

# 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

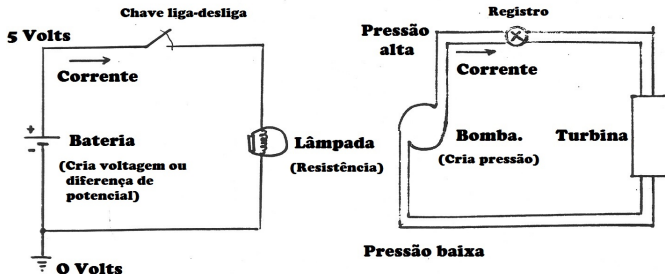
- Veremos a tecnologia VLSI. Será passada a Lista 2 de exercícios. Ao final dessas aulas, vocês saberão
  - O que é um transistor MOS e suas mil utilidades: funciona como chave, resistor, capacitor, ...
  - Portas lógicas NOT, NAND e NOR podem ser produzidas por vários transistores MOS. Transistor é 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 de microeletônica 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.

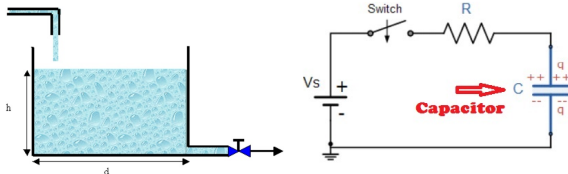
# Analogia - Recordação de circuitos elétricos



carga elétrica  
corrente elétrica  
voltagem  
bateria  
resistor  
capacitor

gota de água  
corrente de água  
pressão  
bomba  
turbina  
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 água (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** = **M**etal **O**xide **S**emiconductor

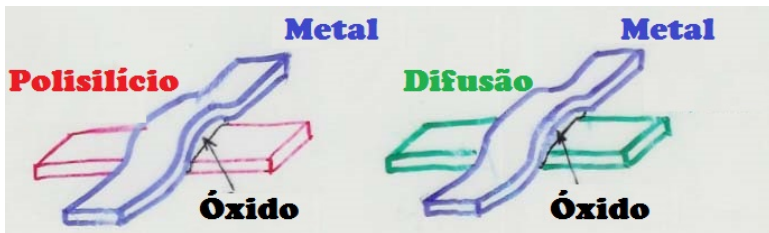
- Veremos o transistor MOS, que pode funcionar como uma chavinha minúscula (liga e desliga) feito de semicondutor (**Silício Si**).
- O transistor MOS é importante pois é o tijolo que constrói todo o mundo digital.

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



# Sobreposição de camadas

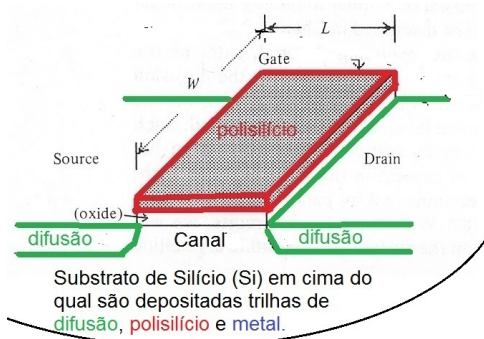
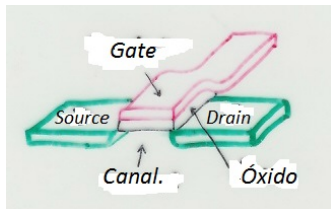
- Uma trilha de **metal** pode cruzar uma trilha de **polisilício** ou de **difusão** sem produzir efeito significativo.



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



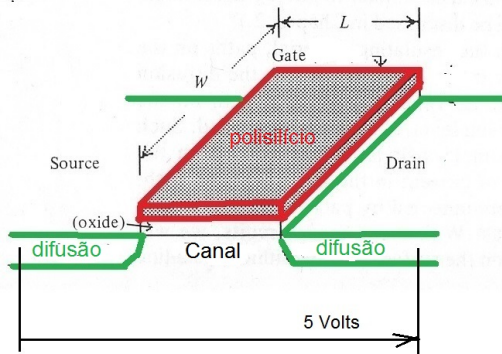
# Polisilício cruzando difusão produz um transistor



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

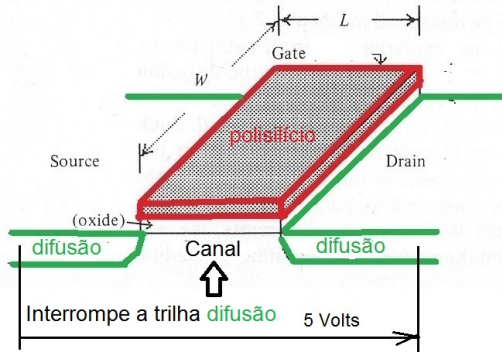


# Polisilício cruzando difusão produz um transistor



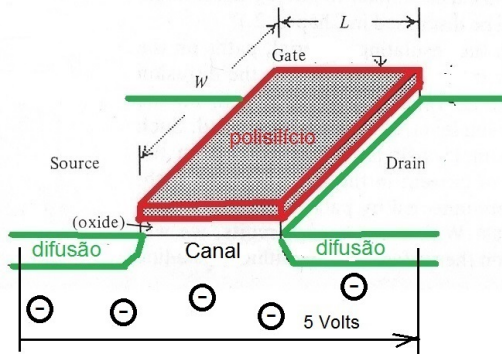
- Vamos aplicar uma voltagem, e.g. de 5 Volts, entre *Drain* e *Source* na trilha de **difusão**  $V_{DS} = 5$  Volts. Será que isso vai permitir passagem de corrente na trilha de **difusão**?

# 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.

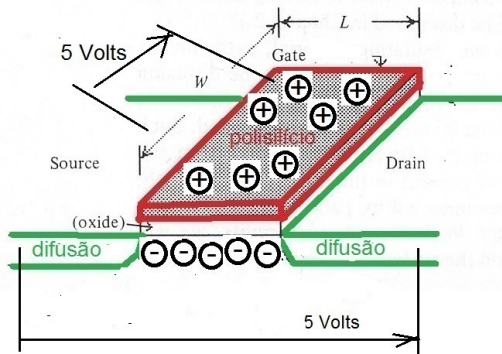
# Polisilício cruzando difusão produz um transistor



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

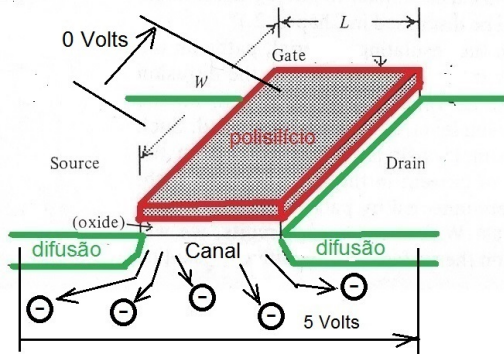


# Polisilício cruzando difusão produz um transistor



- 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



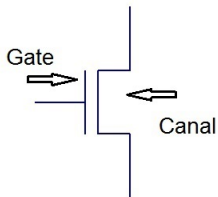
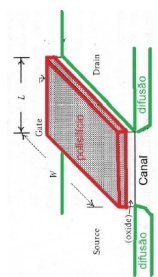
- Fazendo a voltagem  $V_{GS} = 0$  (por exemplo ligando o Gate à terra) esvazia as cargas positivas no Gate. Os elétrons deixam o Canal e cessa a corrente na trilha da difusão.



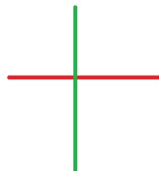


# Notação para transistor MOS

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



Notação **sem cor**



Notação **colorida** (palito)

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).



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

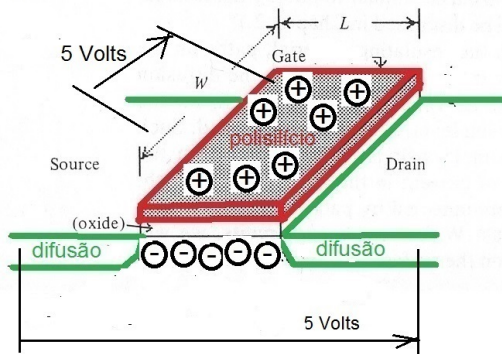


- uma **porta NOR** (porta OR seguida de NOT).



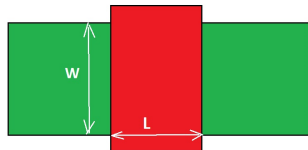
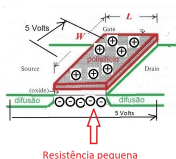
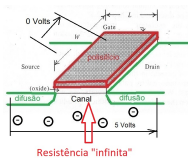
Com transistores MOS como tijolo construímos qualquer circuito digital, incluindo memórias e processadores.

# Transistor MOS como capacitor



- Voltagem alta no Gate carrega cargas elétricas no capacitor. Voltagem 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

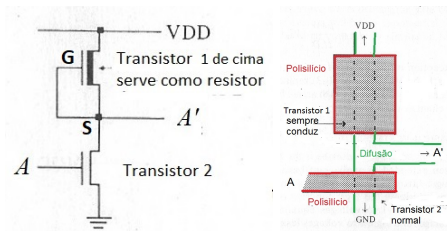
Recordamos o divisor-de-tensão (potenciômetro).



- 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.
- $V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{in}$
- Se  $R_1 = R_2$  então  $V_{out} = \frac{1}{2} \cdot V_{in} = 2.5 \text{ Volts}$
- Se  $R_1 \gg R_2$  então  $V_{out}$  fica próximo a zero Volts.

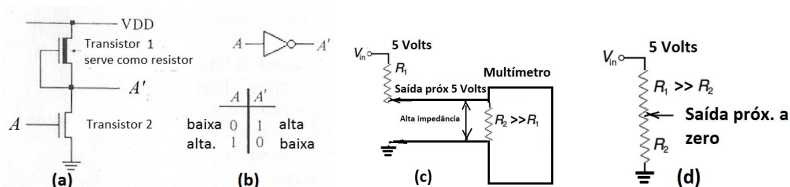


# Dois transistores produzem uma porta NOT



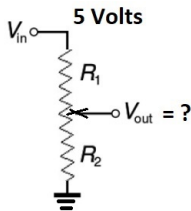
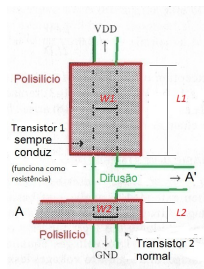
- O transistor 1 foi fabricado para sempre permitir a passagem de corrente. O seu papel é funcionar como resistência.
- Isso é feito através de uma implantação de íons no canal do transistor 1. Com isso, o transistor 1 já conduz, ao fazer voltagem entre gate e source  $V_{GS} = 0$ .
- O transistor 2 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. Se você mede a saída com um multímetro (que possui alta impedância ou resistência), a saída  $A'$  fica com voltagem alta (1). Ver Figura (c).
- Se  $A$  tem voltagem alta (1), o transistor 2 conduz corrente e apresenta uma resistência que chamamos de  $R_2$ .
- Se a resistência do transistor 1  $R_1$  for muito maior que  $R_2$ , então teremos a saída  $A'$  com voltagem baixa (0). Ver a Figura (d).

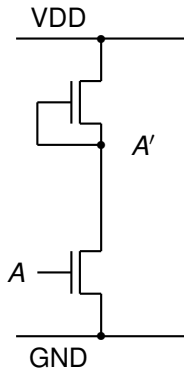
# Dois transistores produzem uma porta NOT



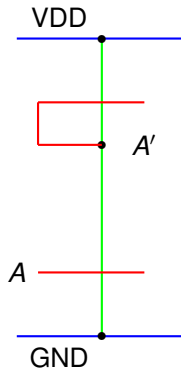
Para uma porta NOT funcionar, basta fazer a resistência de condução do transistor de cima  $R_1$  ser 4 vezes a resistência de condução do transistor de baixo  $R_2$ :

$$\begin{aligned} R_1 &= 4R_2 \\ \frac{L_1}{W_1} &= 4 \frac{L_2}{W_2} \end{aligned}$$

# Notação para porta NOT



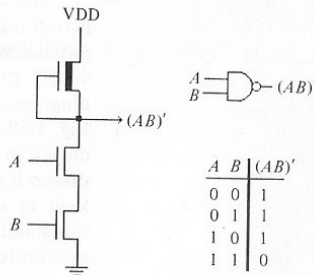
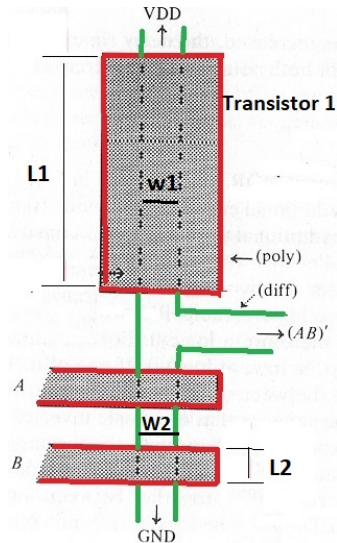
Notação sem cor



Notação colorida (palito)

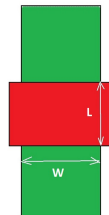


# Três transistores produzem uma porta NAND

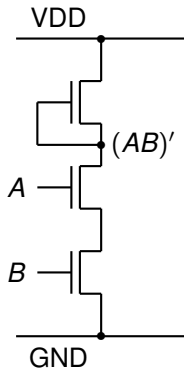


Precisamos fazer  $L1/W1=8 L2/W2$  pois as resistências de condução dos transistores A e B se somam.

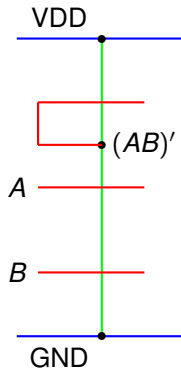
O efeito final é que a resistência do transistor 1 fica 4 vezes a resistência equivalente de A e B.



# Notação para porta NAND

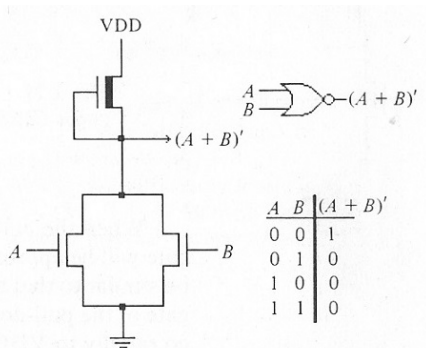
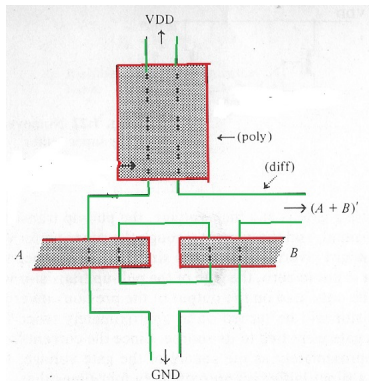


Notação sem cor



Notação colorida (palito)

# Três transistores produzem uma porta NOR



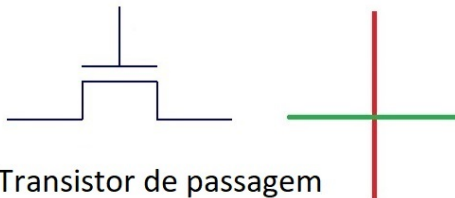
- Aqui basta fazer  $L_1/W_1 = 4L_2/W_2$  pois as resistências de condução de A e B estão em paralelo, produzindo uma resistência equivalente menor que cada uma delas (no caso igual a metade).
- Você pode desenhar a porta NOR com a notação de palito (com cor)?



# Lista de Exercícios 2

- Fazer e entregar por email a [Lista de Exercícios 2](#).
- Não há prazo para entrega. Mas recomendo não demorar muito. Bom fazer logo com a matéria fressquinha na cabeça.

# Circuitos usando transistores de passagem

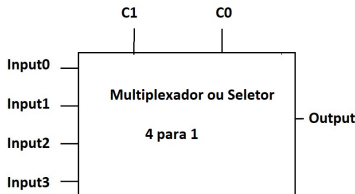


Transistor de passagem

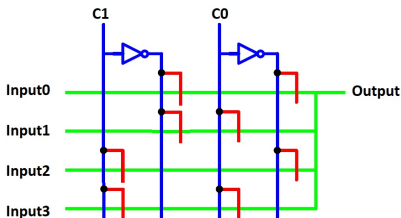
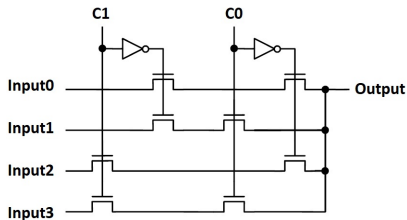
- O transistor MOS funcionando como uma chave deixa passar ou não corrente elétrica.
- O transistor com essa finalidade é conhecido como transistor de passagem (*pass transistor*).
- Vamos dar 2 circuitos interessantes que usam apenas a porta NOT e transistores de passagem.

# 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

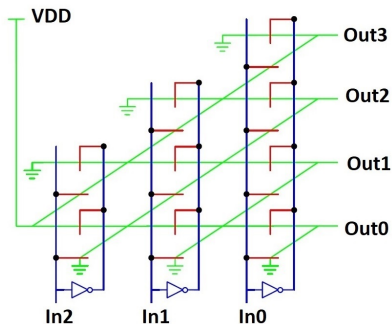


Source: VLSI Systems Univ. Cambridge 2004 (based on Mead and Conway - Intro. to VLSI Systems)

# Circuito contador de 1's

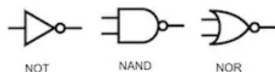
Dados 3 bits  $IN_0$ ,  $IN_1$ ,  $IN_2$ , o circuito conta o número de 1's. Se  $i$  bits iguais a 1, a saída  $Out_i = 1$  e as demais saídas = 0.

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



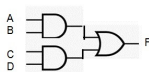
Veremos agora que qualquer circuito digital pode ser implementado

- 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).

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

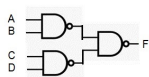


Vamos negar duas vezes o lado direito (que não altera nada):

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

Aplicamos Lei de Morgan:

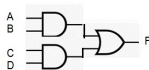
$$F = \overline{\overline{(A \wedge B)} \wedge \overline{(C \wedge D)}}$$



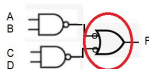
# Lógica booleana usando porta NAND

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

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

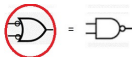


Negando a saída do AND e a entrada do OR não muda nada. Assim:

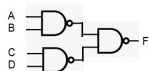


Vamos expressar a Lei de Morgan em forma de desenho:

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



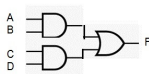
Portanto temos:



# Lógica booleana usando porta NOR

Considere de novo a equação lógica:

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



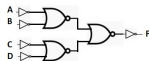
Vamos negar duas vezes o lado direito (que não altera nada):

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

Aplicamos Lei de Morgan:

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

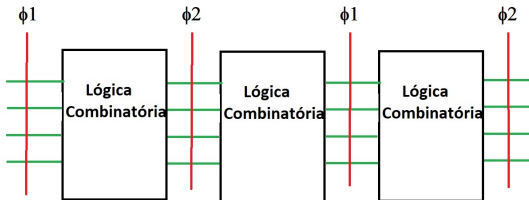
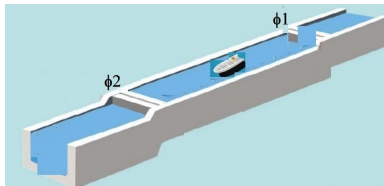
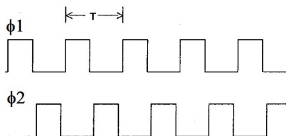
$$\text{Portanto } \overline{F} = \overline{(\overline{A \vee B})} \vee \overline{(\overline{C \vee D})}$$





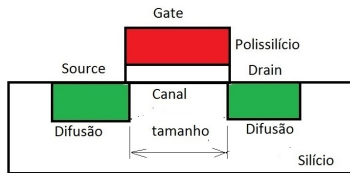
# Relógio de duas fases $\phi 1$ e $\phi 2$

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.)





# Importância do transistor MOS



Source: Siang Wun Song

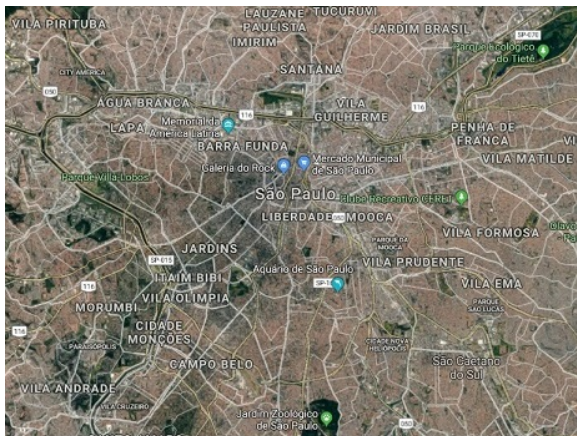
Transistor

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  $1.000 \text{ km}^2$ .



Source: Google Maps

# Importância do transistor MOS

A mesma pastilha hoje pode conter toda a terra, com uma área de 510.000.000 km<sup>2</sup>. 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

A previsão é que em 2024 será possível produzir chips com a tecnologia de 5 nm. Na analogia usada, um tal chip poderá conter:

# Importância do transistor MOS



Source: Google Maps

*Ao passar da tecnologia de 7 nm (2018) para 5 nm (2024), dobrou-se a capacidade da pastilha. Note-se isso levou 6 anos, ao invés de 18 meses. Vemos que a tal “Lei” de Moore começou a falhar.*

# 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.*

- Não é uma lei. Foi mais uma constatação de Moore que vem se verificando ao longo dos anos.
- Mas o tamanho do transistor não pode diminuir sempre, por causa de limitações físicas.
- Para os curiosos: verifique consultando na Internet se essa 'Lei' está no seu fim.
- Para pensar: Se a tecnologia baseada no Silício está no fim, quais novas tecnololcias 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 específicas (ASICs).
- Arrays sistólicos e Google TPU (*Tensor Processing Unit*)