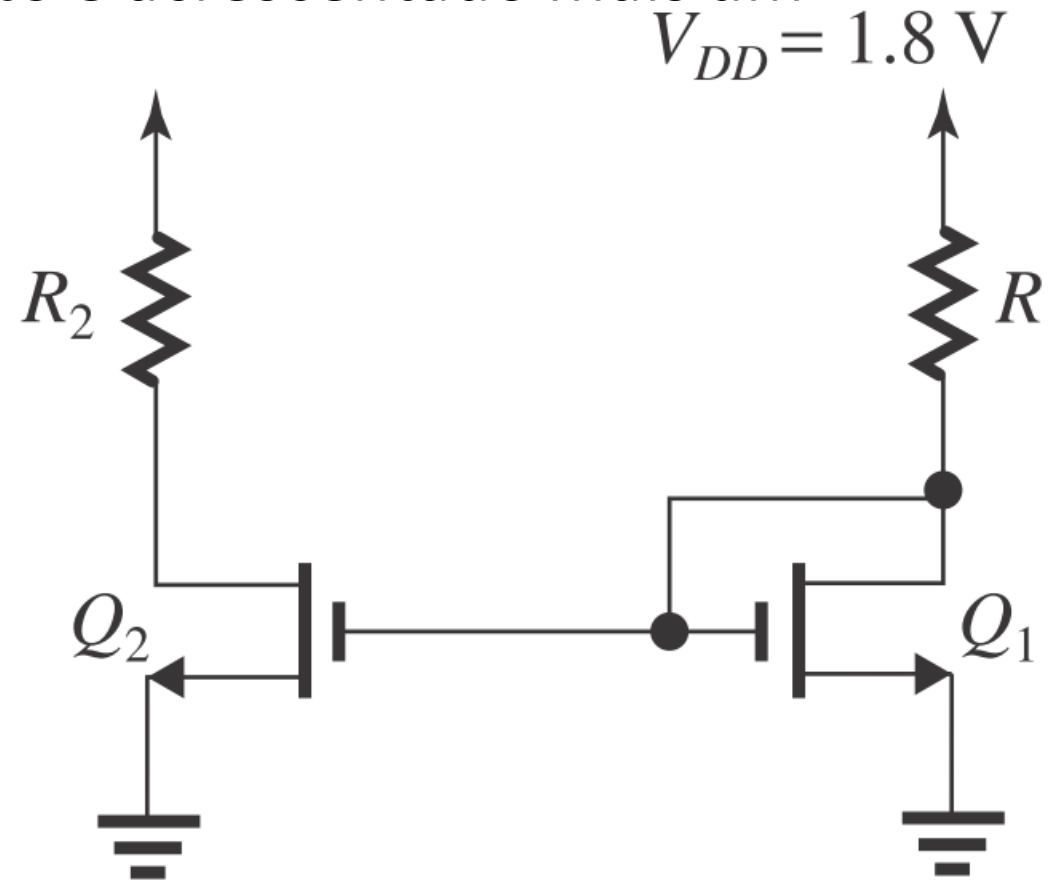
Exemplo - aumentando

- Considere agora que ao mesmo circuito é acrescentado mais um transistor Q_2 e um resistor R_2 :

- Calcule R_2 de forma que Q_2 fique no limite da saturação

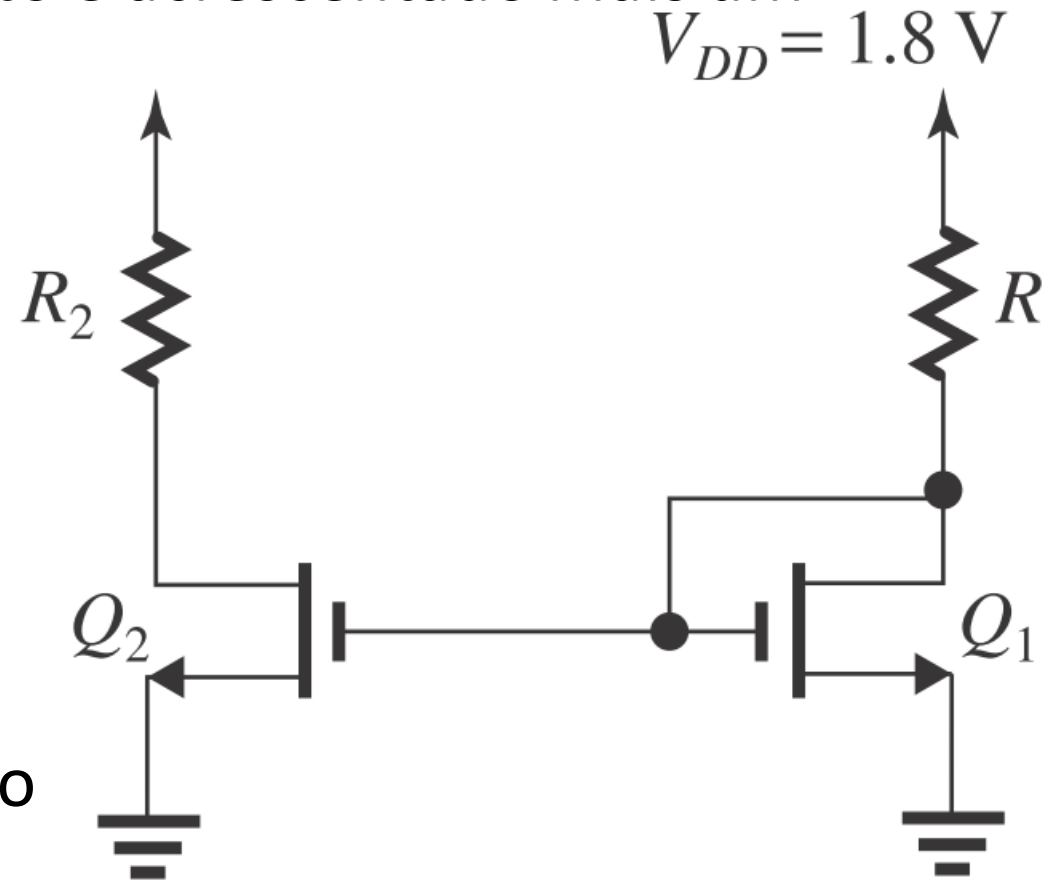
- $i_2 = \frac{1}{2} \cdot k'_n \cdot (W/L) V_{OV}^2 = 32 \mu A$

- $R_2 = (1,8 - 0,2) / 32 \mu A = 50 k\Omega$



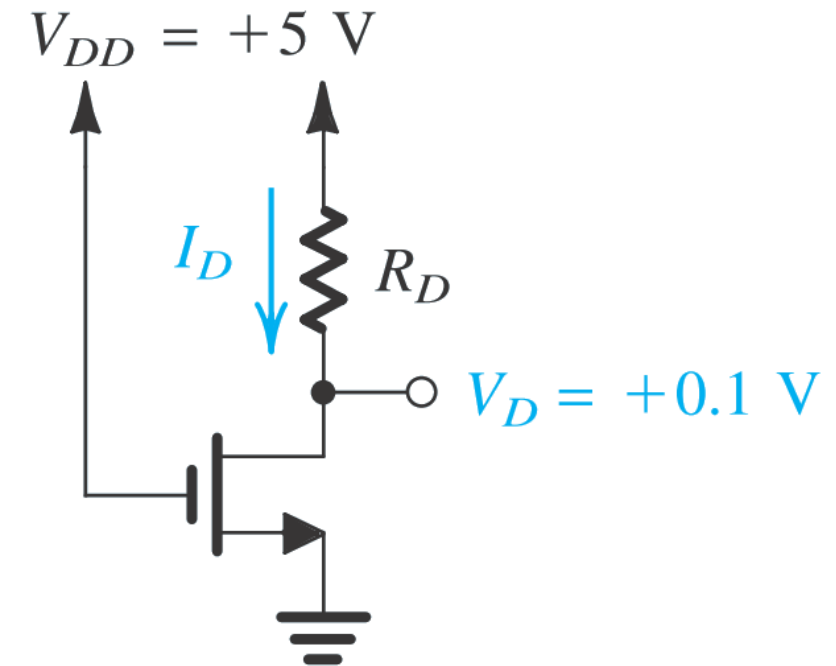
Exemplo - aumentando

- Considere agora que ao mesmo circuito é acrescentado mais um transistor Q_2 e um resistor R_2 :
- Calcule R_2 de forma que Q_2 fique no limite da saturação
- $i_2 = 1/2 \cdot k'_n \cdot (W/L) V_{OV}^2 = 32 \mu A$
- $R_2 = (1,8 - 0,2) / 32 \mu A = 50 k\Omega$
- Note que $i_1 = i_2$, este circuito é chamado Espelho de Corrente MOSFET



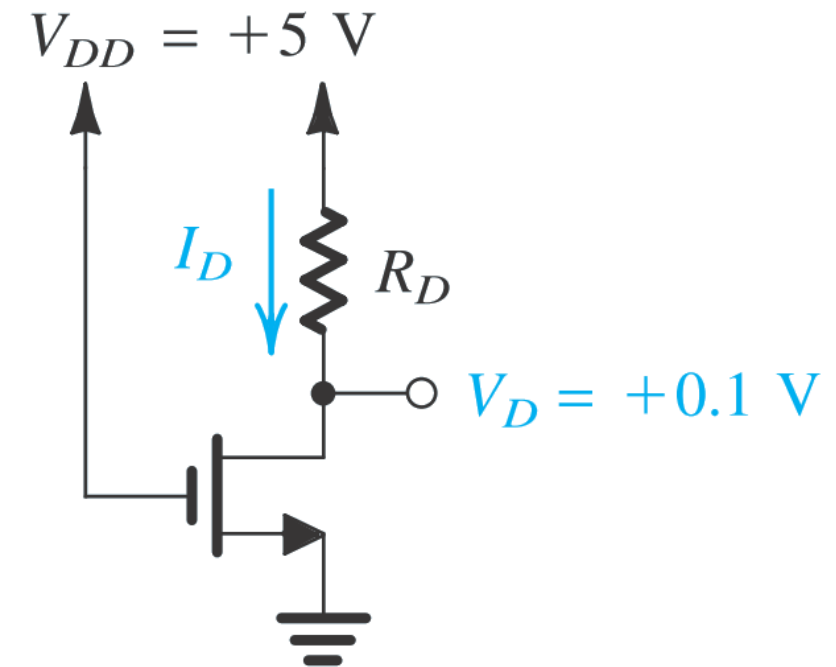
Exemplo

- Queremos projetar o circuito para obter $V_D = 0,1\text{V}$, neste caso, qual a resistência r_{DS} entre o dreno e a fonte do transistor?
- $V_{tn} = 1\text{V}$ e $k_n = k'_n(W/L) = 1\text{mA/V}^2$



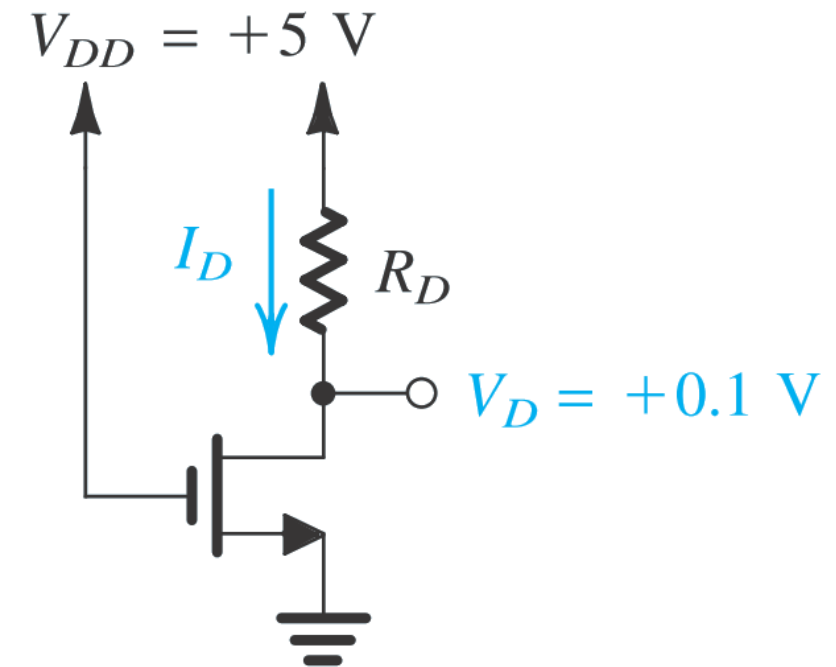
Exemplo

- Queremos projetar o circuito para obter $V_D = 0,1V$, neste caso, qual a resistência r_{DS} entre o dreno e a fonte do transistor?
- $V_{tn} = 1V$ e $k_n = k'_n(W/L) = 1mA/V^2$
- Como $V_D = 0,1V$ e $V_{GS} = 5V$ com $V_{tn} = 1V$, o transistor opera na região de TRIODO ($V_{DS} < V_{OV}$)
- $I_D = k_n \cdot (V_{OV} \cdot V_{DS} - \frac{1}{2} \cdot V_{DS}^2) = 1m \cdot [(5V - 1V) \cdot 0,1V - 0,5 \cdot 0,1^2] = 395\mu A$



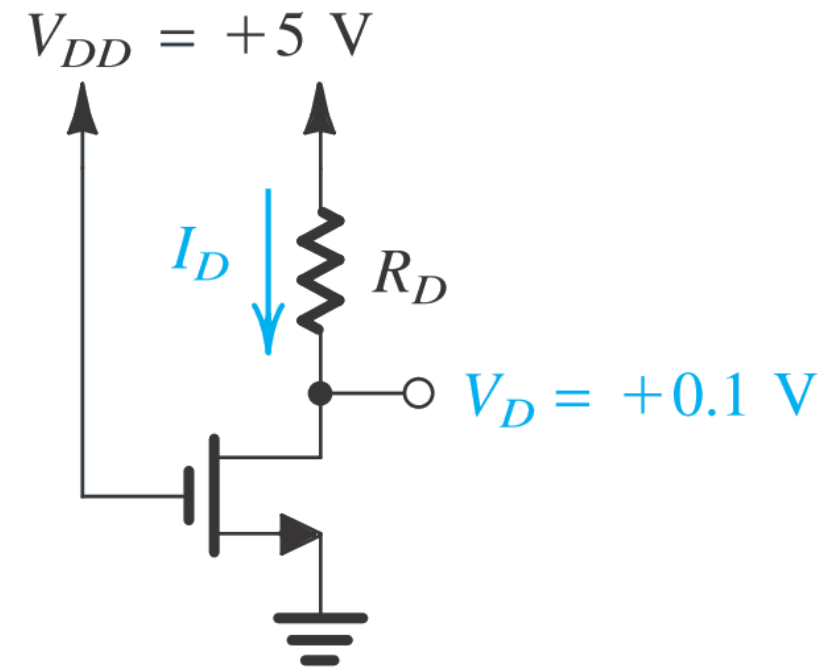
Exemplo

- Queremos projetar o circuito para obter $V_D = 0,1V$, neste caso, qual a resistência r_{DS} entre o dreno e a fonte do transistor?
- $V_{tn} = 1V$ e $k_n = k'_n(W/L) = 1mA/V^2$
- $I_D = 1m \cdot [(5V - 1V) \cdot 0,1V - 0,5 \cdot 0,1^2] = 395\mu A$
- $R_D = (5V - 0,1V) / 395\mu A = 12,4k\Omega$



Exemplo

- Queremos projetar o circuito para obter $V_D = 0,1V$, neste caso, qual a resistência r_{DS} entre o dreno e a fonte do transistor?
- $V_{tn} = 1V$ e $k_n = k'_n(W/L) = 1mA/V^2$
- $I_D = 1m \cdot [(5V - 1V) \cdot 0,1V - 0,5 \cdot 0,1^2] = 395\mu A$
- $R_D = (5V - 0,1V) / 395\mu A = 12,4k\Omega$
- $r_{DS} = V_{DS} / I_D = 0,1 / 395\mu = 253\Omega$



Exemplo

- Queremos projetar o circuito para obter $V_D = 0,1V$, neste caso, qual a resistência r_{DS} entre o dreno e a fonte do transistor?

- $V_{tn} = 1V$ e $k_n = k'_n(W/L) = 1mA/V^2$

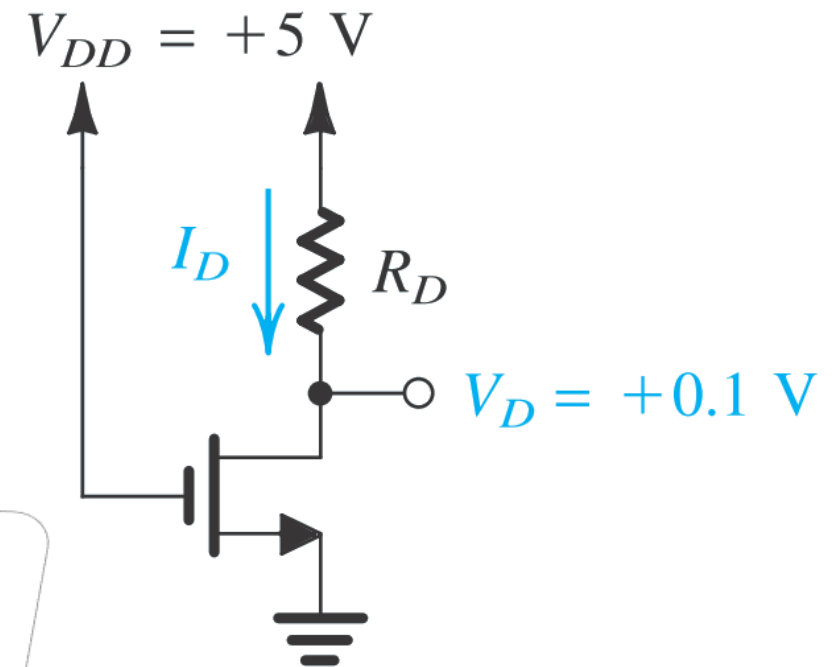
- $I_D = 1m \cdot [(5V - 1V) \cdot 0,1V - 0,5 \cdot 0,1^2] = 395\mu A$

- $R_D = (5V - 0,1V) / 395\mu A = 12,4k\Omega$

- $r_{DS} = V_{DS} / I_D = 0,1 / 395\mu = 253\Omega$

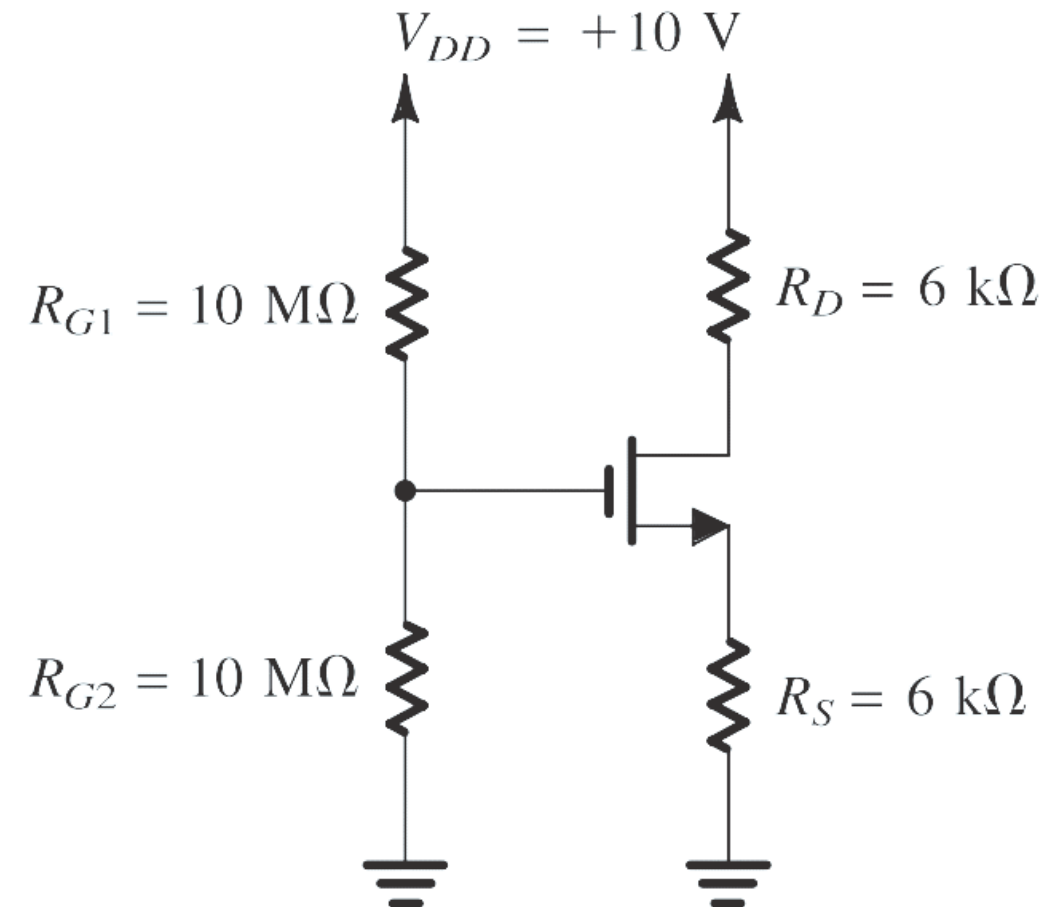
- Se usássemos a fórmula para r_{DS} :
o valor calculado seria de 250Ω

$$r_{DS} = \frac{1}{k_n V_{OV}}$$



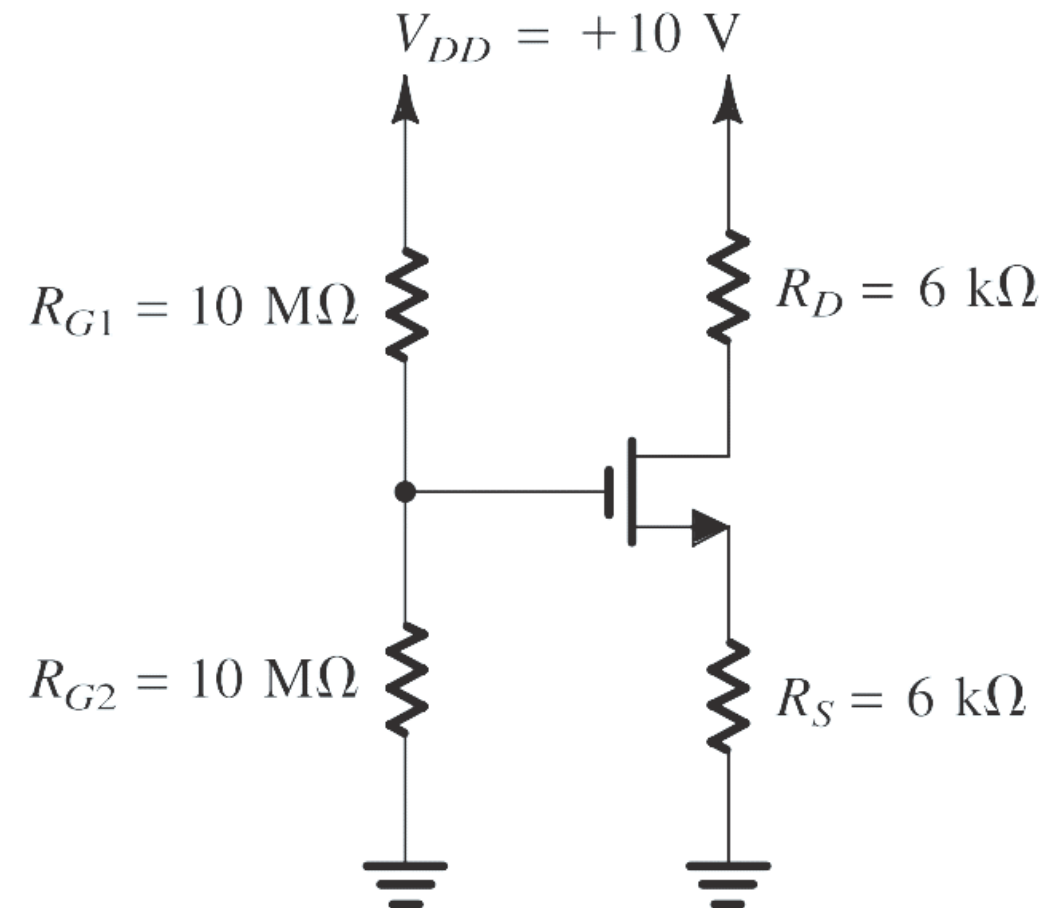
Exemplo

- Calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor Q1 no circuito:
 $V_{tn}=1V$ $k_n=1mA/V^2$ $\lambda=0$



Exemplo

- Calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor Q1 no circuito:
 $V_{tn}=1V$ $k_n=1mA/V^2$ $\lambda=0$
- Como não há corrente na porta, $V_G=5V$



Exemplo

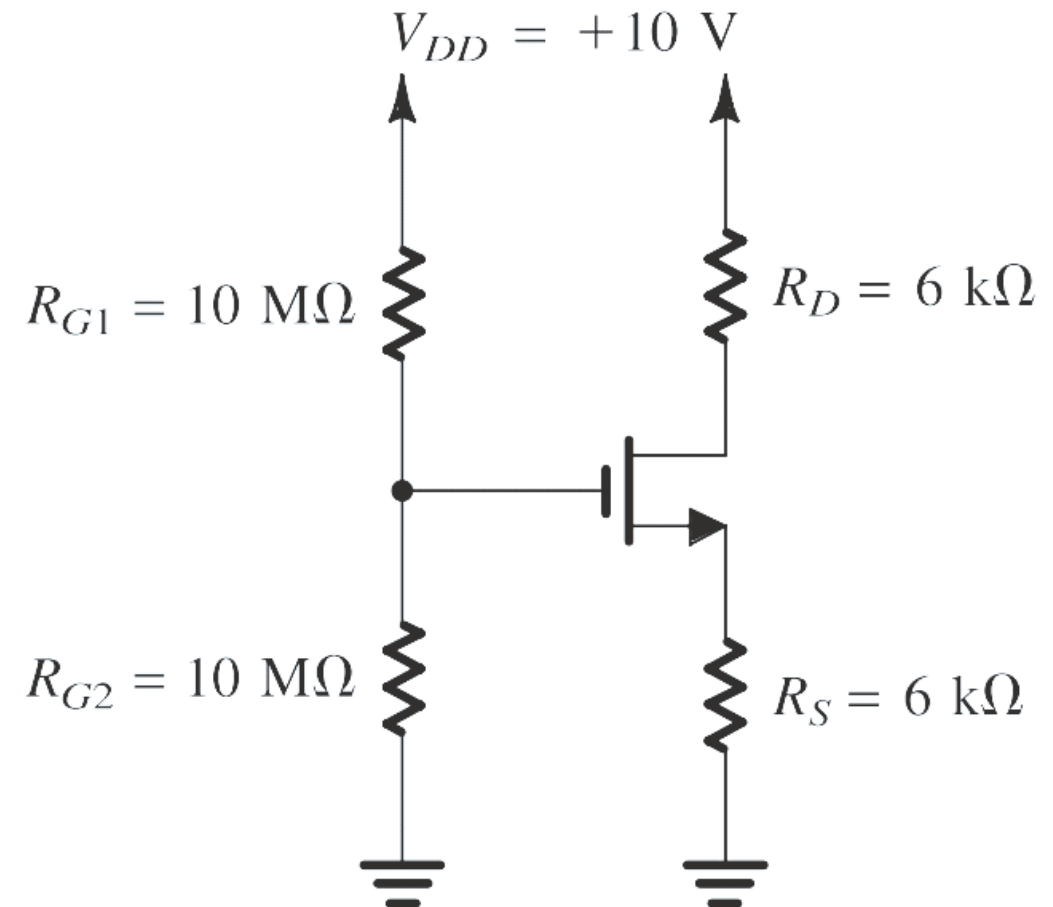
- Calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor Q1 no circuito:

$$V_{tn}=1V \quad k_n=1\text{mA/V}^2 \quad \lambda=0$$

- Como não há corrente na porta, $V_G=5V$
- Não sabemos em qual região o transistor estará operando, então supomos saturação:

$$i_D = \frac{1}{2} * k_n * V_{OV}^2$$

- A tensão V_S é a tensão sobre R_S : $6\text{k}\Omega * i_D$



Exemplo

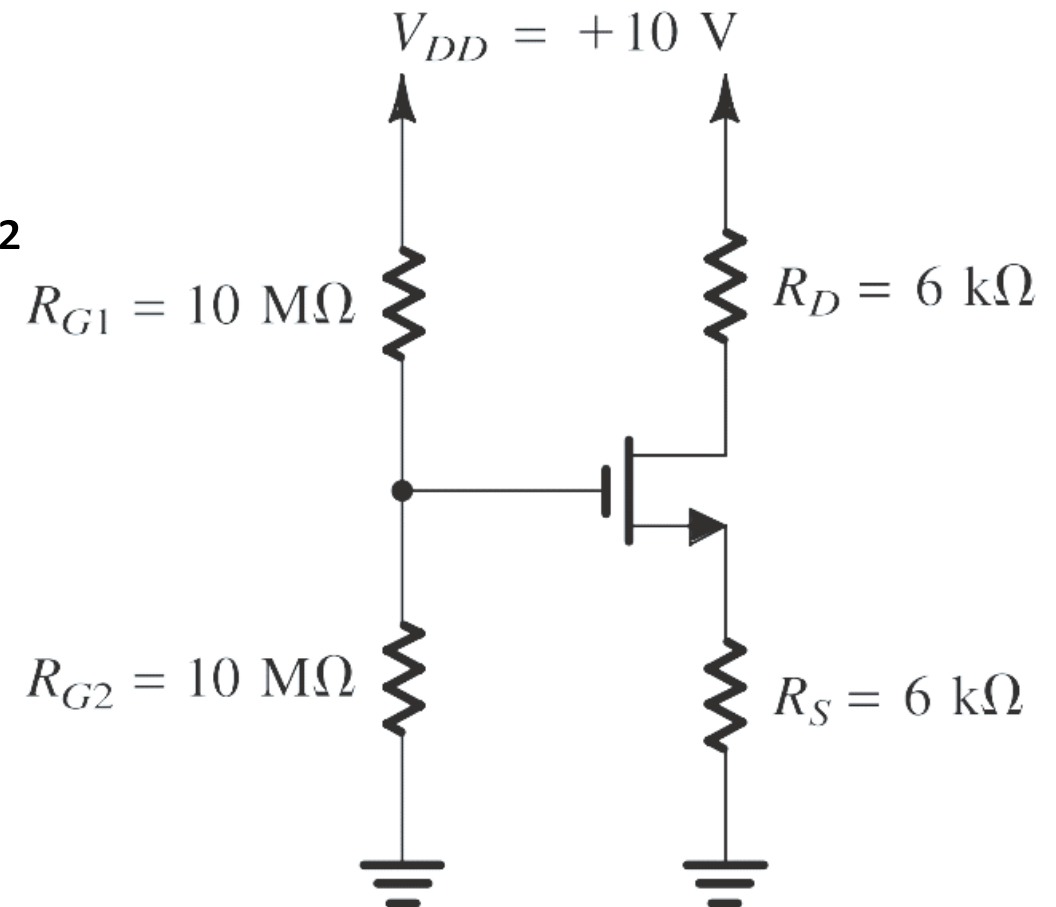
- Calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor Q1 no circuito:

$$V_{tn}=1V \quad k_n=1\text{mA/V}^2 \quad \lambda=0$$

- $V_G=5V$, supomos saturação: $i_D=1/2*k_n*V_{OV}^2$

- A tensão V_S é a tensão sobre R_S : $6\text{k}\Omega*i_D$

- $i_D=1/2*k_n*[(V_G-6\text{k}\Omega*i_D)-V_{tn}]^2$



Exemplo

- Calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor Q1 no circuito:

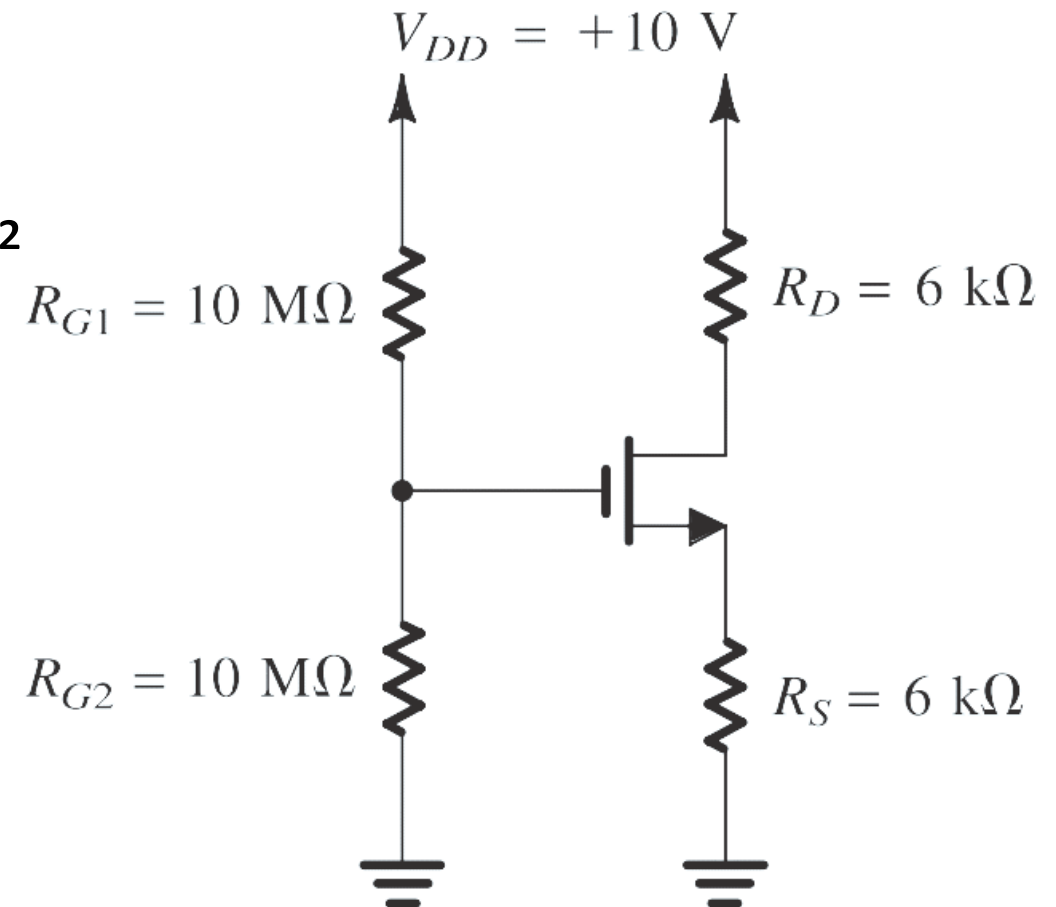
$$V_{tn}=1V \quad k_n=1\text{mA/V}^2 \quad \lambda=0$$

- $V_G=5V$, supomos saturação: $i_D=1/2*k_n*V_{OV}^2$

- A tensão V_S é a tensão sobre R_S : $6\text{k}\Omega*i_D$

- $i_D=1/2*1\text{m}*[5-6\text{k}.i_D-1]^2$

- A equação é quadrática e retorna dois resultados: 0,89mA ou 0,5mA



Exemplo

- Calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor Q1 no circuito:
 $V_{tn}=1V$ $k_n=1mA/V^2$ $\lambda=0$

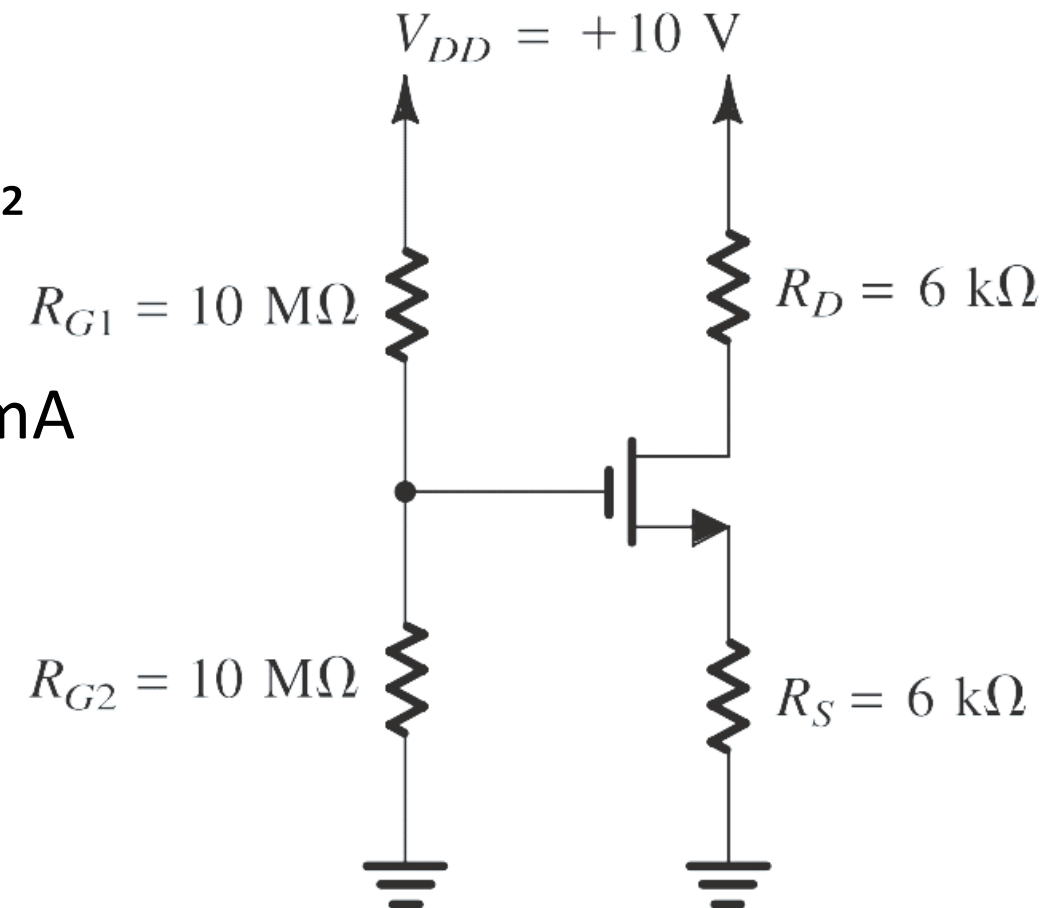
- $V_G=5V$, supomos saturação: $i_D=1/2*k_n*V_{OV}^2$

- A tensão V_S é a tensão sobre R_S : $6k\Omega*i_D$

- $i_D=1/2*1m*[5-6k.i_D-1]^2 = 0,89mA$ ou $0,5mA$

- $0,89mA \rightarrow V_S=5,34V$

- $0,5mA \rightarrow V_S= 3V$



Exemplo

- Calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor Q1 no circuito:
 $V_{tn}=1V$ $k_n=1mA/V^2$ $\lambda=0$

- $V_G=5V$, supomos saturação: $i_D=1/2*k_n*V_{OV}^2$

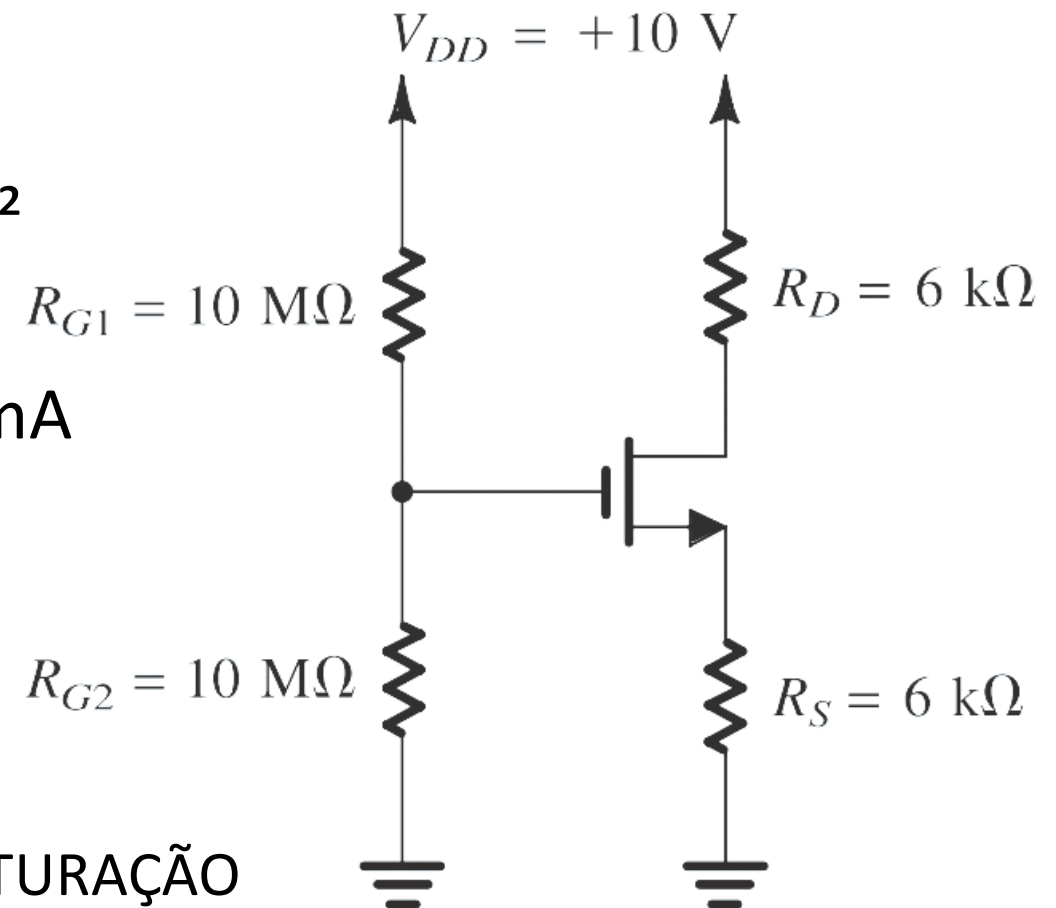
- A tensão V_S é a tensão sobre R_S : $6k\Omega*i_D$

- $i_D=1/2*1m*[5-6k.i_D-1]^2 = 0,89mA$ ou $0,5mA$

- ~~$0,89mA \rightarrow V_S=5,34V (>V_G)$~~

- $0,5mA \rightarrow V_S=3V \rightarrow V_{GS}=2V$ e $V_D=7V$

$V_{DS} > V_{GS} - V_{tn} \rightarrow$ SATURAÇÃO



Exemplo

- Calcule as tensões e correntes nos terminais do transistor Q1 no circuito:
 $V_{tn}=1V$ $k_n=1mA/V^2$ $\lambda=0$

- $V_G=5V$, supomos saturação: $i_D=1/2*k_n*V_{OV}^2$

- A tensão V_S é a tensão sobre R_S : $6k\Omega*i_D$

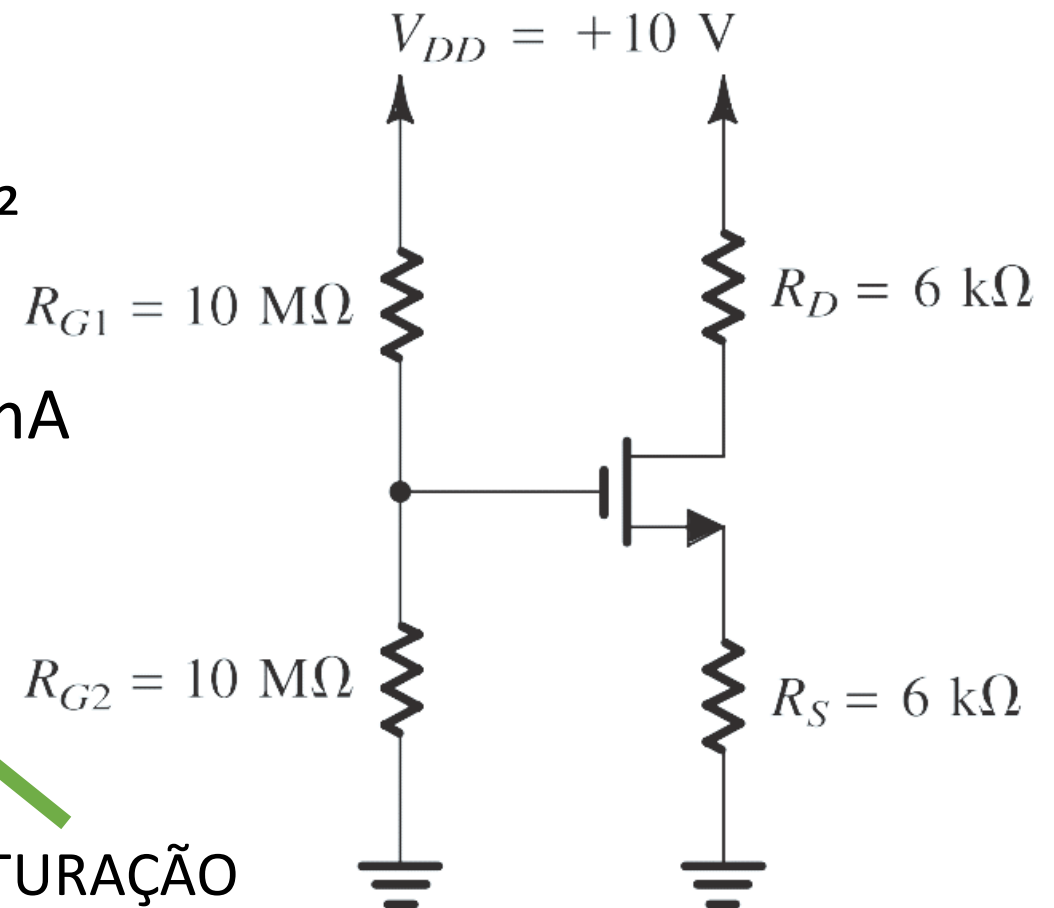
- $i_D=1/2*1m*[5-6k.i_D-1]^2 = 0,89mA$ ou $0,5mA$

- ~~$0,89mA \rightarrow V_S=5,34V (>V_G)$~~

- $0,5mA \rightarrow V_S=3V \rightarrow V_{GS}=2V$ e $V_D=7V$

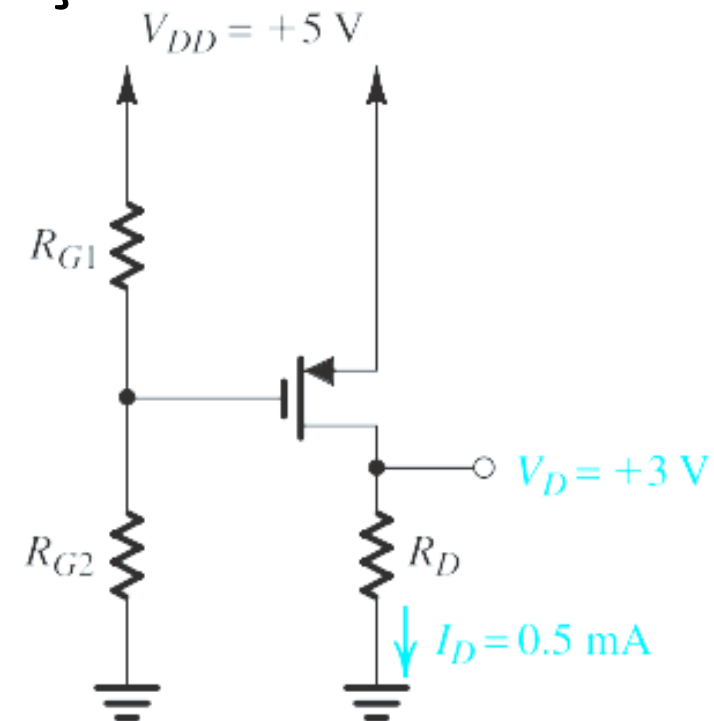
$V_{DS} > V_{GS} - V_{tn} \rightarrow$ SATURAÇÃO

OK!



Exemplo

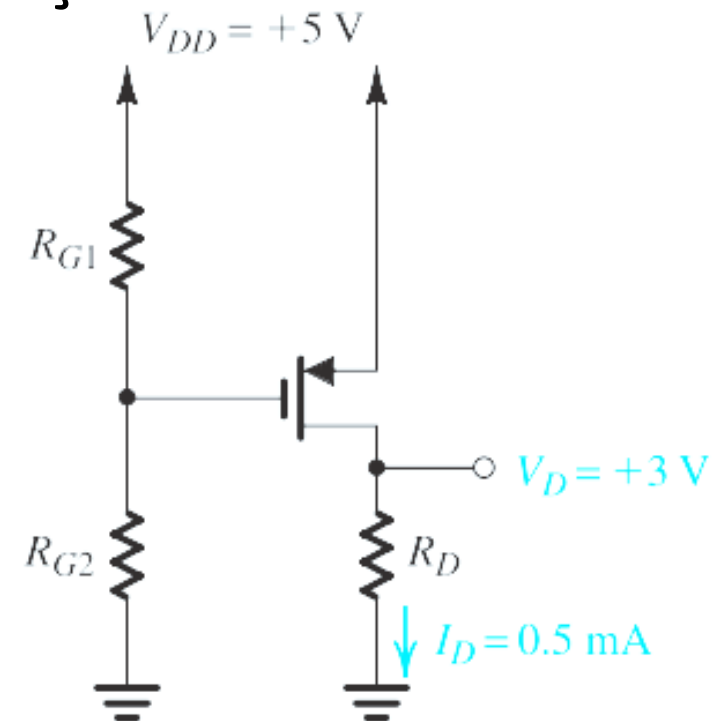
- Projete o circuito para obter $I_D = 0,5\text{mA}$ e $V_D = 3\text{V}$ operando em saturação
 $V_{tp} = -1\text{V}$ $k_p = 1\text{mA/V}^2$ $\lambda = 0$
- Qual o maior valor de R_D que mantem a região de saturação?



Exemplo

- Projete o circuito para obter $I_D = 0,5\text{mA}$ e $V_D = 3\text{V}$ operando em saturação
 $V_{tp} = -1\text{V}$ $k_p = 1\text{mA/V}^2$ $\lambda = 0$
- Qual o maior valor de R_D que mantem a região de saturação?
- Para $I_D = 0,5\text{mA}$, conseguimos calcular $|V_{OV}|$ com a equação da corrente em saturação

$$i_D = \frac{1}{2} k_p' \left(\frac{W}{L} \right) v_{OV}^2$$

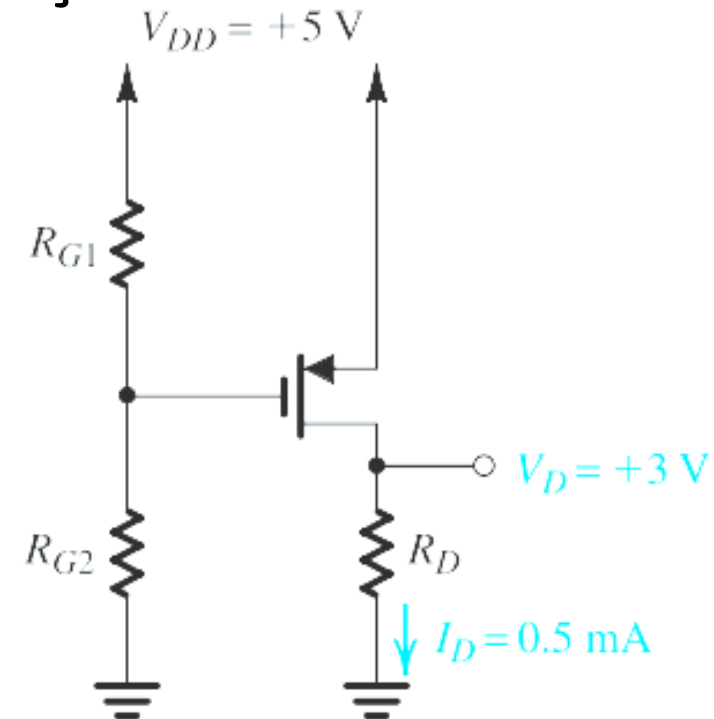


Exemplo

- Projete o circuito para obter $I_D = 0,5\text{mA}$ e $V_D = 3\text{V}$ operando em saturação
 $V_{tp} = -1\text{V}$ $k_p = 1\text{mA/V}^2$ $\lambda = 0$
- Qual o maior valor de R_D que mantem a região de saturação?

- Para $I_D = 0,5\text{mA} = 0,5 \cdot 1\text{m} \cdot V_{OV}^2 \rightarrow |V_{OV}| = 1\text{V}$

- $V_{SG} = |V_{tp}| + |V_{OV}| = 1 + 1 = 2\text{V}$



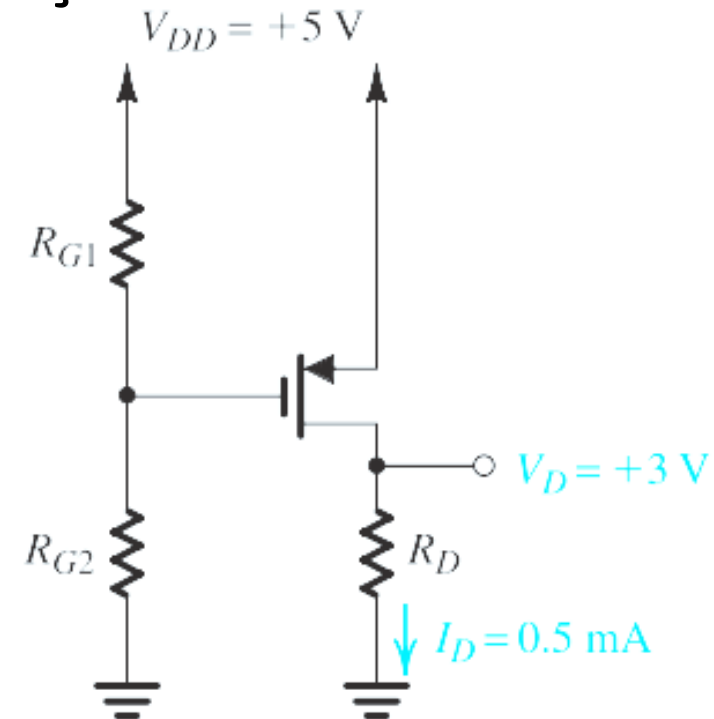
Exemplo

- Projete o circuito para obter $I_D = 0,5\text{mA}$ e $V_D = 3\text{V}$ operando em saturação
 $V_{tp} = -1\text{V}$ $k_p = 1\text{mA/V}^2$ $\lambda = 0$
- Qual o maior valor de R_D que mantem a região de saturação?

- Para $I_D = 0,5\text{mA} = 0,5 \cdot 1\text{m} \cdot V_{OV}^2 \rightarrow |V_{OV}| = 1\text{V}$

- $V_{SG} = |V_{tp}| + |V_{OV}| = 1 + 1 = 2\text{V}$

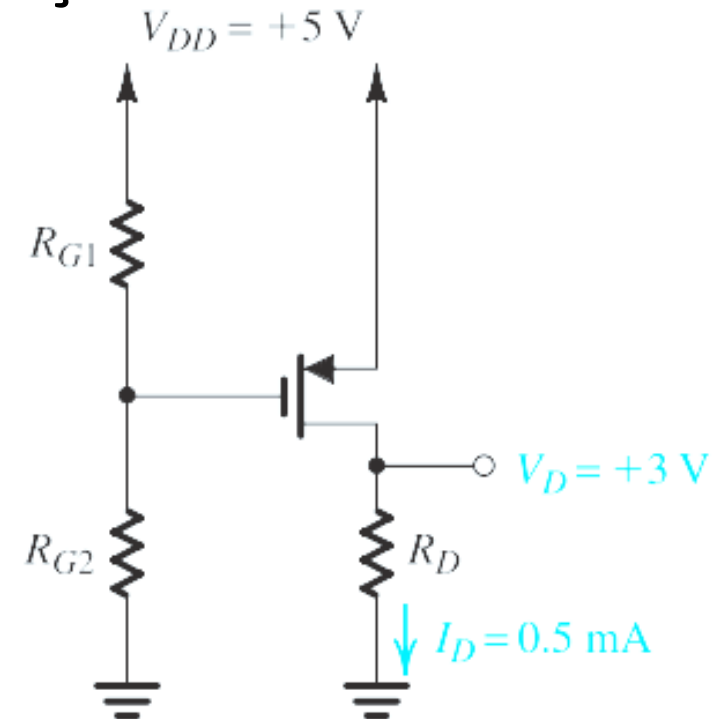
- Como $V_S = 5\text{V} \rightarrow V_G = 3\text{V}$



Exemplo

- Projete o circuito para obter $I_D = 0,5\text{mA}$ e $V_D = 3\text{V}$ operando em saturação
 $V_{tp} = -1\text{V}$ $k_p = 1\text{mA/V}^2$ $\lambda = 0$
- Qual o maior valor de R_D que mantem a região de saturação?

- Para $I_D = 0,5\text{mA} \rightarrow |V_{OV}| = 1\text{V} \rightarrow V_G = 3\text{V}$
- Como não há corrente na porta, podemos fazer um divisor resistivo da ordem de $\text{M}\Omega$, por exemplo
 $R_{G1} = 2\text{M}\Omega$ e $R_{G2} = 3\text{M}\Omega$



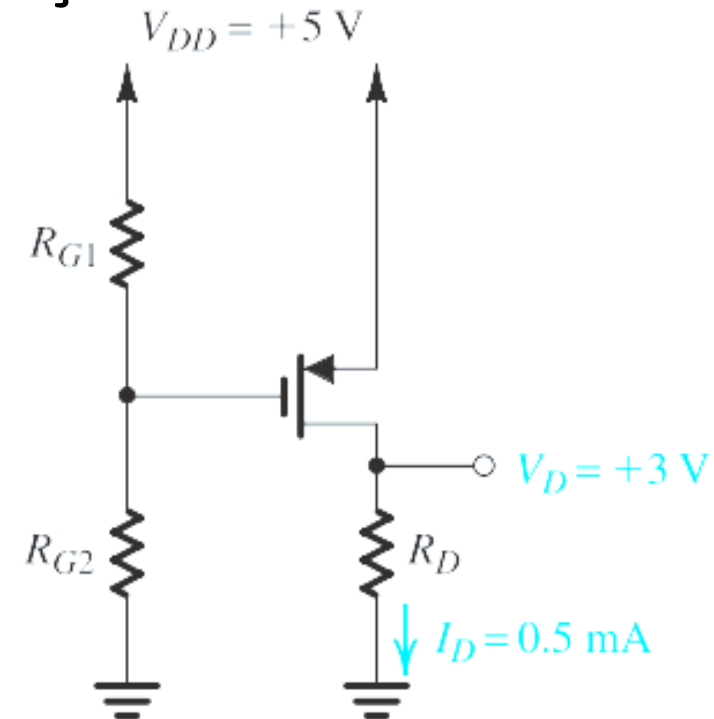
Exemplo

- Projete o circuito para obter $I_D = 0,5\text{mA}$ e $V_D = 3\text{V}$ operando em saturação
 $V_{tp} = -1\text{V}$ $k_p = 1\text{mA/V}^2$ $\lambda = 0$
- Qual o maior valor de R_D que mantem a região de saturação?

- Para $I_D = 0,5\text{mA} \rightarrow |V_{OV}| = 1\text{V} \rightarrow V_G = 3\text{V}$

- $R_{G1} = 2\text{M}\Omega$ e $R_{G2} = 3\text{M}\Omega$

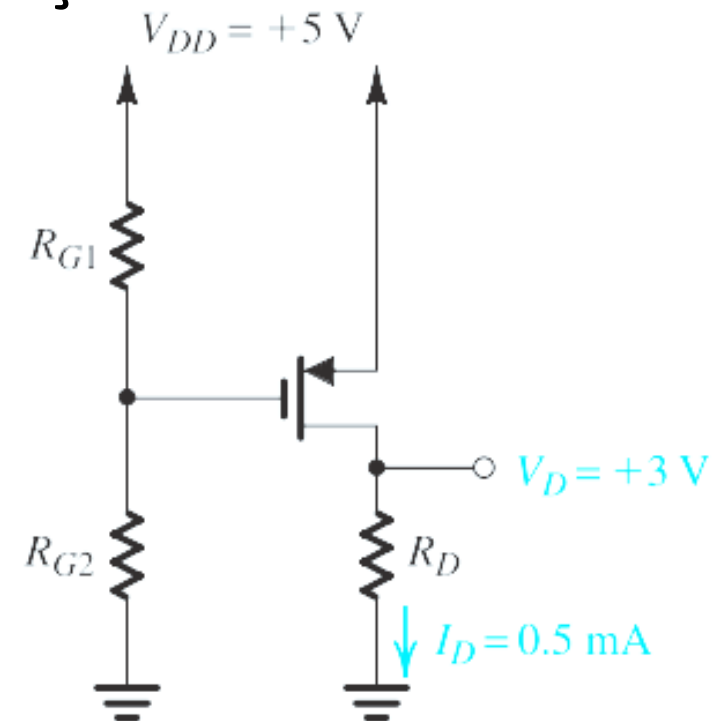
- $R_D = 3\text{V} / 0,5\text{mA} = 6\text{k}\Omega$



Exemplo

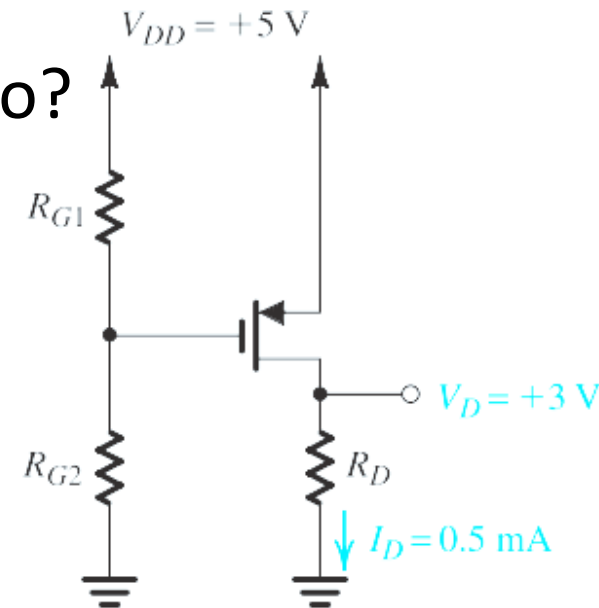
- Projete o circuito para obter $I_D = 0,5\text{mA}$ e $V_D = 3\text{V}$ operando em saturação
 $V_{tp} = -1\text{V}$ $k_p = 1\text{mA/V}^2$ $\lambda = 0$
- Qual o maior valor de R_D que mantem a região de saturação?

- Para $I_D = 0,5\text{mA} \rightarrow |V_{OV}| = 1\text{V} \rightarrow V_G = 3\text{V}$
- $R_{G1} = 2\text{M}\Omega$ e $R_{G2} = 3\text{M}\Omega$
- $R_D = 6\text{k}\Omega$



Exemplo

- Projete o circuito para obter $I_D = 0,5\text{mA}$ e $V_D = 3\text{V}$ operando em saturação
 $V_{tp} = -1\text{V}$ $k_p = 1\text{mA/V}^2$ $\lambda = 0$
 - Para $I_D = 0,5\text{mA} \rightarrow |V_{OV}| = 1\text{V} \rightarrow V_G = 3\text{V}$
 - $R_{G1} = 2\text{M}\Omega$ e $R_{G2} = 3\text{M}\Omega$
 - $R_D = 6\text{k}\Omega$
- Qual o maior valor de R_D que mantem a região de saturação?



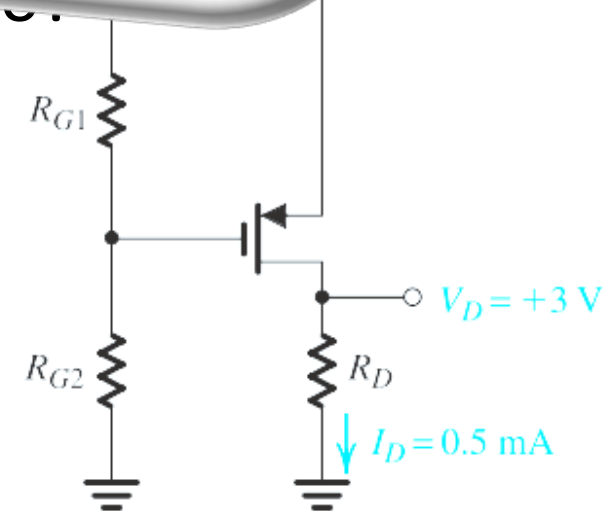
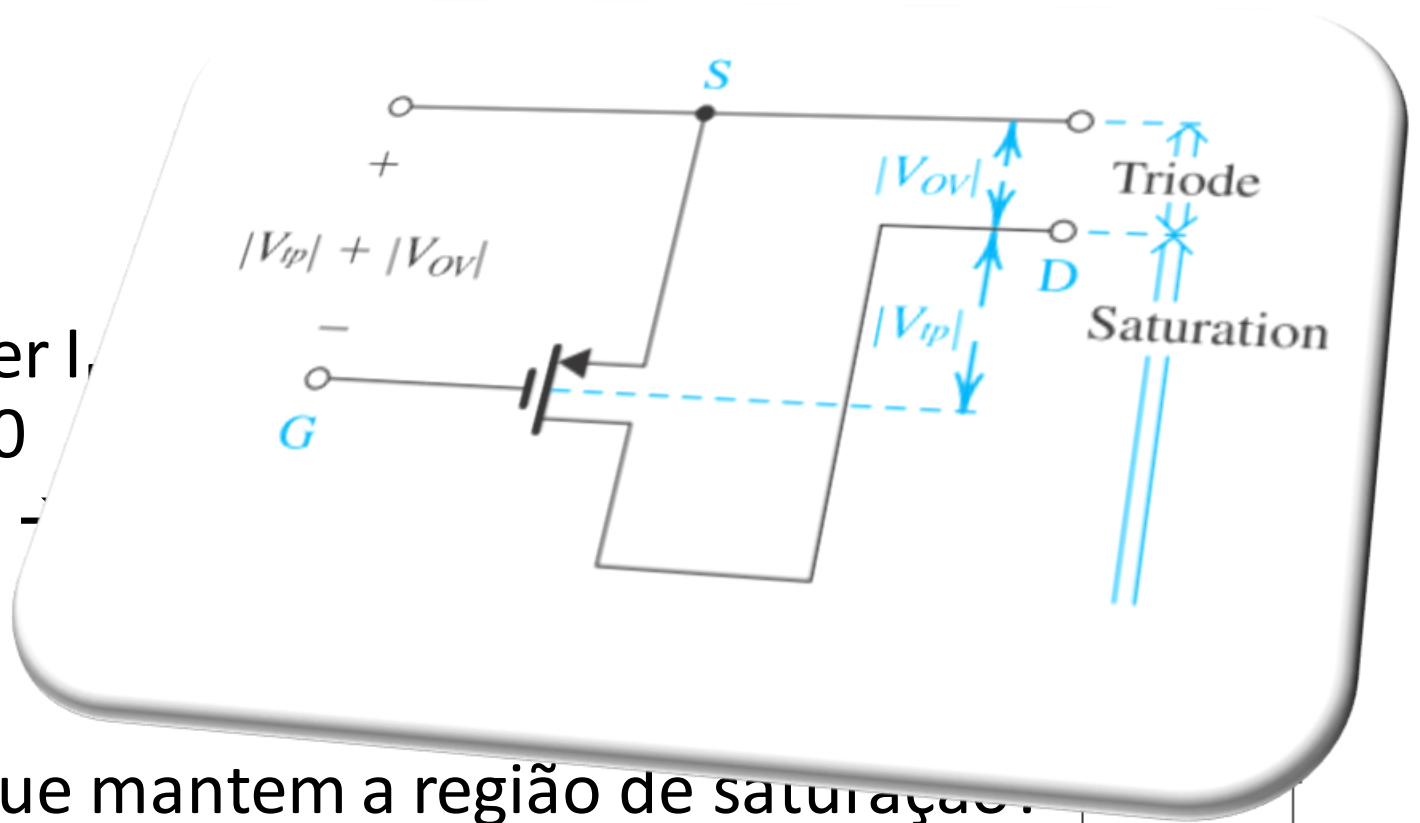
Exemplo

- Projete o circuito para obter $I_D = 0.5 \text{ mA}$
 $V_{tp} = -1 \text{ V}$ $k_p = 1 \text{ mA/V}^2$ $\lambda = 0$

- Para $I_D = 0.5 \text{ mA} \rightarrow |V_{ov}| = 1 \text{ V}$
- $R_{G1} = 2 \text{ M}\Omega$ e $R_{G2} = 3 \text{ M}\Omega$
- $R_D = 6 \text{ k}\Omega$

- Qual o maior valor de R_D que mantém a região de saturação?

- Limite da saturação: $|V_{SD}| = |V_{ov}|$

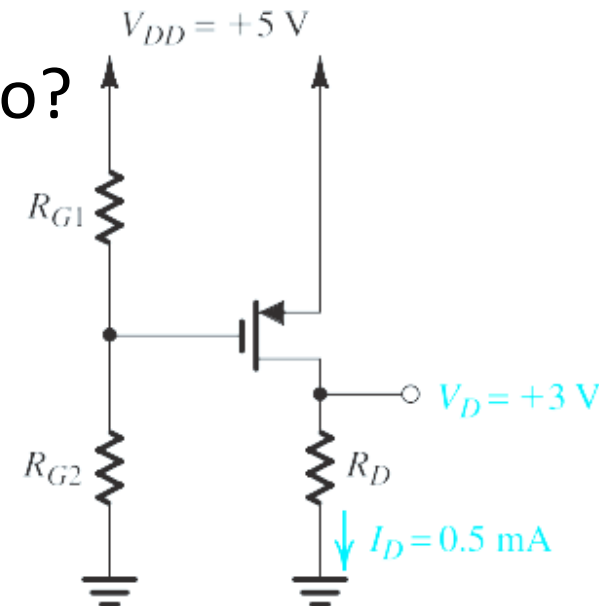


Exemplo

- Projete o circuito para obter $I_D = 0,5\text{mA}$ e $V_D = 3\text{V}$ operando em saturação

$$V_{tp} = -1\text{V} \quad k_p = 1\text{mA/V}^2 \quad \lambda = 0$$

- Para $I_D = 0,5\text{mA} \rightarrow |V_{OV}| = 1\text{V} \rightarrow V_G = 3\text{V}$
 - $R_{G1} = 2\text{M}\Omega$ e $R_{G2} = 3\text{M}\Omega$
 - $R_D = 6\text{k}\Omega$
- Qual o maior valor de R_D que mantem a região de saturação?

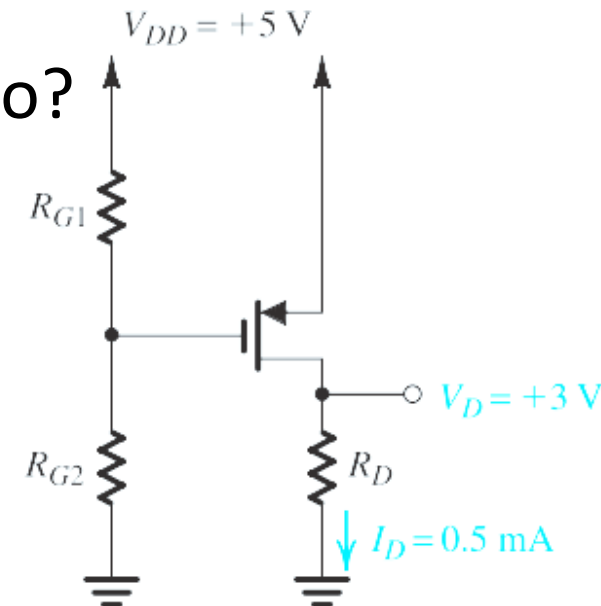


Exemplo

- Projete o circuito para obter $I_D = 0,5\text{mA}$ e $V_D = 3\text{V}$ operando em saturação

$$V_{tp} = -1\text{V} \quad k_p = 1\text{mA/V}^2 \quad \lambda = 0$$

- Para $I_D = 0,5\text{mA} \rightarrow |V_{OV}| = 1\text{V} \rightarrow V_G = 3\text{V}$
 - $R_{G1} = 2\text{M}\Omega$ e $R_{G2} = 3\text{M}\Omega$
 - $R_D = 6\text{k}\Omega$
- Qual o maior valor de R_D que mantem a região de saturação?
 - Limite da saturação: $|V_{SD}| = |V_{OV}|$
 - Limite da saturação: V_D excede V_G com magnitude de $|V_{tp}|$
 - $V_{D\max} = 3 + 1 = 4\text{V}$
 - $R_{D\max} = 4\text{V} / 0,5\text{mA} = 8\text{k}\Omega$



CMOS – MOS Complementar

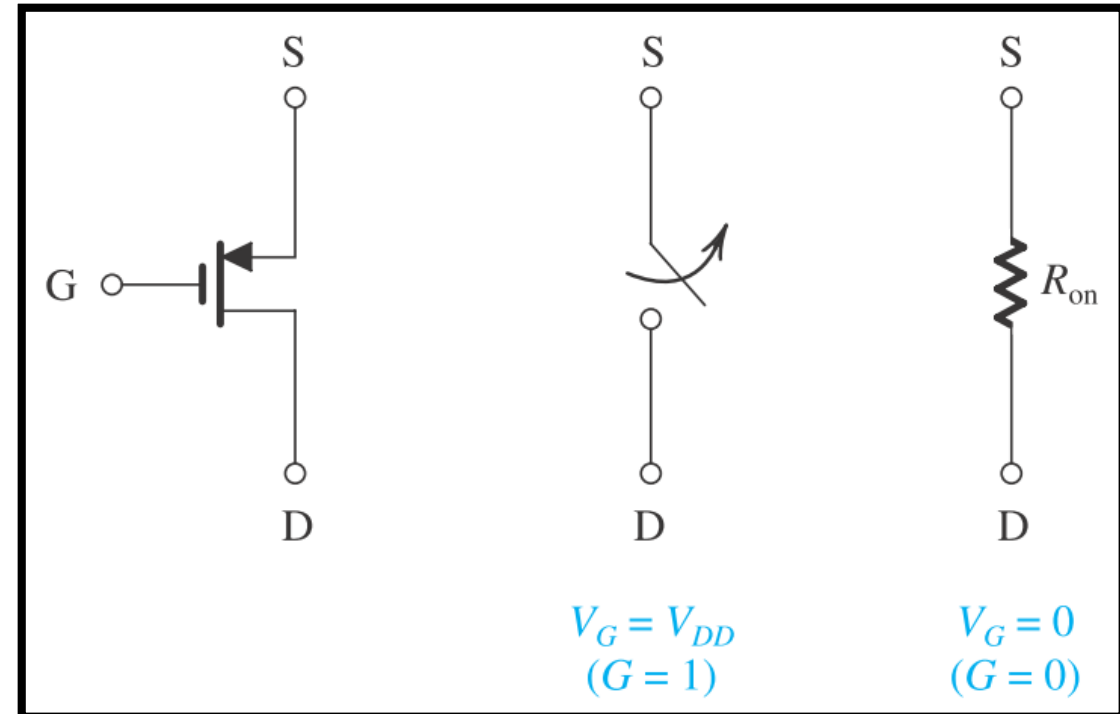
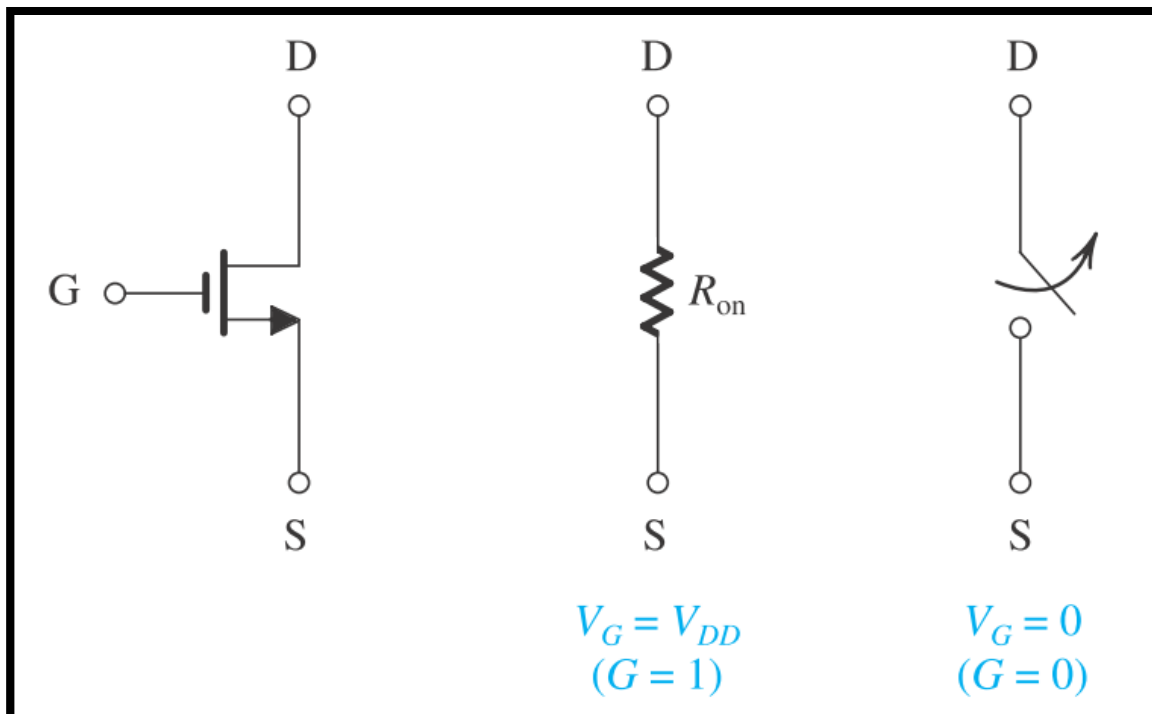
- Utilizando tecnologia NMOS em conjunto com PMOS, são construídos circuitos lógicos.
- Utiliza-se as regiões de corte e triodo, em conjunto com as características de tensão dos dois tipos de transistor para fazer circuitos simples de forma complementar:

CMOS – MOS Complementar

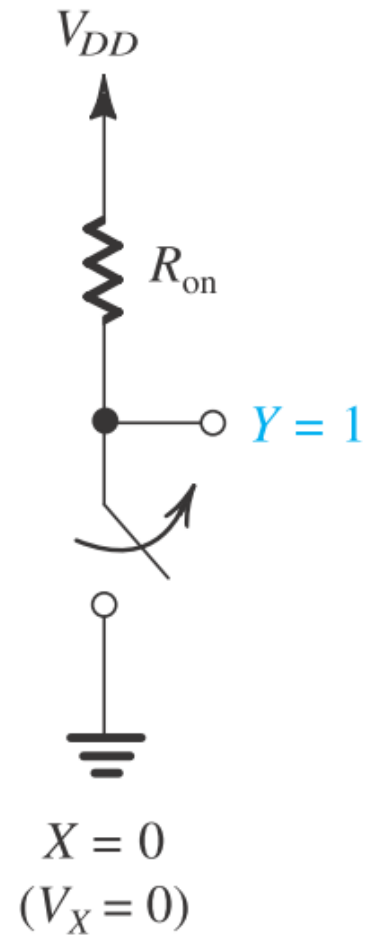
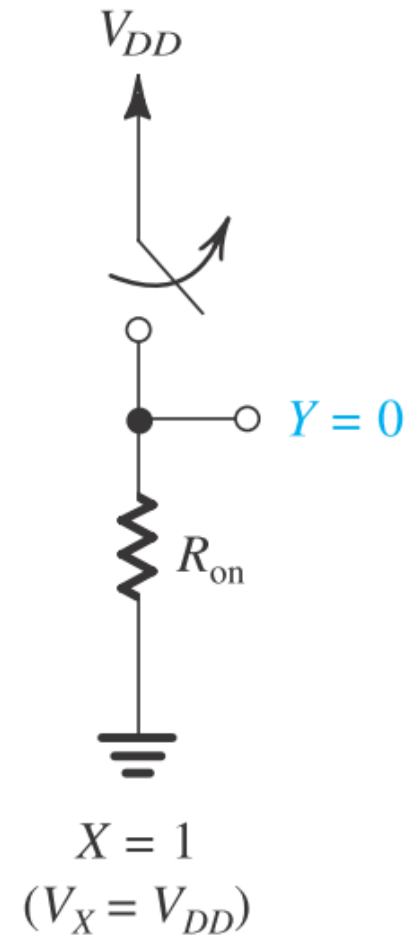
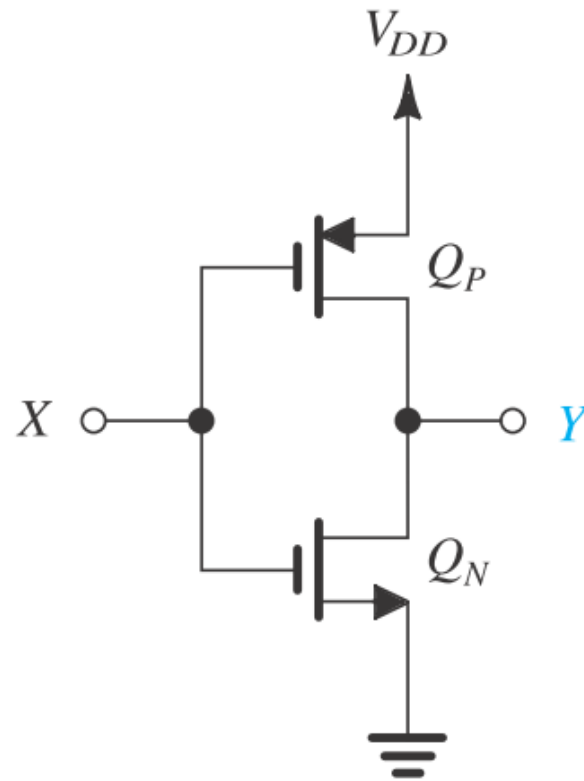
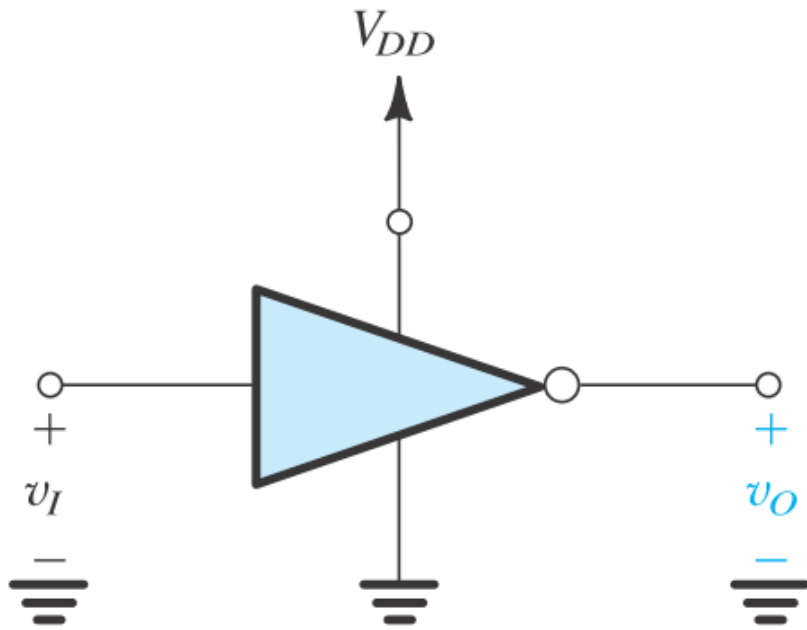
- Utilizando tecnologia NMOS em conjunto com PMOS, são construídos circuitos lógicos.
- Utiliza-se as regiões de corte e triodo, em conjunto com as características de tensão dos dois tipos de transistor para fazer circuitos simples de forma complementar:
- NMOS com entrada alta – baixa resistência
- PMOS com entrada alta – circuito aberto
- NMOS com entrada baixa – circuito aberto
- PMOS com entrada baixa – baixa resistência

CMOS – MOS Complementar

- NMOS com entrada alta – baixa resistência
- PMOS com entrada alta – circuito aberto
- NMOS com entrada baixa – circuito aberto
- PMOS com entrada baixa – baixa resistência

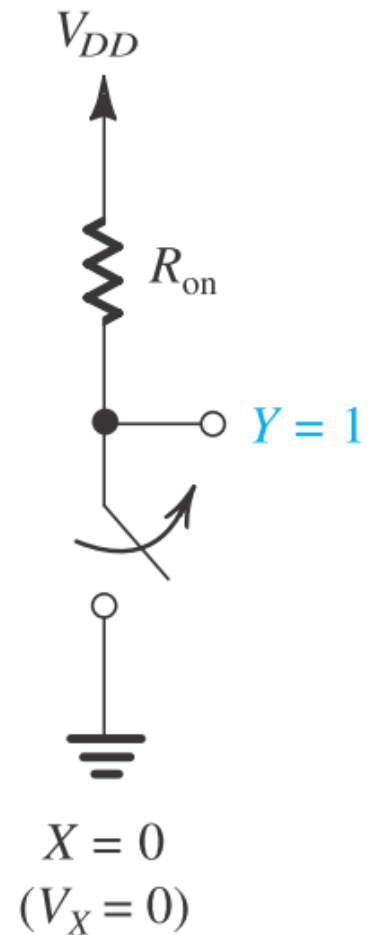
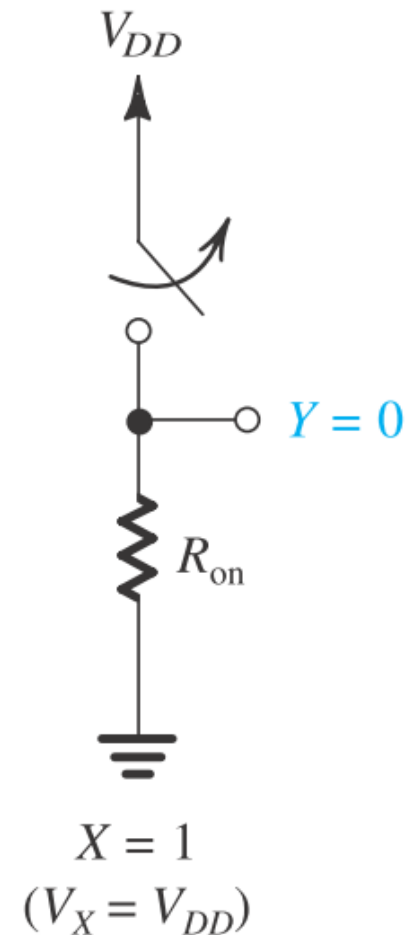
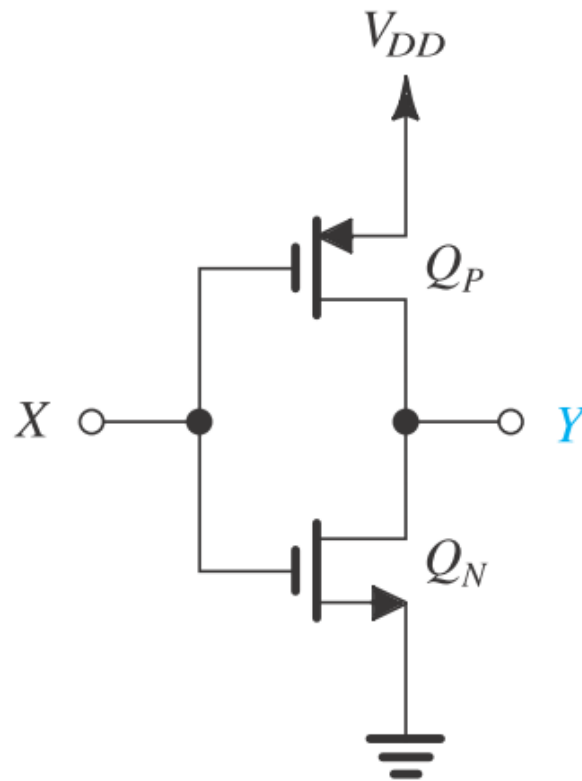
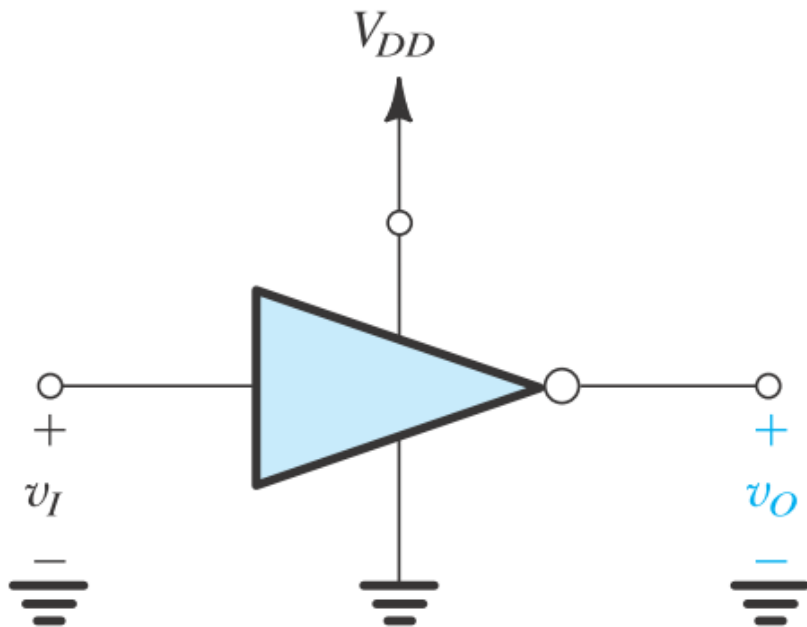


Inversor lógico CMOS



Inversor lógico CMOS

- Note: PMOS no lado de alta, NMOS no lado de baixa

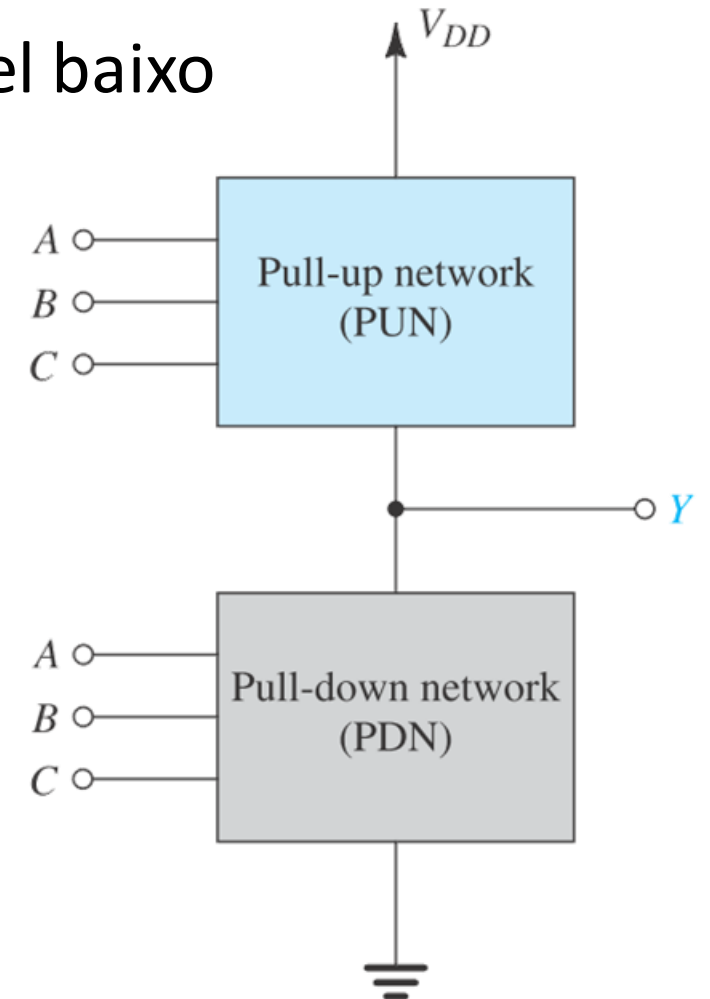
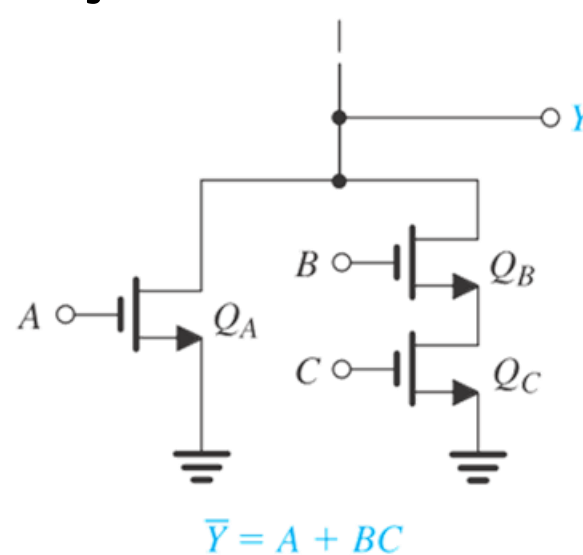
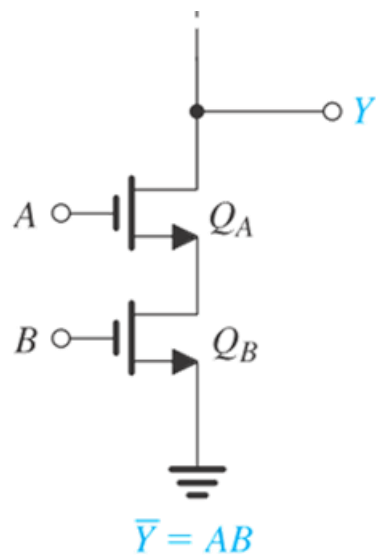
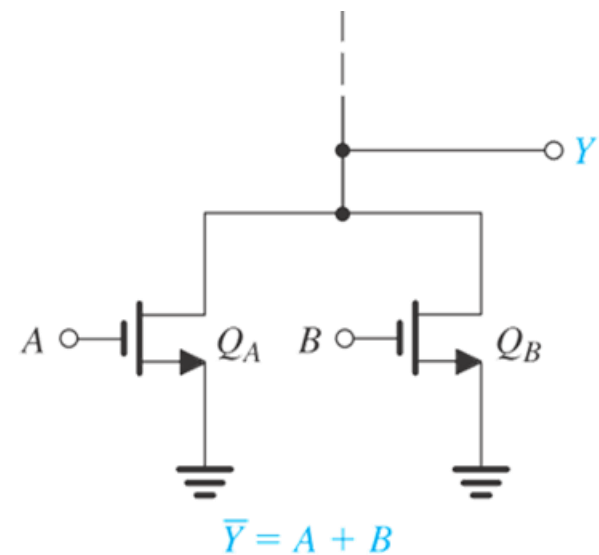


Circuitos lógicos CMOS

- Utilizando as mesmas características que possibilitam construir o inversor lógico CMOS, podemos construir circuitos lógicos mais complexos, fazendo duas redes: PDN e PUN
- PDN – Pull Down Network – leva a saída para o nível baixo
 - Construída com transistores NMOS
- PUN – Pull Up Network – leva a saída para nível alto
 - Construída com transistores PMOS

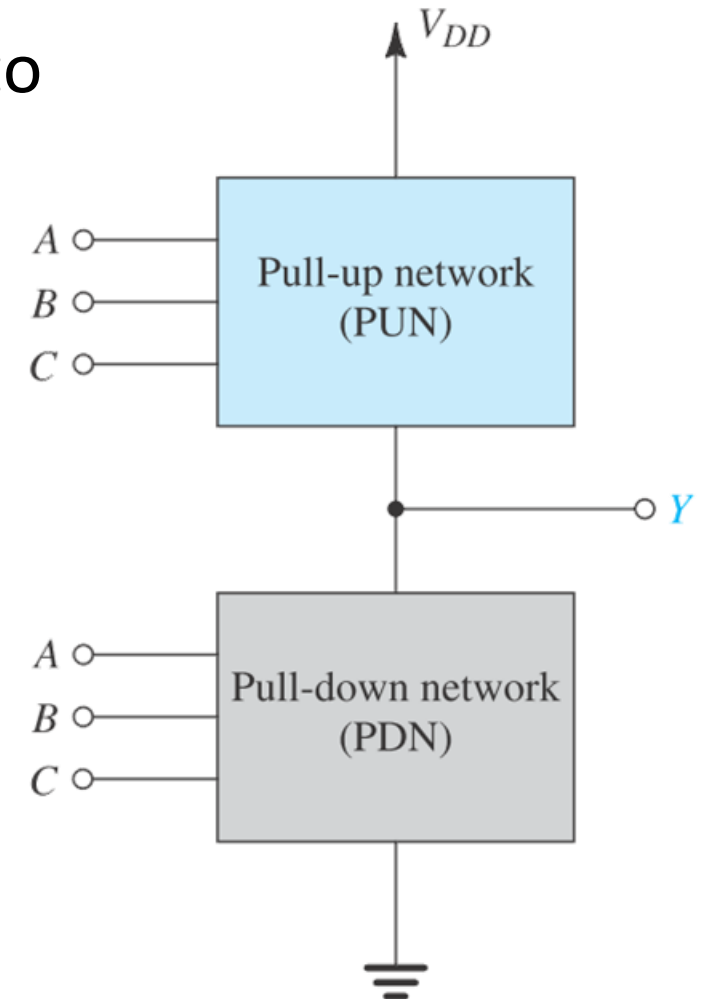
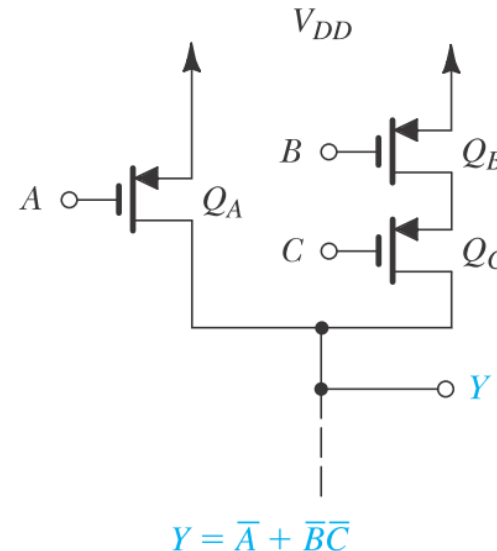
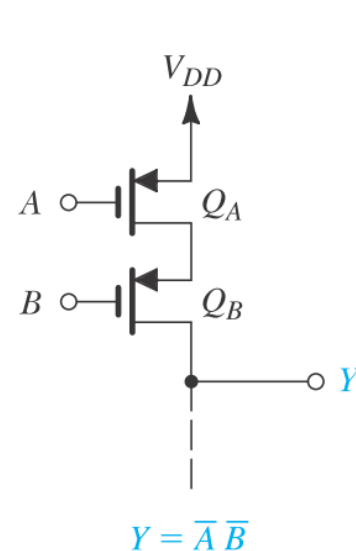
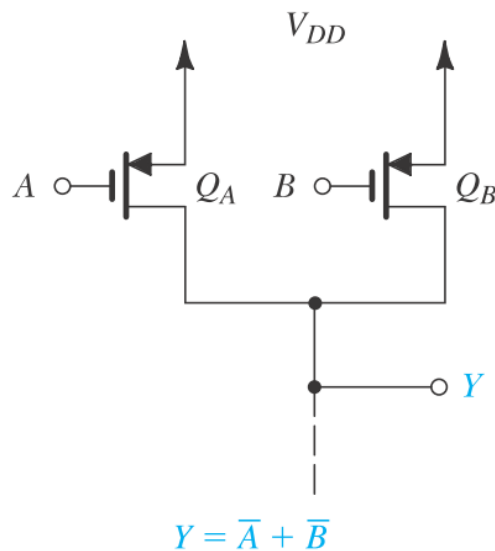
Circuitos lógicos CMOS

- PDN –Pull Down Network – leva a saída para o nível baixo
 - Construída com transistores NMOS
- Transistores em paralelo fazem função OR
- Transistores em série fazem função AND



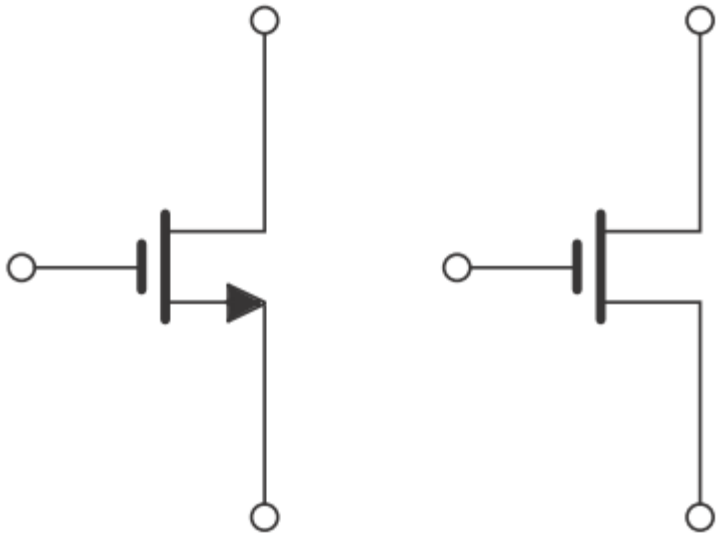
Circuitos lógicos CMOS

- PUN – Pull Up Network – leva a saída para nível alto
 - Construída com transistores PMOS
- Transistores em paralelo fazem função AND
- Transistores em série fazem função OR

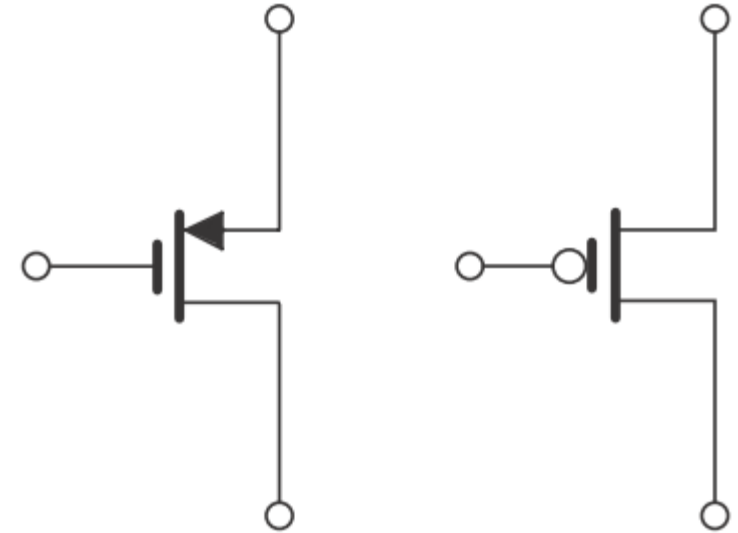


Símbolos mais simples para lógica digital

- NMOS fica simplificado omitindo a seta
 - PMOS fica simplificado omitindo a seta e por um sinal de 'não' na entrada

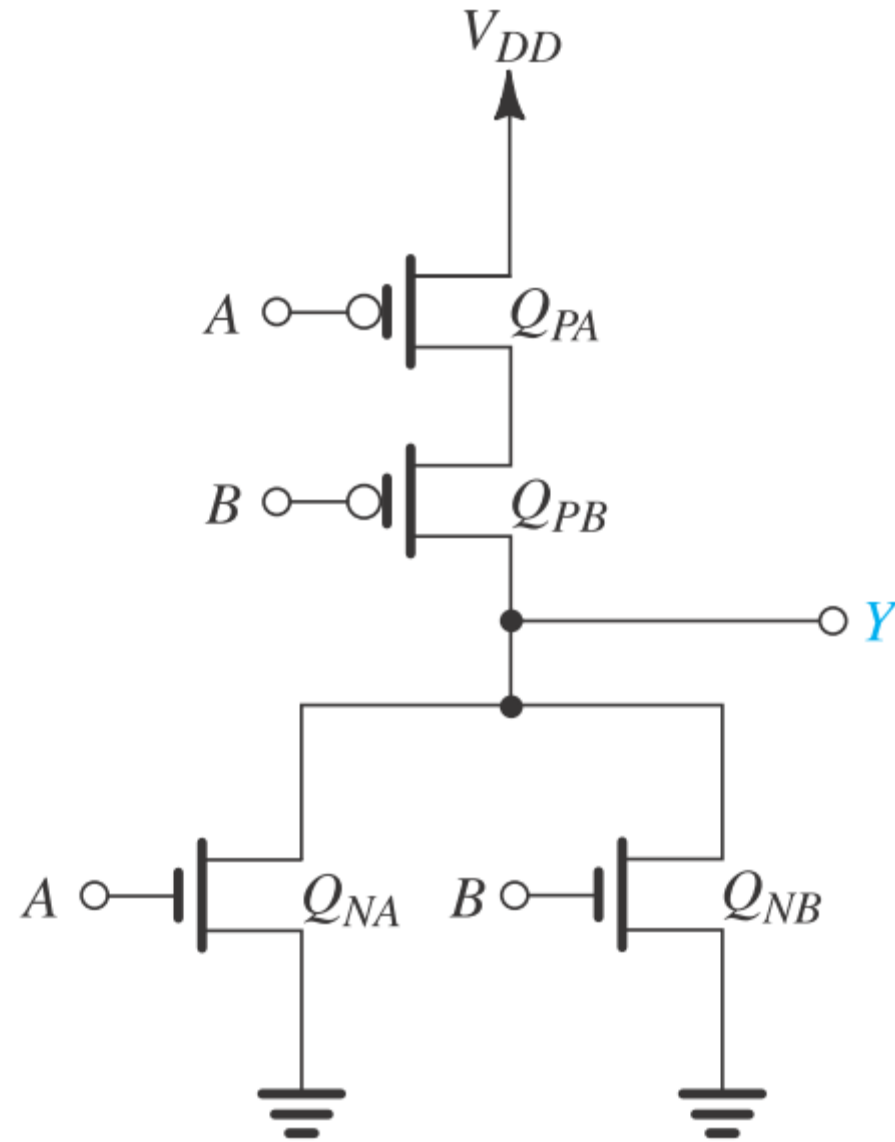


NMOS



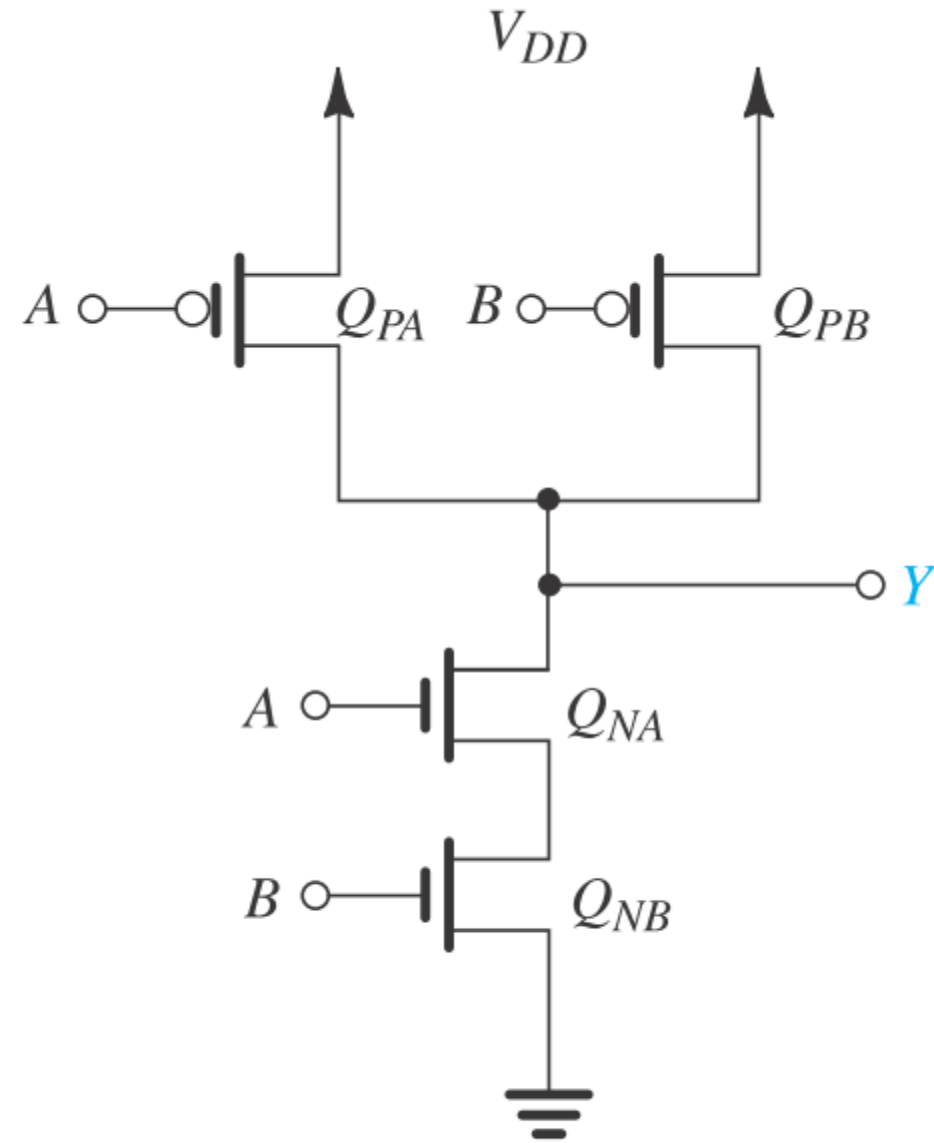
PMOS

Porta NOR



$$Y = \overline{A + B}$$

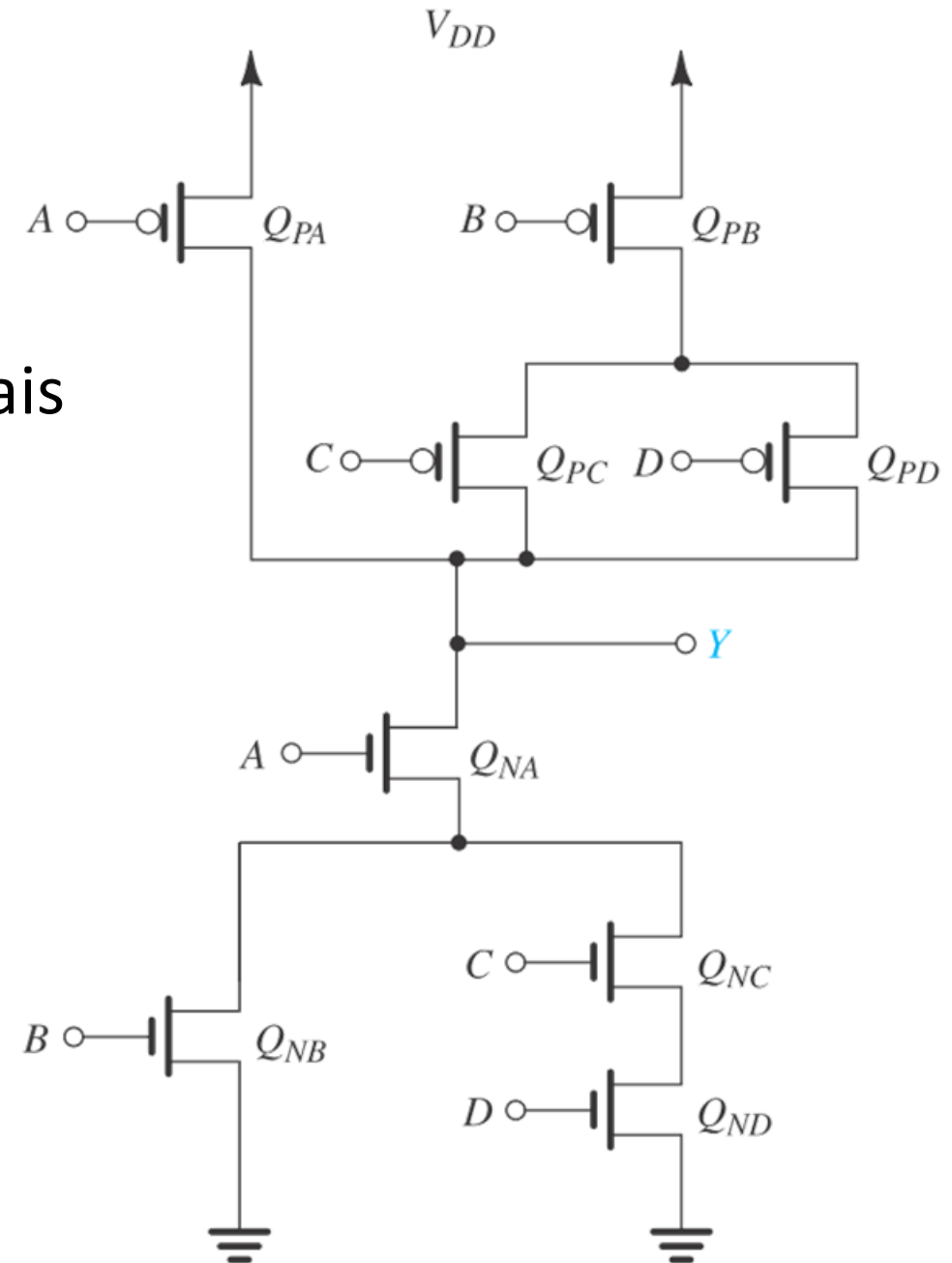
Porta NAND



$$Y = \overline{AB}$$

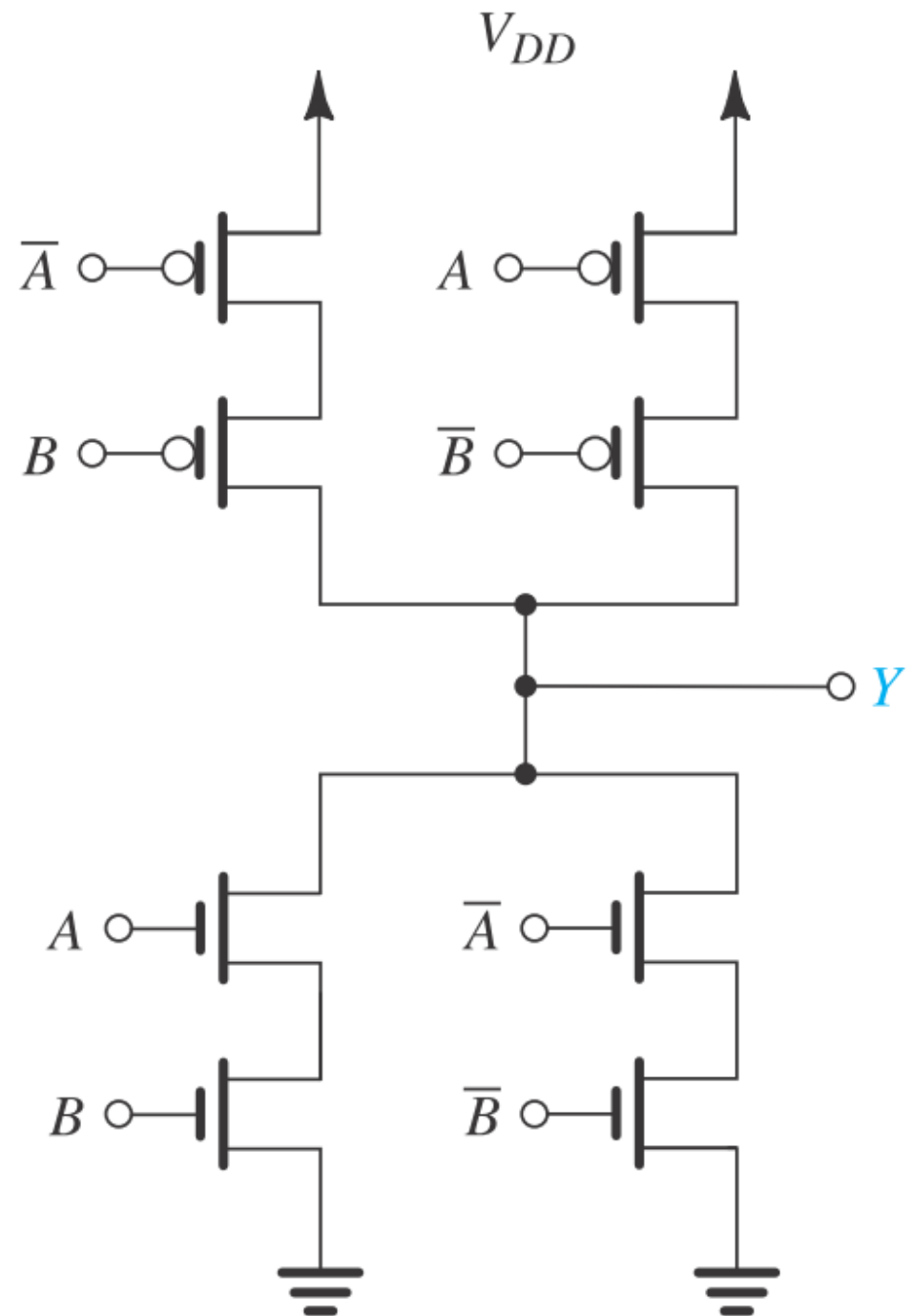
Portas mais complexas

- Note que as redes PUN e PDN são duais



$$Y = \overline{A(B + CD)}$$

Porta Ou Exclusivo



Resumindo

- A PDN pode ser sintetizada a partir da expressão para \bar{Y}
- A PUN pode ser sintetizada a partir da expressão para Y
- Uma rede pode ser construída a partir da outra observando o princípio da dualidade

Exemplo:

- Obtenha um circuito lógico capaz de executar a função $Y = \overline{A + B(C + D)}$

Exemplo:

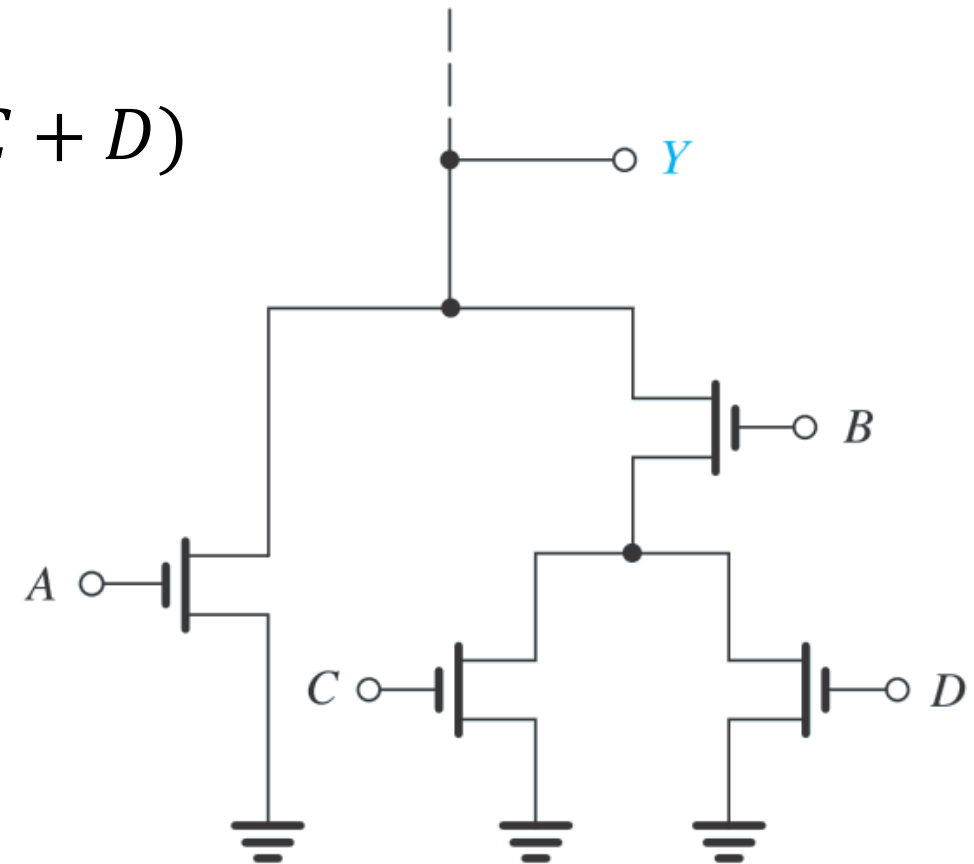
- Obtenha um circuito lógico capaz de executar a função $Y = \overline{A + B(C + D)}$
- Para a PDN usamos a expressão: $\bar{Y} = A + B(C + D)$

Exemplo:

- Obtenha um circuito lógico capaz de executar a função $Y = \overline{A + B(C + D)}$
- Para a PDN usamos a expressão: $\bar{Y} = A + B(C + D)$
- Função 'OU' (+) \rightarrow redes em paralelo
- Função 'E' (*) \rightarrow redes em série

Exemplo:

- Obtenha um circuito lógico capaz de executar a função $Y = \overline{A + B(C + D)}$
- Para a PDN usamos a expressão: $\bar{Y} = A + B(C + D)$
- Função 'OU' (+) \rightarrow redes em paralelo
- Função 'E' (*) \rightarrow redes em série

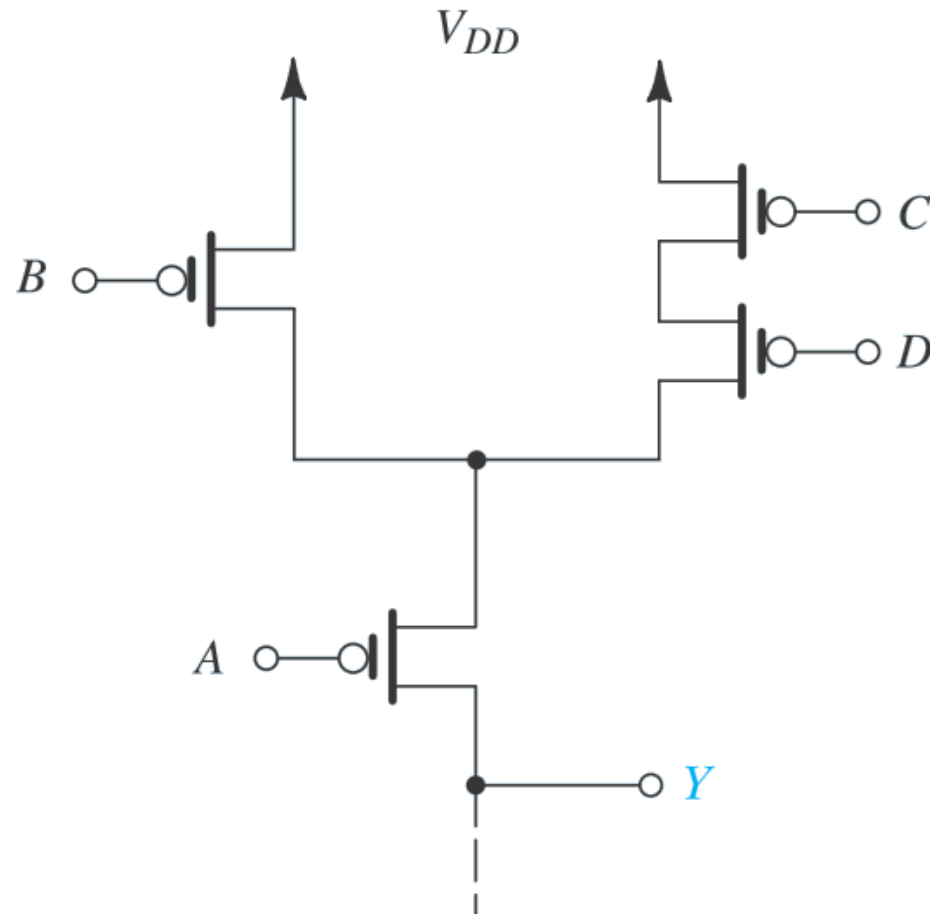


Exemplo:

- Obtenha um circuito lógico capaz de executar a função $Y = \overline{A + B(C + D)}$
- Para a PUN usamos a expressão por deMorgan: $Y = \bar{A}(\bar{B} + \bar{C}\bar{D})$

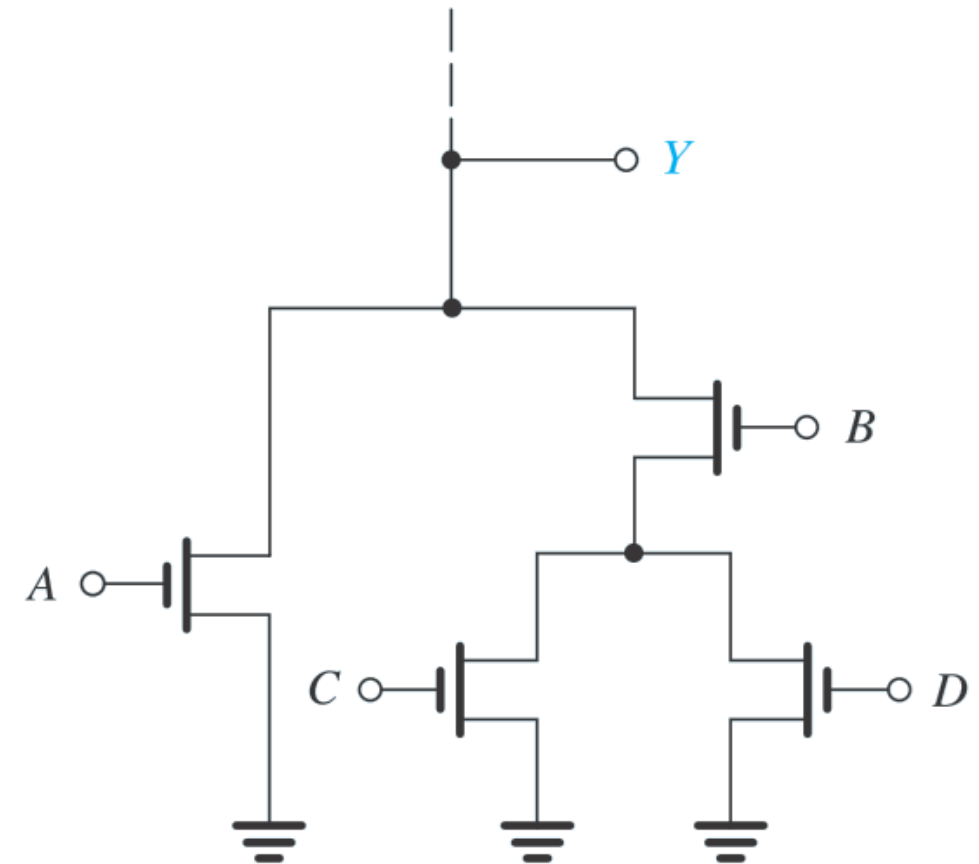
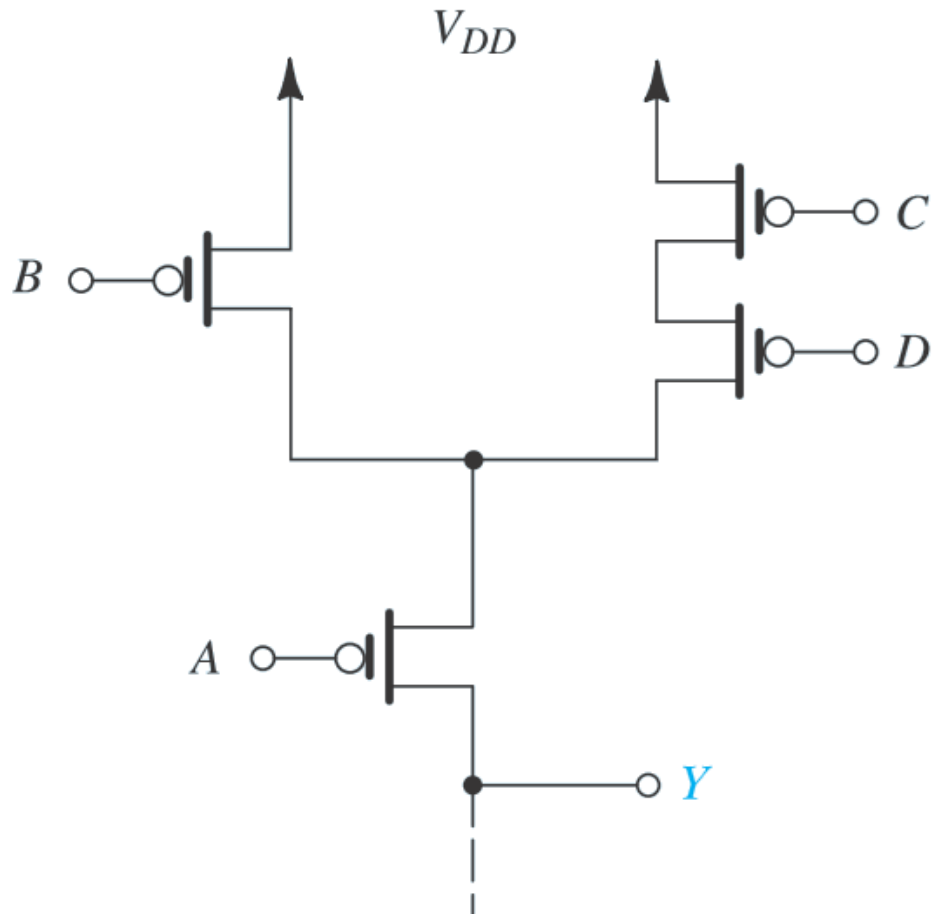
Exemplo:

- Obtenha um circuito lógico capaz de executar a função $Y = \overline{A + B(C + D)}$
- $Y = \bar{A}(\bar{B} + \bar{C}\bar{D})$



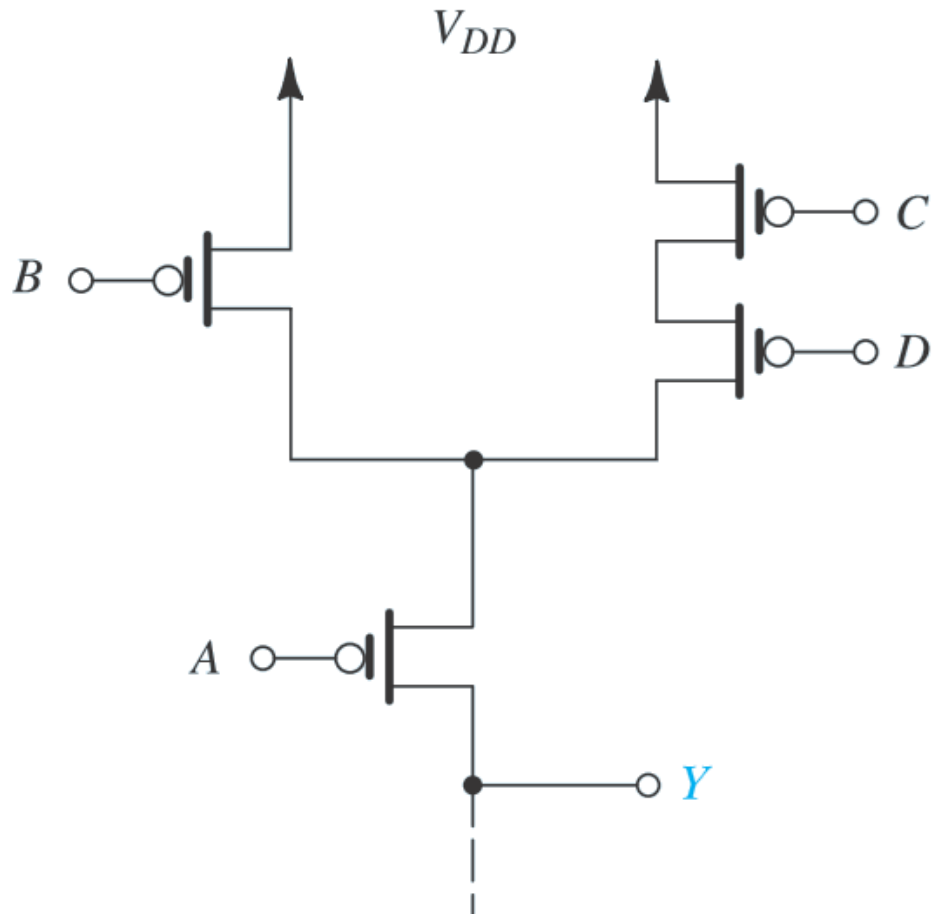
Exemplo:

- Obtenha um circuito lógico capaz de executar a função $Y = \overline{A + B(C + D)}$



Exemplo:

- Obtenha um circuito lógico capaz de executar a função $Y = \overline{A + B(C + D)}$



Note que as
redes são duais

