Sistemas Digitais

ET46B

Prof. Eduardo Vinicius Kuhn

kuhn@utfpr.edu.br
Curso de Engenharia Eletrônica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Capítulo 3
Descrevendo circuitos lógicos

Conteúdo

Objetivos

- Introduzir as três operações lógicas básicas (`OR`, `AND` e `NOT`).
- Descrever a operação e **construir tabelas-verdade** para as portas `OR`, `NOR`, `AND`, `NAND` e `NOT`.
- **Obter expressões booleanas descrevendo circuitos lógicos**.
- **Implementar circuitos usando portas lógicas** a partir de expressões booleanas.
- Mostrar como **os teoremas da álgebra booleana** podem ser usados para simplificar expressões lógicas.
- **Demonstrar a universalidade das portas `NOR` e `NAND`.**
- **Discutir sobre o tempo de atraso de propagação.**

Introdução

- **Álgebra convencional não é adequada** para lidar com circuitos digitais, uma vez que as variáveis podem assumir valores reais.

- **Na álgebra booleana**, as variáveis só podem assumir apenas dois "valores" distintos (i.e., 0 ou 1).
    - Proposta por George Boole (1854) e levada para o mundo dos circuitos digitais por Claude Shannon (1930).
    - ...introduz **símbolos e operadores "próprios"**.
    - Torna possível descrever, manipular e simplificar expressões lógicas.

- Portanto, é uma ferramenta poderosa de análise, síntese e documentação para circuitos lógicos, tal como tabelas-verdade, símbolos, diagramas esquemáticos e diagramas de tempo.

Constantes e variáveis booleanas

- **Constantes e variáveis booleanas** podem assumir **apenas** dois "valores", i.e., **0 ou 1**.
- As variáveis booleanas 0 e 1 **representam efetivamente um estado/nível lógico.**
- **Outros termos são, comumente, usados como sinônimos** desses níveis lógicos.

Lógico 0	**Lógico 1**
Falso	Verdadeiro
Baixo	Alto
Desligado	Ligado
Não	Sim
Aberto	Fechado

O valor booleano 0 pode representar qualquer tensão na faixa de 0–$0{,}8$ V, enquanto 1 pode representar qualquer tensão na faixa de 2–5 V.

Constantes e variáveis booleanas

- As **entradas (e.g., A, B, C, ...) e saídas (e.g., x, y, z, ...)** de um circuito lógico são consideradas variáveis lógicas.
- **Os níveis lógicos da(s) entrada(s) determinam, a qualquer momento, os níveis lógicos da(s) saída(s).**
- **A álgebra booleana permite expressar relações entre entradas e saídas (variáveis e constantes) de um circuito.**

$$x = (A+0)\overline{C}\,\overline{D} + \overline{(\overline{A}+C)(B+\overline{D})} + B(\overline{C}+1)D$$

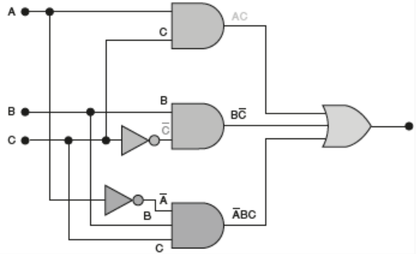
  - Variáveis booleanas, <u>em momentos diferentes</u>, podem assumir níveis lógicos 0 ou 1 (se não for um nível lógico, será o outro).
  - Constantes booleanas são pontos no circuito onde os níveis lógicos <u>não se alteram</u> ao longo do tempo (são sempre 0 ou 1).

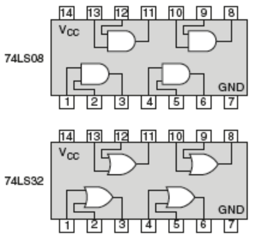
A álgebra booleana tem, de fato, apenas três operações básicas (operações lógicas):

`OR`, `AND` **e** `NOT`

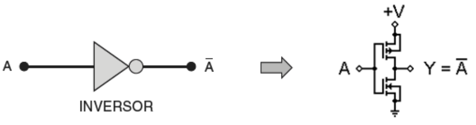
Constantes e variáveis booleanas

Em nosso mundo digital, **essas operações são realizadas por portas lógicas** **construídas com transistores.**



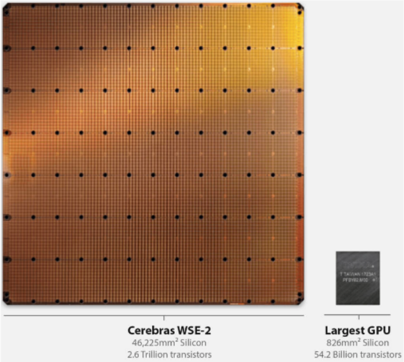


Exemplo:



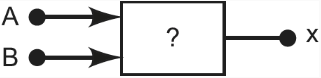
Curiosidade

Porta/Função	Número de Transistores
NOT	2
Buffer	4
NAND 2-input	4
NOR 2-input	4
AND 2-input	6
OR 2-input	6
NAND 3-input	6
NOR 3-input	6
MUX 2-input with TG	6
MUX 4-input with TG	18
MUX 4-input	24
1-bit Adder full	28
1-bit Adder–subtractor	48
8-bit multiplier	3,000
16-bit multiplier	9,000
32-bit multiplier	21,000



Tabelas-verdade

Uma **tabela-verdade** **descreve como a saída** x de um circuito lógico **depende dos níveis lógicos das entradas** (e.g., A e B).



A	B	x
0	0	1
0	1	0
1	0	1
1	1	0

- A **lista das combinações possíveis é usualmente uma sequência de contagem binária**; logo, é fácil preencher uma tabela-verdade sem esquecer nenhuma combinação.
- Caso o circuito lógico tenha mais entradas, basta adicionar mais colunas (e.g., C, D, E...).
- O número de linhas é 2^N, sendo N o número de entradas.

Operação e porta `OR`

Na álgebra booleana, a operação `OR` **é representada por** '$+$', i.e.,

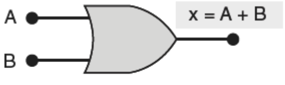
$$\boxed{x = A + B}$$

a qual é lida como 'x **é igual a** A **OU** B'.

Com respeito a **tabela-verdade e símbolo**,

OR

A	B	x = A + B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1



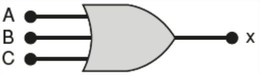
Porta OR

Note que x assume nível lógico 1 caso <u>ao menos uma</u> entrada seja 1;

caso contrário, x assume nível lógico 0.

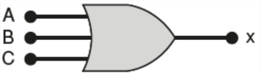
Operação e porta OR

Exemplo: Determine a saída x para uma porta OR de 3 entradas (A, B e C).



Operação e porta OR

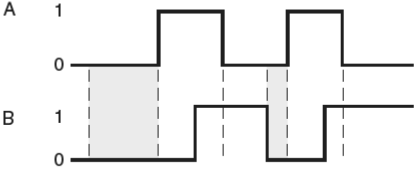
Exemplo: Determine a saída x para uma porta OR de 3 entradas (A, B e C).

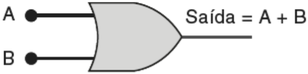


R:

A	B	C	x
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

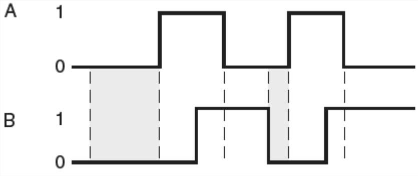
Exemplo: Determine a saída da porta OR nos diferentes instantes de tempo indicados.

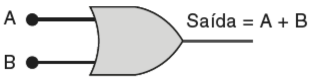




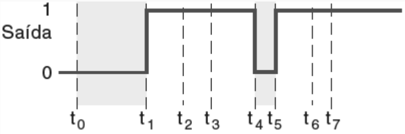
Operação e porta OR

Exemplo: Determine a saída da porta OR nos diferentes instantes de tempo indicados.





R:



Entre t_0–t_1 e t_4–t_5, a saída assume nível lógico 0; em contraste, assume nível lógico 1 em todos os outros intervalos.

Operação e porta AND

Na álgebra booleana, a operação AND **é representada por '$\cdot$'** (comumente omitido por simplicidade), i.e.,

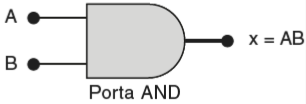
$$\boxed{x = A \cdot B}$$

a qual é lida como 'x **é igual a** A **E** B'.

Com respeito a **tabela-verdade e símbolo**,

AND

A	B	x = A • B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



Note que x assume nível lógico 1 caso <u>todas</u> as entradas sejam 1; caso contrário, x assume nível lógico 0.

Operação e porta AND

Exemplo: Determine a saída x para uma porta AND de 3 entradas (A, B e C).

Operação e porta AND

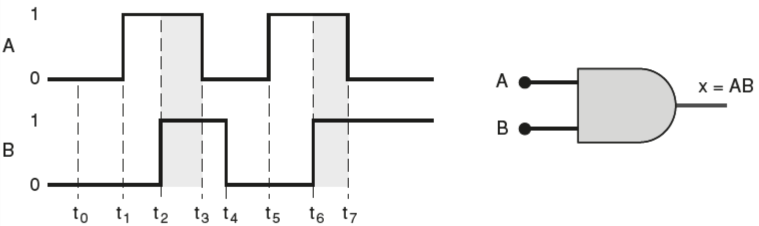
Exemplo: Determine a saída x para uma porta AND de 3 entradas (A, B e C).

R:

A	B	C	x
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

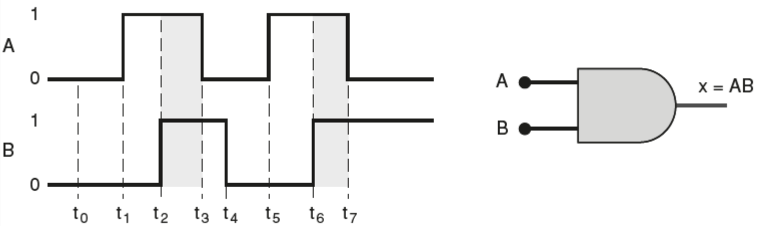
Operação e porta AND

Exemplo: Determine a saída da porta AND nos diferentes instantes de tempo indicados.

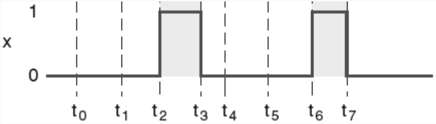


Operação e porta AND

Exemplo: Determine a saída da porta AND nos diferentes instantes de tempo indicados.



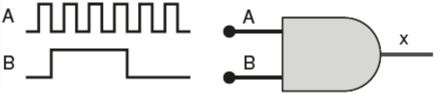
R:



A saída assume nível lógico 1 apenas entre t_2–t_3 e t_6–t_7.

Operação e porta AND

Exemplo: Considerando

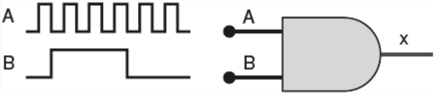


a) Qual a forma de onda da saída da porta AND?

b) E, caso a entrada B seja mantida em nível lógico 0?

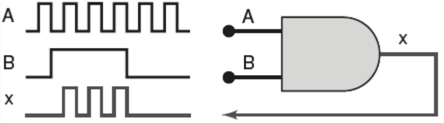
Operação e porta AND

Exemplo: Considerando



a) Qual a forma de onda da saída da porta AND?

R:



b) E, caso a entrada B seja mantida em nível lógico 0?

R: Nesse caso, a porta AND é usada como circuito inibidor, já que $B = 0$ implica $x = 0$; por outro lado, quando $B = 1$, tem-se a condição de habilitação, fazendo $x = A$.

Operação e porta NOT

Na álgebra booleana, a operação NOT **é representada por '$^{-}$'** (ou, eventualmente, por '$'$'), i.e.,

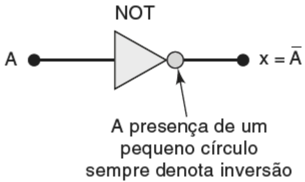
$$\boxed{x = \overline{A}} \quad \text{ou} \quad \boxed{x = A'}$$

a qual é lida como '**x é igual a A negado**' (complemento de A).

Com respeito a **tabela-verdade e símbolo**,

NOT

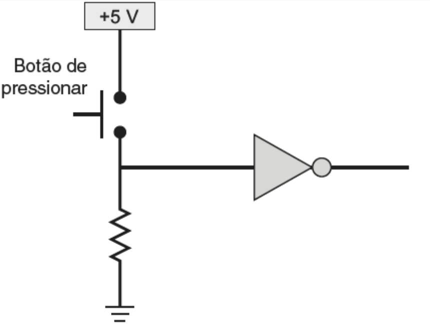
A	$x = \overline{A}$
0	1
1	0



Note que x assume o nível lógico oposto ao aplicado na entrada A.

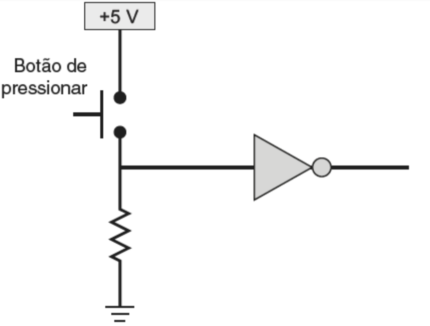
Operação e porta NOT

Exemplo: Explique o funcionamento da porta NOT na aplicação (típica) ilustrada na figura.



Operação e porta NOT

Exemplo: Explique o funcionamento da porta NOT na aplicação (típica) ilustrada na figura.

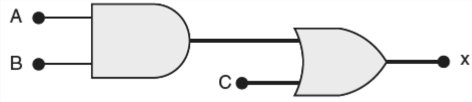


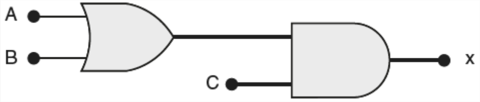
R: Nessa aplicação, quando o botão é pressionado, tem-se nível lógico 0 na saída da porta NOT (inversora).

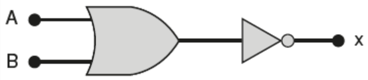
Qualquer circuito lógico pode ser descrito usando as 3 operações booleanas básicas (`OR`, `AND` e `NOT`).

Descrevendo circuitos lógicos algebricamente

Exemplo: Determine as expressões booleanas que descrevem a relação entre as entradas e a saída dos seguintes circuitos lógicos:



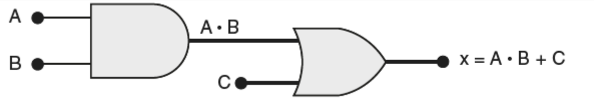


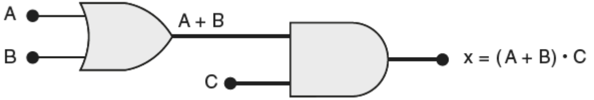


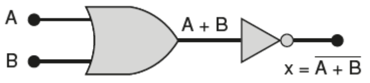
Descrevendo circuitos lógicos algebricamente

Exemplo: Determine as expressões booleanas que descrevem a relação entre as entradas e a saída dos seguintes circuitos lógicos:

R:

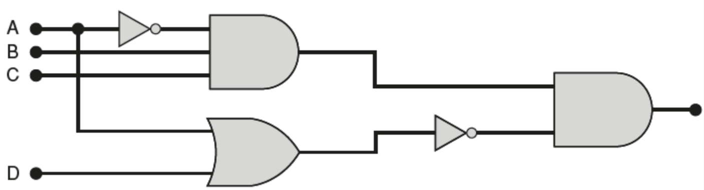






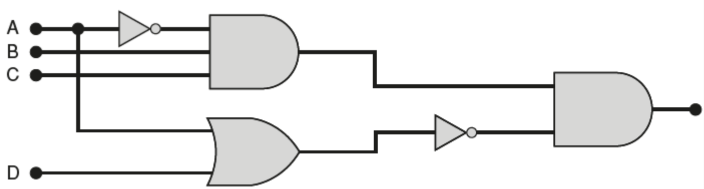
Descrevendo circuitos lógicos algebricamente

Exemplo: Determine a expressão booleana que descreve o seguinte circuito lógico:



Descrevendo circuitos lógicos algebricamente

Exemplo: Determine a expressão booleana que descreve o seguinte circuito lógico:

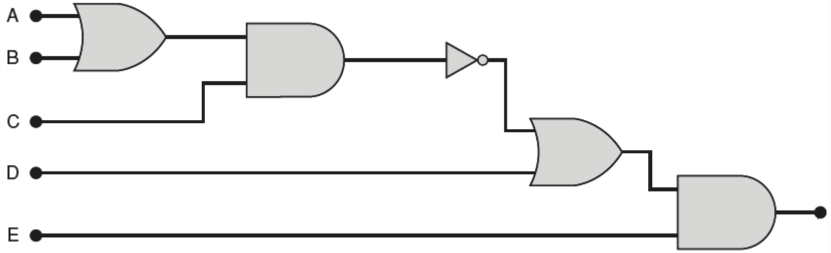


R:

$$x = \overline{A}BC\overline{(A + D)}$$

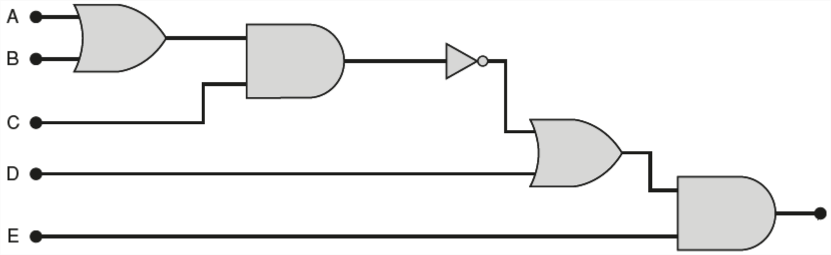
Descrevendo circuitos lógicos algebricamente

Exemplo: Determine a expressão booleana que descreve o seguinte circuito lógico:



Descrevendo circuitos lógicos algebricamente

Exemplo: Determine a expressão booleana que descreve o seguinte circuito lógico:



R:

$$x = [D + \overline{(A + B)C}]E$$

Avaliando as saídas dos circuitos lógicos

A partir da expressão booleana que descreve um circuito, pode-se **determinar o nível lógico da saída** para uma dada entrada. Para tal, deve-se:

i) **atribuir o nível lógico às entradas**; e, então,

ii) **avaliar a expressão** usando a álgebra booleana.

Eventualmente, podem surgir dúvidas quanto a **qual operação deve ser avaliada primeiro**. Nesse contexto, lembre-se:

Precedência de operadores

Operador	Símbolo	Descrição
`NOT`	$^{-}$ ou $'$	Mais alta
`AND`	$\cdot$	Média
`OR`	$+$	Mais baixa

Avalie primeiro as expressões contidas entre parênteses.

Avaliando as saídas dos circuitos lógicos

Especificamente, **as seguintes regras devem ser obedecidas**:

1) Avalie as expressões dentro de parênteses.
2) Realize as operações `NOT` "simples" (uma variável).
   - Caso uma operação `NOT` envolva mais de uma variável, resolva a expressão e, em seguida, "inverta" o resultado.
3) Execute as operações `AND` e, então, `OR`.

A ordem das operações é a mesma da álgebra convencional.

Avaliando as saídas dos circuitos lógicos

Exemplo: Determine a saída $x = [D + \overline{(A + B)C}]E$ quando

a) $A = B = 0$ e $C = D = E = 1$

b) $A = B = E = 0$ e $C = D = 1$

Lembre-se da <u>precedência de operadores</u>, i.e., $(\ \ ) \rightarrow$ `NOT` $\rightarrow$ `AND` $\rightarrow$ `OR`.

Avaliando as saídas dos circuitos lógicos

Exemplo: Determine a saída $x = [D + \overline{(A+B)C}]E$ quando

a) $A = B = 0$ e $C = D = E = 1$

b) $A = B = E = 0$ e $C = D = 1$

R:

a)

$$\begin{aligned} x &= [1 + \overline{(0+0)1}]1 \\ &= [1 + \overline{0}]1 \\ &= 1. \end{aligned}$$

b)

$$\begin{aligned} x &= [1 + \overline{(0+0)1}]0 \\ &= 0. \end{aligned}$$

Lembre-se da precedência de operadores, i.e., ( ) $\rightarrow$ NOT $\rightarrow$ AND $\rightarrow$ OR.

E, se quiséssemos avaliar/verificar o funcionamento de um dado circuito lógico frente a todos os casos possíveis?

Avaliando as saídas dos circuitos lógicos

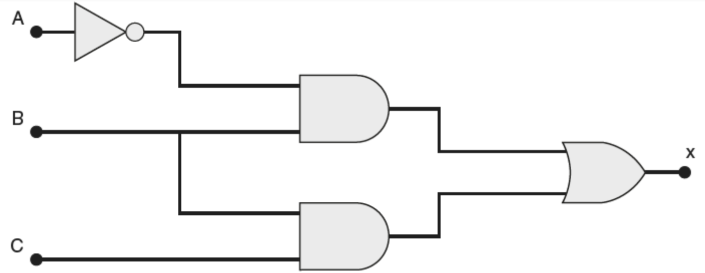
A melhor maneira de verificar **como um circuito lógico funciona se dá através de sua tabela-verdade**, a qual lista **todas** as possíveis combinações de entrada.

Dessa forma, torna-se possível:

- Analisar uma porta ou combinação lógica de cada vez.
- Conferir se a implementação está correta.
- Identificar pontos de erros do circuito lógico.

Para cada possível combinação de entrada, determina-se o estado lógico em cada ponto (nó) do circuito lógico, inclusive a saída.

Exemplo: Determine a tabela-verdade do circuito combinacional ilustrado na figura.



Avaliando as saídas dos circuitos lógicos

R: Considerando que a saída do circuito lógico é dada por

$$x = \overline{A}B + BC$$

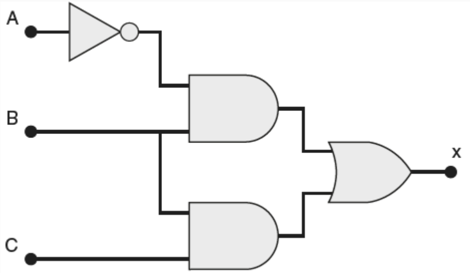
é possível mostrar que

A	B	C	$u = \overline{A}$	$v = \overline{A}B$	$w = BC$	$x = v + w$
0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	1	0	0	0
0	1	0	1	1	0	1
0	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	0	0	0
1	0	1	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	1	1

Avaliando as saídas dos circuitos lógicos

A partir de uma tabela-verdade, pode-se então **testar o circuito para todas as combinações de entradas**, e.g.,

- Se uma combinação de entrada produzir uma saída incorreta, basta verificar o nível lógico de cada nó intermediário.
- Se o nível lógico de um nó intermediário está correto, o problema está à direita; caso contrário, à esquerda desse nó.



A	B	C	$u=\overline{A}$	$v=\overline{A}B$	$w=BC$	$x=v+w$
0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	1	0	0	0
0	1	0	1	1	0	1
0	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	0	0	0
1	0	1	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	1	1

O diagrama de um circuito lógico pode ser obtido diretamente a partir de uma dada expressão booleana.

Implementando circuitos a partir de expressões booleanas

Exemplo: Desenhe o diagrama do circuito que implementa a seguinte expressão lógica:

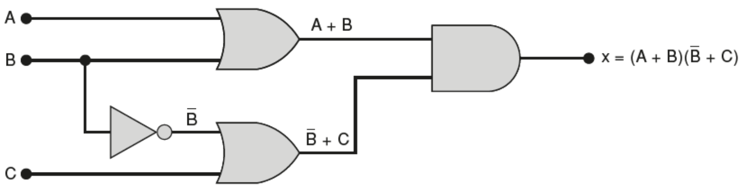
$$x = (A + B)(\overline{B} + C).$$

Implementando circuitos a partir de expressões booleanas

Exemplo: Desenhe o diagrama do circuito que implementa a seguinte expressão lógica:

$$x = (A + B)(\overline{B} + C).$$

R:



Implementando circuitos a partir de expressões booleanas

Exemplo: Desenhe o diagrama do circuito que implementa a seguinte expressão lógica:

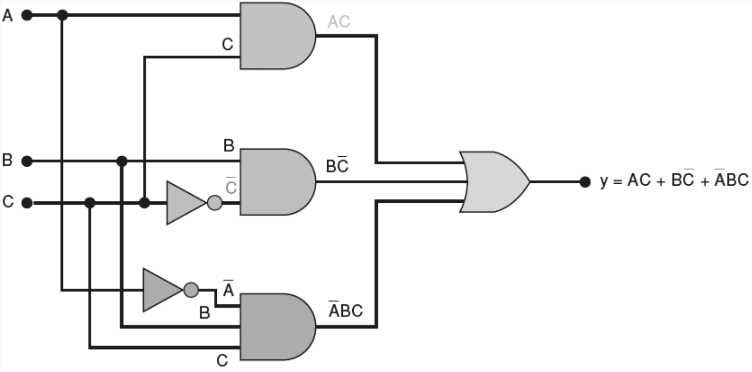
$$y = AC + B\overline{C} + \overline{A}BC.$$

Implementando circuitos a partir de expressões booleanas

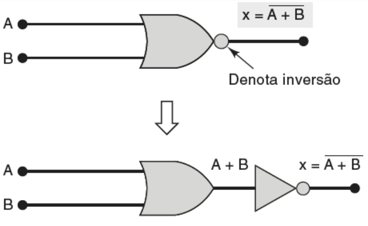
Exemplo: Desenhe o diagrama do circuito que implementa a seguinte expressão lógica:

$$y = AC + B\overline{C} + \overline{A}BC.$$

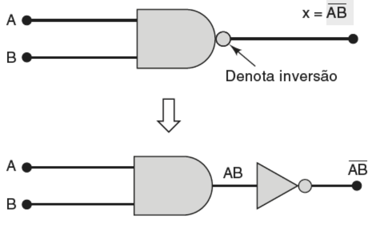
R:



Portas NOR e NAND



		OR	NOR
A	B	A + B	$\overline{A + B}$
0	0	0	1
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	1	0



		AND	NAND
A	B	AB	$\overline{AB}$
0	0	0	1
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

Exceto pelo pequeno círculo na saída, que representa a operação de "inversão", os símbolos das portas NOR e NAND são iguais às portas OR e AND, respectivamente.

Portas NOR e NAND

Exemplo: Implemente o circuito lógico cuja expressão booleanada é dada por

$$x = \overline{AB\overline{(C + D)}}$$

usando apenas portas NOR e NAND. E, em seguida, determine o nível lógico da saída quando $A = B = C = 1$ e $D = 0$.

Lembre-se da precedência de operadores, i.e., $(\ \ ) \rightarrow$ NOT $\rightarrow$ AND $\rightarrow$ OR.

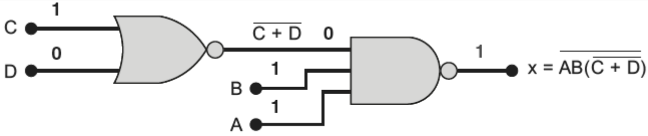
Portas NOR e NAND

Exemplo: Implemente o circuito lógico cuja expressão booleanada é dada por

$$x = \overline{AB\overline{(C+D)}}$$

usando apenas portas NOR e NAND. E, em seguida, determine o nível lógico da saída quando $A = B = C = 1$ e $D = 0$.

R:



Lembre-se da precedência de operadores, i.e., ( ) → NOT → AND → OR.

Em álgebra, um teorema é uma proposição que foi provada verdadeira por uma cadeia de raciocínio...

Teoremas booleanos (de uma variável)

1) **Elementos de identidade:**
$$\begin{cases} A + 0 = A \\ A \cdot 1 = A \end{cases}$$

2) **Elementos nulos:**
$$\begin{cases} A + 1 = 1 \\ A \cdot 0 = 0 \end{cases}$$

3) **Lei da involução:**
$$\begin{cases} \overline{\overline{A}} = A \end{cases}$$

4) **Lei da idempotência:**
$$\begin{cases} A \cdot A = A \\ A + A = A \end{cases}$$

5) **Complemento:**
$$\begin{cases} A \cdot \overline{A} = 0 \\ A + \overline{A} = 1 \end{cases}$$

6) **Princípio da dualidade:**
Cada postulado/teorema tem seu par dual obtido intercambiando-se as operações `OR` "$+$" e `AND` "$\cdot$", bem como os elementos 0 e 1.

Teoremas booleanos (com mais de uma variável)

7) **Propriedade comutativa:**

$$\begin{cases} A + B = B + A \\ A \cdot B = B \cdot A \end{cases}$$

8) **Propriedade associativa:**

$$\begin{cases} (A + B) + C = A + B + C \\ (A \cdot B) \cdot C = ABC \end{cases}$$

9) **Propriedade distributiva:**

$$\begin{cases} A(B + C) = AB + AC \\ A + BC = (A + B)(A + C) \end{cases}$$

10) **Lei da absorção:**

$$\begin{cases} A + AB = A \\ A(A + B) = A \end{cases}$$

11) **Teorema '(?)':**

$$\begin{cases} A + \overline{A}B = A + B \\ \overline{A} + AB = \overline{A} + B \end{cases}$$

12) **Teoremas de De Morgan:***

$$\begin{cases} \overline{(A + B)} = \overline{A} \cdot \overline{B} \\ \overline{(A \cdot B)} = \overline{A} + \overline{B} \end{cases}$$

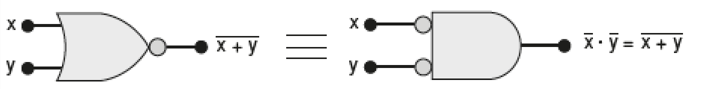
*Os dois teoremas mais importantes da álgebra booleana foram contribuições do grande matemático Augustus De Morgan.

Implicações dos Teoremas de De Morgan

Dado que

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

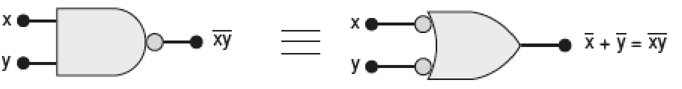
verifica-se que



Analogamente, de

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

observa-se que



Os teoremas booleanos são úteis na simplificação de expressões lógicas...

Simplificação de expressões usando teoremas booleanos

Exemplo: Simplifique as seguintes expressões booleanas:

a) $x = A \cdot \overline{B} \cdot D + A \cdot \overline{B} \cdot \overline{D}$

b) $y = (\overline{A} + B)(A + B)$

c) $z = ACD + \overline{A}BCD$

d) $w = \overline{(\overline{A} + C)(B + \overline{D})}$

Simplificação de expressões usando teoremas booleanos

Exemplo: Simplifique as seguintes expressões booleanas:

a) $x = A \cdot \overline{B} \cdot D + A \cdot \overline{B} \cdot \overline{D}$
R: $y = A\overline{B}$

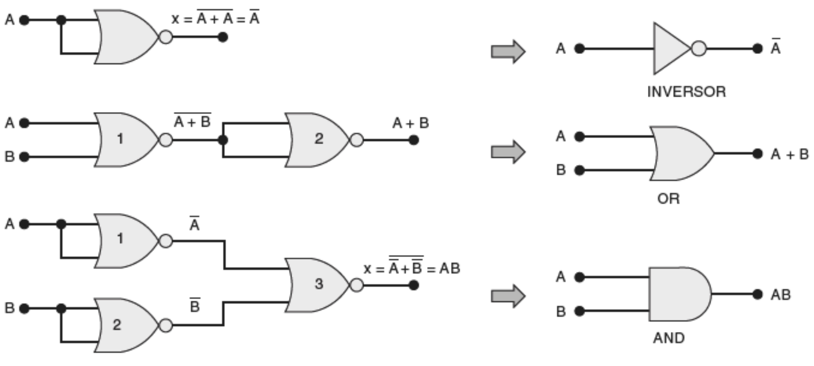
b) $y = (\overline{A} + B)(A + B)$
R: $z = B$

c) $z = ACD + \overline{A}BCD$
R: $z = (A + B)CD$

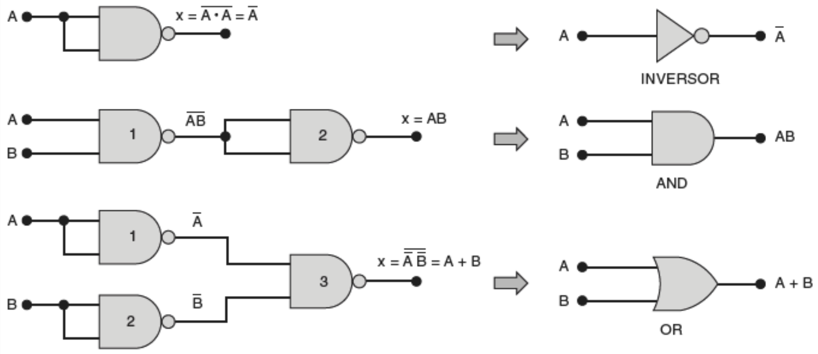
d) $w = \overline{(\overline{A} + C)(B + \overline{D})}$
R: $w = A\overline{C} + \overline{B}D$

Qualquer expressão pode ser implementada usando apenas portas `NOR` ou `NAND`.

Universalidade das portas NOR e NAND



Universalidade das portas NOR e NAND



Universalidade das portas NOR e NAND

Exemplo: Implemente a expressão booleana

$$x = AB + CD$$

usando apenas portas NAND.

Universalidade das portas `NOR` e `NAND`

Exemplo: Implemente a expressão booleana

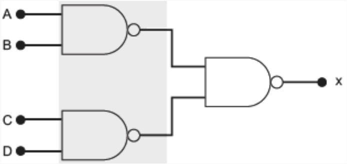
$$x = AB + CD$$

usando apenas portas `NAND`.

R: A partir da Lei da involução e dos Teoremas de De Morgan,

$$\begin{aligned} x &= \overline{\overline{AB}} + \overline{\overline{CD}} \\ &= \overline{\overline{AB} \cdot \overline{CD}} \end{aligned}$$

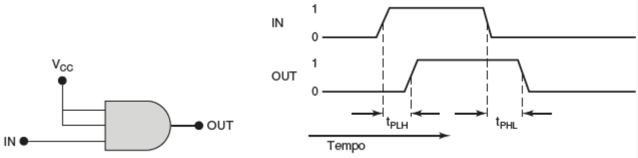
o que resulta em



O atraso de propagação é definido, basicamente, como o tempo que leva para um sistema produzir uma saída apropriada após receber uma entrada.

Atraso de propagação

Visando **mensurar o atraso de propagação** (e.g., porta `AND`), considere:



Quando a entrada assume nível ALTO, a saída assume um nível ALTO pouco depois (e vice-versa). Logo, observa-se que

i) **Transições não são verticais (instantâneas)**; por isso, mede-se o ponto de 50% na entrada até 50% na saída.

ii) O tempo de propagação BAIXO/ALTO t_{PLH} **não é necessariamente o mesmo** de ALTO/BAIXO t_{PHL}.

Atraso de propagação

A velocidade de um circuito lógico está relacionada à característica de atraso de propagação. Portanto, **cabe ao projetista assegurar que o CI é adequado para a aplicação considerada.**

Philips Semiconductors — **Product specification**

8-input NAND gate — **74HC/HCT30**

QUICK REFERENEC DATA

GND = 0 V; T_{amb} = 25 °C; $t_r = t_f$ = 6 ns

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	TYPICAL		UNIT
			HC	HCT	
t_{PHL}/t_{PLH}	propagation delay A, B, C, D, E, F, G, H to Y	C_L = 15 pF; V_{CC} = 5 V	12	12	ns
C_I	input capacitance		3.5	3.5	pF
C_{PD}	power dissipation capacitance per gate	notes 1 and 2	15	15	pF

MOTOROLA

QUAD 2-INPUT OR GATE

SN54/74LS32

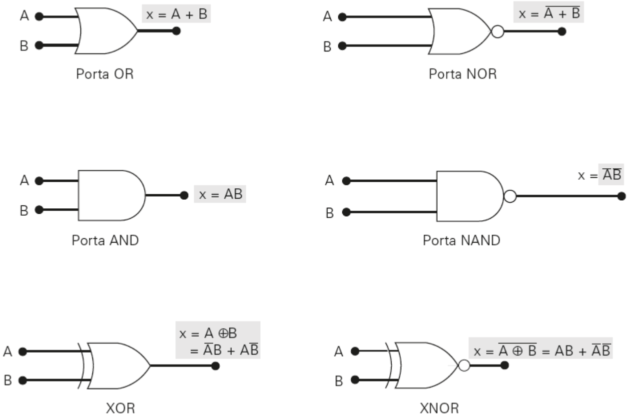
AC CHARACTERISTICS (T_A = 25°C)

Symbol	Parameter	Limits			Unit	Test Conditions
		Min	Typ	Max		
t_{PLH}	Turn-Off Delay, Input to Output		14	22	ns	V_{CC} = 5.0 V C_L = 15 pF
t_{PHL}	Turn-On Delay, Input to Output		14	22	ns	

Resumo

- As 3 operações básicas foram mostradas, i.e., `OR`, `AND` e `NOT`.
- **Ferramentas úteis de análise, síntese e documentação de circuitos lógicos foram apresentadas**, e.g.,
  - descrição em nossa própria língua;
  - construção de tabelas-verdade;
  - derivação de expressões lógicas;
  - esboço de diagramas esquemáticos; e/ou
  - obtenção de diagramas de tempo.
- Teoremas da álgebra booleana foram introduzidos e **utilizados para simplificar expressões lógicas**.
- A universalidade das portas `NOR` e `NAND` foi mostrada, as quais **possibilitam sintetizar quaisquer circuitos lógicos**.
- O conceito de atraso de propagação foi discutido.

Resumo



A	B	OR $A+B$	NOR $\overline{A+B}$	AND $A \cdot B$	NAND $\overline{A \cdot B}$	XOR $A \oplus B$	XNOR $\overline{A \oplus B}$
0	0	0	1	0	1	0	1
0	1	1	0	0	1	1	0
1	0	1	0	0	1	1	0
1	1	1	0	1	0	0	1

Considerações finais

Exercícios sugeridos:

3.16, 3.19, 3.20, 3.22, 3.24, 3.26-3.33, 3.38-3.40, 3.48 e 3.49

de R.J. Tocci, N.S. Widmer, G.L. Moss, *Sistemas digitais: princípios e aplicações*, 12a ed., São Paulo: Pearson, 2019. ⟶ (Capítulo 3)

Para a próxima aula:

R.J. Tocci, N.S. Widmer, G.L. Moss, *Sistemas digitais: princípios e aplicações*, 12a ed., São Paulo: Pearson, 2019. ⟶ (Capítulo 4)

Até a próxima aula... =)