



IC-UNICAMP

MC 602

Circuitos Lógicos e Organização de Computadores

IC/Unicamp

Prof Mario Côrtes

Capítulo 2

Introdução – Circuitos Combinacionais

- Variáveis e funções
- Tabela verdade
- Portas lógicas
- Análise de circuitos digitais
- Álgebra Booleana
- Diagrama de Venn
- Síntese
- Mintermos e SOP
- Maxtermos e POS



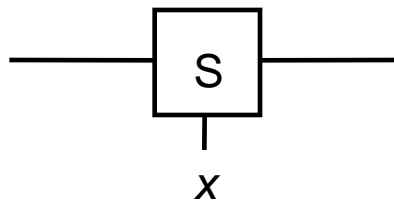
Variáveis e funções

- Sinais digitais e representação por chaves
- Lógica feita com chaves

Uma chave binária

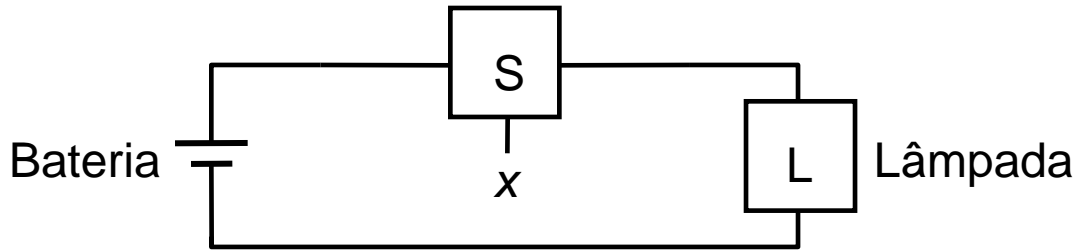


(a) Dois estados de uma chave

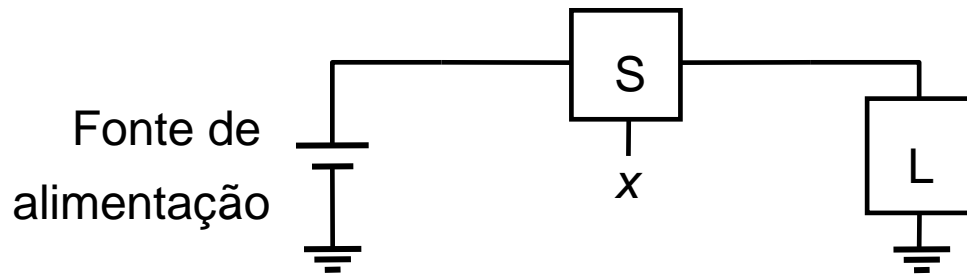


(b) Símbolo de uma chave

Lâmpada controlada por chave binária



(a) Conexão direta com a bateria

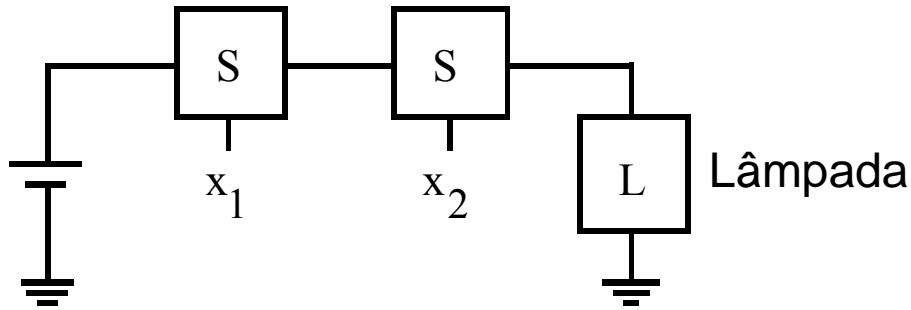


(b) Terra como interconexão

Se $L(x)$ é o estado da lâmpada \rightarrow ligado para $L=1$ e desligado para $L=0$, então $L(x) = x$ liga se $x = 1$

$L(x)$ é uma função lógica de uma variável

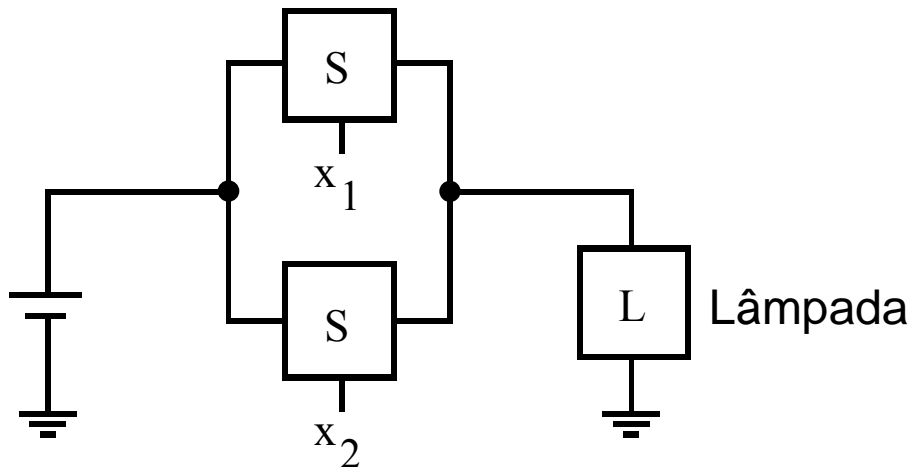
Duas funções lógicas básicas



(a) AND lógico (E lógico): conexão em série

$L(x) = x_1 \cdot x_2$
 $L=1$ se $x_1 = x_2 = 1$
 $L=0$ caso contrário

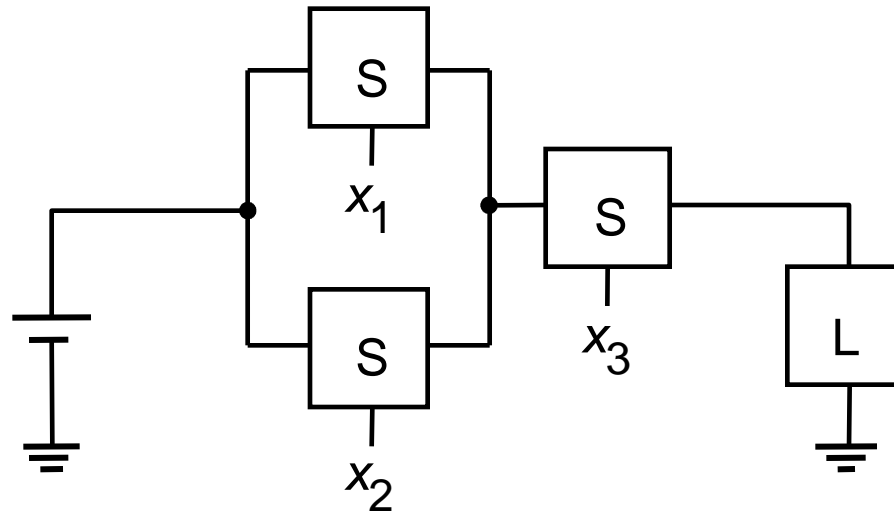
Símbolo para AND .
 Símbolo para OR +



(b) OR lógico (OU lógico): conexão em paralelo

$L(x) = x_1 + x_2$
 $L=0$ se $x_1 = x_2 = 0$
 $L=1$ caso contrário

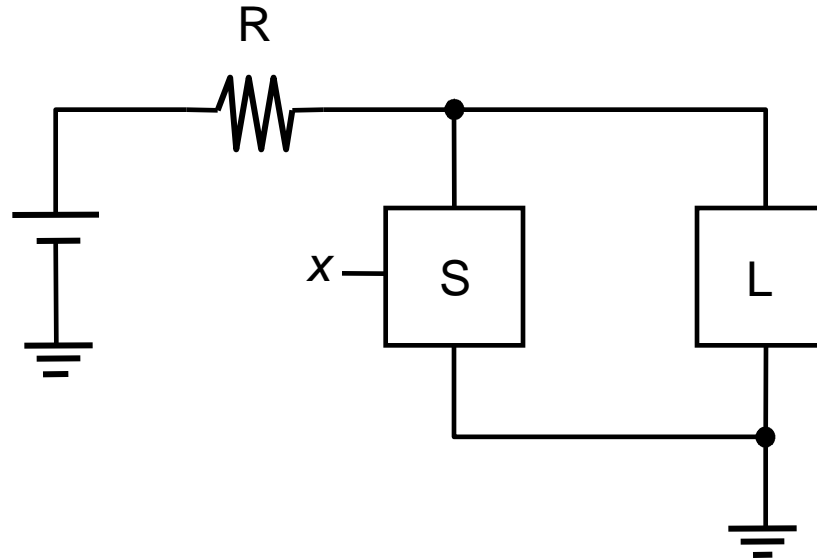
Conexão série-paralelo



$$L(x) = (x_1 + x_2) \cdot x_3$$

$L=1$ se $x_3 = 1$
E ou x_1 ou $x_2 = 1$

Inversão



$$L(x) = \bar{x}$$

Tabela verdade (1)

entradas		saída
x1	x2	$x1 \cdot x2$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

entradas		saída
x1	x2	$x1 + x2$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

AND e OR (2 entradas)

Tabela verdade (2)

entradas			saída
x1	x2	x3	$x1 \cdot x2 \cdot x3$
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

entradas			saída
x1	x2	x3	$x1 + x2 + x3$
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

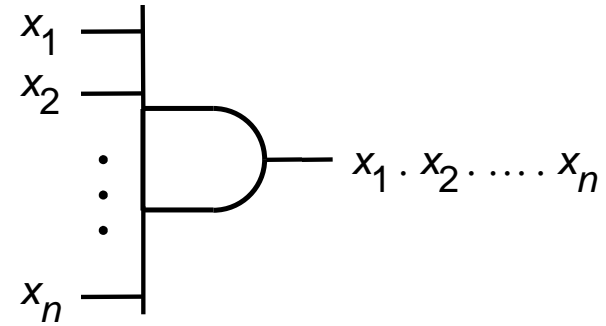
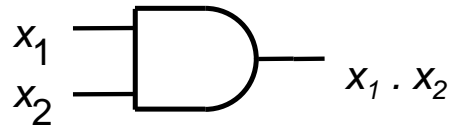
AND e OR (3 entradas)

Portas lógicas AND, OR, NOT símbolos

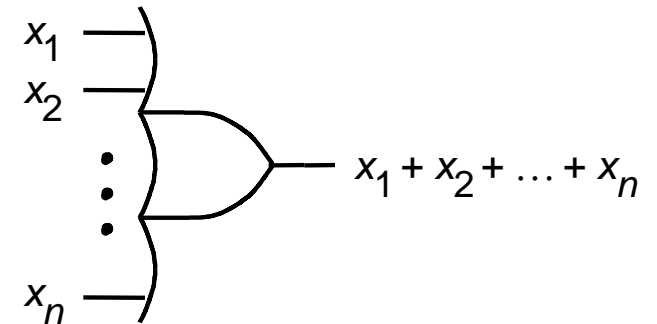
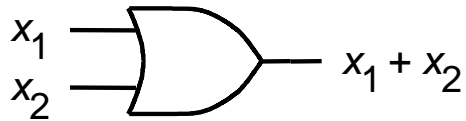


IC-UNICAMP

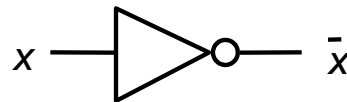
Portas AND



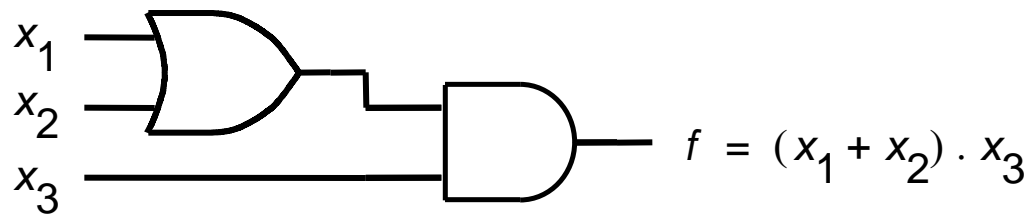
Portas OR



Inversor (not)



Uma função lógica com AND e OR



NAND e NOR: complemento de AND e OR



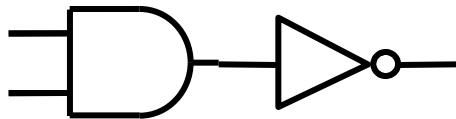
NAND (2 entradas)

entradas		saída
x1	x2	$x1 \cdot x2$
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

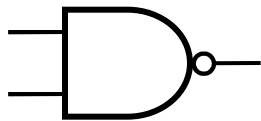
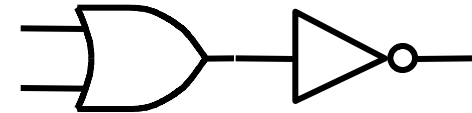
Tabela verdade

NOR (2 entradas)

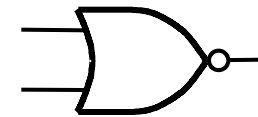
entradas		saída
x1	x2	$x1 + x2$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0



Circuito equivalente

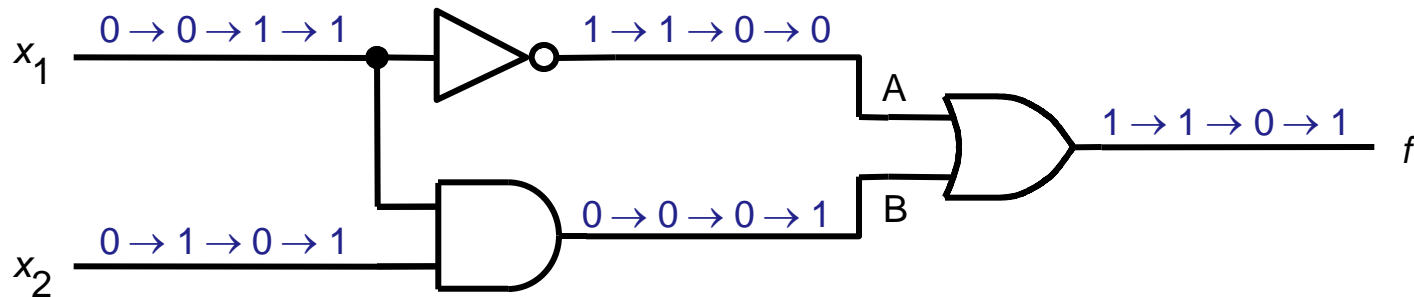


Símbolo



- Processo de análise
 - Dado um circuito digital →
 - Descobrir a função lógica que ele implementa
- Processo de síntese
 - Dado um comportamento lógico esperado →
 - Sintetizar um circuito que se comporte desta maneira

Uma rede lógica



(a) A rede implementa

$$f = \bar{x}_1 + x_1 \cdot x_2$$

x_1	x_2	$f(x_1, x_2)$	A	B
0	0	1		
0	1	1		
1	0	0		
1	1	1		

completar

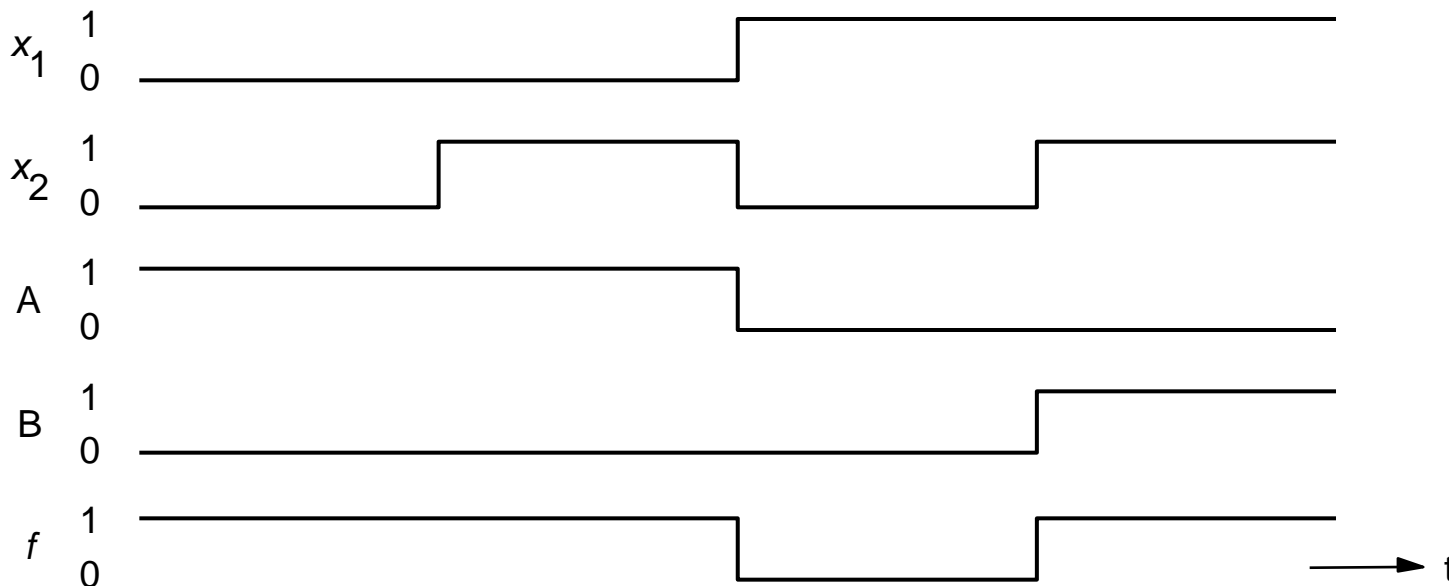
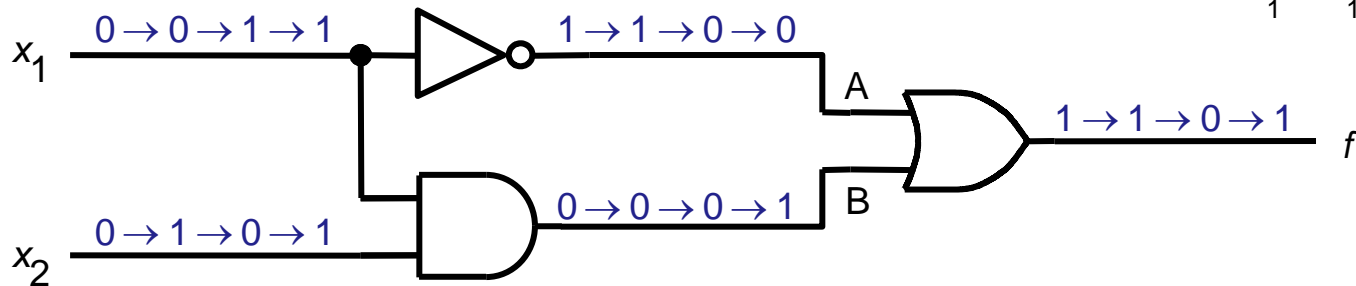
(b) Tabela verdade de f



Timing diagram

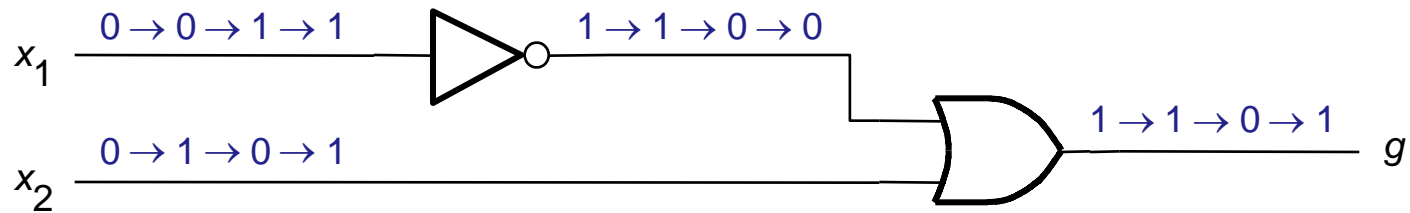
$$f = \bar{x}_1 + x_1 \cdot x_2$$

x_1	x_2	$f(x_1, x_2)$
0	0	1
0	1	1
1	0	0
1	1	1

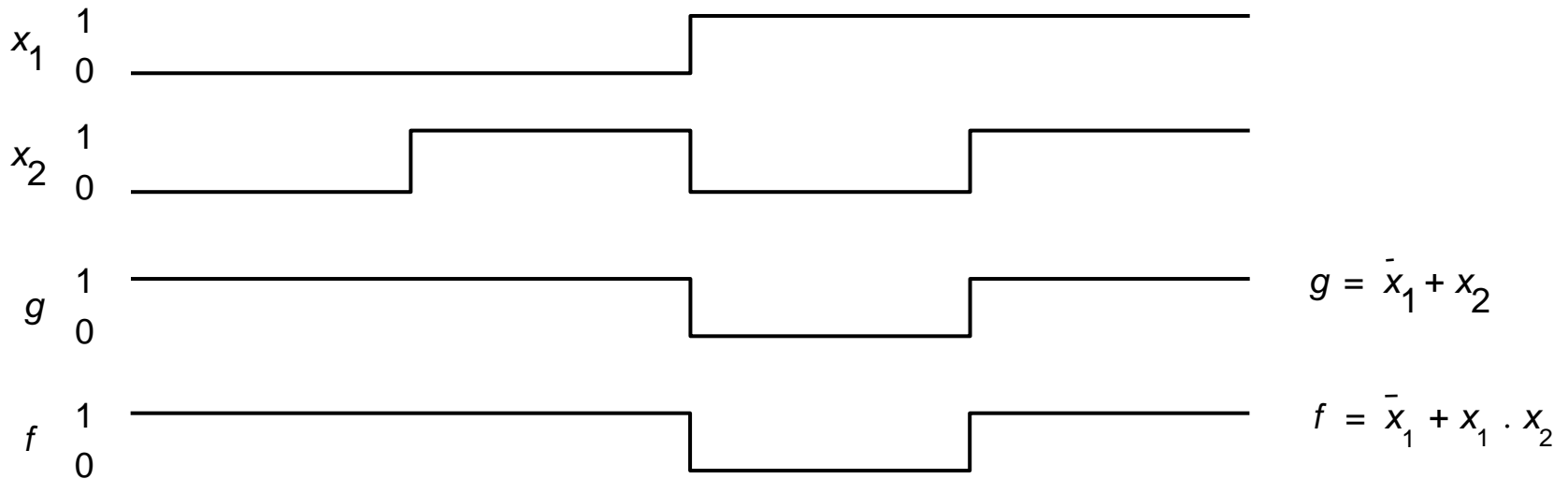


Timing diagram = diagrama de tempo = waveform = forma de onda

Circuitos equivalentes



Outra rede que implementa $g = \bar{x}_1 + x_2$



Então $g = \bar{x}_1 + x_2$ é equivalente a $f = \bar{x}_1 + x_1 \cdot x_2$

Implementação ótima

- Se $g = f \rightarrow \bar{x}_1 + x_2 = \bar{x}_1 + x_1 \cdot x_2$
- Mas g é melhor \rightarrow mais barato \rightarrow menos hardware
- Existem muitas implementações para a mesma função
- Como encontrar a melhor?
- Método formal no capítulo 4
- Manipulações algébricas podem também gerar solução minimizada \rightarrow em seguida

Álgebra Booleana

- George Boole (1849): descrição algébrica do processo de raciocínio lógico
 - Verdadeiro / Falso \rightarrow 1/0 \rightarrow ligado/desligado
- Shannon (1930): uso da álgebra booleana para descrever o comportamento de circuitos feitos com chaves (1^a impl. de circ digitais)
- Vamos ver
 - Propriedades
 - Axiomas
 - Teoremas

Álgebra Booleana: primitivas

- Valores:
 - 0 e 1
- Operadores:
 - AND
 - OR
 - NOT

Álgebra Booleana: axiomas

- Como em matemática, axiomas são hipóteses básicas (não demonstradas)

$$1a \quad 0 \cdot 0 = 0$$

$$1b \quad 1 + 1 = 1$$

$$2a \quad 1 \cdot 1 = 1$$

$$2b \quad 0 + 0 = 0$$

$$3a \quad 0 \cdot 1 = 1 \cdot 0 = 0$$

$$3b \quad 1 + 0 = 0 + 1 = 1$$

$$4a \quad \text{se } x = 0 \text{ então } \bar{x} = 1$$

$$4b \quad \text{se } x = 1 \text{ então } \bar{x} = 0$$

Álgebra Booleana: teoremas de 1 variável

- Podem ser demonstrados por indução perfeita, substituindo-se valores possíveis de x , ou seja 0 ou 1, e usando os axiomas

$$5a \quad x \cdot 0 = 0$$

$$5b \quad x + 1 = 1$$

$$6a \quad x \cdot 1 = x$$

$$6b \quad x + 0 = x$$

$$7a \quad x \cdot x = x$$

$$7b \quad x + x = x$$

$$8a \quad x \cdot \bar{x} = 0$$

$$8b \quad x + \bar{x} = 1$$

$$9 \quad \overline{(\bar{x})} = x$$

exemplo de prova T8b, para $x=0$

$$0 + \bar{0} \stackrel{A4a}{=} 0 + 1 \stackrel{A3b}{=} 1$$

repetir para $x = 1$

alunos \rightarrow demonstrar todos



Princípio da dualidade

- Observar axiomas/teoremas (a) e (b)
- Dualidade $0 \Leftrightarrow 1$ $+ \Leftrightarrow \cdot$
- Toda igualdade tem sua igualdade dual
- Há (no min.) 2 alternativas para implementar uma função \rightarrow adotar a mais barata

1a $0 \cdot 0 = 0$	1b $1 + 1 = 1$
2a $1 \cdot 1 = 1$	2b $0 + 0 = 0$
3a $0 \cdot 1 = 1 \cdot 0 = 0$	3b $1 + 0 = 0 + 1 = 1$
4a se $x = 0$ então $\bar{x} = 1$	4b se $x = 1$ então $\bar{x} = 0$
5a $x \cdot 0 = 0$	5b $x + 1 = 1$
6a $x \cdot 1 = x$	6b $x + 0 = x$
7a $x \cdot x = x$	7b $x + x = x$
8a $x \cdot \bar{x} = 0$	8b $x + \bar{x} = 1$



Propriedades

10a	$x \cdot y = y \cdot x$	10b	$x + y = y + x$	comutativa
11a	$x \cdot (y \cdot z) = (x \cdot y) \cdot z$	11b	$x + (y + z) = (x + y) + z$	associativa
12a	$x \cdot (y + z) = x \cdot y + x \cdot z$	12b	$x + y \cdot z = (x + y) \cdot (x + z)$	distributiva
13a	$x + x \cdot y = x$	13b	$x \cdot (x + y) = x$	absorção
14a	$x \cdot y + x \cdot \bar{y} = x$	14b	$(x + y) \cdot (x + \bar{y}) = x$	combinação
15a	$\overline{(x \cdot y)} = \bar{x} + \bar{y}$	15b	$\overline{(x + y)} = \bar{x} \cdot \bar{y}$	Teor. DeMorgan
16a	$x + \bar{x} \cdot y = x + y$	16b	$x \cdot (\bar{x} + y) = x \cdot y$	
17a	$x \cdot y + y \cdot z + \bar{x} \cdot z = x \cdot y + \bar{x} \cdot z$	17b	$(x + y) \cdot (y + z) \cdot (\bar{x} + z) =$ $(x + y) \cdot (\bar{x} + z)$	consenso

- Postulados básicos para derivar todos os teoremas e propriedades
 - operações + e \cdot definidas
 - teoremas 5 e 8
 - propriedades 10 e 12


Prova de igualdades

- Indução perfeita:
 - substituir todas possibilidades de variáveis → como tabela verdade LHS e RHS
- Manipulação algébrica
 - manipular LHS até que ele se iguale ao RHS; ou
 - manipular LHS e RHS até que cheguem à mesma expressão
- Diagrama de Venn


Prova do teorema de DeMorgan

- Por indução perfeita
- $\overline{(x \cdot y)} = \bar{x} + \bar{y}$

x	y	$x \cdot y$	$\overline{x \cdot y}$	\bar{x}	\bar{y}	$\bar{x} + \bar{y}$
0	0	0	1	1	1	1
0	1	0	1	1	0	1
1	0	0	1	0	1	1
1	1	1	0	0	0	0



LHS



RHS

Exemplos: provar igualdades por manipulação algébrica



IC-UNICAMP

- Exemplo 2.1:

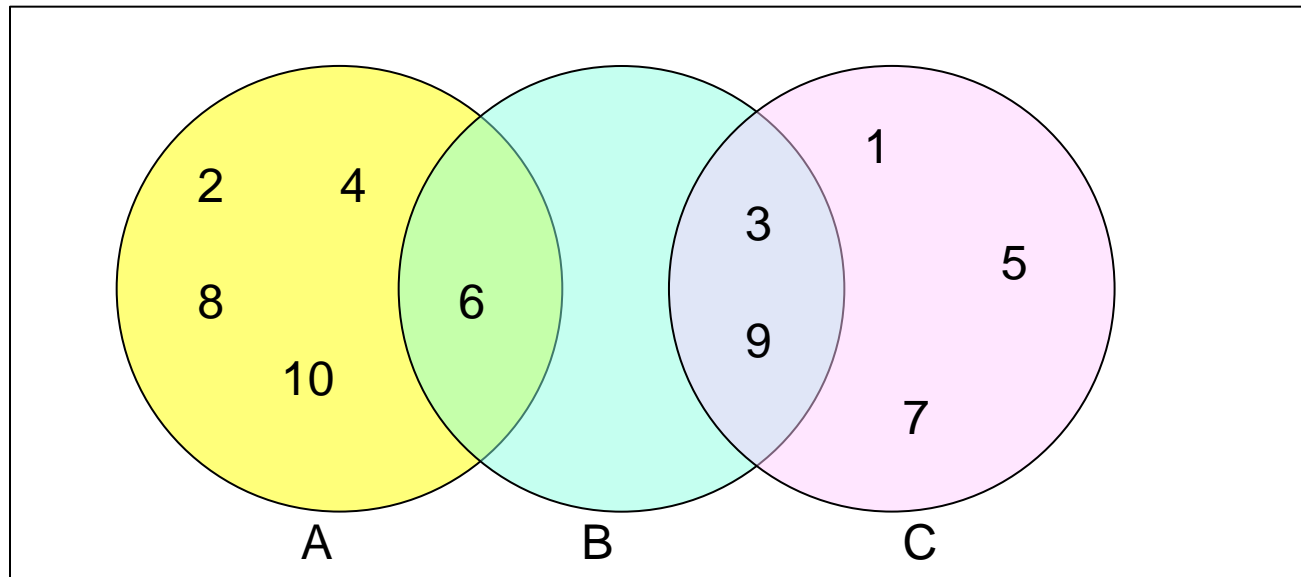
$$(x_1 + x_3) \cdot (\bar{x}_1 + \bar{x}_3) = x_1 \cdot \bar{x}_3 + \bar{x}_1 \cdot x_3$$

- Exemplo 2.2:

$$x_1 \cdot \bar{x}_3 + \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3 + x_1 \cdot x_3 + \bar{x}_2 \cdot x_3 = \bar{x}_1 \bar{x}_2 + x_1 x_2 + x_1 \bar{x}_2$$

Diagrama de Venn

- Originou-se da teoria dos conjuntos e de lógica
- Exemplo: inteiros de 1 a 10
 - A: pares B: múltiplo de 3 C: ímpares

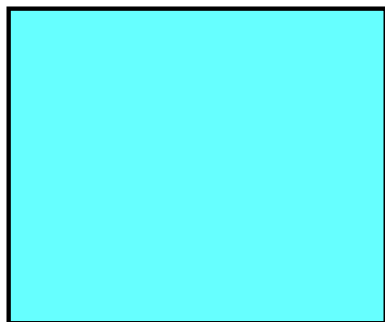


$$A \cdot B = A \cap B$$

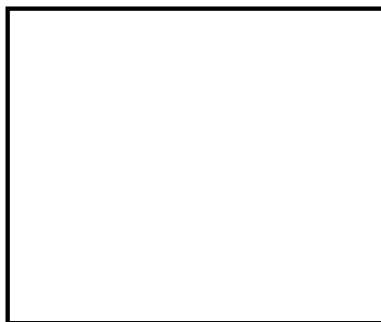
$$A + B = A \cup B$$



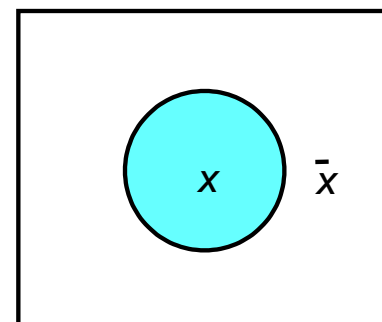
Diagrama de Venn e álgebra de Boole



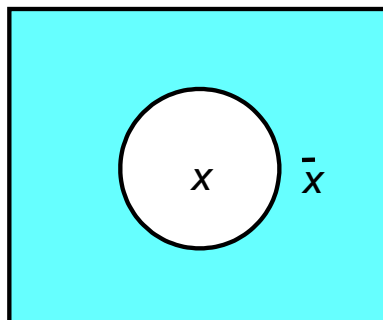
(a) Constante 1



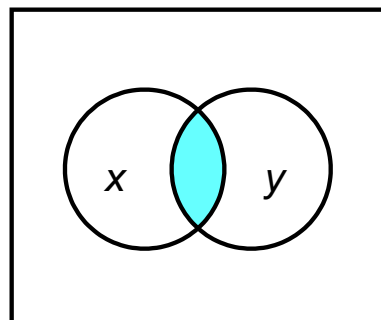
(b) Constante 0



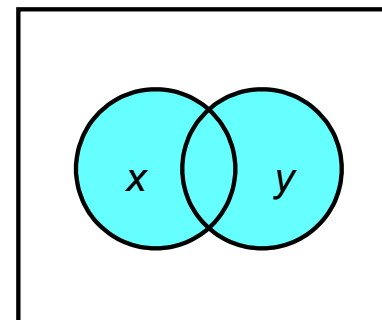
(c) Variável x



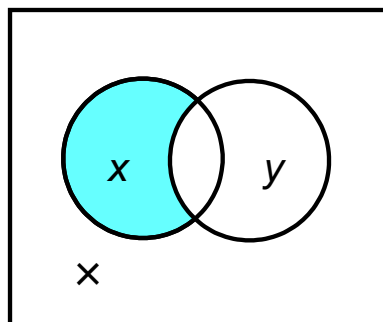
(d) \bar{x}



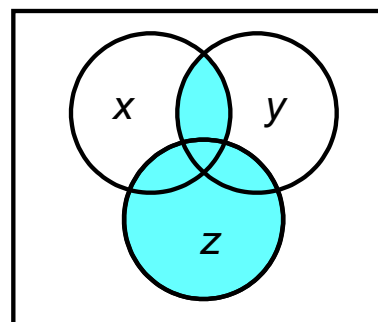
(e) $x \cdot y$



(f) $x + y$

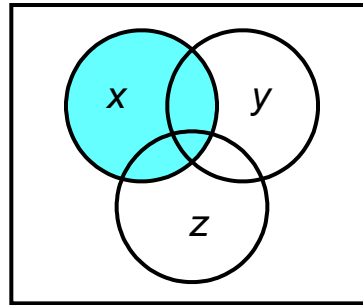


(g) $x \cdot \bar{y}$

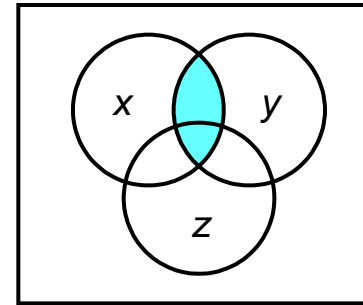


(h) $x \cdot y + z$

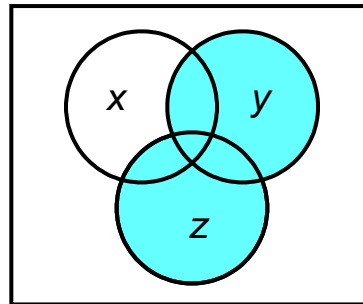
Propriedade distributiva (T12a)



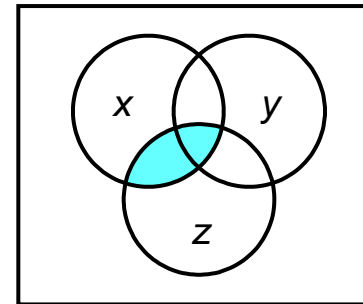
(a) x



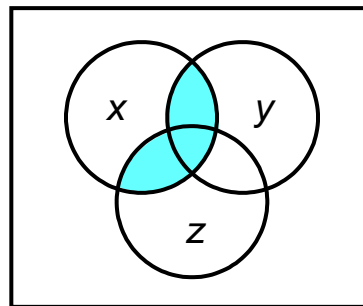
(d) $x \cdot y$



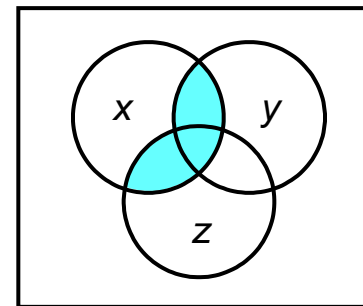
(b) $y + z$



(e) $x \cdot z$



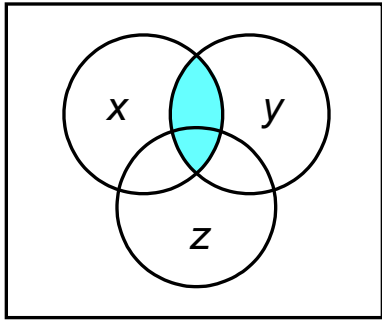
(c) $x \cdot (y + z)$



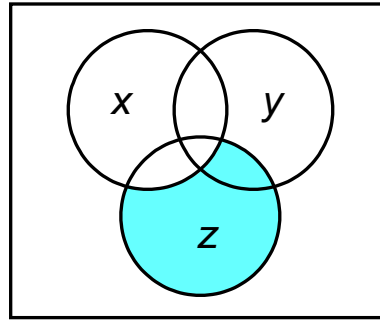
(f) $x \cdot y + x \cdot z$



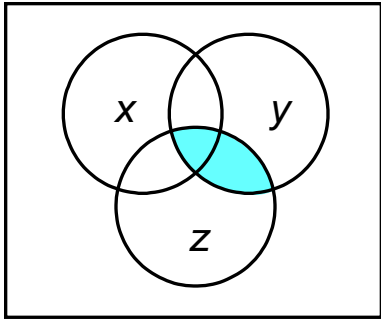
Verificação: $xy + \bar{x}z + yz = xy + \bar{x}z$



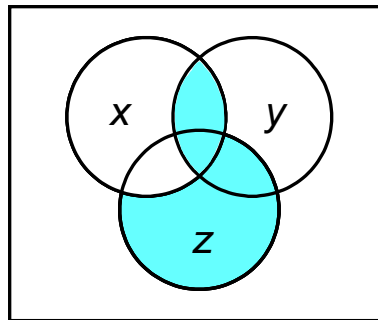
$x \cdot y$



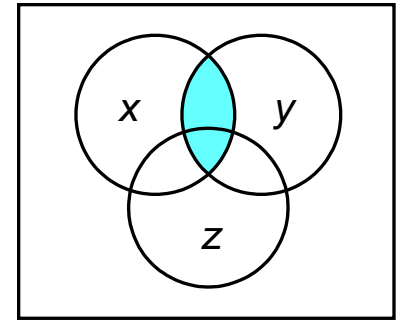
$\bar{x} \cdot z$



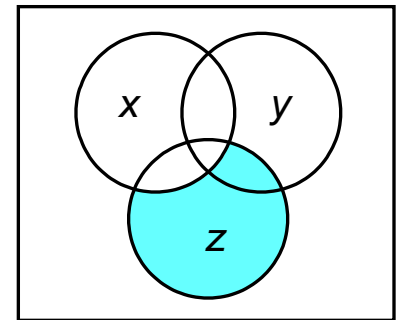
$y \cdot z$



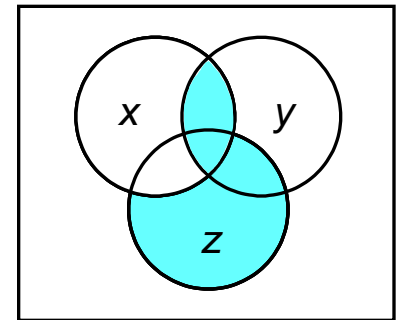
$x \cdot y + \bar{x} \cdot z + y \cdot z$



$x \cdot y$



$\bar{x} \cdot z$



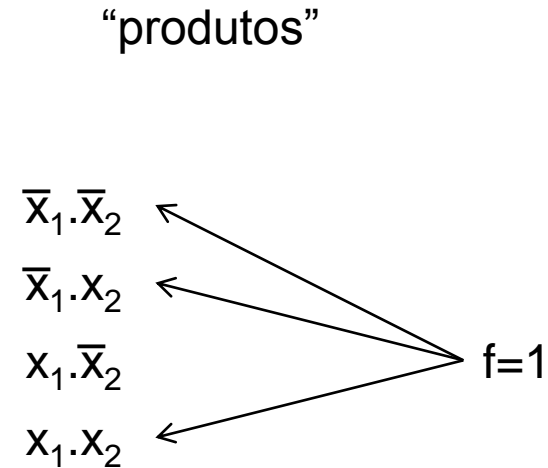
$x \cdot y + \bar{x} \cdot z$

Precedência das operações

- Com AND, OR e NOT é possível construir infinitas expressões
- Parênteses podem indicar precedência, mas a convenção seguinte é usada:
- NOT depois AND depois OR
- A expressão
$$x_1 \cdot x_2 + \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2$$
- é calculada na seguinte ordem
$$(x_1 \cdot x_2) + ((\bar{x}_1) \cdot (\bar{x}_2))$$

Síntese usando portas AND, OR, NOT

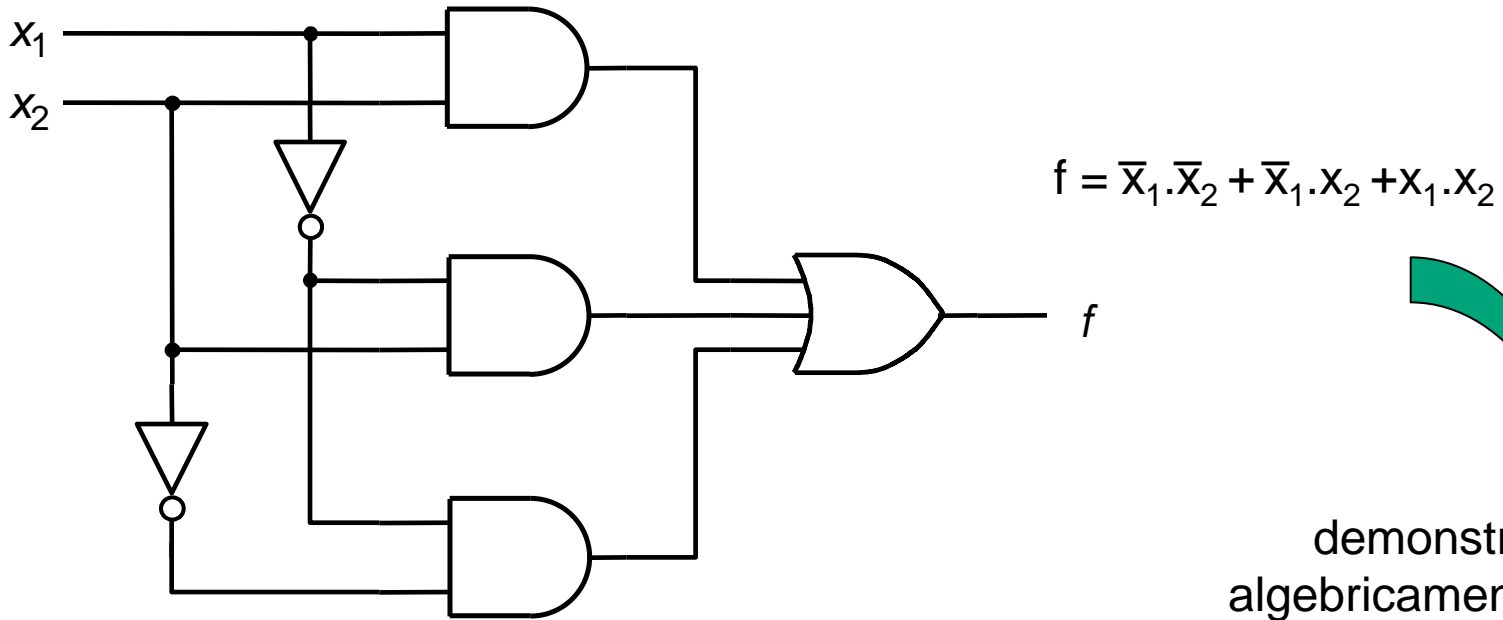
x_1	x_2	$f(x_1, x_2)$
0	0	1
0	1	1
1	0	0
1	1	1



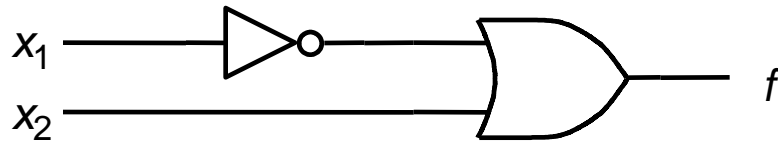
- soma de produtos “canônica” (um produto por linha da tabela verdade, com todos os literais)

$$f = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 + \bar{x}_1 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_2$$

Implementação canônica e mínima



implementação canônica de soma de produtos



implementação mínima

demonstrar
algebricamente

$f = \bar{x}_1 + x_2$

Mintermos e Soma de Produtos (SOP)

- Para uma função de n variáveis
- Mintermo: produto (ANDs) de n variáveis, complementadas ou não
 - existe um mintermo para cada linha da tabela verdade
- Forma canônica de SOP
 - f = soma (ORs) de todos os mintermos para os quais a função é igual a um

	x_1	x_2	$f(x_1, x_2)$
m_0	0	0	1
m_1	0	1	1
m_2	1	0	0
m_3	1	1	1

$$\begin{aligned}
 f(x_1, x_2) &= \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 + \bar{x}_1 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_2 \\
 &= \Sigma(m_0, m_1, m_3) \\
 &= \Sigma(0, 1, 3)
 \end{aligned}$$

Exemplo: função de 3 variáveis

Row number	x_1	x_2	x_3	Minterm
0	0	0	0	$m_0 = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3$
1	0	0	1	$m_1 = \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3$
2	0	1	0	$m_2 = \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3$
3	0	1	1	$m_3 = \bar{x}_1 x_2 x_3$
4	1	0	0	$m_4 = x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3$
5	1	0	1	$m_5 = x_1 \bar{x}_2 x_3$
6	1	1	0	$m_6 = x_1 x_2 \bar{x}_3$
7	1	1	1	$m_7 = x_1 x_2 x_3$

Outro exemplo com 3 variáveis

Row number	x_1	x_2	x_3	$f(x_1, x_2, x_3)$
0	0	0	0	0
1	0	0	1	1
2	0	1	0	0
3	0	1	1	0
4	1	0	0	1
5	1	0	1	1
6	1	1	0	1
7	1	1	1	0

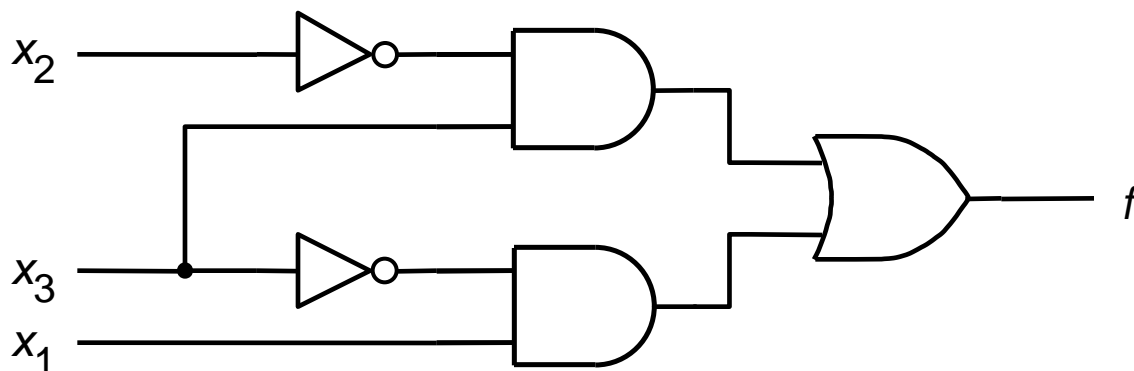
$$f(x_1, x_2, x_3) = \Sigma(m_1, m_4, m_5, m_6)$$

$$f(x_1, x_2, x_3) = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3 + x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3 + x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3 + x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3$$

$$f(x_1, x_2, x_3) = (\bar{x}_1 + x_1) \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3 + x_1 \cdot (\bar{x}_2 + x_2) \cdot \bar{x}_3$$

$$f(x_1, x_2, x_3) = 1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3 + x_1 \cdot 1 \cdot \bar{x}_3$$

$$f(x_1, x_2, x_3) = \bar{x}_2 \cdot x_3 + x_1 \cdot \bar{x}_3$$



custo da implementação =
n. de portas + n. entradas

$$\text{custo} = 5 + 8 = 13$$

Uma implementação SOP mínima

Produto de Soma, Maxtermos

- Pelo princípio da dualidade: se é possível implementar como soma de mintermos ($f=1$) deve haver outra implementação com mintermos ($f=0$)
- Consideremos as linhas da tabela onde $f=0$
 - $\bar{f} = \sum m_i$ (m das linhas onde $f=0$)
 - $f = \overline{\sum m_i}$
 - por de Morgan: $f = \prod \bar{m}_i$
 - Os complementos de m_i são os Maxtermos M_i
 - $f = \prod M_i$

Produto de Soma, Maxtermos: exemplo

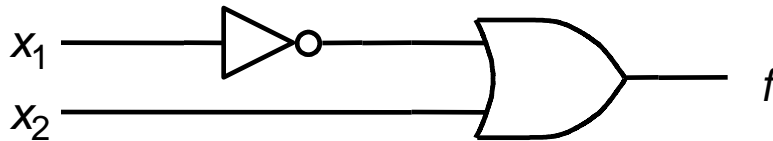
x_1	x_2	$f(x_1, x_2)$
0	0	1
0	1	1
1	0	0
1	1	1

$$\overline{f(x_1, x_2)} = \Sigma(m_2) = x_1 \cdot \bar{x}_2$$

Por de Morgan

$$f(x_1, x_2) = \overline{x_1 \cdot \bar{x}_2} = \bar{x}_1 + x_2$$

$$f(x_1, x_2) = \bar{m}_2 = M_2$$



implementação mínima

custo da implementação =
n. de portas + n. entradas

$$\text{custo} = 2 + 3 = 5$$

Refazer com POS e maxtermos

Row number	x_1	x_2	x_3	$f(x_1, x_2, x_3)$
0	0	0	0	0
1	0	0	1	1
2	0	1	0	0
3	0	1	1	0
4	1	0	0	1
5	1	0	1	1
6	1	1	0	1
7	1	1	1	0

$$\overline{f(x_1, x_2, x_3)} = \Sigma(m_0, m_2, m_3, m_7)$$

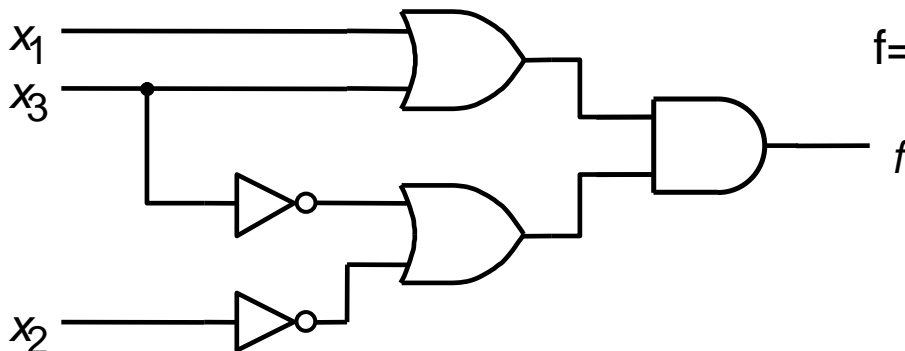
$$\overline{f} = \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} + \overline{x_1} \cdot x_2 \cdot \overline{x_3} + \overline{x_1} \cdot x_2 \cdot x_3 + x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$$

$$f = \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} + \overline{x_1} \cdot x_2 \cdot \overline{x_3} + \overline{x_1} \cdot x_2 \cdot x_3 + x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$$

$$f = m_0 + m_2 + m_3 + m_7$$

$$f = \overline{m_0} \cdot \overline{m_2} \cdot \overline{m_3} \cdot \overline{m_7}$$

$$f = M_0 \cdot M_2 \cdot M_3 \cdot M_7$$



$$f = (x_1 + x_2 + x_3) \cdot (x_1 + \overline{x_2} + x_3) \cdot (x_1 + \overline{x_2} + \overline{x_3}) \cdot (\overline{x_1} + \overline{x_2} + \overline{x_3})$$

provar que $f = (x_1 + x_3) \cdot (\overline{x_2} + \overline{x_3})$

$$\text{custo} = 5 + 8 = 13$$

Uma implementação POS mínima



Exemplo: mintermos e maxtermos

Row number	x_1	x_2	x_3	Minterm	Maxterm
0	0	0	0	$m_0 = \bar{x}_1\bar{x}_2\bar{x}_3$	$M_0 = x_1 + x_2 + x_3$
1	0	0	1	$m_1 = \bar{x}_1\bar{x}_2x_3$	$M_1 = x_1 + x_2 + \bar{x}_3$
2	0	1	0	$m_2 = \bar{x}_1x_2\bar{x}_3$	$M_2 = x_1 + \bar{x}_2 + x_3$
3	0	1	1	$m_3 = \bar{x}_1x_2x_3$	$M_3 = x_1 + \bar{x}_2 + \bar{x}_3$
4	1	0	0	$m_4 = x_1\bar{x}_2\bar{x}_3$	$M_4 = \bar{x}_1 + x_2 + x_3$
5	1	0	1	$m_5 = x_1\bar{x}_2x_3$	$M_5 = \bar{x}_1 + x_2 + \bar{x}_3$
6	1	1	0	$m_6 = x_1x_2\bar{x}_3$	$M_6 = \bar{x}_1 + \bar{x}_2 + x_3$
7	1	1	1	$m_7 = x_1x_2x_3$	$M_7 = \bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \bar{x}_3$

Exemplos

- Ex 2.3: gerar SOP e simplificar

$$f(x_1, x_2, x_3) = \Sigma m(2, 3, 4, 6, 7)$$

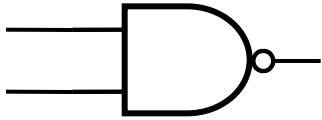
- Ex 2.4: gerar POS e simplificar

$$f(x_1, x_2, x_3) = \Pi M(0, 1, 5)$$

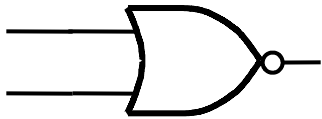
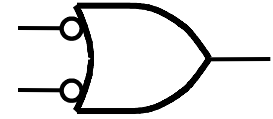
- Ex 2.5: gerar SOP e simplificar

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = \Sigma m(3, 7, 9, 12, 13, 14, 15)$$

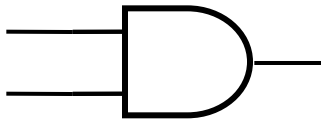
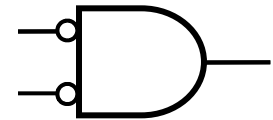
Funções e símbolos equivalentes



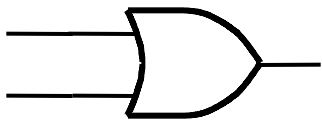
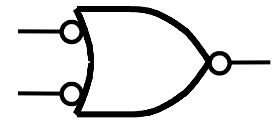
$$f = \overline{a \cdot b} = \overline{a} + \overline{b}$$



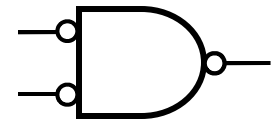
$$f = \overline{\overline{a} + \overline{b}} = \overline{a} \cdot \overline{b}$$



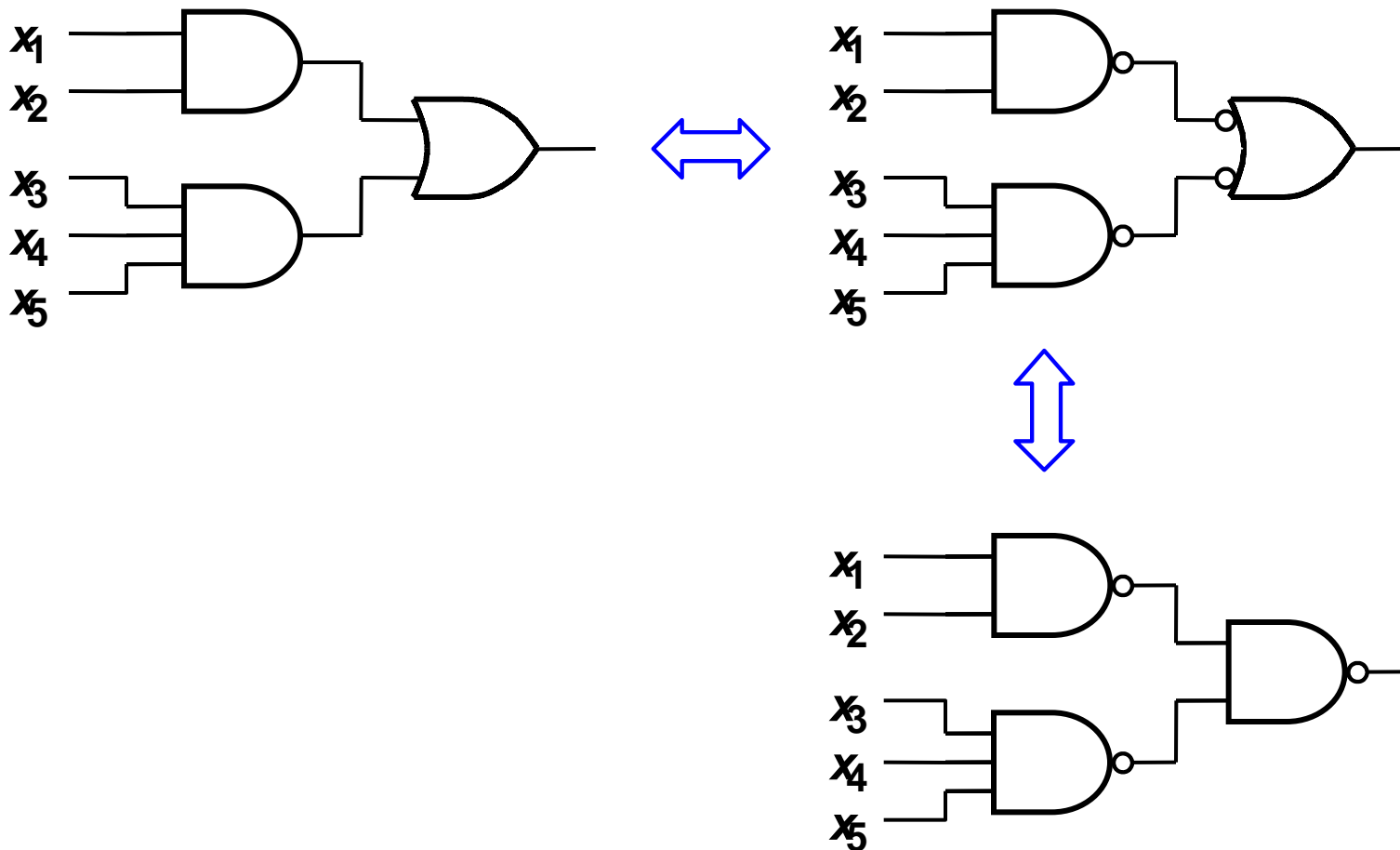
$$f = \overline{\overline{a \cdot b}} = \overline{\overline{a} + \overline{b}}$$



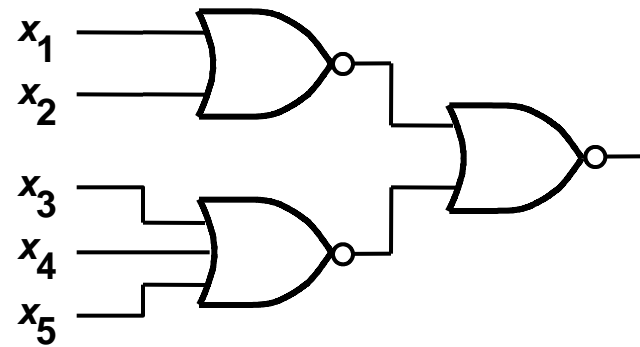
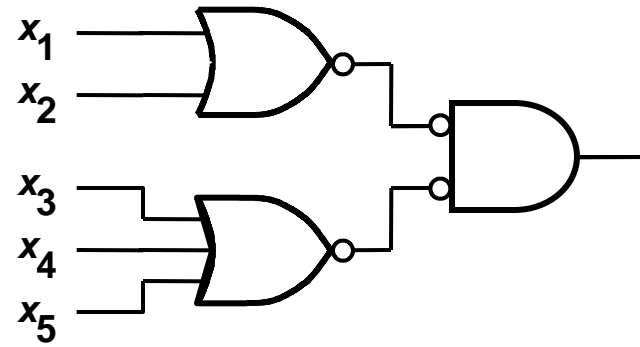
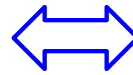
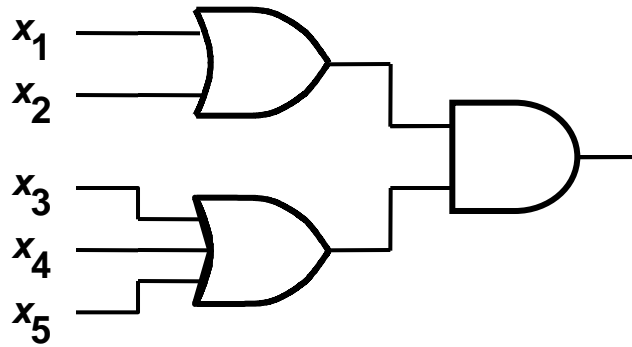
$$f = \overline{\overline{\overline{a} + \overline{b}}} = \overline{\overline{a} \cdot \overline{b}}$$



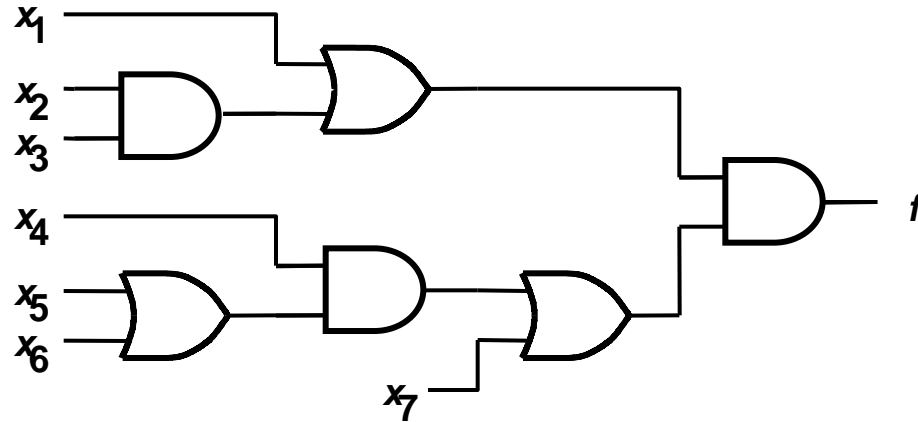
Exemplo de Síntese Só com NANDs



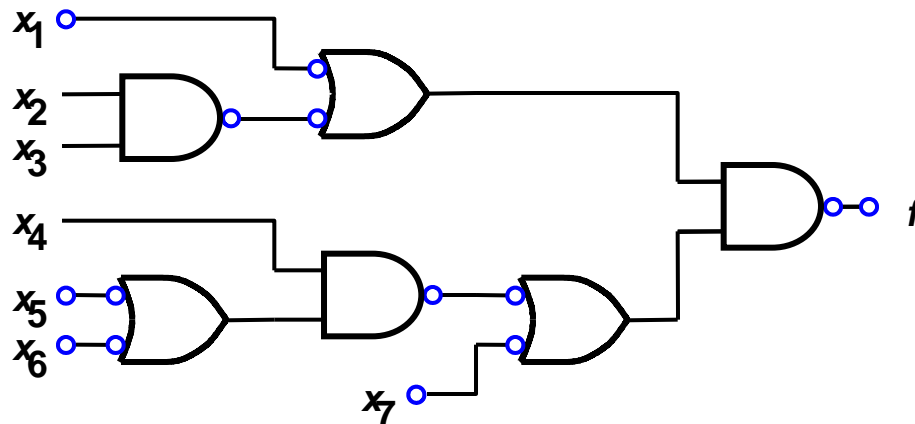
Exemplo de Síntese Só com NORs



Exemplo

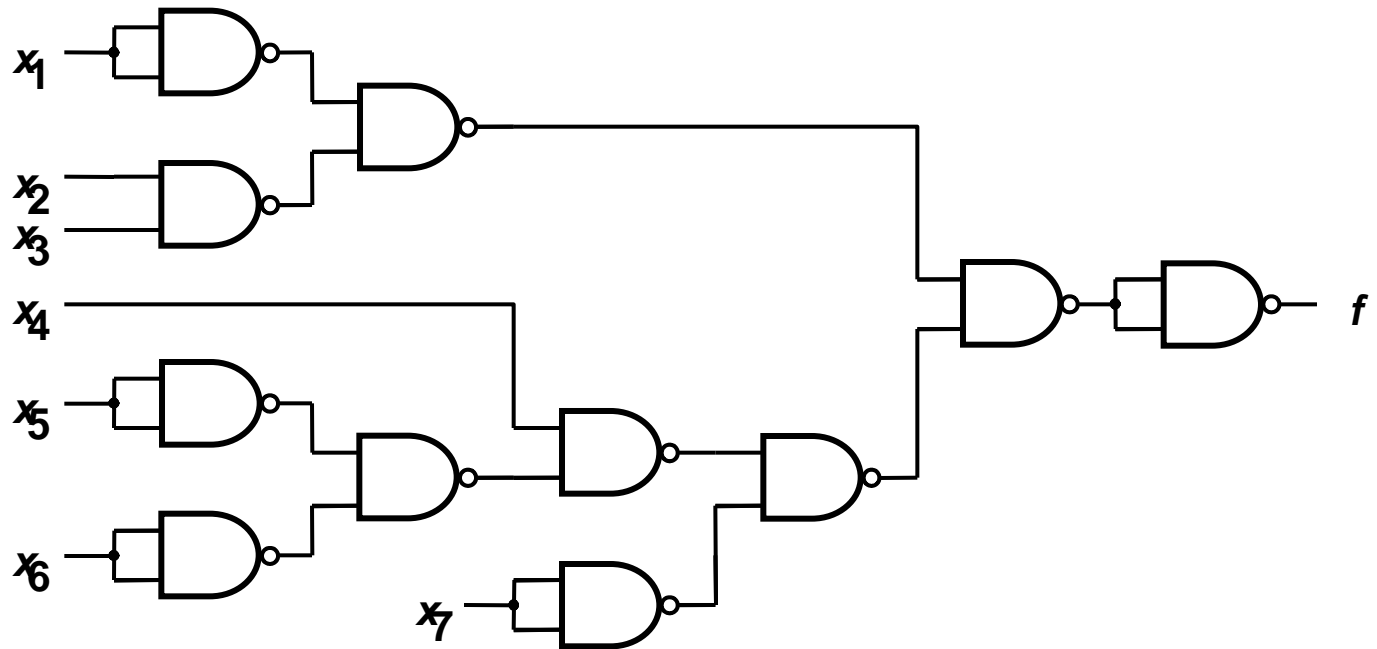


Circuit with AND and OR gates

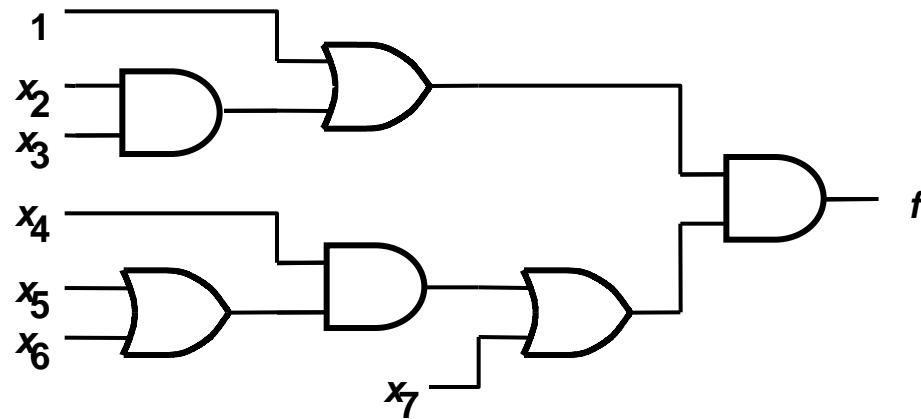


Convertendo para NANDs

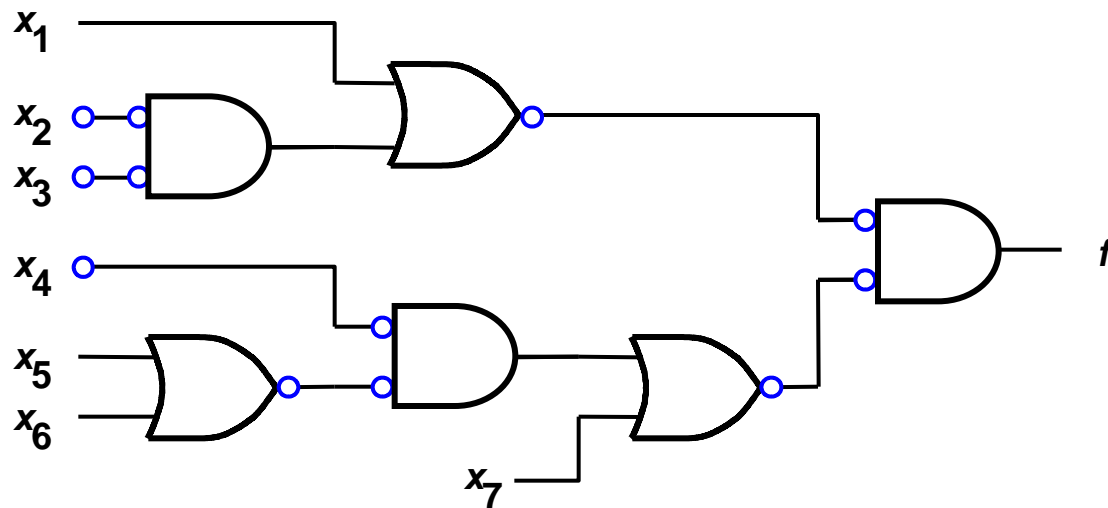
Exemplo (cont.)



Exemplo (cont.)

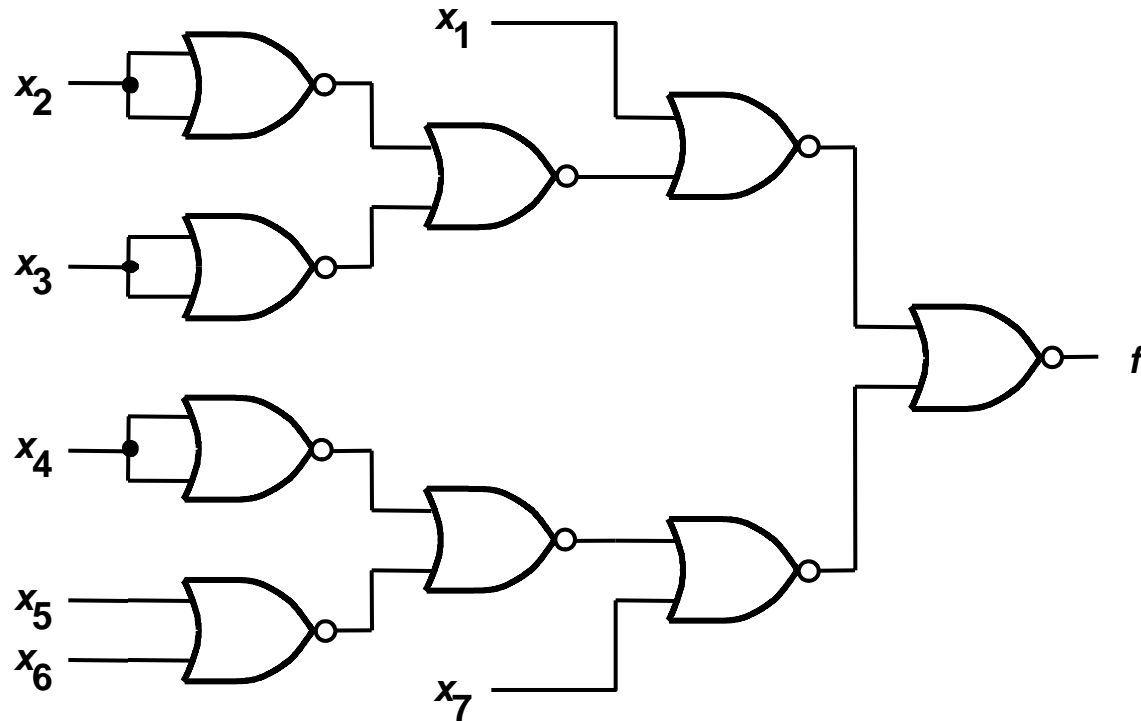


Circuit with AND and OR gates



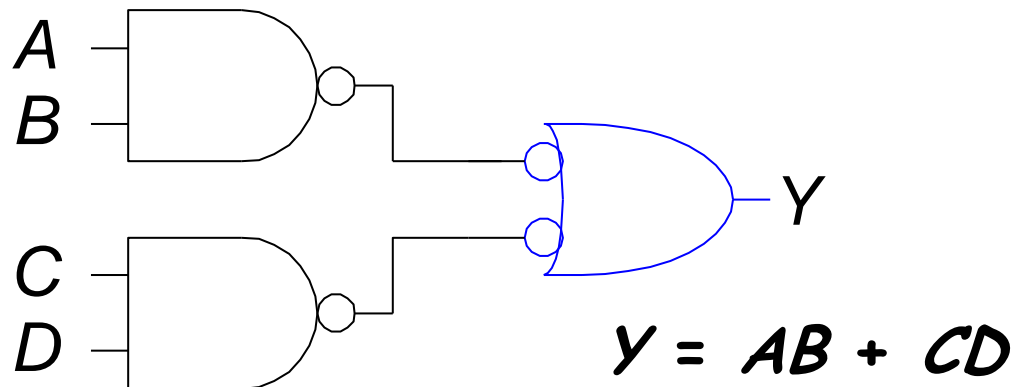
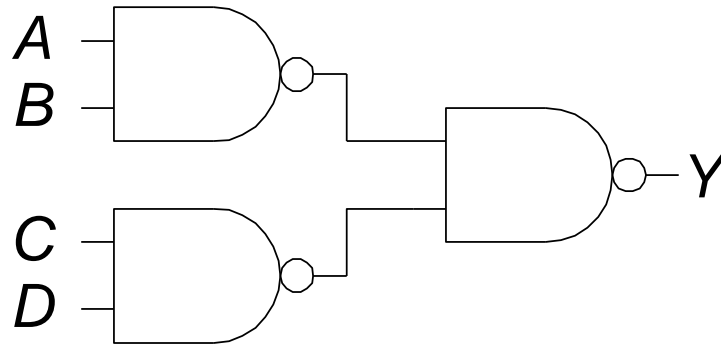
Convertendo para NORs

Exemplo (cont.)



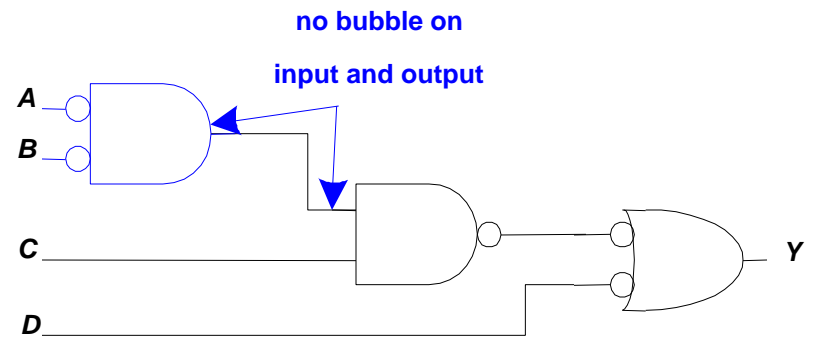
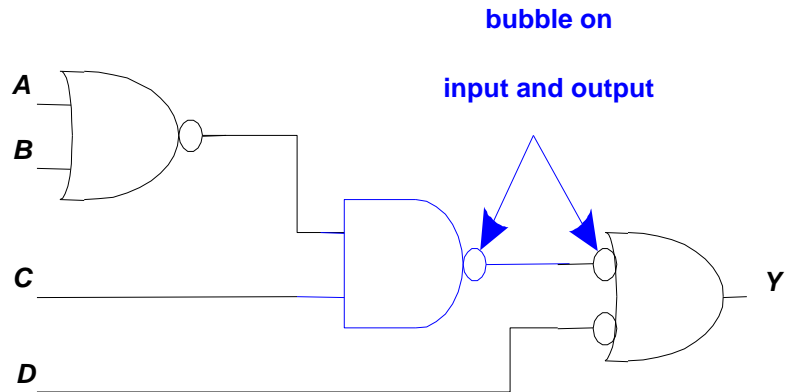
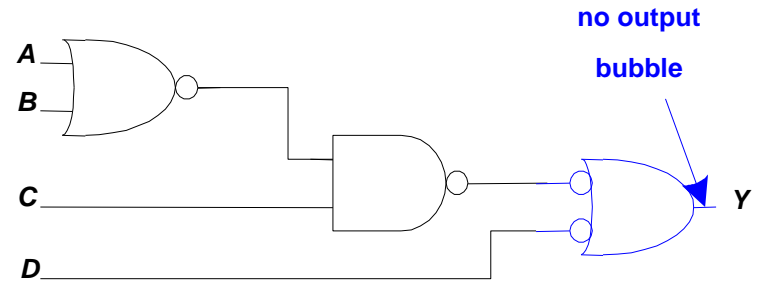
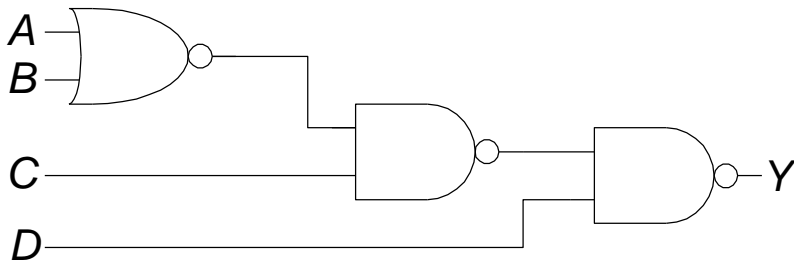
Exercício:

- Qual é a expressão booleana para o circuito abaixo?





Técnica Bubble Pushing



$$Y = \bar{A} \bar{B} C + \bar{D}$$



Exemplos

- Ex 2.6: implementar somente com NORs (ver exemplo 2.4)

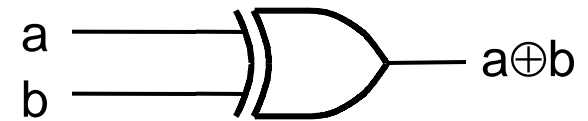
$$f(x_1, x_2, x_3) = \sum m(2, 3, 4, 6, 7) = (x_1 + x_2) \cdot (x_2 + \overline{x_3})$$

- Ex 2.7: implementar somente com NANDs (ver exemplo 2.3)

$$f(x_1, x_2, x_3) = \sum m(2, 3, 4, 6, 7) = x_2 + (x_1 \cdot \overline{x_3})$$

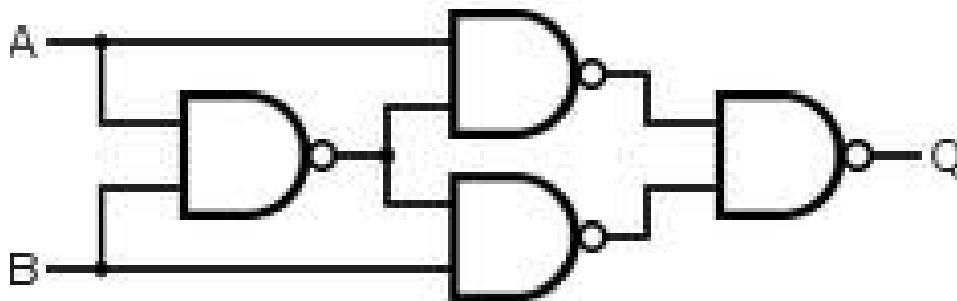
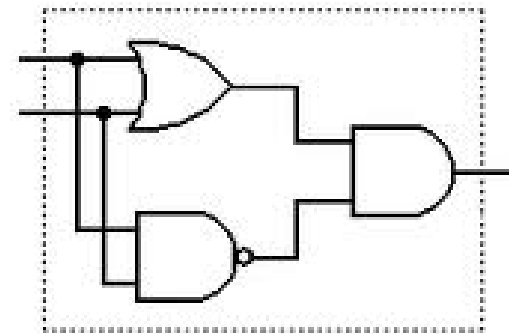
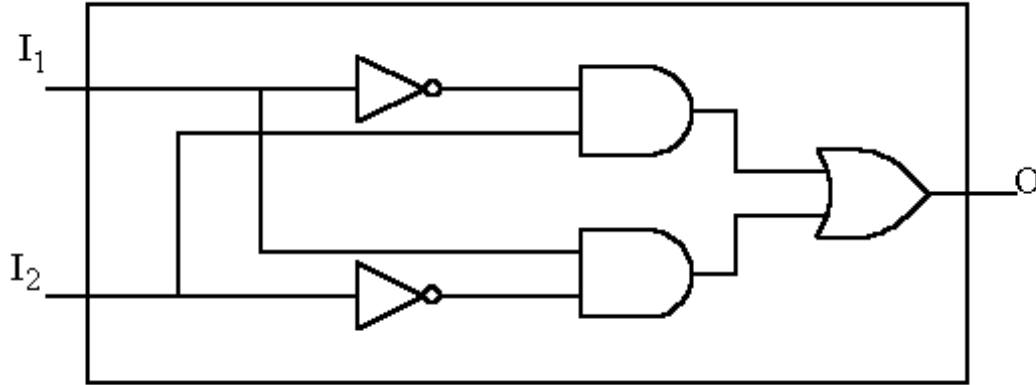
Função lógica: XOR – ou exclusivo

a	b	XOR (a, b)	XNOR (a, b)
0	0	0	1
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1



- XOR = 0 se entradas iguais e =1 caso contrário
- XNOR = complemento de XOR = det. de igualdade
- Demonstrar que
 - $XOR(a,b) = a \oplus b = \bar{a} \cdot b + a \cdot \bar{b}$
 - $a \oplus b = b \oplus a$ e $a \oplus (b \oplus c) = (a \oplus b) \oplus c = a \oplus b \oplus c$
 - $\bar{a} \oplus b = \overline{a \oplus b}$
 - $XOR(a_1, a_2, \dots, a_n) = 1$ n^o ímpar de 1's em (a_1, a_2, \dots, a_n)

Algumas implementações de XOR



Exemplos: 3-way light controller



- Três interruptores de luminária: qualquer um que seja acionado causa mudança de estado da lâmpada (on \leftrightarrow off)

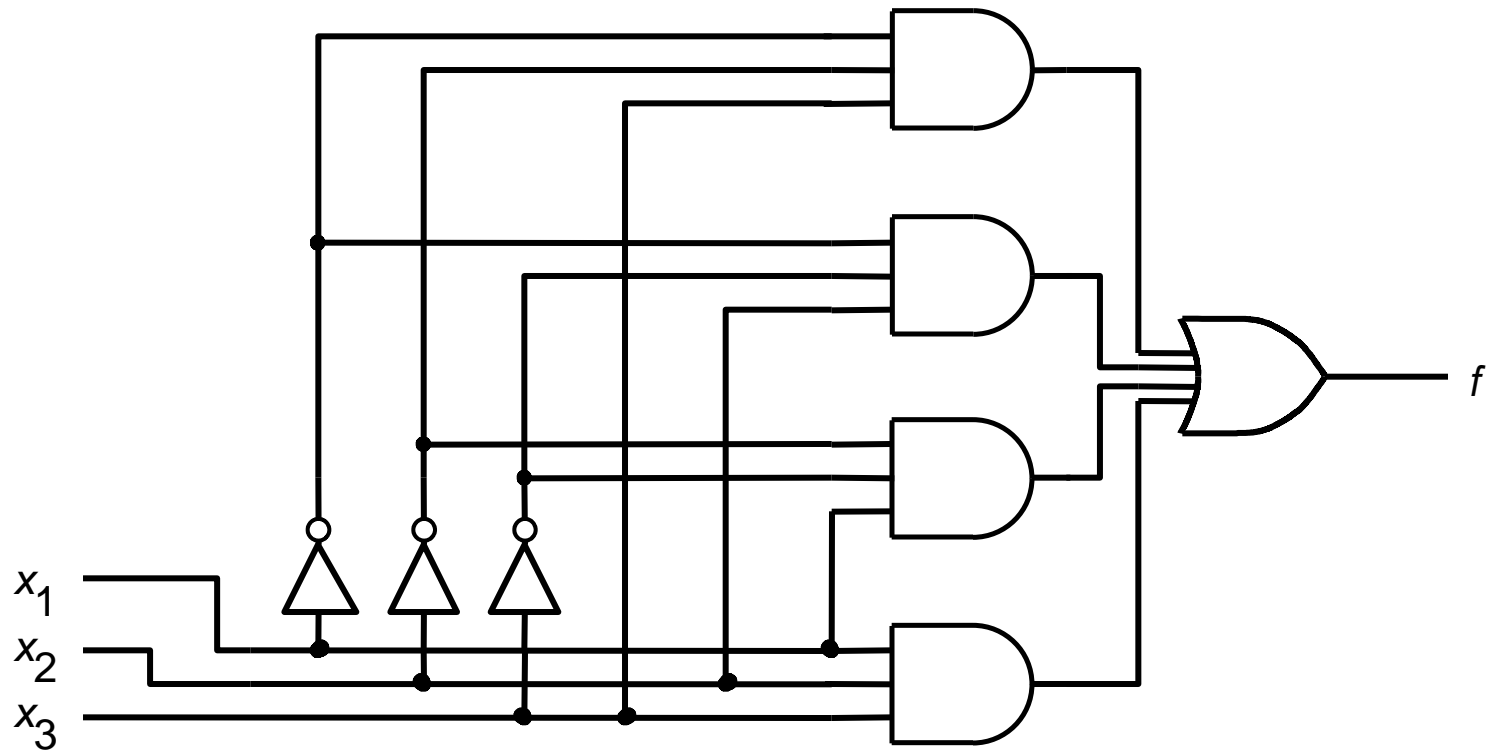
- $f(x_1, x_2, x_3) = \Sigma m(1, 2, 4, 7)$

- $f(x_1, x_2, x_3) = \Pi M(0, 3, 5, 6)$

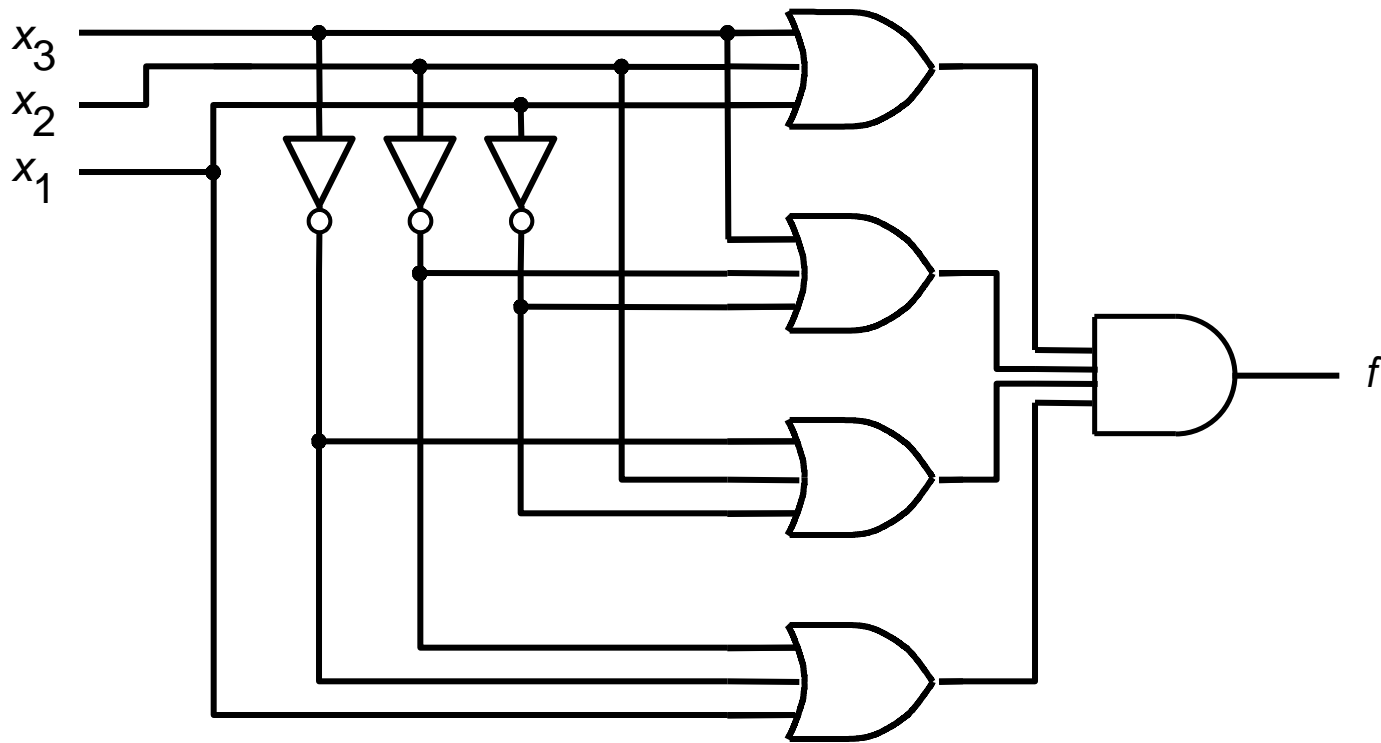
- circuitos minimizados no próximo slide

x_1	x_2	x_3	f
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

3-way light controller: SOP



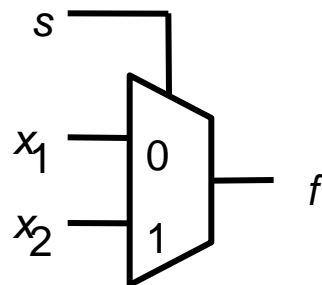
3-way light controller: POS



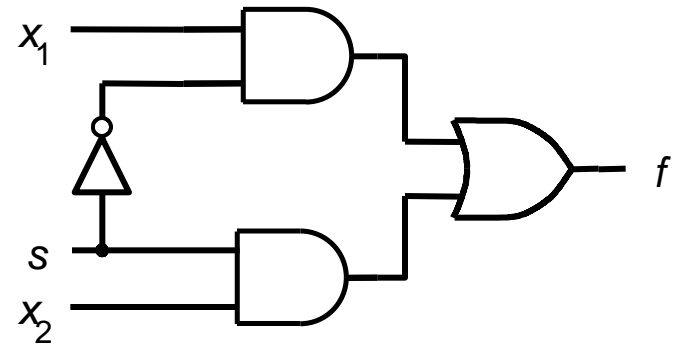
Exemplos: multiplexador

$s x_1 x_2$	$f(s, x_1, x_2)$
0 0 0	0
0 0 1	0
0 1 0	1
0 1 1	1
1 0 0	0
1 0 1	1
1 1 0	0
1 1 1	1

(a) Truth table



(c) Graphical symbol



(b) Circuit

s	$f(s, x_1, x_2)$
0	x_1
1	x_2

(d) More compact truth-table representation