Tecnologia VLSI - Uma Breve Introdução

MAC0344 - Arquitetura de Computadores
Prof. Siang Wun Song

Slides usados: https://www.ime.usp.br/∼song/mac344/slides03a-vlsi.pdf

Baseado em parte no livro de Mead and Conway - Introduction to VLSI Systems

Tecnologia VLSI - circuitos integrados em Silício

Source: Wikipedia

- Veremos a tecnologia VLSI. Será passada a Lista 2 de exercícios. Ao final dessas aulas, vocês saberão
  - O que é um transistor MOS e suas mil utilidades: funciona como chave, resistor, capacitor, ...
  - Portas lógicas NOT, NAND e NOR podem ser produzidas por vários transistores MOS. Transistor é portanto o tijolo para o mundo digital.
  - Em 40 anos, o tamanho do transistor diminuiu de 5 micrômetros para 7 nanômetros, aumentando a capacidade de uma pastilha de Silício de 510.000 vezes.
  - Estamos na Geração VLSI do Silício, razão do avanço fantástico que estamos vivenciando. (Mas essa geração está prestes a mudar, para uma nova ...)

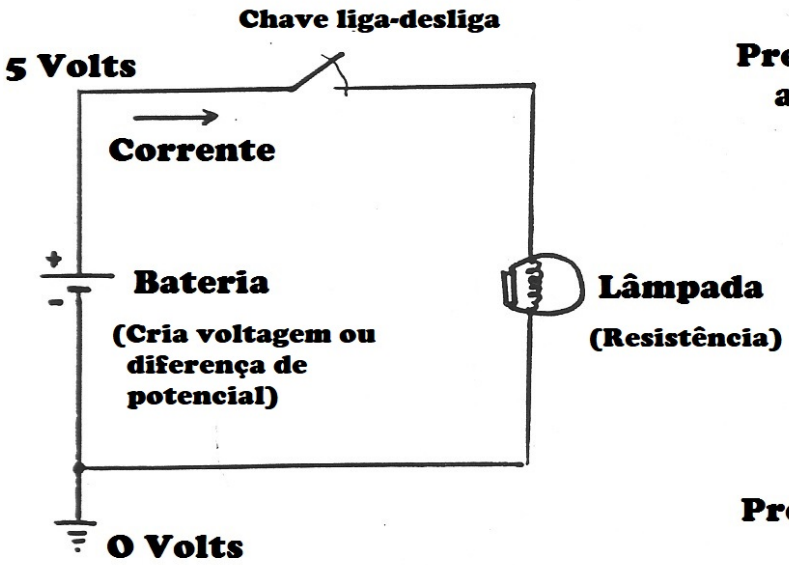
Tecnologia VLSI

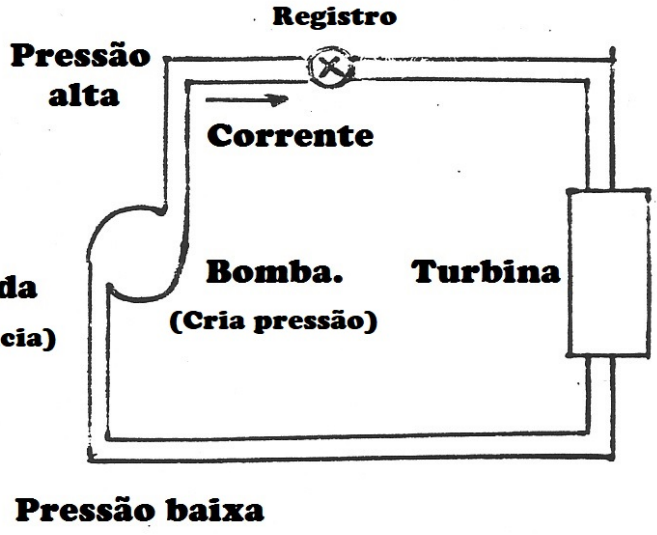
Tecnologia de microeletrônica que integra uma grande quantidade de dispositivos eletrônicos (transistores) numa pastilha (chip) de silício.

Várias tecnologias surgiram, desde a sua invenção por Jack Kilby (Prêmio Nobel de Física), até chegar na atual tecnologia VLSI.

- SSI (Small Scale of Integration)
- MSI (Medium Scale of Integrations):
  Integram de dezenas ou centenas a milhares de transistores.
- LSI (Large Scale of Integration)
- VLSI (Very Large Scale of Integrations):
  Integram bilhões de transistores.

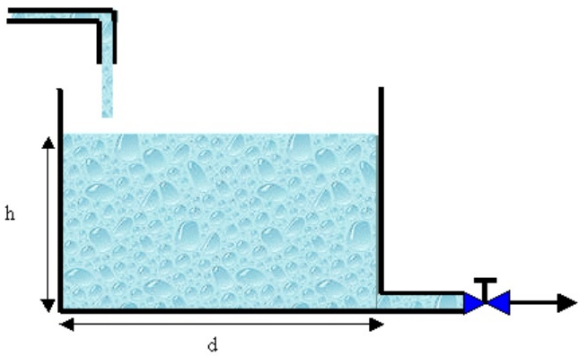
Analogia - Recordação de circuitos elétricos

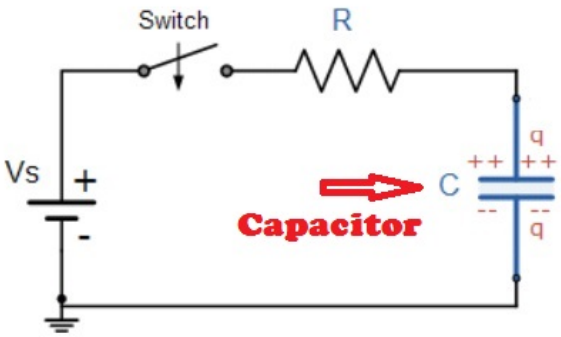




carga elétrica	gota de água
corrente elétrica	corrente de água
voltagem	pressão
bateria	bomba
resistor	turbina
capacitor	tanque de água

Analogia - Recordação de circuitos elétricos





- Para armazenar água podemos encher um tanque.
- Para armazenar carga elétrica usamos um capacitor.
- O tempo para carregar totalmente um tanque de áqua (ou um capacitor de carga elétrica) depende, entre outros parâmetros, da dimensão do tanque (ou do capacitor).
- Em VLSI, um capacitor minúsculo é usado para representar 1 se está carregado de carga, e 0 caso contrário.

Transistor MOS

MOS = Metal Oxide Semiconductor

- Veremos o transistor MOS, que pode funcionar como uma chavinha minúscula (liga e desliga) feito de semicondutor (Silício Si).
- O transistor MOS é importante pois é o tijolo que constrói todo o mundo digital.

As explicações são simplificadas (usando a tecnologia NMOS) para facilitar o entendimento. CMOS, parecida com NMOS, é a tecnologia mais usada.

Transistor MOS

Em cima de um substrato de Silício (*wafer* de Silício) são depositadas 3 camadas de material condutor:

- metal
- polisilício
- difusão

As 3 camadas são separadas por óxido (isolante).

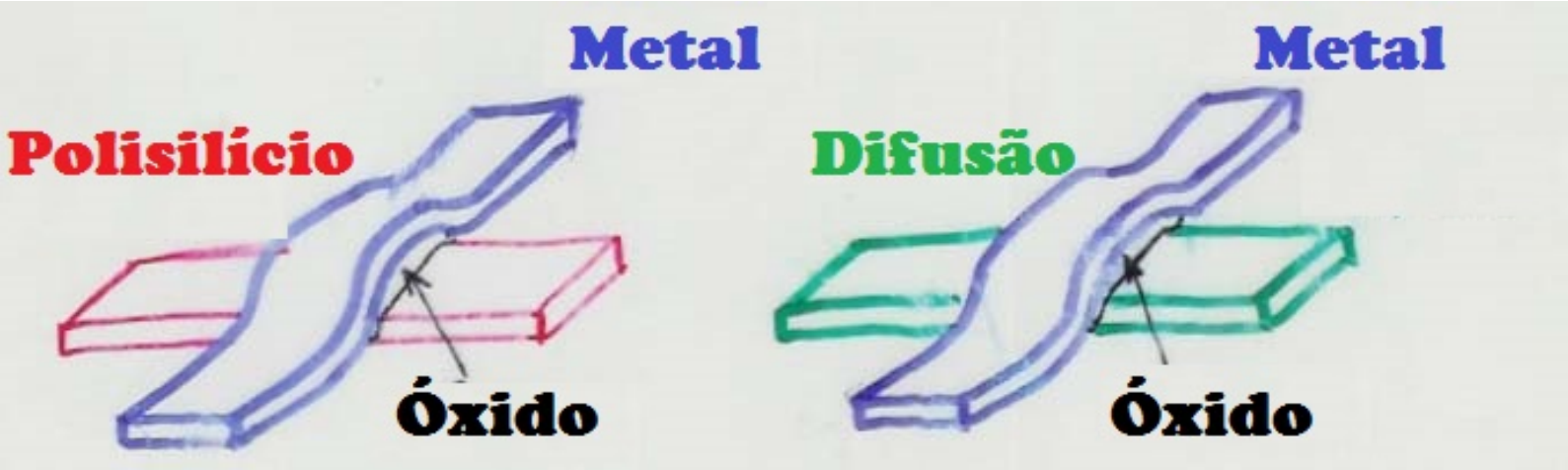
Transistor MOS

Bandeira da Namíbia

Source: Wikipedia

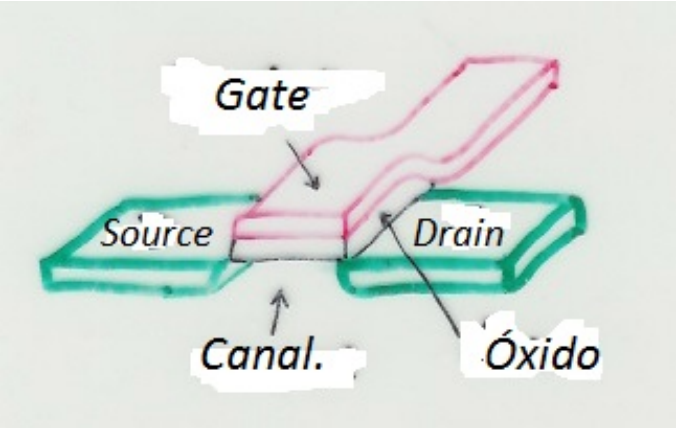
Sobreposição de camadas

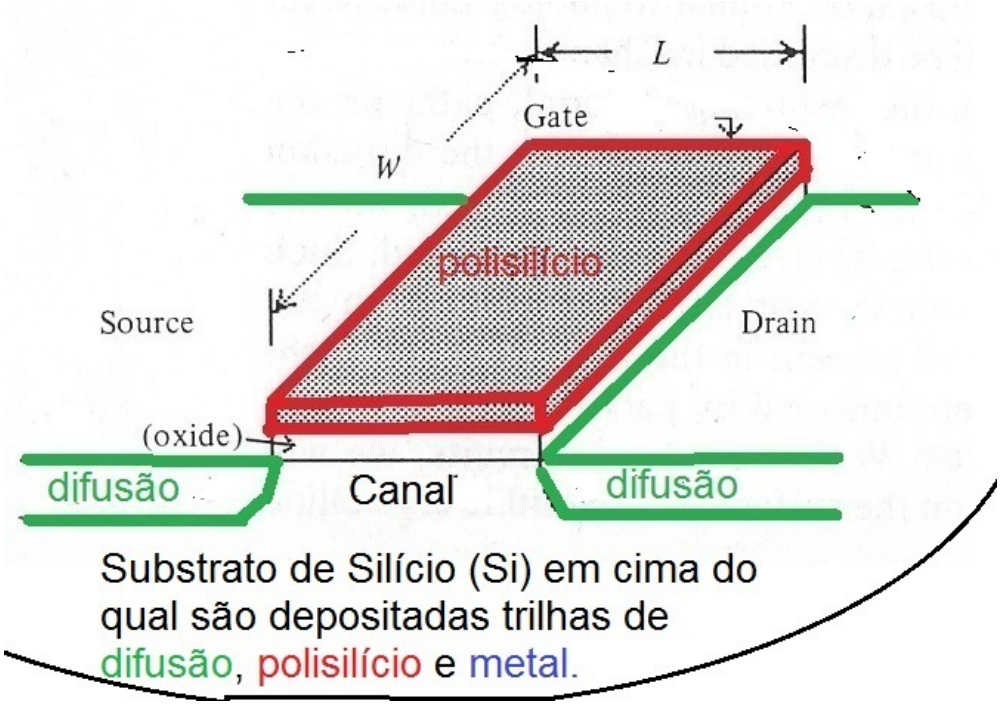
- Uma trilha de metal pode cruzar uma trilha de polisilício ou de difusão sem produzir efeito significativo.



Vocês vão perguntar: E se uma trilha de polisilício cruzar uma de difusão?

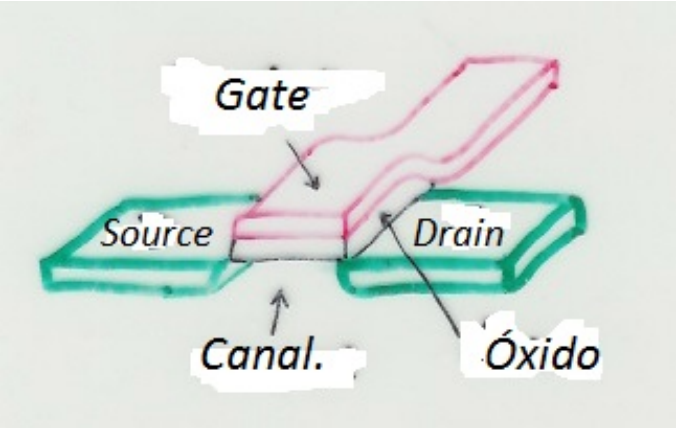
Polisilício cruzando difusão produz um transistor

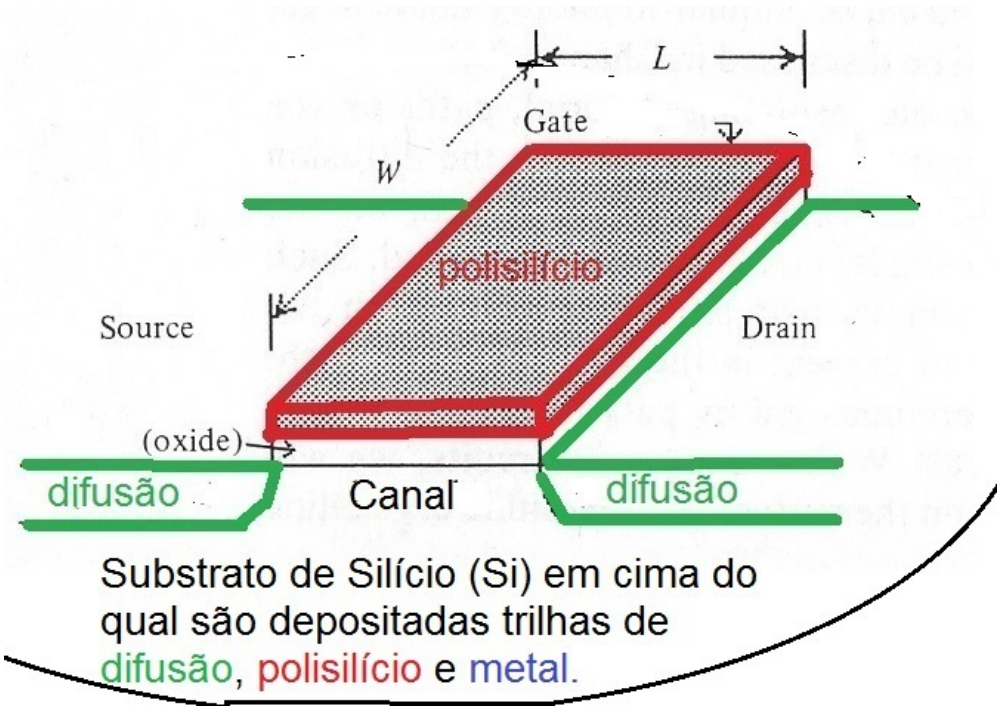




- Se uma trilha de polisilício cruzar uma trilha de difusão, então aparece um **transistor MOS** (que funciona como uma chave liga-desliga). Vejamos como.

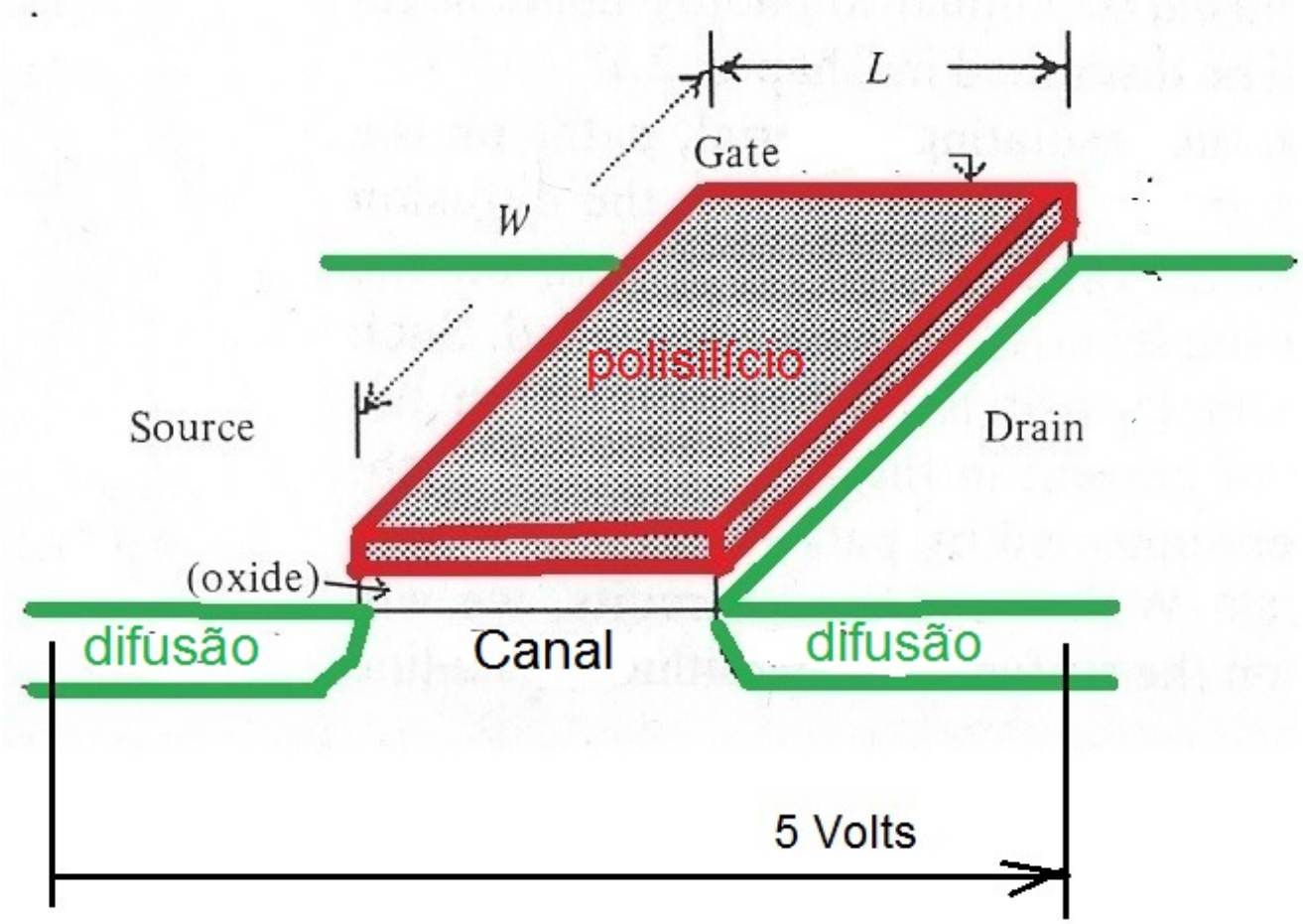
Polisilício cruzando difusão produz um transistor





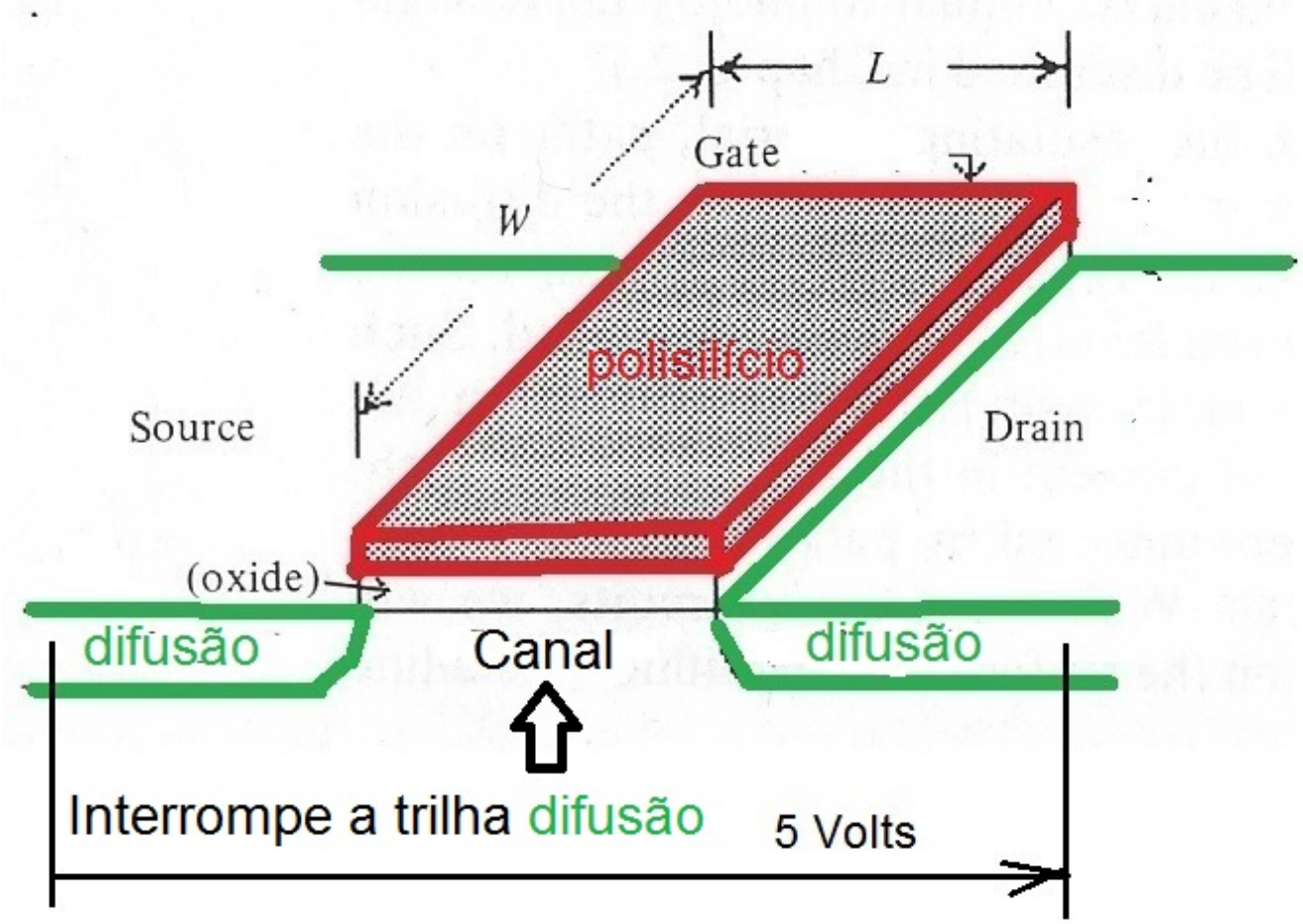
- Observemos primeiro o seguinte (veja a figura): A trilha de difusão não é contínua mas está interrompida no Canal. Isso foi por construção na fabricação.

Polisilício cruzando difusão produz um transistor



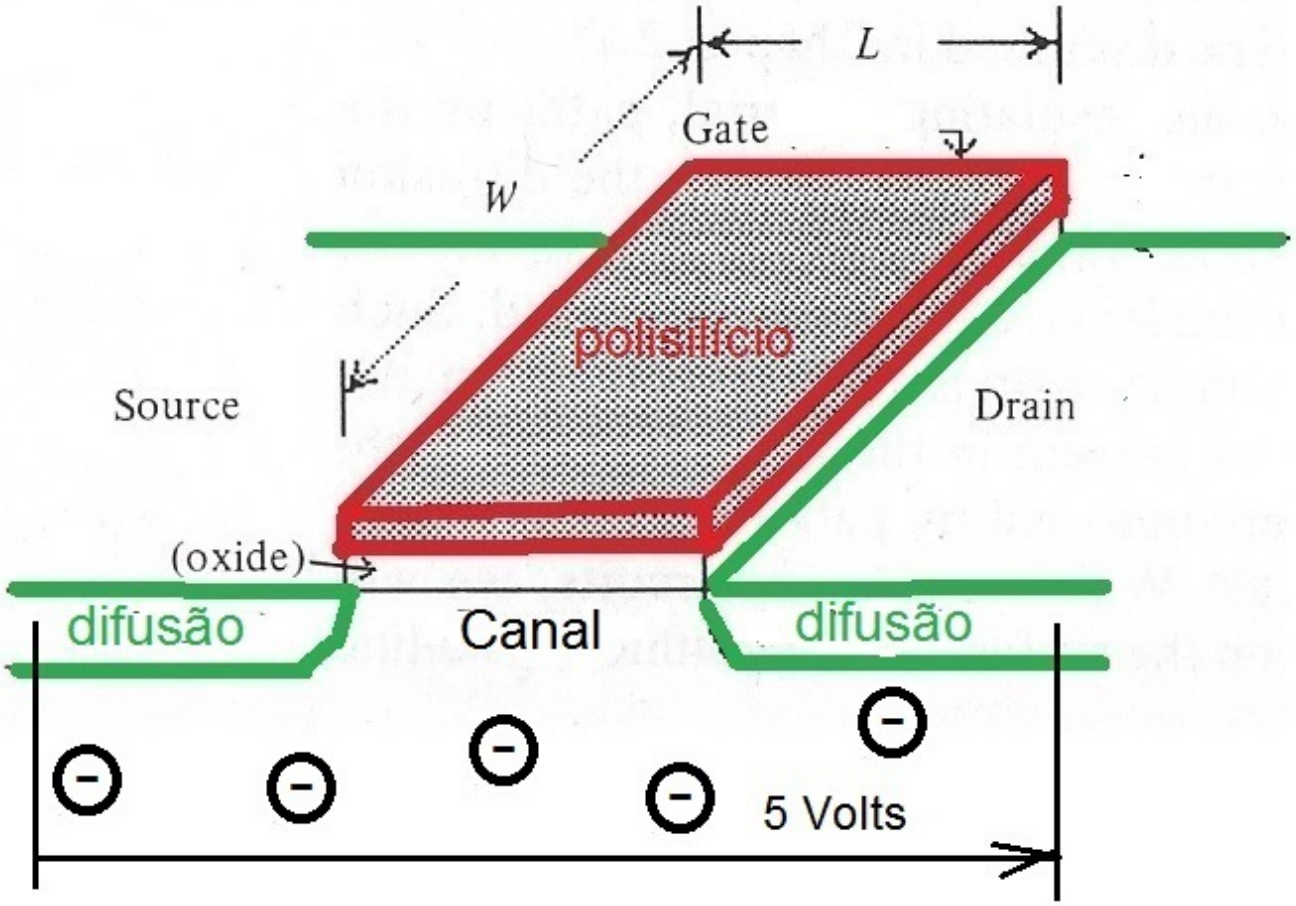
- Vamos aplicar uma voltagem, e.g. de 5 Volts, entre *Drain* e *Source* na trilha de difusão $V_{DS} = 5$ Volts. Será que isso vai permitir passagem de corrente na trilha de difusão?

Polisilício cruzando difusão produz um transistor



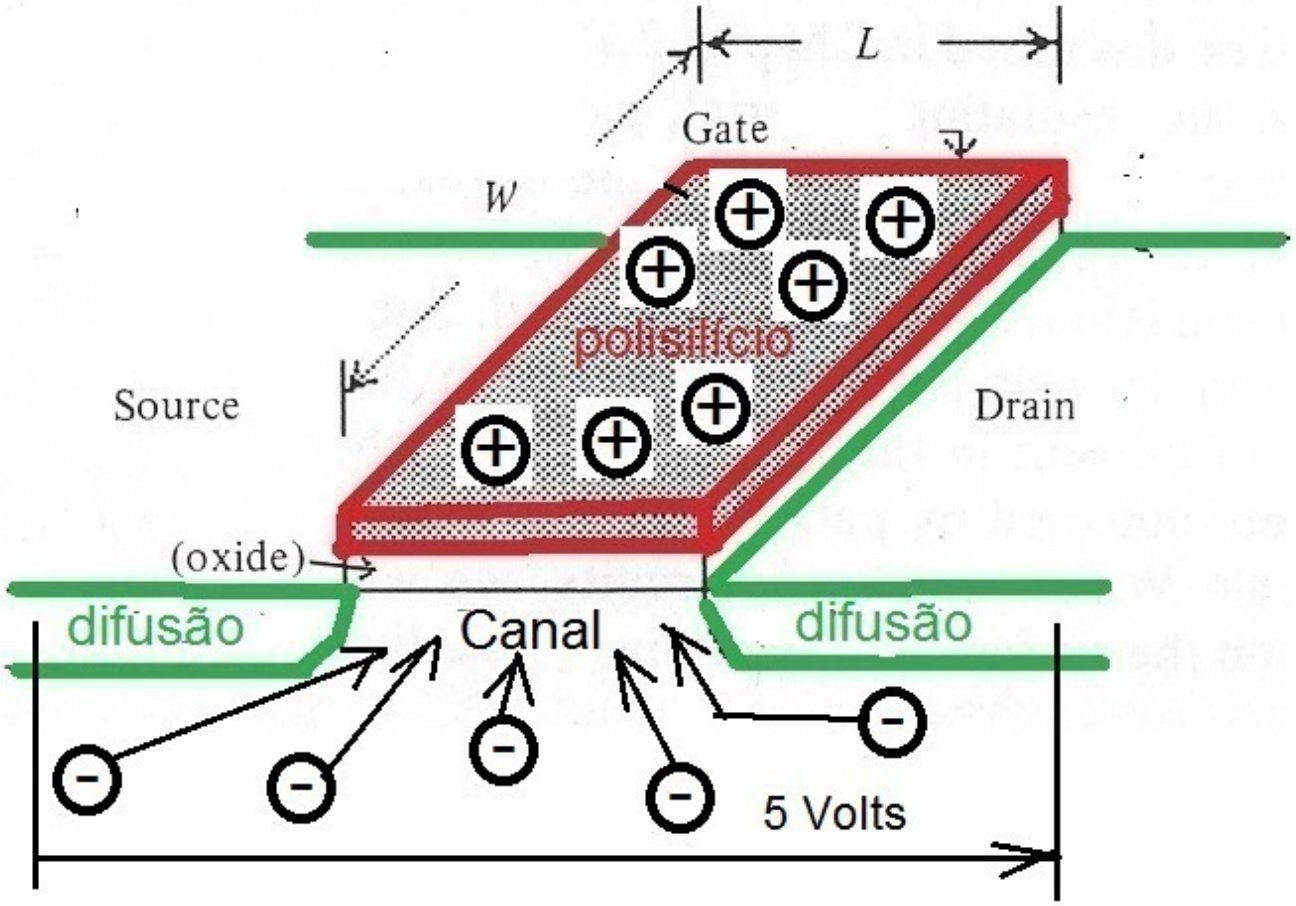
- A trilha de difusão está interrompida no Canal (por construção na fabricação). Por isso não passa corrente nessa trilha mesmo aplicando a voltagem VDD de 5 Volts.

Polisilício cruzando difusão produz um transistor



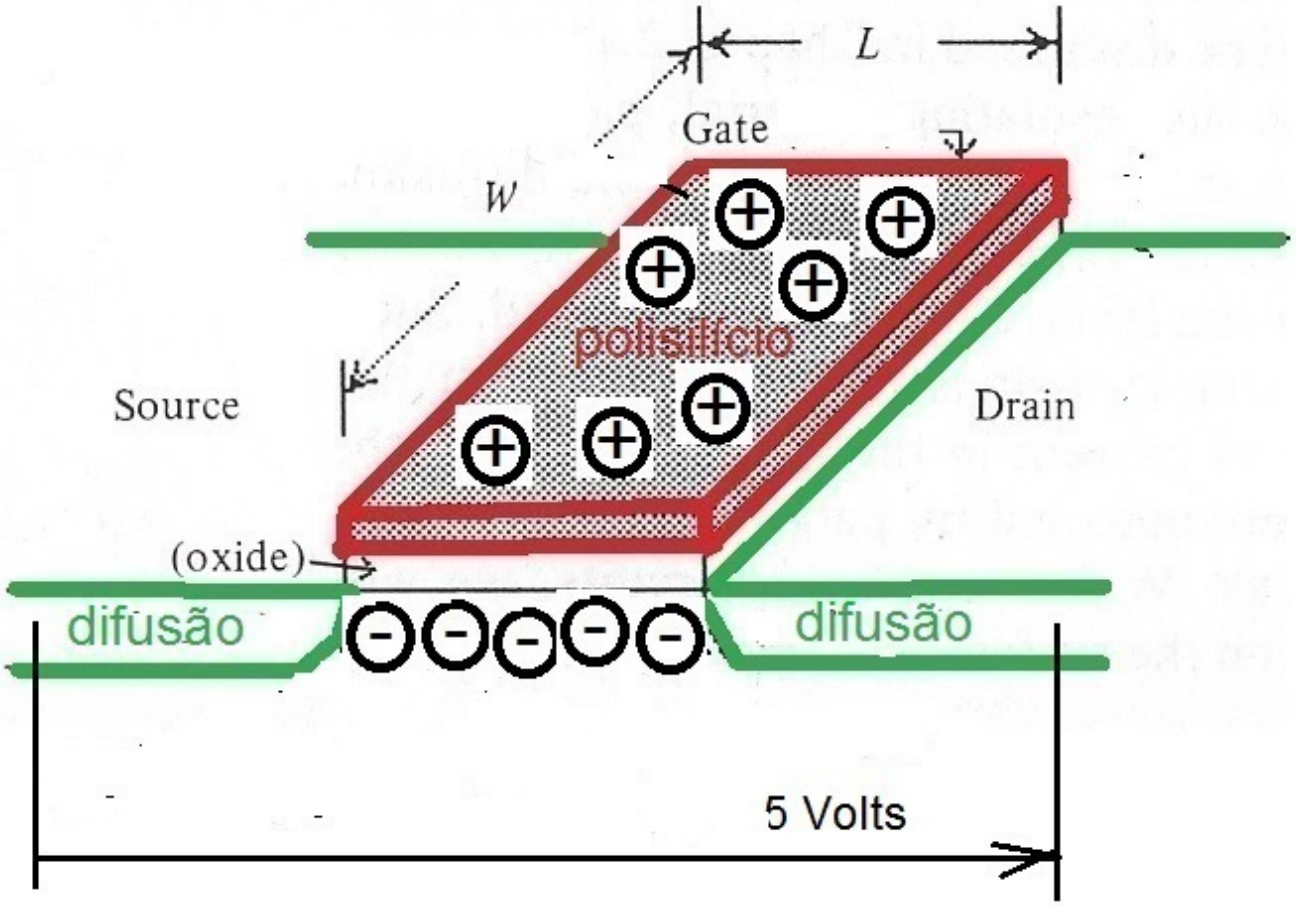
- No substrato de Silício há elétrons livres. Vejamos como podemos concentrar esses elétrons livres no Canal para permitir passagem de corrente elétrica.

Polisilício cruzando difusão produz um transistor



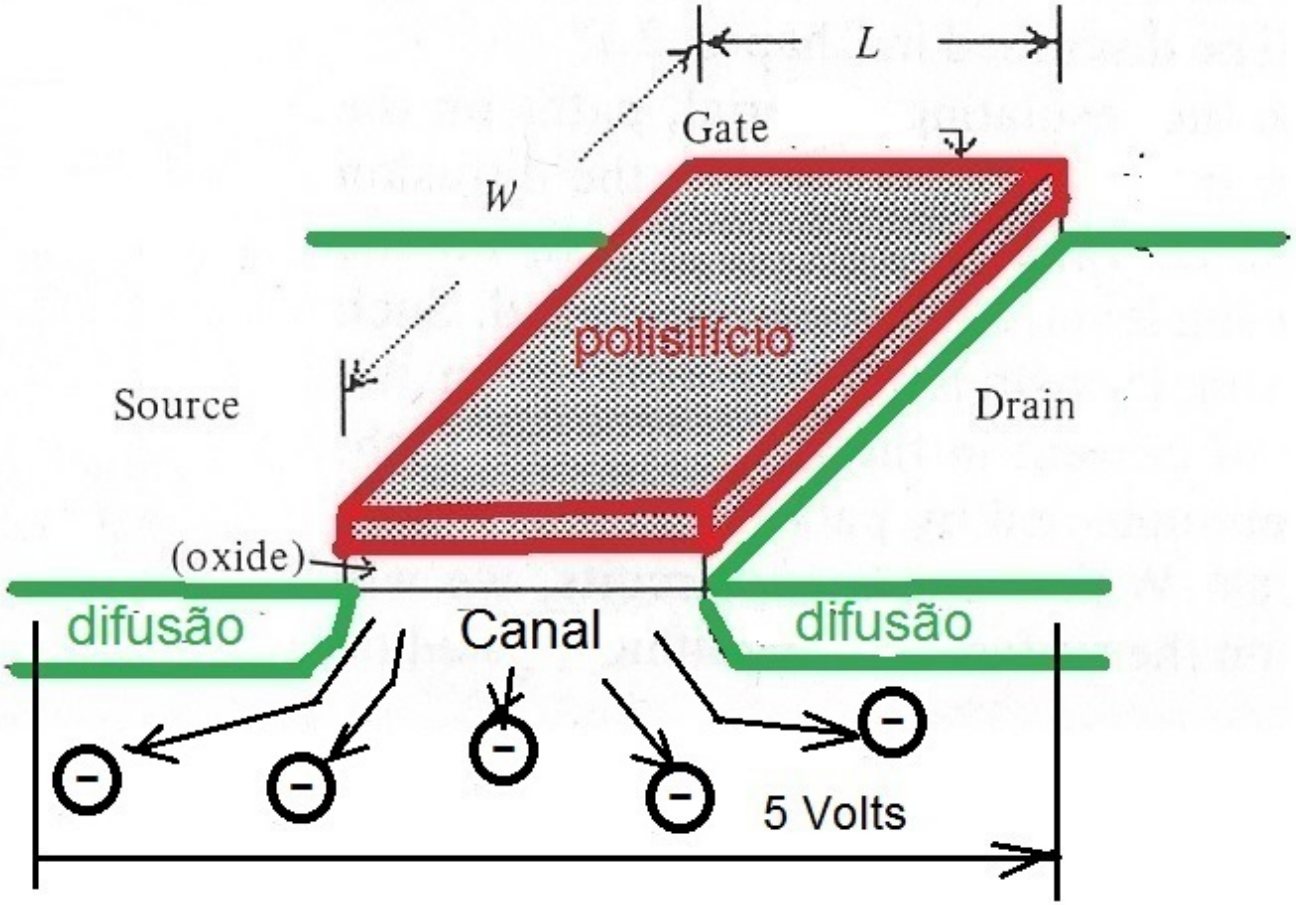
- Injetando uma correte elétrica no Gate aumenta a voltagem entre Gate e Source V_{GS}. Cargas positivas no Gate atraem elétrons (cargas negativas) para o Canal.

Polisilício cruzando difusão produz um transistor



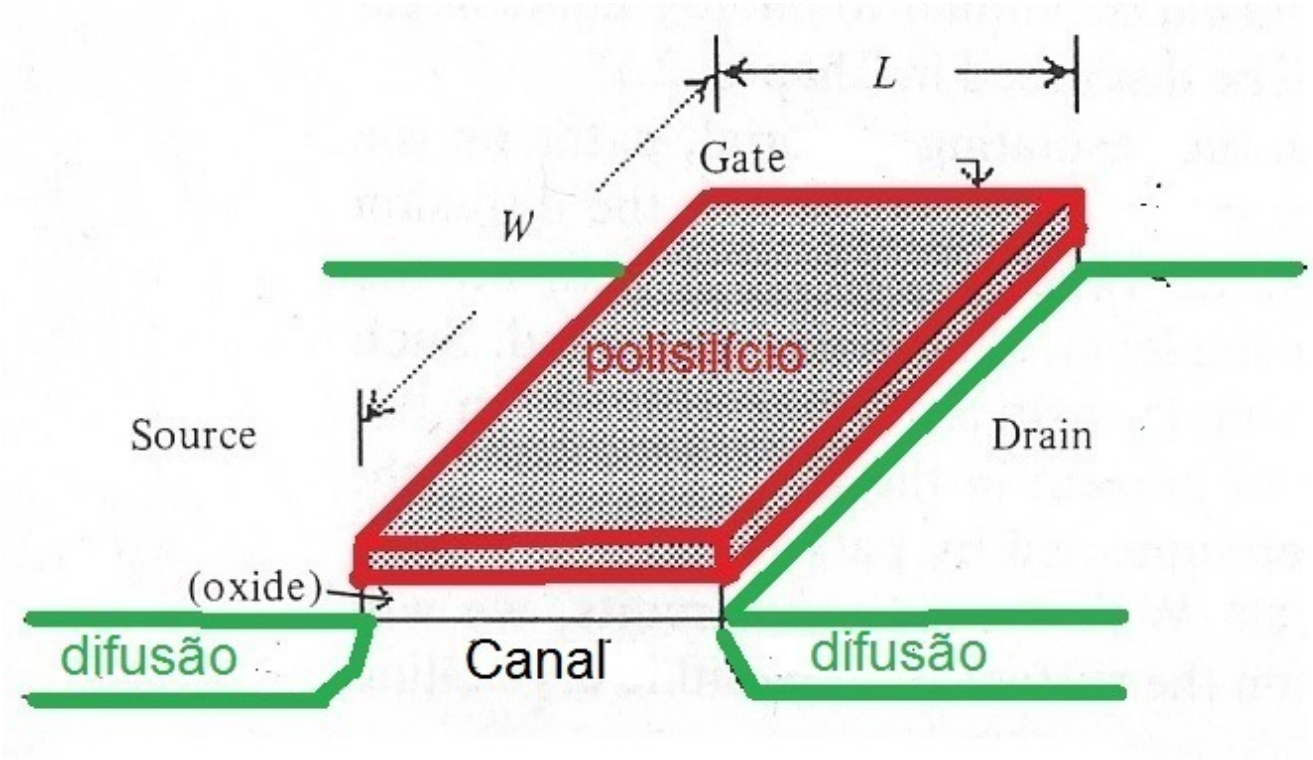
- Elétrons concentrados no Canal acabam interligando as duas partes da difusão (que estavam interrompidas) e permitem a passagem de corrente na trilha.

Polisilício cruzando difusão produz um transistor



- Tirandos as cargas no gate (por exemplo ligando o Gate à terra), os elétrons concentrados no Canal se despersam e cessa a corrente na trilha da difusão.

Polisilício cruzando difusão produz um transistor

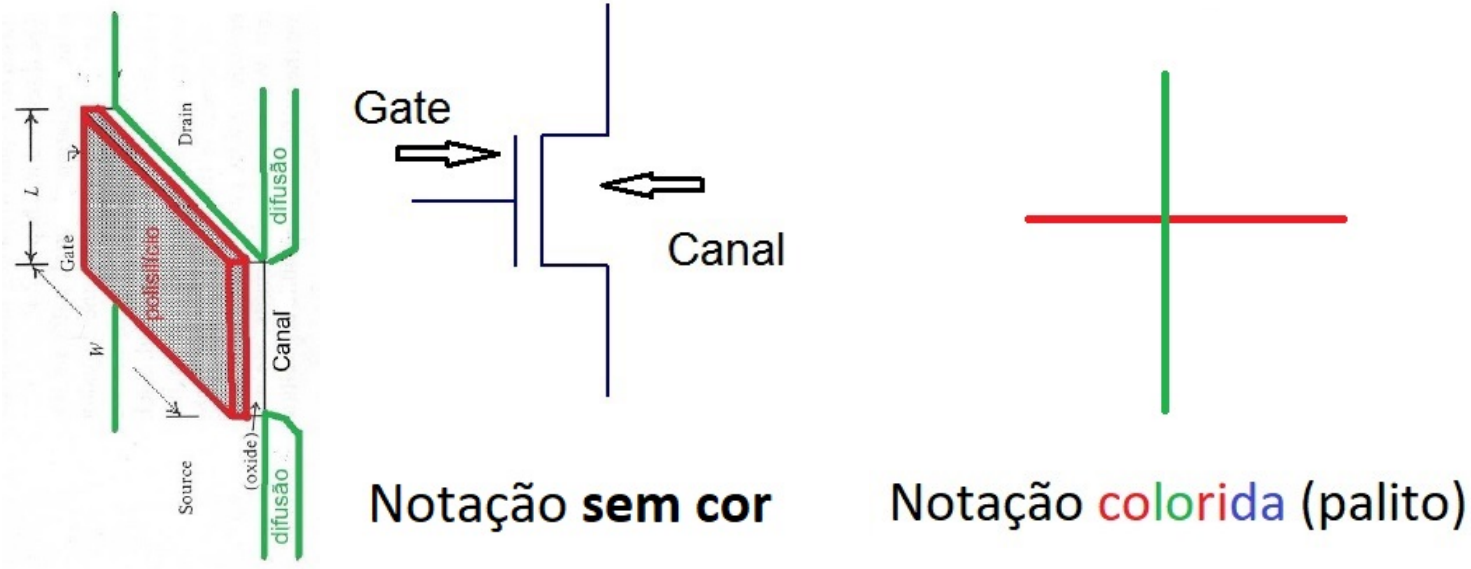


Transistor MOS é uma chave liga-desliga

- Voltagem alta no Gate polisilício: passa corrente na trilha difusão Voltagem zero no Gate polisilício: cessa corrente na trilha difusão.

Notação para transistor MOS

Ao invés de desenhar um transistor MOS como na figura à esquerda,



podemos usar essas 2 notações simplificadas. Notem a semelhança com o desenho.

Importância do transistor MOS

Vimos que o transistor MOS pode funcionar como uma chave liga-desliga.

E daí?

Acontece que o transistor MOS serve como tijolo para o mundo digital.

Veremos agora a sua importância.

Importância do transistor MOS

Veremos que o transistor MOS, além de funcionar como chave liga-desliga, também tem as seguintes utilidades:

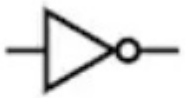
- Pode funcionar como capacitor (para armazenar carga elétrica).

  Ao contrário do capacitor da figura, o transistor MOS é minúsculo (alguns nanômetros).
  A memória do computador usa um transistor carregado com carga para representar 1 e descarregado para 0.

- Pode funcionar como resistor (resistência).

Importância do transistor MOS

- Com dois transistores podemos construir uma porta NOT (para inverter um sinal lógico).

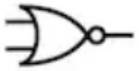


NOT

- Com três transistores podemos construir
  - uma porta NAND (porta AND seguida de NOT).

NAND

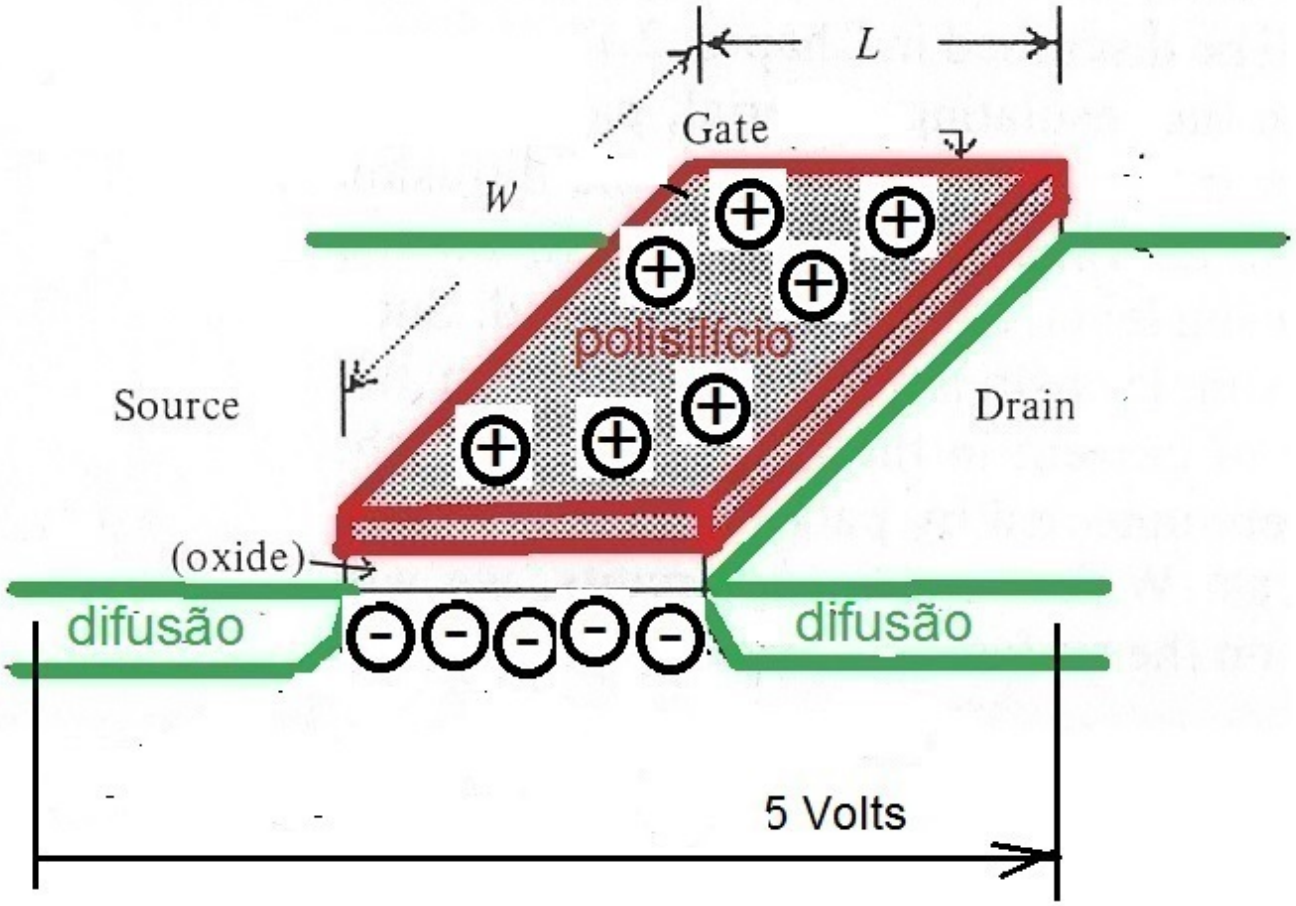
  - uma porta NOR (porta OR seguida de NOT).



NOR

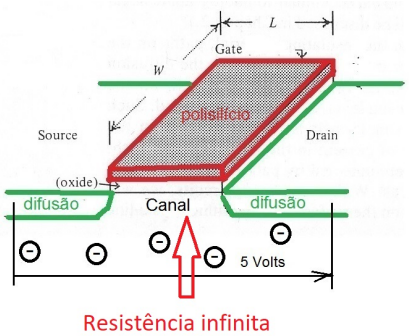
Com transistores MOS como tijolo construímos qualquer circuito digital, incluindo memórias e processadores.

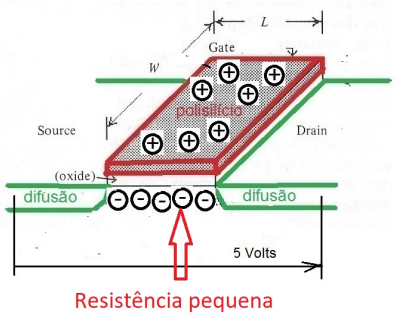
Transistor MOS como capacitor

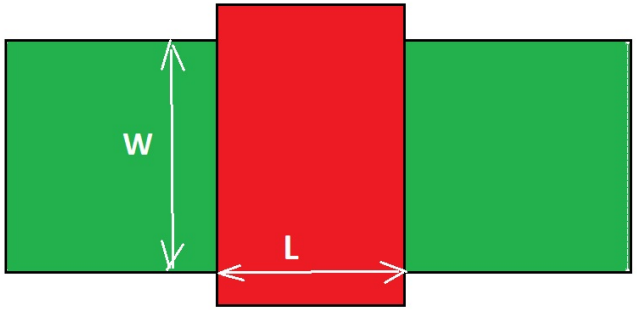


- Voltagem alta no Gate carrega cargas elétricas no capacitor. Voltagme zero no Gate descarrega as cargas do capacitor. Um transistor pode então implementar um bit de memória.

Transistor MOS como resistor ou resistência







Um transistor que não conduz corrente apresenta uma resistência 'infinita' pois a trilha difusão está interrompida no Canal.

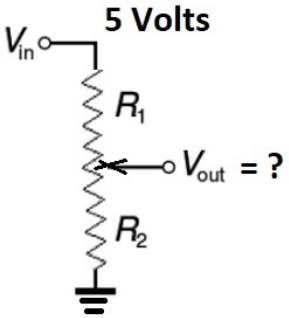
Mas um transistor conduzindo ou passando corrente possui uma pequena resistência R cujo valor é diretamente proporcional ao comprimento L e inversamente proporcional à largura W.

$$R = \alpha \frac{L}{W}, \text{ onde } \alpha \text{ é uma constante.}$$

- O comprimento L e a largura W são medidas na região de interseção entre Polissilício e Difusão (ver figura).
- L é a medida na direção do fluxo da corrente
- W é a medida ortogonal ao comprimento.

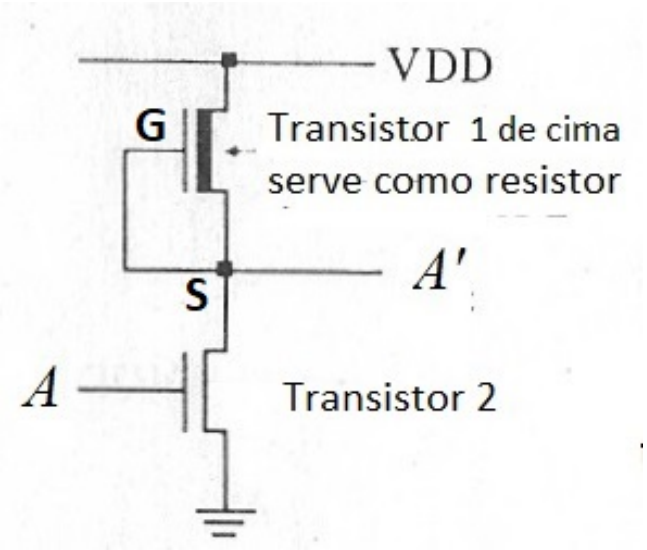
Para entender como produzir uma porta NOT

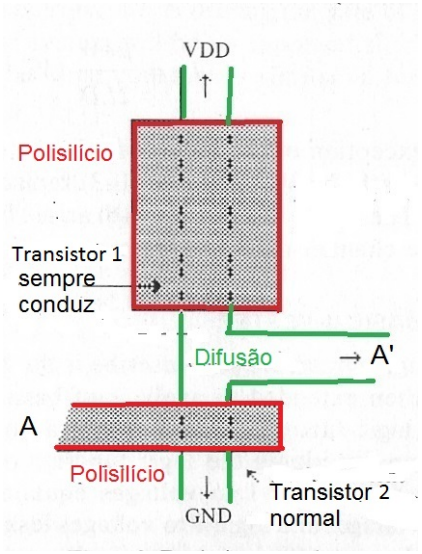
Recordamos o divisor-de-tensão (potenciômetro).

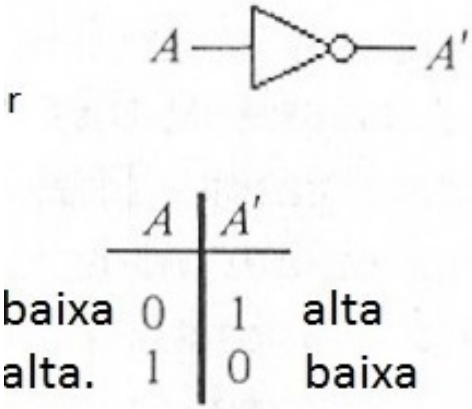


- O *dimmer* é usado para controlar a luminosidade de uma lâmpada. O botão deslizante pode ser movido para baixo para diminuir a intensidade da luz.
- O *dimmer* pode ser implementado com um potenciômetro através do divisor-de-tensão.
- $V_{out} = \frac{R_2}{R_1+R_2}.V_{in}$
- Se $R_1 = R_2$ então $V_{out} = \frac{1}{2}.V_{in}$ = 2.5 Volts
- Se $R_1 >> R_2$ então V_{out} fica próximo a zero Volts.

Dois transistores produzem uma porta NOT

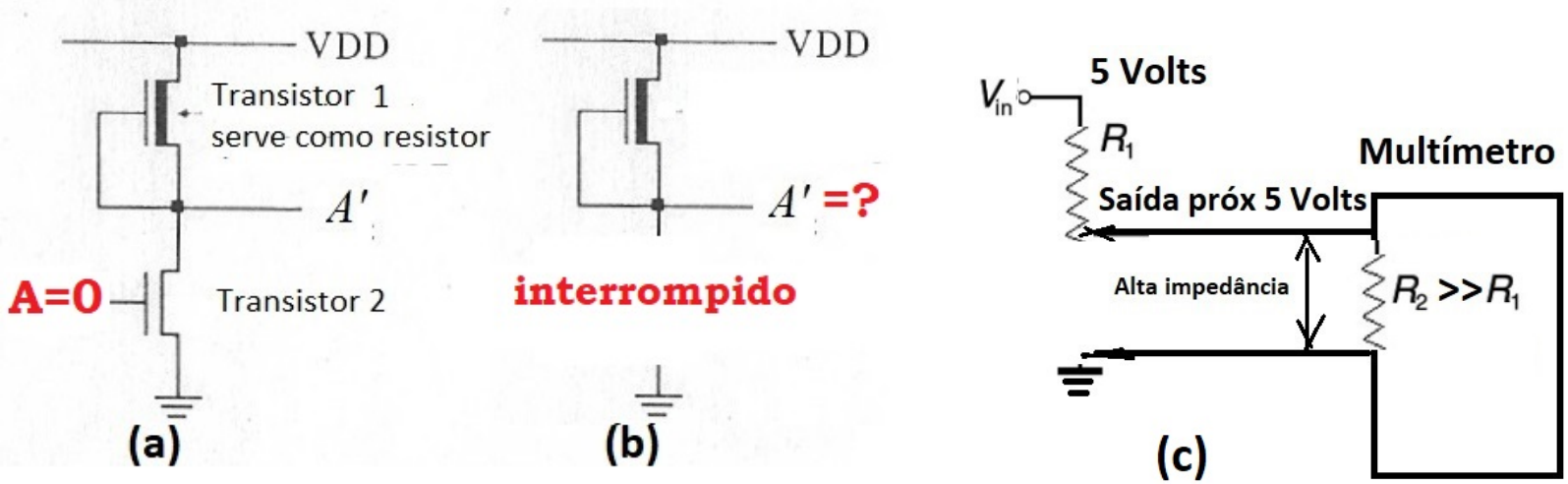






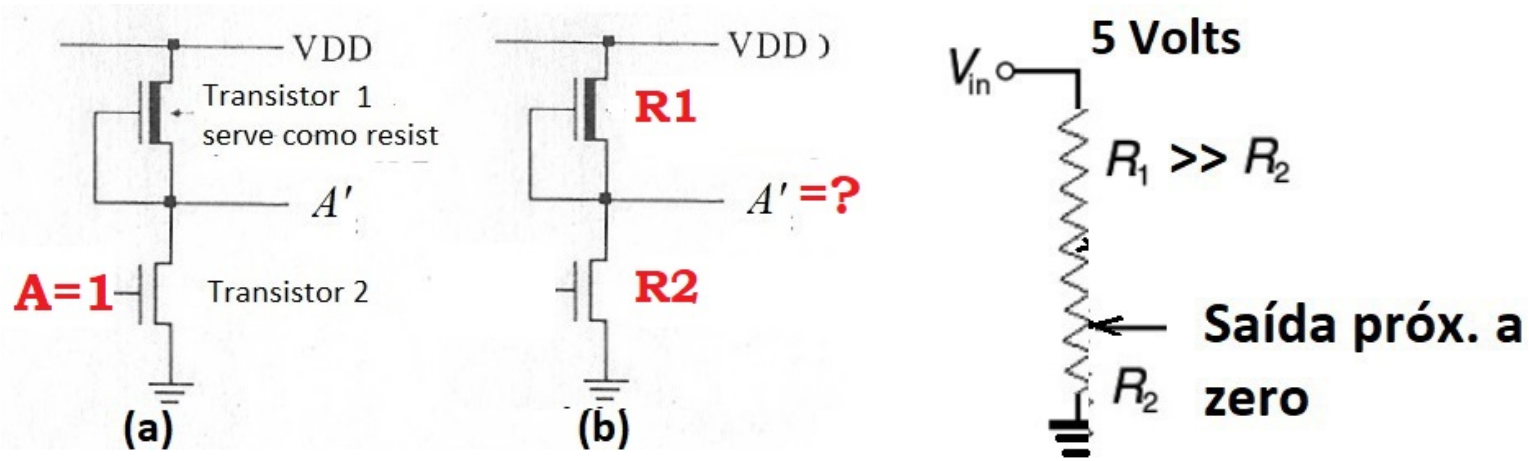
- O transistor 1 foi fabricado para sempre permitir a passagem de corrente. O seu papel é funcionar como resistência.
- Isso é feito através de uma implantação de íons no canal do transistor 1. Com isso, o transistor 1 já conduz, ao fazer voltagem entre gate e source $V_{GS} = 0$.
- O transistor 2 de baixo funciona com uma chave liga-desliga.

Dois transistores produzem uma porta NOT



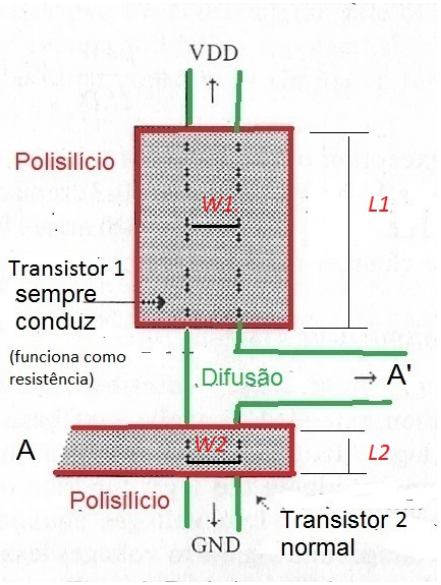
- Se A tem voltagem baixa (0), o transistor 2 não conduz corrente e o circuito está interrompido.
- Quanto vale a saída A'? Figuar (b).
- Se você mede a voltagem da saída A' com um multímetro (que possui alta impedância ou resistência), a saída A' fica com voltagem alta (1). Figura (c).

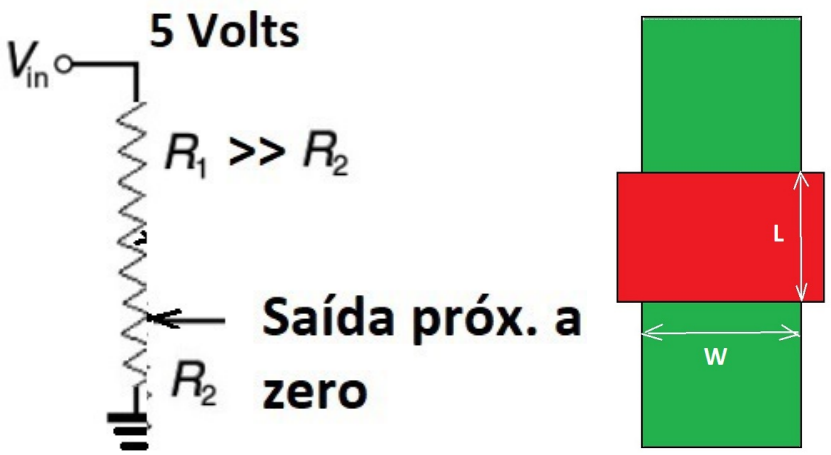
Dois transistores produzem uma porta NOT



- Se A tem voltagem alta (1), o transistor 2 conduz corrente.
- O transistor 2 conduzindo corrente apresenta uma resistência que chamamos de R_2. Figura (b).
- Quanto vale a voltagem de A'?
- Se a resistência do transistor 1 R_1 for muito maior que R_2, então teremos a saída A' com voltagem baixa (0). Figura (c).

Dois transistores produzem uma porta NOT



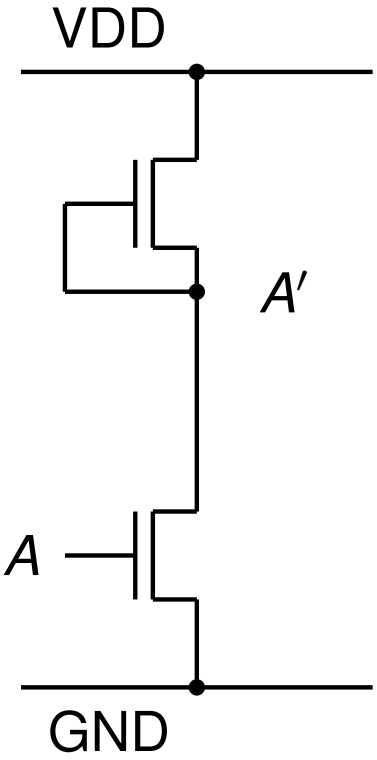


- Vimos que devemos ter $R1 >> R2$. Mas quantas vezes maior?
- Uma regra prática para uma porta NOT funcionar, basta fazer R_1 ser 4 vezes R_2:

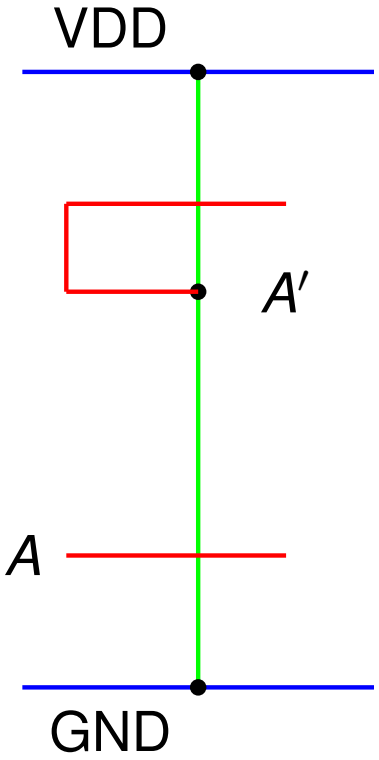
$$R_1 = 4R_2$$
$$\frac{L_1}{W_1} = 4\frac{L_2}{W_2}$$

- Ver figura como medir L e W.

Notação para porta NOT



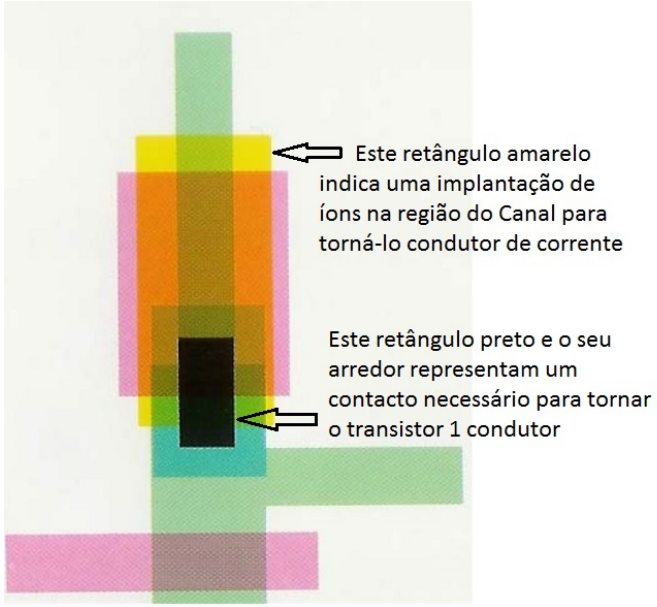
Notação sem cor



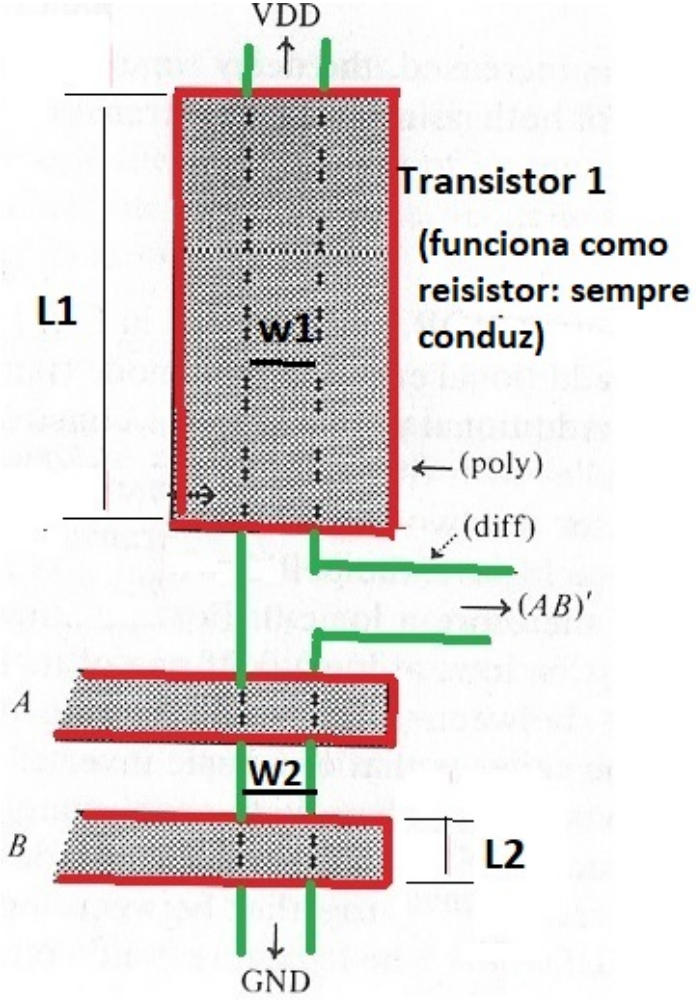
Notação colorida (palito)

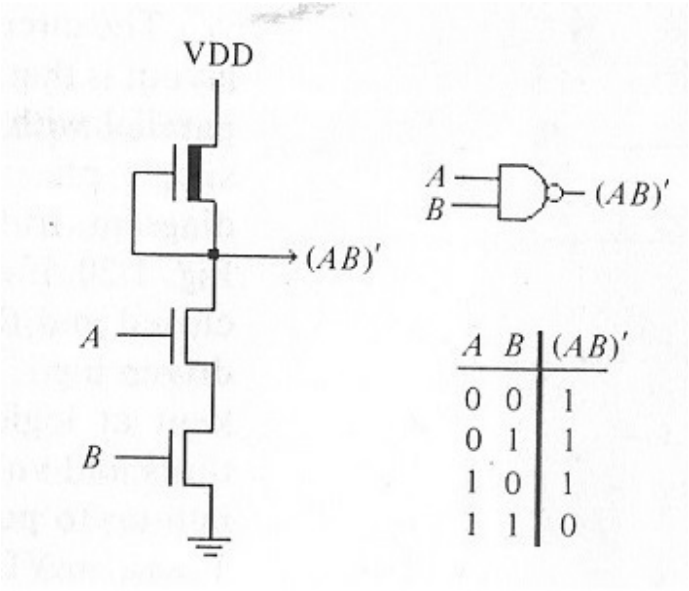
Como está o meu aprendizado?

- A figura mostra uma porta NOT em NMOS.
- A figura mostra alguns detalhes do transistor 1 para que o seu Canal seja diferente e sempre conduza corrente: a cor amarela mostra a implantação de íons no canal para torná-lo condutor de eletricidade.
- Identificar na figura abaixo as dimensões L_1, W_1, L_2, e W_2.



Três transistores produzem uma porta NAND

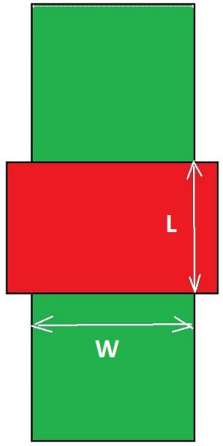




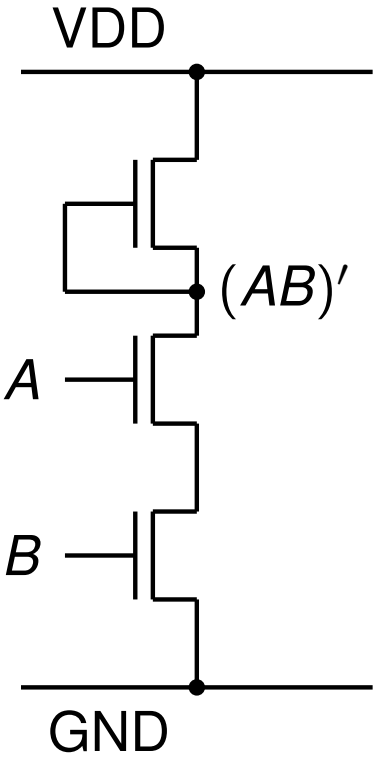
A	B	(AB)'
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Precisamos fazer L1/W1=8 L2/W2 pois as resistências de condução dos transistores A e B se somam.

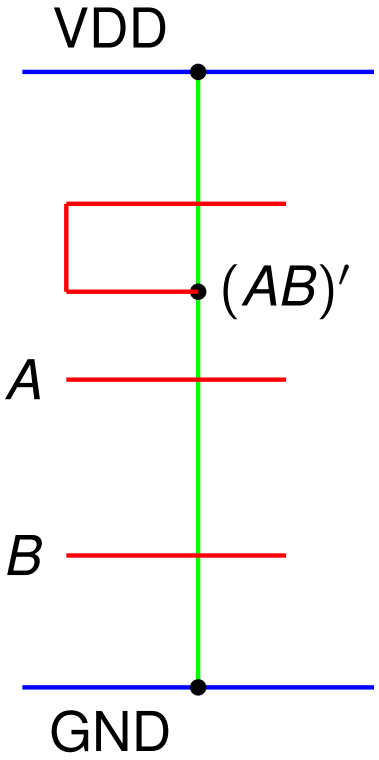
O efeito final é que a resistência do transistor 1 fica 4 vezes a resistência equivalente de A e B.



Notação para porta NAND

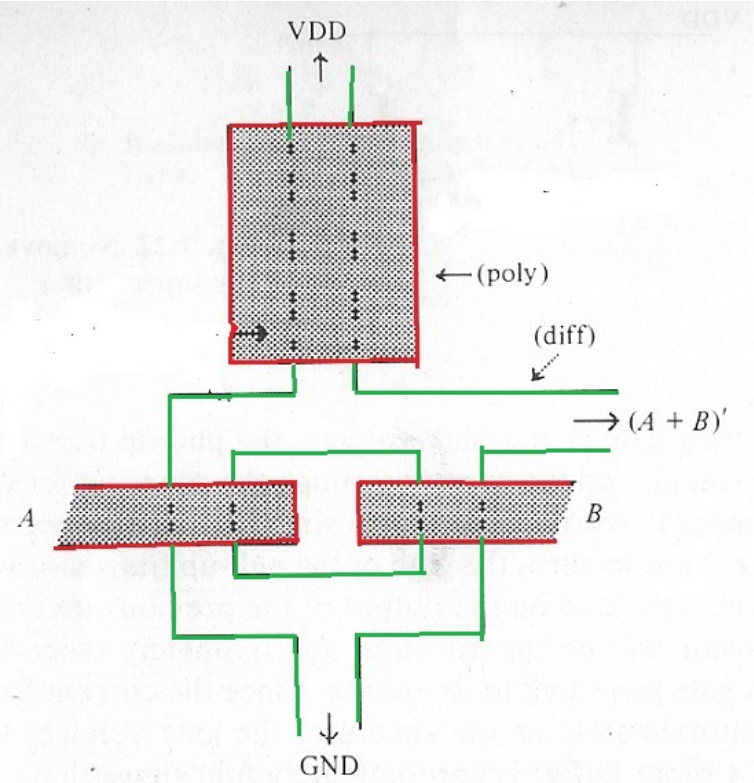


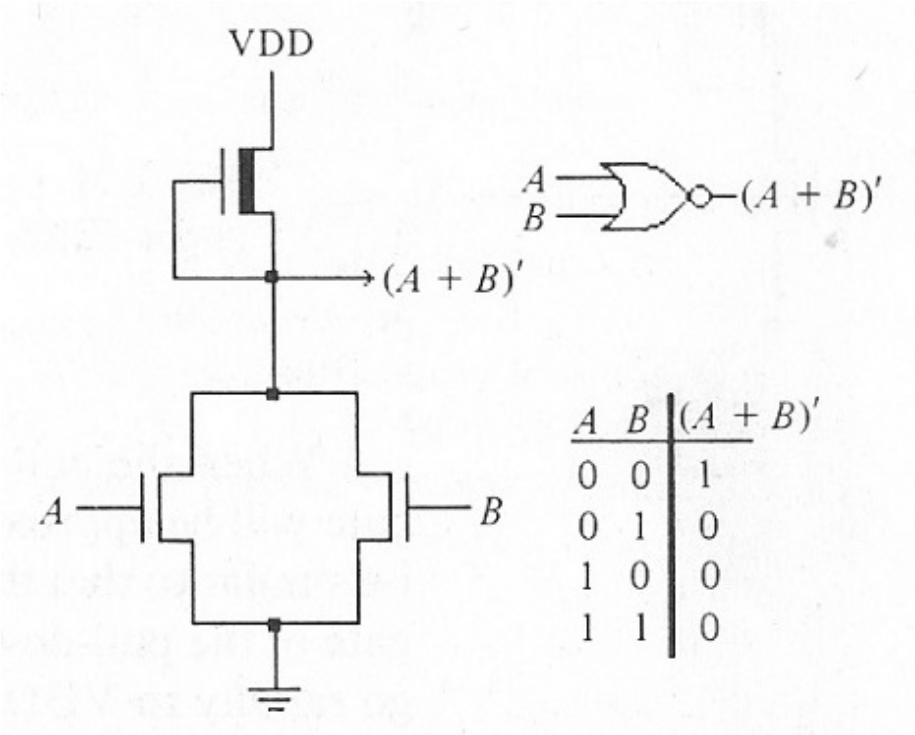
Notação sem cor



Notação colorida (palito)

Três transistores produzem uma porta NOR





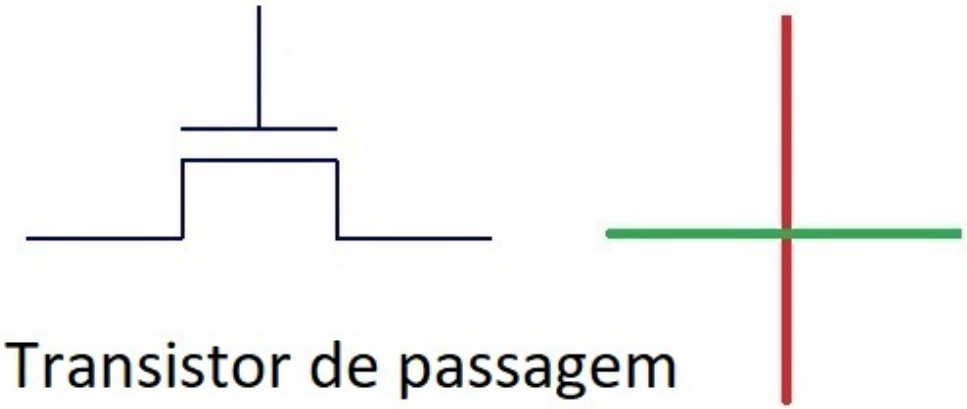
A	B	$(A+B)'$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

- Aqui basta fazer $L_1/W_1 = 4L_2/W_2$ pois as resistências de condução de A e B estão em paralelo, produzindo uma resistência equivalente menor que cada uma delas (no caso igual a metade).
- Voce pode desenhar a porta NOR com a notação de palito (com cor)?

Lista de Exercícios 2

- Fazer e entregar por email a Lista de Exercícios 2.
- Tem prazo para entrega. Recomendo não demorar muito. Bom fazer logo com a matéria fresquinha na cabeça.

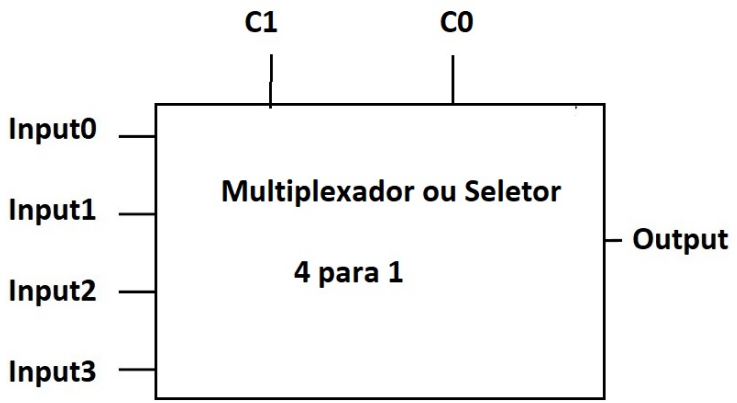
Circuitos usando transistores de passagem



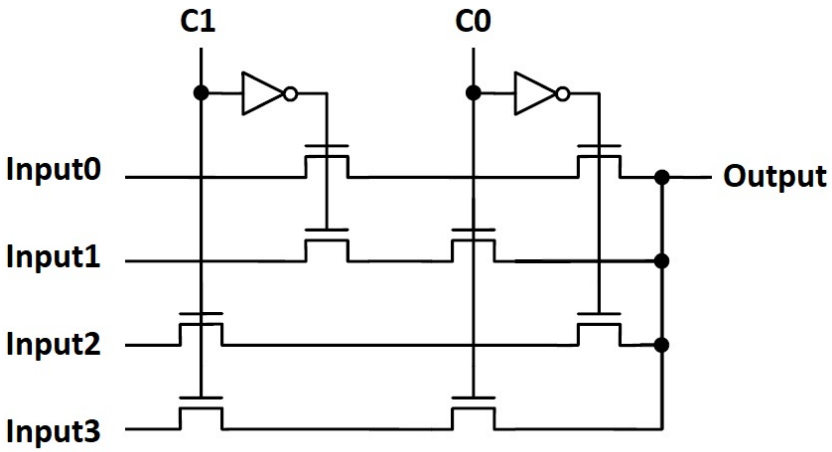
- O transistor MOS funcionando como uma chave deixa passar ou não corrente elétrica.
- O transistor com essa finalidade é conhecido como transistor de passagem (*pass transistor*).
- Vamos dar 2 circuitos interessantes que usam apenas a porta NOT e transistores de passagem.

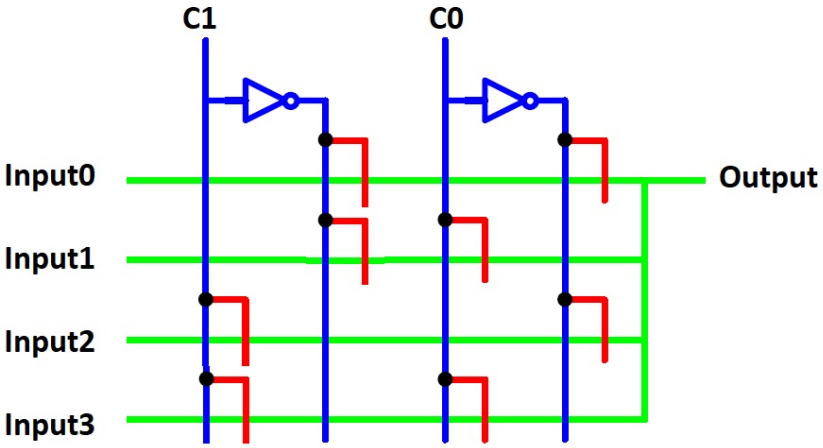
Multiplexador ou Seletor 4 para 1

Multiplexador ou seletor 4 para 1 usando apenas transistores de passagem e portas NOT.



C1	C0	Output
0	0	Input0
0	1	Input1
1	0	Input2
1	1	Input3



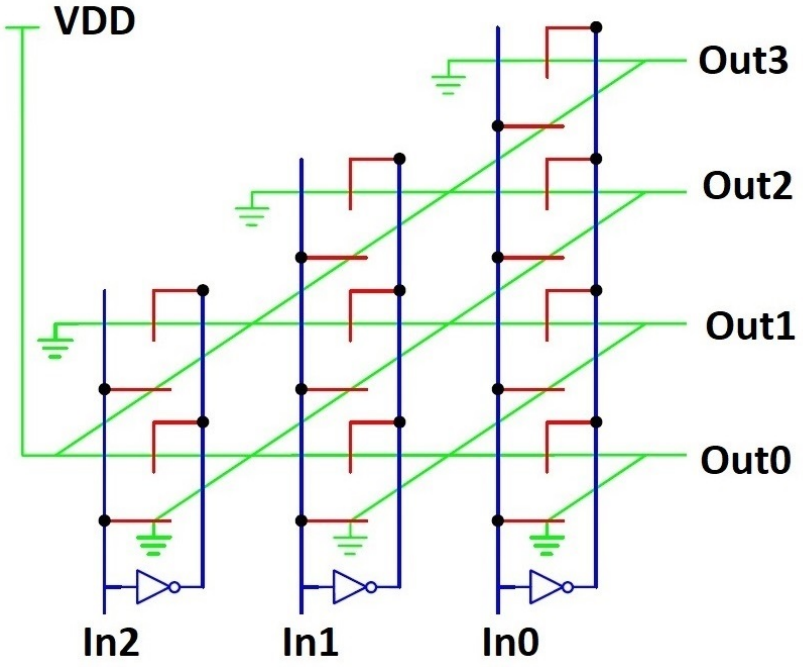


Source: VLSI Systems Univ. Cambridge 2004 (based on Mead and Conway - Intro. to VLSI Systems)

Circuito contador de 1's

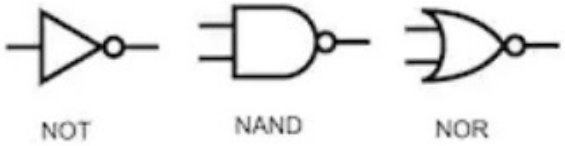
Dados 3 bits IN_0, IN_1, IN_2, o circuito conta o número de 1's. Se i bits iguais a 1, a saída $Out_i = 1$ e as demais saídas = 0.

In2	In1	In0	Out0	Out1	Out2	Out3
0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	1	0	0
0	1	0	0	1	0	0
0	1	1	0	0	1	0
1	0	0	0	1	0	0
1	0	1	0	0	1	0
1	1	0	0	0	1	0
1	1	1	0	0	0	1



Source: VLSI Systems Univ. Cambridge 2004 (based on Mead and Conway - Intro. to VLSI Systems)

Lógica booleana com portas NAND ou NOR



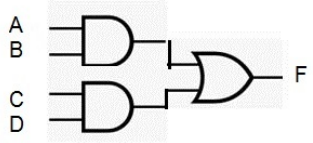
Veremos agora que qualquer circuito digital pode ser implementado

- apenas com portas NAND e NOT (NOT pode ser considerado como uma porta NAND com apenas uma entrada)
- ou apenas com portas NOR e NOT (NOT pode ser considerado como uma porta NOR com apenas uma entrada).

Lógica booleana usando porta NAND

Considere a equação lógica expressa na forma normal disjuntiva ou disjunção de cláusulas conjuntivas (uma soma de produtos).

$$F = (A \wedge B) \vee (C \wedge D)$$

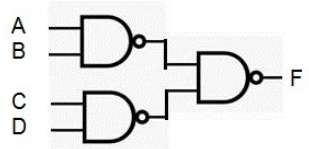


Vamos negar duas vezes o lado direito (que não altera nada):

$$F = \overline{\overline{(A \wedge B) \vee (C \wedge D)}}$$

Aplicamos Lei de Morgan:

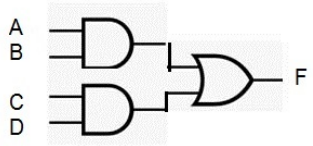
$$F = \overline{\overline{(A \wedge B)} \wedge \overline{(C \wedge D)}}$$



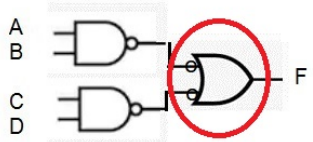
Lógica booleana usando porta NAND

Vamos “demonstrar” a mesma coisa usando “desenhos”. Seja a equação lógica:

$$F = (A \wedge B) \vee (C \wedge D)$$

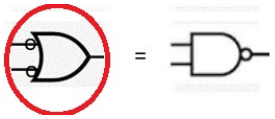


Negando a saída do AND e a entrada do OR não muda nada. Assim:

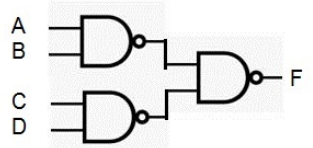


Vamos expressar a Lei de Morgan em forma de desenho:

$$\overline{X} \vee \overline{Y} = \overline{X \wedge Y}$$



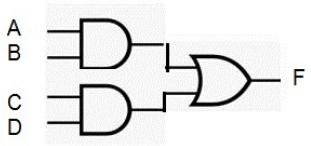
Portanto temos:



Lógica booleana usando porta NOR

Considere de novo a equação lógica:

$$F = (A \wedge B) \vee (C \wedge D)$$

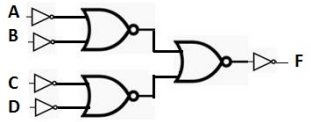


Vamos negar duas vezes o lado direito (que não altera nada):

$$F = \overline{\overline{(A \wedge B) \vee (C \wedge D)}}$$

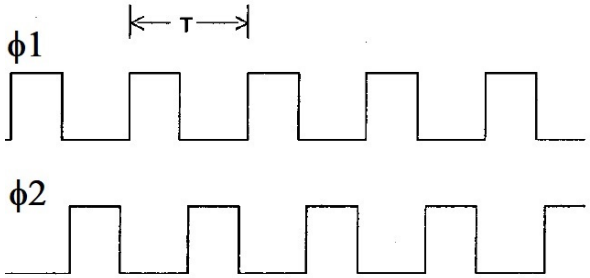
Aplicamos Lei de Morgan:

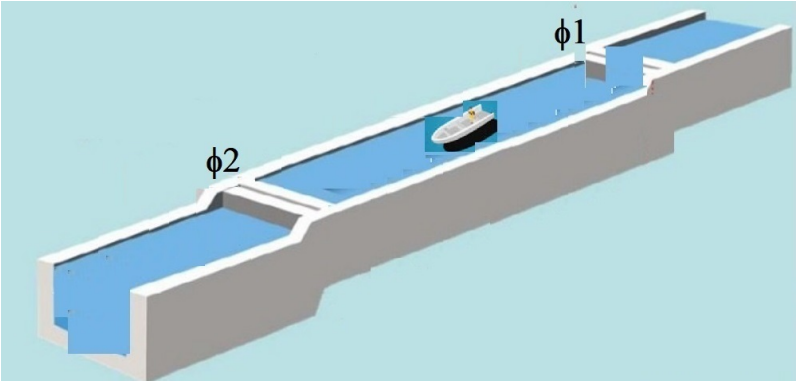
$$F = \overline{\overline{(A \wedge B)} \wedge \overline{(C \wedge D)}} = \overline{(\overline{A} \vee \overline{B}) \wedge (\overline{C} \vee \overline{D})} = \overline{(\overline{A} \vee \overline{B})} \vee \overline{(\overline{C} \vee \overline{D})}$$

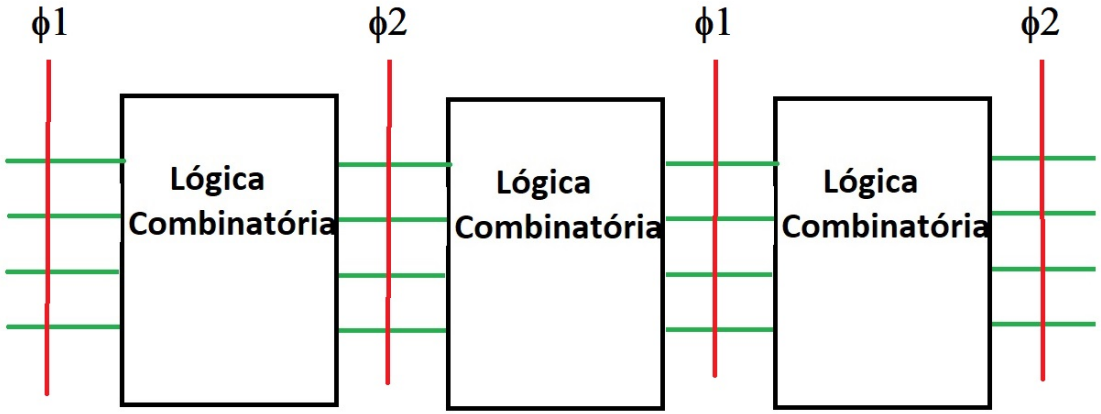


Relógio de duas fases $\phi 1$ e $\phi 2$

Um relógio de duas fases $\phi 1$ e $\phi 2$ é usado para controlar o movimento dos dados num circuito MOS. (Semelhante ao funcionamento de uma eclusa e.g. Canal do Panamá.)

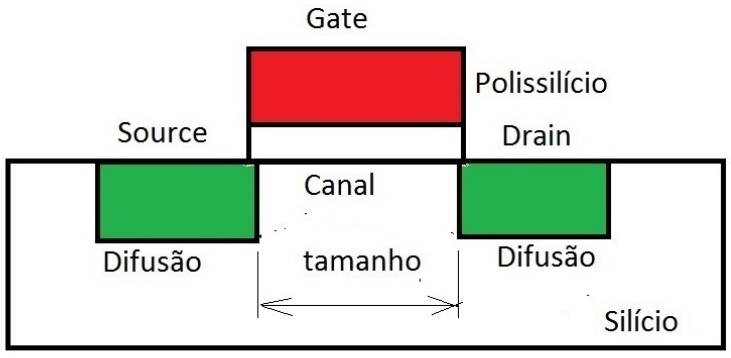






Lembre-se de como sincronizar desfile de samba por meio da bateria?

Importância do transistor MOS



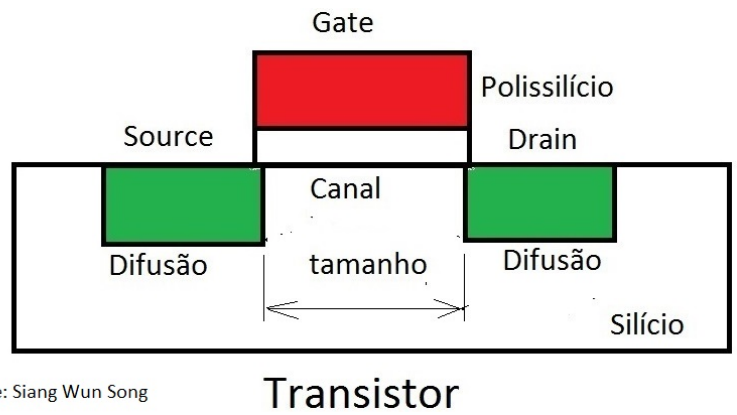
Source: Siang Wun Song

Transistor

Ano	Tamanho transistor
1978	5 micrômetros
2018	7 nanômetros

- O tamanho (*feature size*) de um transistor é o comprimento do Canal entre *Drain* e *Source*.
- Esse tamanho passou de 5 micrômetros em 1978 para 7 nanômetros em 2018.

Importância do transistor MOS



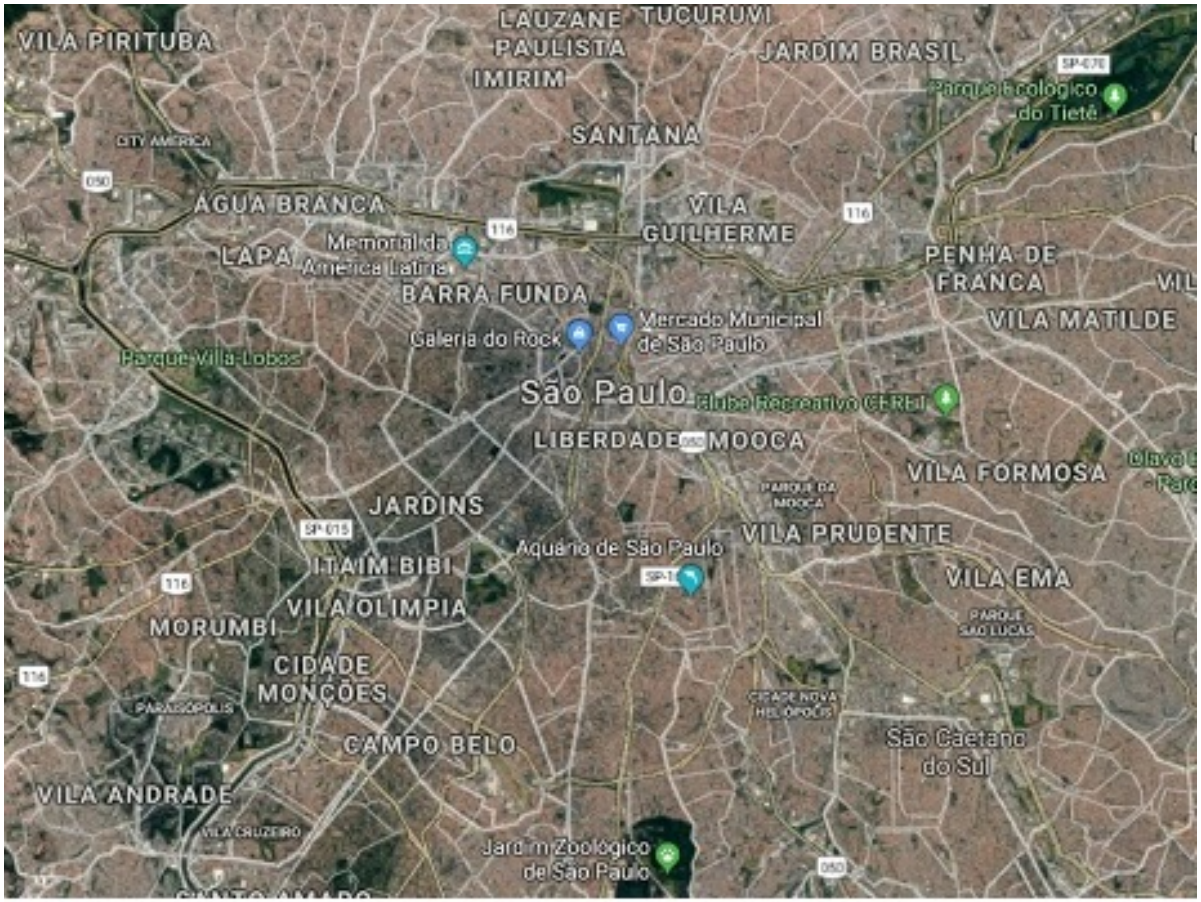
Source: Siang Wun Song

Ano	Tamanho transistor	Redução (1D)	Redução na área (2D)
1978	5 micrômetros		
2018	7 nanômetros	714 vezes	510.000 vezes

- Se uma dimensão (1D) na pastilha diminui 5000/7 = 714 vezes, temos uma redução de $714^2 = 510.000$ na área (2D).
- "Lei" de Moore: o número de transistores numa pastilha de Silício dobra a cada 18 meses.

Importância do transistor MOS

Suponha que a pastilha de 1978 continha, ao invés de circuitos VLSI, uma região geográfica de 1.000 km^2.



Source: Google Maps

Importância do transistor MOS

A mesma pastilha hoje pode conter toda a terra, com uma área de 510.000.000 km^2. Isso ilustra o avanço da VLSI.

Source: Google Maps

Importância do transistor MOS

Hoje existem 3 fabricantes no mundo capazes de produzir chips com a tecnologia de 7 nm. (Clicar aqui para a reportagem completa.)

- Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC)

  Para um vídeo sobre esse fabricante, ver:
  Inside The Worlds Largest Semiconductor Factory - BBC (4:17 minutos)
- Samsung
- Intel

Tecnologia de 5 nm

Em 2024 já é possível produzir chips com a tecnologia de 5 nm. Aqui é preciso dizer o que siginifica 5 nm.

- O nome tecnologia de 5 nm usada hoje não tem mais a ver com algum tamanho físico do transistor (como o comprimento do gate ou do canal), como entendido historicamente.
- Usa-se o nome 5 nm, 3 nm, etc. para designar um termo de marketing usado por uma fabricante a uma nova geração de semicondutor de Silício com maior densidade em número de transistores, maior velocidade, e menor consumo de energia em relaão à tecnologia anterior de 7 nm.
- Samsung e TCMC já estão produzindo chips de 5 nm em volume de produção, para companhias como Apple, Marvell, Huawei e Qualcomm.
- Para conhecer a história do desenvolvimento da tecnologia de 5 nm: Ver 5 nm Process - Wikipedia.

Tecnologia de 3 nm

TSMC Fab 18 is the main 3nm production facility

Source: TSMC

Para conhecer a nova tecnologia de 3 nm:

- Ver 3 nm Process - Wikipedia.
- Ver 3 nm Technology - Taiwan Semiconductor Manufacturing Company.

É interessante observar que há pesquisas de vários materiais que podem ser melhores candidatos para substituir o Silício, como o Arseneto de Boro Cúbico.

Como foi o meu aprendizado?

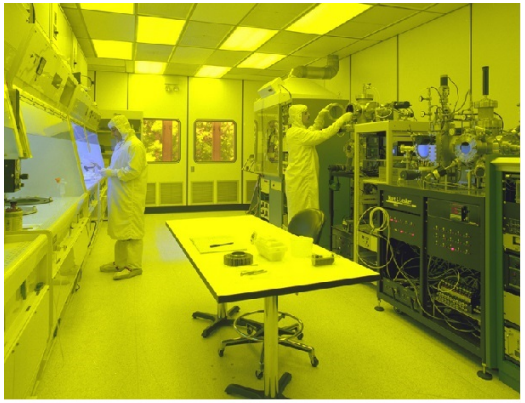
Um pequeno desafio: gostou do multiplexador 4 para 1? Você seria capaz de projetar um de 8 para 1? (Não precisa entregar...)

"Lei" de Moore:

> *o número de transistores numa pastilha de Silício dobra a cada 18 meses.*

- Pesquisa na Internet materiais que podem substituir o Silício.
- Se a tecnologia baseada no Silício está no fim, quais novas tecnologias vão surgir no futuro?

Próximo assunto: Processo de fabricação e arrays sistólicos



Source: Wikipedia

- Próximo assunto: Processo de fabricação e arrays sistólicos
- Como fabricar chip VLSI: sala limpa, processo básico semelhante a revelação de fotos a partir de negativos.
- Pastilhas feitas sob medida para aplicações específcas (ASICs).
- Arrays sistólicos e Google TPU (*Tensor Processing Unit*)