

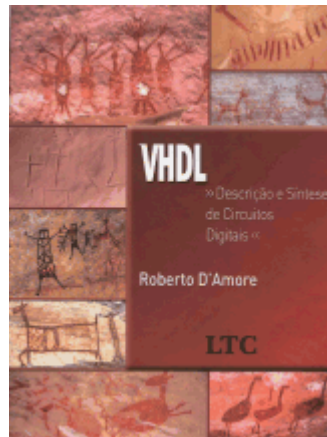
Demonstração de imagens de auxílio didático

VHDL - Descrição e Síntese de Circuitos Digitais

Roberto d'Amore

ISBN 85-216-1452-7

Editora LTC www.ltceditora.com.br



Para imagens de um curso completo consulte: www.ele.ita.br/~damore/vhdl

Tópicos

- Aspectos gerais da linguagem
- Síntese de circuitos
- Entidade de projeto
- Classes de objetos: constante, variável e sinal
- Tipos
- Operadores
- Construção concorrente **WHEN ELSE**
- Construção concorrente **WITH SELECT**
- Processos e lista de sensibilidade
- Construção seqüencial **IF ELSE**
- Construção seqüencial **CASE WHEN**
- Circuitos síncronos

Aspectos gerais da linguagem

- Suporta diversos níveis de hierarquia
 - uma descrição pode ser: conjunto de descrições interligadas
- Estilo de uma descrição
 - diversos níveis de abstração são suportados
 - pode conter descrições com diferentes níveis de abstração
- Ferramentas de síntese:
 - suportam diferentes estilos de descrição
 - normalmente: modos preferenciais devem ser empregados
- Linguagem concorrente
 - ordem dos comandos: não importa
 - comandos seqüenciais: somente em regiões específicas

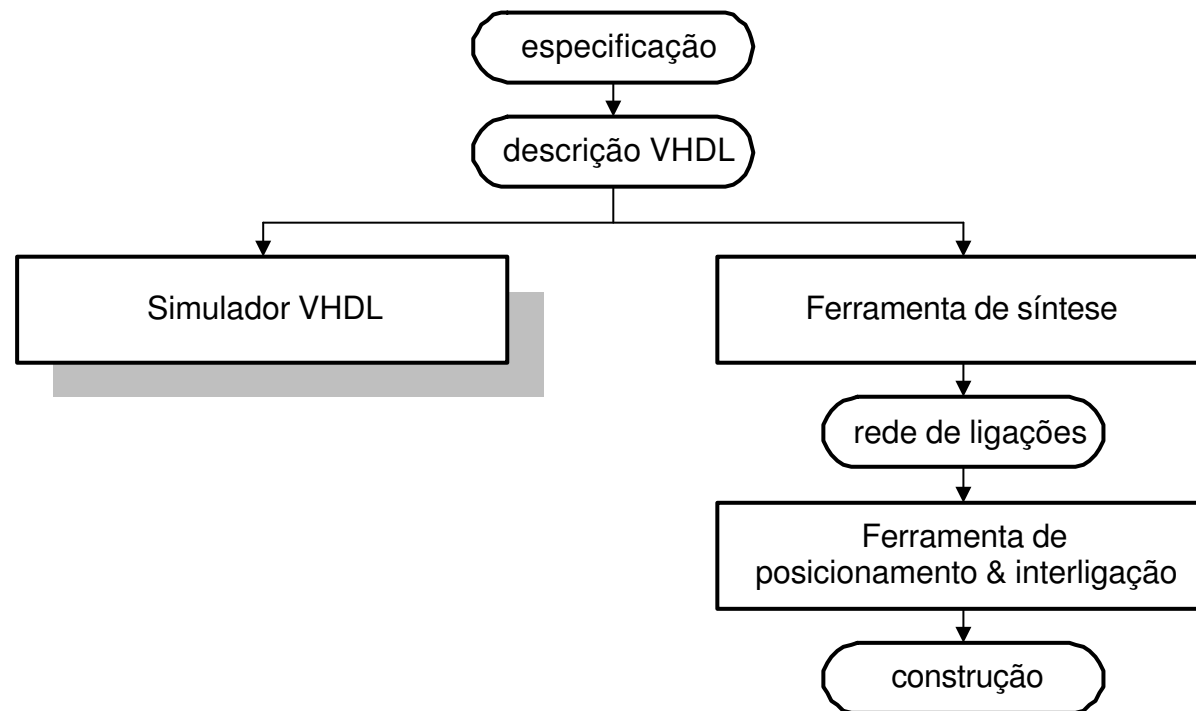
Síntese de circuitos

- VHDL: não foi concebida para síntese de circuitos
 - consequência: nem todas construções são suportadas
- Motivos da limitação:
 - falta de correspondência da construção / descrição com um circuito
exemplo: *flip flop* com dois terminais de relógio
 - impossibilidade da síntese direta
exemplo: multiplicação de dois números reais

Etapas gerais de um processo de síntese

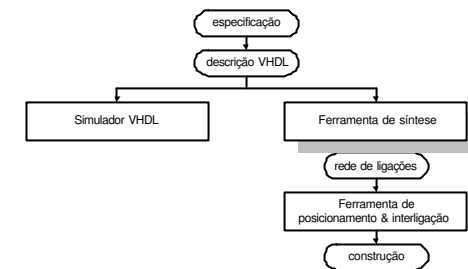
Simulador VHDL:

- compilação / simulação do código



Ferramenta de síntese

- Síntese da descrição - (ilustração das operações)
 - descrição do circuito
 - circuito nível RTL sintetizado
 - circuito nível portas (final)

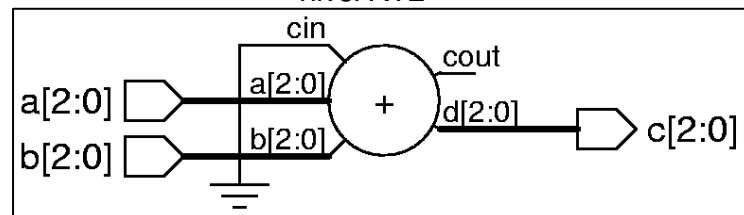


descrição VHDL

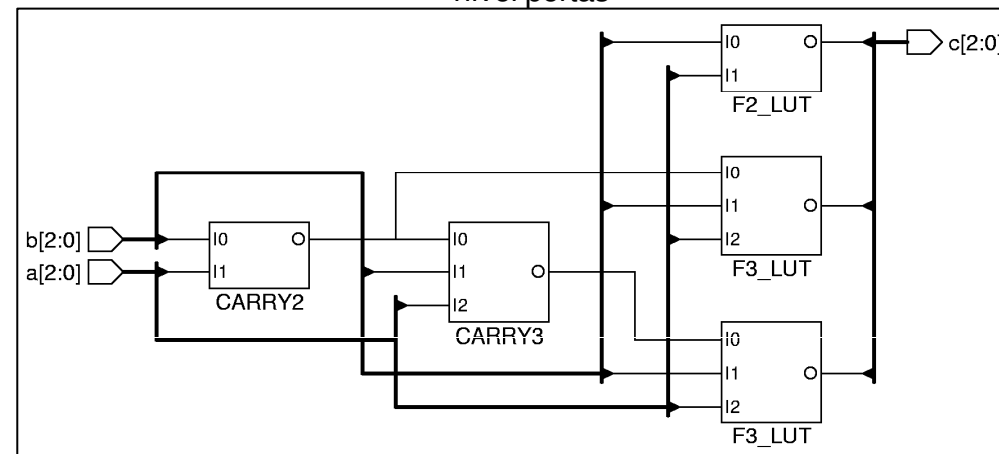
```
ENTITY soma IS
  PORT (a, b : IN  INTEGER RANGE 7 DOWNT0 0;
        c      : OUT INTEGER RANGE 7 DOWNT0 0);
END soma;

ARCHITECTURE teste OF soma IS
BEGIN
  c <= a+b;
END teste;
```

nível RTL



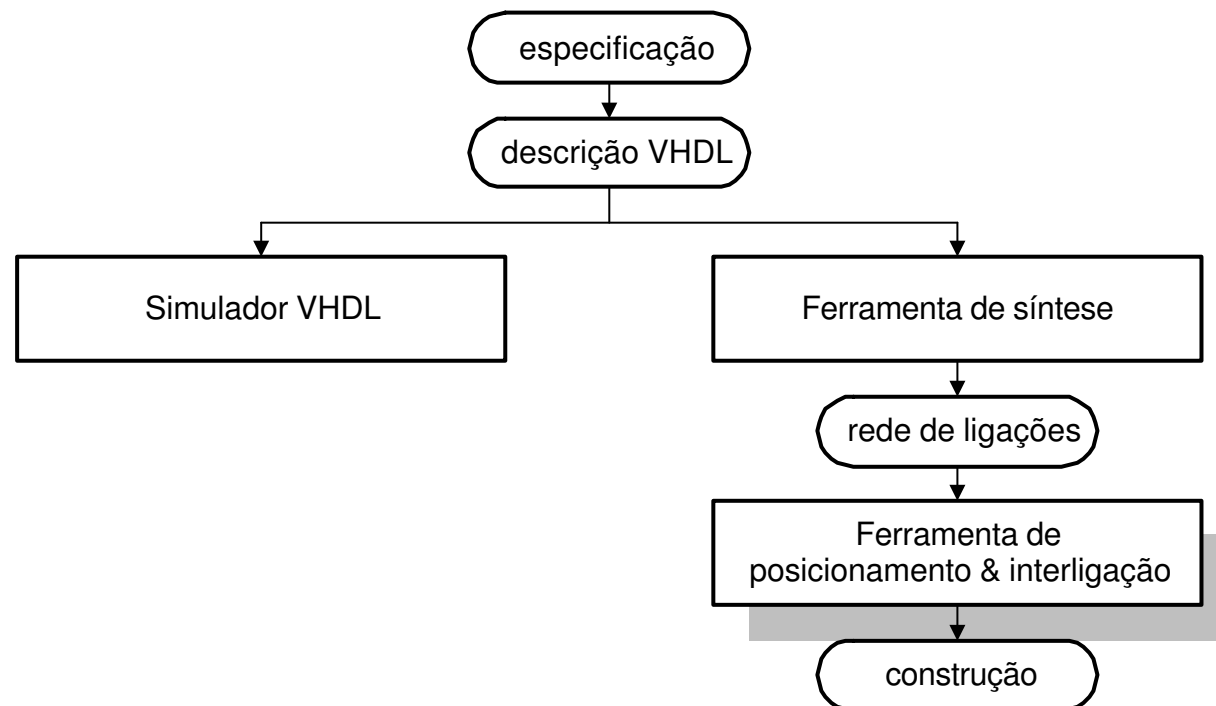
nível portas



otimização velocidade / área

Ferramenta de posicionamento e interligação

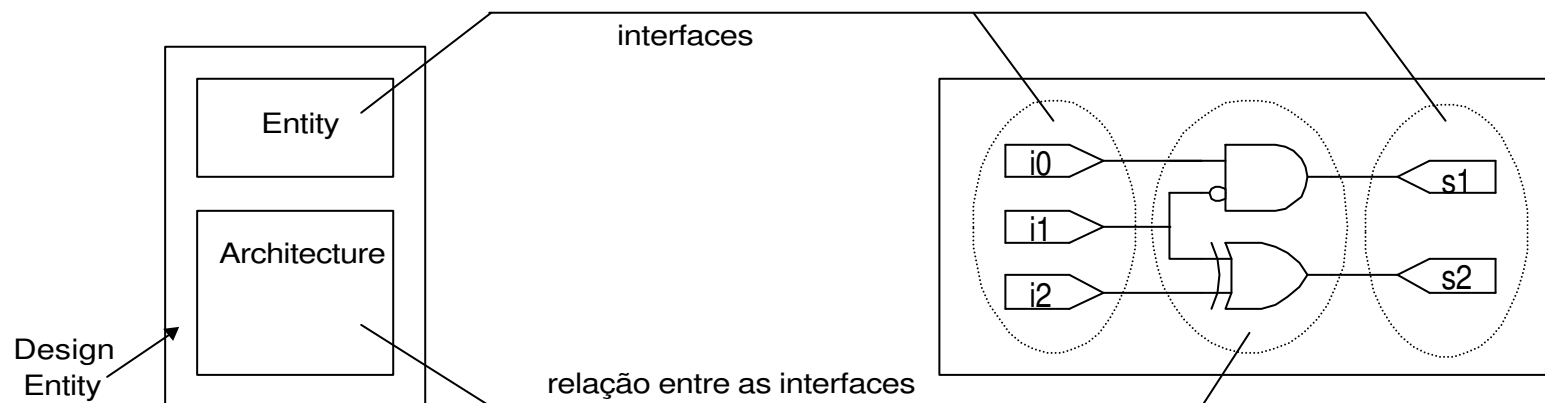
- Posiciona e interliga as primitivas / componentes
 - dispositivo empregado na implementação:
 - FPGA - dispositivo lógico programável
 - ASIC - circuitos integrados de aplicação específica



Primeiro contato com a linguagem

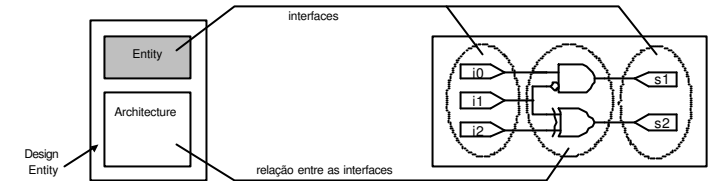
Entidade de projeto

- Pode representar:
 - uma simples porta lógica a um sistema completo
- Composta de duas partes:
 - Declaração da entidade
 - define portas de entrada e saída da descrição
(equivalente ao símbolo de um bloco em captura esquemática)
 - Arquitetura
 - descreve as relações entre as portas
(equivalente ao esquema contido no bloco em cap. esquemática)



Declaração da entidade

- **ENTITY**: inicia a declaração
- **PORT**: define modo e tipo das portas
 - modo **IN** : entrada
 - modo **OUT** : saída
 - modo **BUFFER** : saída - pode ser referenciada internamente
 - modo **INOUT** : bidirecional
- **END**: termina a declaração



```
ENTITY entidade_abc IS

    PORT (x0, x1      : IN      tipo_a;    -- entradas
          y0, y1      : OUT      tipo_b;    -- saidas
          y2          : BUFFER  tipo_c;    -- saida
          z0, z1      : INOUT   tipo_d);    -- entrada / saida

END entidade_abc;
```

- Exemplo: declaração de uma entidade & esquema da arquitetura

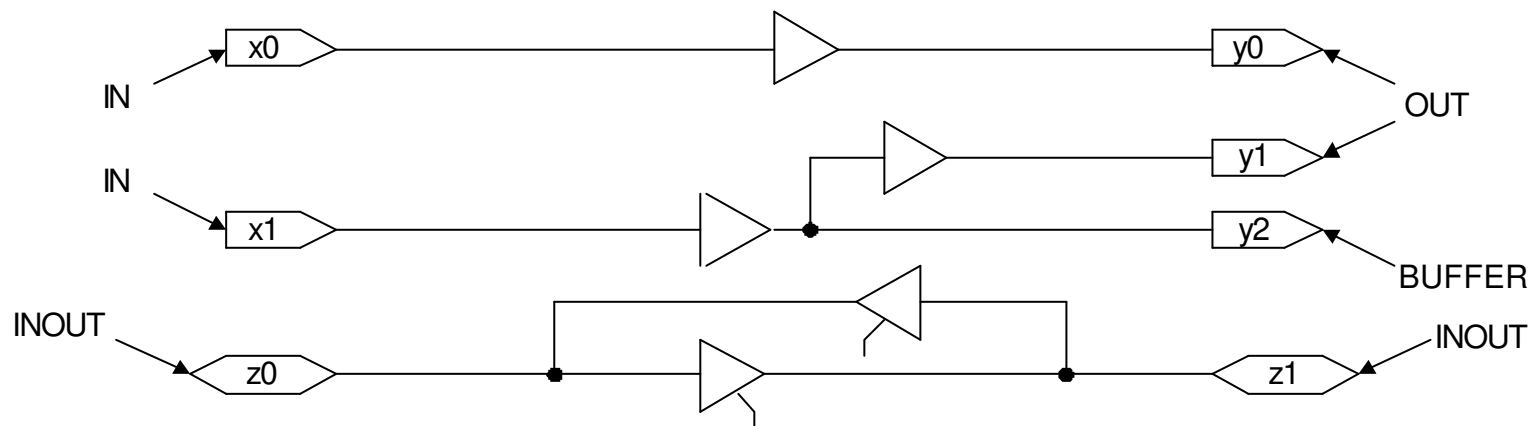
```
ENTITY entidade_abc IS
```

```

    PORT (x0, x1      : IN      tipo_a;    -- entradas
          y0, y1      : OUT      tipo_b;    -- saidas
          y2          : BUFFER   tipo_c;    -- saida
          z0, z1      : INOUT    tipo_d);   -- entrada / saida

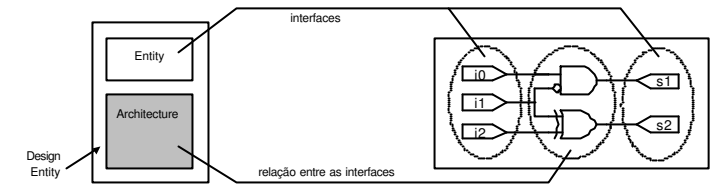
```

```
END entidade_abc;
```



Declaração da arquitetura

- **ARCHITECTURE**: inicia a declaração
- linhas que seguem podem conter:
 - declaração de sinais e constantes
 - declaração de componentes referenciados
 - descrição de subprogramas locais
 - definição de novos tipos
- **BEGIN**: inicia a descrição
- **END**: termina a descrição



```
ARCHITECTURE estilo_abc OF entidade_abc IS
    -- declaracoes de sinais e constantes
    -- declaracoes de componentes referenciados
    -- descricao de sub-programas locais
    -- definicao de novos tipos de dados locais
    --
BEGIN
    --
    -- declaracoes concorrentes
    --
END estilo_abc;
```

Exemplos de classe de objetos: constante sinal

- Objetos: são elementos que contêm um valor armazenado
- Exemplo:
 - **CONSTANT**: valor estático
 - **SIGNAL**: valor imposto pode ser alterado
regiões de código seqüencial e concorrente
- Exemplos de transferência de valores: constante e sinal

```
sinal_2    <= sinal_1;      -- transferencia entre sinais  
sinal_4    <= constante_1;  -- transferencia de constante para sinal
```

- Exemplo de uma descrição completa
 - definidas três portas: uma entrada, duas de saída
 - tipo das portas: **INTEGER**
 - operações: transferência de valores
 - declarados: s1 sinal interno, e c1 constante
 - concorrência no código: (próxima imagem)

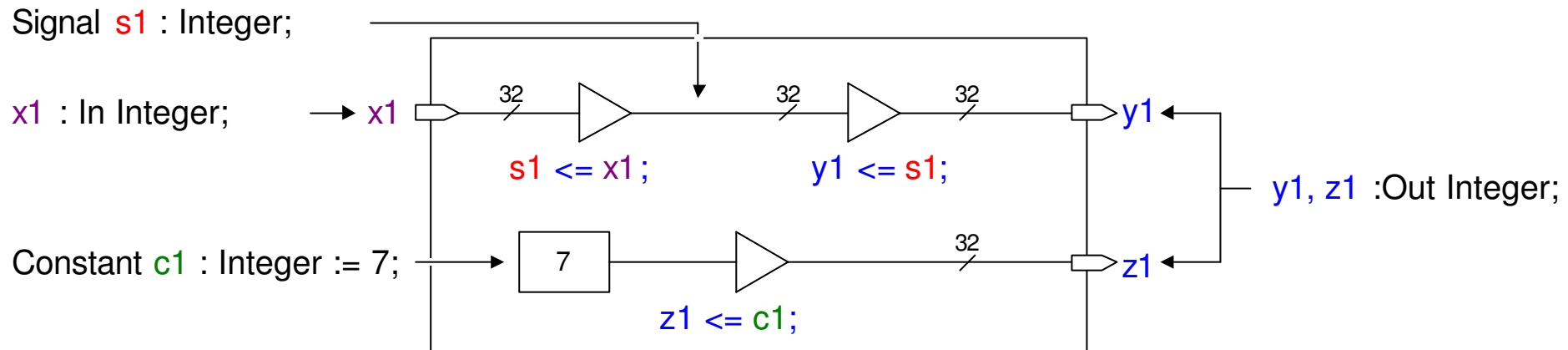
```
1 ENTITY atrib_1 IS
2   PORT (x1      : IN  INTEGER;          -- porta entrada
3         y1,z1   : OUT INTEGER);        -- portas saída
4 END;
5
6 ARCHITECTURE teste OF atrib_1 IS
7   SIGNAL  s1 : INTEGER;                -- declaracao de um sinal tipo inteiro
8   CONSTANT c1 : INTEGER := 7;         -- declaracao de uma constante tipo inteiro
9 BEGIN
10  y1 <= s1;                             -- regioao de codigo concorrente
11  s1 <= x1;
12
13  z1 <= c1;
14 END teste;
```

- Exemplo de uma descrição completa

- observar concorrência no código:

linha 10: $y1 \leq s1$ -- valor de $s1$ transferido para saída $y1$

linha 11: $s1 \leq x1$ -- $s1$ recebe o valor da entrada $x1$



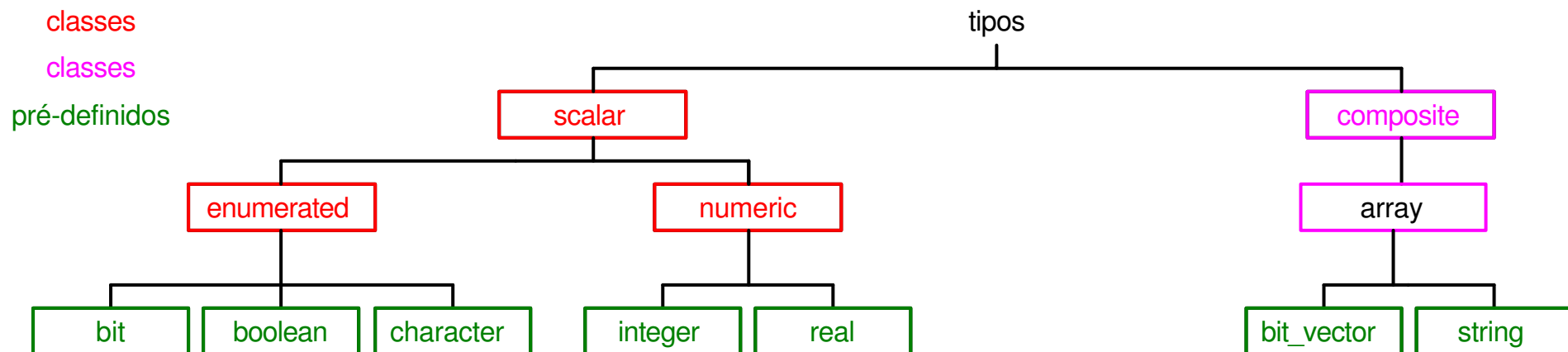
```

5
6 ARCHITECTURE teste OF atrib_1 IS
7     SIGNAL    s1 : INTEGER;           -- declaracao de um sinal tipo inteiro
8     CONSTANT  c1 : INTEGER := 7;      -- declaracao de uma constante tipo inteiro
9 BEGIN
10    y1 <= s1;                          -- regio de codigo concorrente
11    s1 <= x1;
12
13    z1 <= c1;
14 END teste;

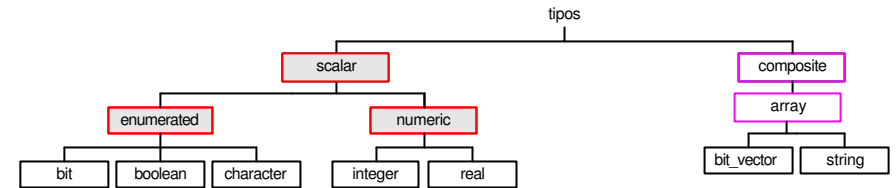
```

Tipos

- Objetos:
 - devem ser declarados segundo uma especificação de tipo
- Objetos de tipos diferentes:
 - não é permitida a transferência de valores
- Exemplo de tipos pré-definidos no pacote padrão VHDL:



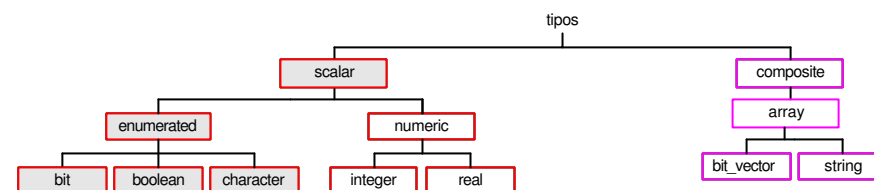
Tipos escalares



- São ordenados
 - podem ser aplicados operadores: maior, menor
- Classes: enumerado e numérico

classe	tipo	valor	exemplos
enumerado	BIT	um, zero	1, 0
	BOOLEAN	verdadeiro, falso	TRUE, FALSE
	CHARACTER	caracteres ASCII	a, b, c, A, B, C, ?, (
numérico	INTEGER	$-2^{31} \leq x \leq 2^{31}-1$	123, 8#173#, 16#7B# 2#11_11_011#
	REAL	$-3.65 \times 10^{47} \leq x \leq +3.65 \times 10^{47}$	1.23, 1.23E+2, 16#7.B#E+1

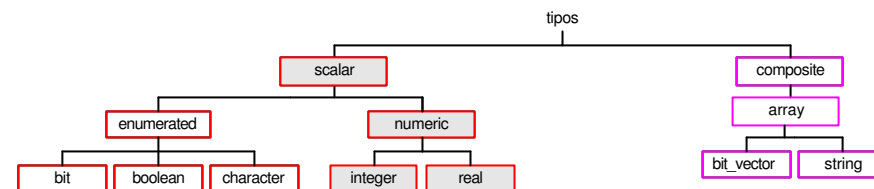
Tipos escalares



- Classe enumerado (pré-definidos):
 - **BIT**: empregado para representar níveis lógicos “0” e “1”
 - **BOOLEAN**: empregado em declarações que executam uma decisão
 - **CHARACTER**: qualquer caracter ASCII padrão

classe	tipo	valor	exemplos
enumerado	BIT	um, zero	1, 0
	BOOLEAN	verdadeiro, falso	TRUE, FALSE
	CHARACTER	caracteres ASCII	a, b, c, A, B, C, ?, (

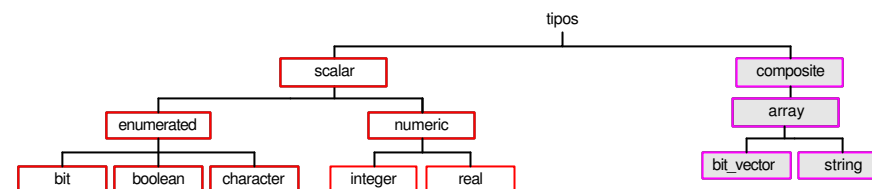
Tipos escalares



- Classe numérico (pré-definidos):
 - **INTEGER**: representa um número inteiro entre $-2^{31} \leq x \leq 2^{31}-1$
 - necessário uma linha de 32 bits para representação!
 - conveniente limitar a faixa de valores na declaração
 - **REAL**: ponto flutuante
 - não suportado pelas ferramentas de síntese

classe	tipo	valor	exemplos
numérico	INTEGER	$-2^{31} \leq x \leq 2^{31}-1$	123, 8#173#, 16#7B# 2#11_11_011#
	REAL	$-3.65 \times 10^{47} \leq x \leq +3.65 \times 10^{47}$	1.23, 1.23E+2, 16#7.B#E+1

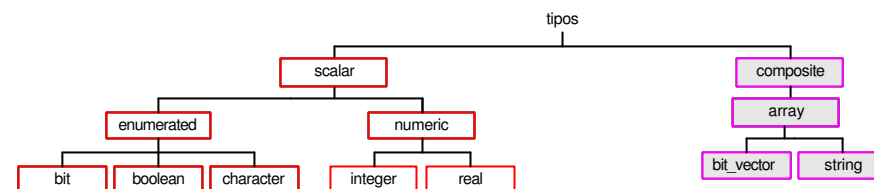
Tipos compostos



- Classe vetor (pré-definidos):
 - **BIT_VECTOR**: vetor contendo elementos tipo bit
 - **STRING**: vetor contendo elementos tipo character

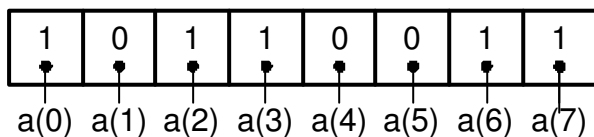
Classe	tipo	valor	exemplos
vetor	BIT_VECTOR	"1", "0"	"1010", B"10_10", O"12", X"A"
	STRING	tipo "character"	"texto", ""incluindo_aspas""

Tipos compostos

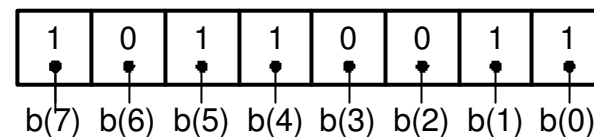


- Declarações:
 - limites definidos por **TO** e **DOWNTO**
- Exemplos de declarações tipos: **bit_vector** e **string**:

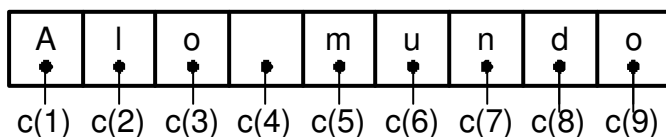
CONSTANT a: BIT_VECTOR(0 TO 7) := "10110011"



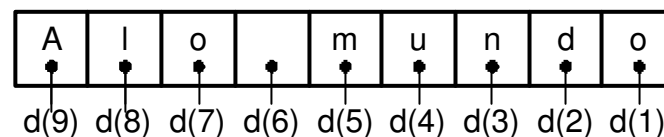
CONSTANT b: BIT_VECTOR(7 DOWNTO 0) := "10110011"



CONSTANT c: STRING(1 TO 9) := "Alo mundo"



CONSTANT d: STRING(1 DOWNTO 9) := "Alo mundo"



Exemplo de operadores

- Divididos em classes:
 - as classes definem a precedência dos operadores
 - operadores de uma mesma classe: igual precedência
- Maior precedência: classe diversos
- Menor precedência: classe lógicos
- Operador “not”: operador lógico, está na classe diversos devido a precedência

classe	operadores
lógicos	and or nand nor xor xnor
relacionais	= /= < <= > >=
adição	+ - &
diversos	not

Operadores

- Tipos envolvidos na operação
 - maioria das operações: operadores do mesmo tipo
- Operadores lógicos:
 - operandos: tipos **bit** e **boolean**
 - podem ser empregados em vetores (arrays):
exemplo: **bit_vector**
 - vetores devem ter o mesmo tamanho
 - operação executada entre elementos de mesma posição

operadores	operando "L"	operando "R"	retorna
not	-	bit	bit
	-	boolean	boolean
and or nand nor xor xnor	bit	bit	bit
	boolean	boolean	boolean
Nota: O operador "not" pertence a classe "diversos"			

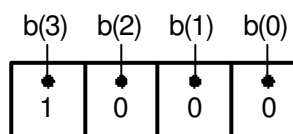
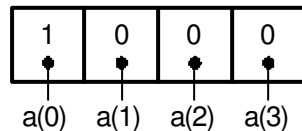
- Operadores relacionais:

- igualdade e desigualdade ($=$ \neq): qualquer tipo
 - $a=b$ para escalares: a mesmo valor de b
 - $a=b$ para compostos: cada elemento de mesma posição igual
- ordenação ($>$ $<$ \geq \leq): tipos escalares (bit, boolean, character, integer, real, time)

operadores	operando "L"	operando "R"	retorna
$=$ \neq	qualquer tipo	mesmo tipo de "L"	boolean
$>$ $<$ \geq \leq	qualquer tipo escalar	mesmo tipo de "L"	boolean

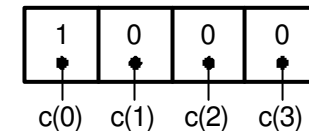
- exemplo de valores tipo `bit_vector` iguais:

CONSTANT a: BIT_VECTOR(0 TO 3) := "1000"



CONSTANT b: BIT_VECTOR(3 DOWNT0 0) := "1000"

CONSTANT c: BIT_VECTOR(0 TO 3) := "1000"



- Operadores adição

- adição e subtração (+ -): tipo numérico
- concatenação (&): vetor unidimensional e elementos (mesmo tipo)

operadores	operando "L"	operando "R"	retorna
+ -	tipo numérico	o mesmo tipo de "L"	mesmo tipo
&	vetor unidimensional	vetor unidimensional	vetor unidimensional
	vetor unidimensional	elemento	vetor unidimensional
	elemento	vetor unidimensional	vetor unidimensional
	elemento	elemento	vetor unidimensional

- Exemplo:

```
a <= b & c;    -- "a" bit_vector 8 elementos,    "b","c" bit_vetor 4 elementos
x <= y & '1';  -- "x" bit_vector 5 elementos,      "y" bit_vetor 4 elementos
```

Exemplo: Atribuição de valores em sinais, tipos **BIT_VECTOR**

- operação: valor **1011** atribuído a todas as portas de saída
- diferentes bases de representação:
 - tipos integer, real formato: **16#b#** **16#b.0#**
 - tipos bit_vector formato: **X"B"**
- linha 10: caracter “_” como separador (melhora leitura do valor)
- linha 12: valor definido para cada elemento,
palavra reservada **OTHERS** especifica elementos restantes

```
1 ENTITY std_a IS
2   PORT (s1,s2,s3,s4,s5 : OUT BIT_VECTOR (3 DOWNTO 0));
3 END std_a;
4
5 ARCHITECTURE teste OF std_a IS
6   CONSTANT c1 : BIT_VECTOR(3 DOWNTO 0) := "1011"; -- constante
7 BEGIN
8   s1 <= c1; -- definindo atraves de constante
9   s2 <= "1011"; -- definindo valor bit a bit
10  s3 <= B"1_0_11"; -- binario default com separadores
11  s4 <= X"B"; -- hexadecimal
12  s5 <= (3 =>'1', 2 =>'0', OTHERS =>'1'); -- uso da palavra reservada "others"
13 END teste;
```

Exemplo: Operadores classe adição

- linhas 10 e 11: operação de concatenação de dois vetores (tipo bit_vector)
- linha 12: soma de dois tipos inteiros

```
1 ENTITY std_xc IS
2   PORT (bv_a,  bv_b  : IN  BIT_VECTOR(1 DOWNTO 0);
3         int_a, int_b : IN  INTEGER RANGE -32 TO 31;
4         bv_c,  bc_d  : OUT BIT_VECTOR(3 DOWNTO 0);
5         int_c       : OUT INTEGER RANGE -64 TO 63);
6 END std_xc;
7
8 ARCHITECTURE teste OF std_xc IS
9 BEGIN
10   bv_c  <= bv_a & bv_b;
11   bc_d  <= bv_a & '1' & '0';
12   int_c <= -int_a +int_b;
13 END teste;
```

Exercícios

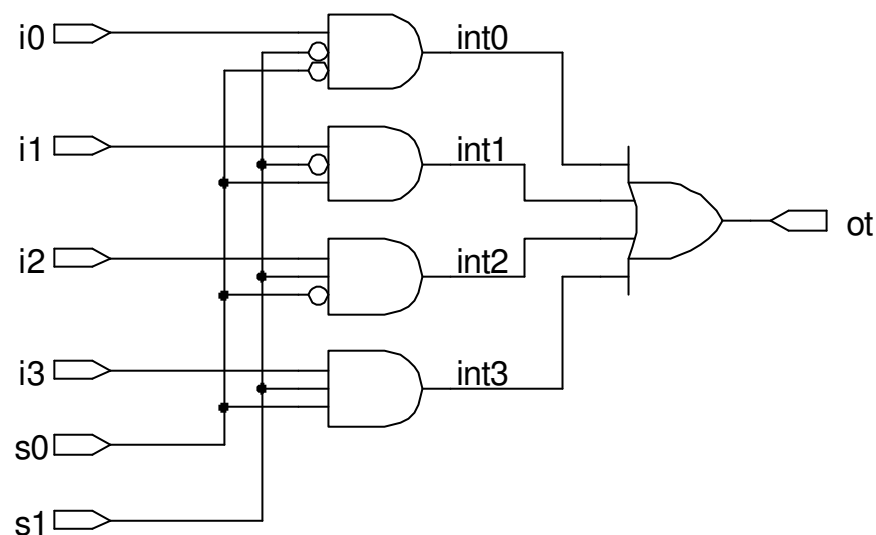
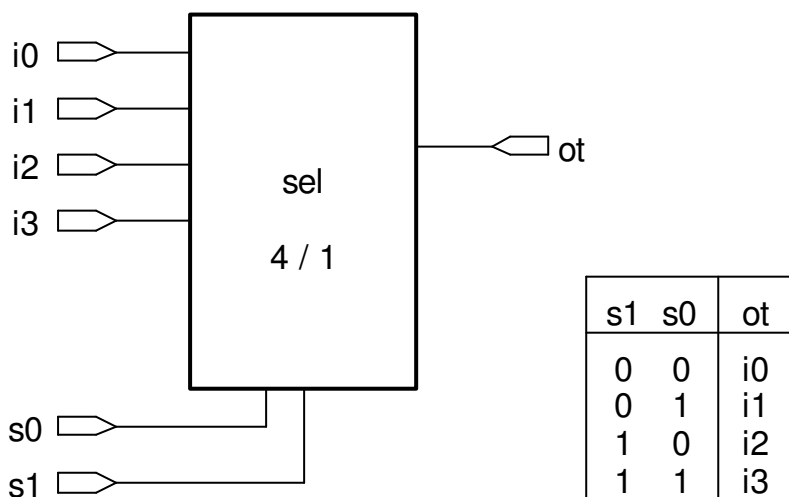
- Compilar e simular as descrições:
 - std_a arquivo: std_a.vhd
 - std_xc arquivo: std_xc.vhd

Comandos concorrentes básicos

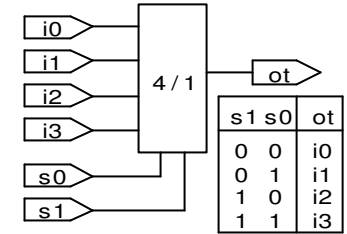
- Construção WHEN ELSE
- Construção WITH SELECT

Descrição de um circuito de seleção

- entradas: i0, i1, i2 e i3
- saída: ot
- controle da seleção: s0 e s1



Exemplo: descrição do circuito de seleção

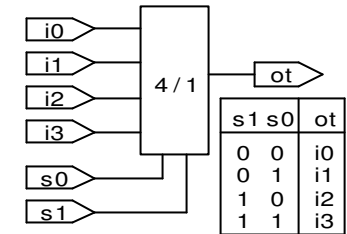


- descrição emprega uma única expressão
- observar: uso de parêntesis → **AND** e **OR** igual precedência

```
1 ENTITY mux_0 IS
2   PORT (i0, i1, i2, i3      : IN  BIT;  -- entradas
3         s0, s1              : IN  BIT;  -- selecao
4         ot                  : OUT BIT); -- saida
5 END mux_0;
6
7 ARCHITECTURE nivel_logico OF mux_0 IS
8 BEGIN
9   ot <= (i0 AND NOT s1 AND NOT s0) OR
10        (i1 AND NOT s1 AND      s0) OR
11        (i2 AND      s1 AND NOT s0) OR
12        (i3 AND      s1 AND      s0);
13 END nivel_logico;
```

Exemplo: - nova descrição do circuito de seleção

- emprega 5 expressões
- sinais internos: *int0*, *int1*, *int2* e *int3*
- observar concorrência do código:
 - valor de *ot*,
determinado pelas expressões linhas 11, 12, 13 e 14



```
1 ENTITY mux_00 IS
2   PORT (i0, i1, i2, i3      : IN  BIT;  -- entradas
3         s0, s1             : IN  BIT;  -- selecao
4         ot                 : OUT BIT); -- saida
5 END mux_00;
6
7 ARCHITECTURE teste OF mux_00 IS
8   SIGNAL int0, int1, int2, int3 : BIT; -- sinais internos
9 BEGIN
10  ot  <= int0 OR int1 OR int2 OR int3;
11  int0 <= i0 AND NOT s1 AND NOT s0;
12  int1 <= i1 AND NOT s1 AND      s0;
13  int2 <= i2 AND      s1 AND NOT s0;
14  int3 <= i3 AND      s1 AND      s0;
15 END teste;
```

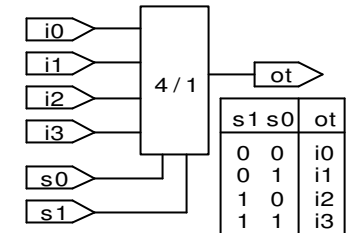

Construção WHEN ELSE

- Transferência condicional de um sinal
- Contém: uma lista de condições e expressões
- Primeira condição verdadeira: define expressão transferida
- Formato da construção:

```
sinal_destino <= expressao_a  WHEN condicao_1 ELSE      -- condicao_1 = verdadeira
                    expressao_b  WHEN condicao_2 ELSE      -- condicao_2 = verdadeira
                    expressao_c;                          -- nenhuma condicao verdadeira
```

Exemplo: - circuito de seleção - WHEN ELSE

- nível de abstração mais elevado
- descrição mais próxima do comportamento do circuito
- opção de escolha:
- linhas 10 e 11: operação **AND** entre s0 e s1
- linha 12: s0 e s1 concatenados



```
1 ENTITY mux_1 IS
2   PORT (i0, i1, i2, i3      : IN  BIT;
3         s0, s1              : IN  BIT;
4         ot                  : OUT BIT);
5 END mux_1;
6
7 ARCHITECTURE teste OF mux_1 IS
8   SIGNAL s1_s0 : BIT_VECTOR(1 DOWNTO 0);
9 BEGIN
10  ot <= i0 WHEN s1= '0' AND s0='0' ELSE
11        i1 WHEN s1= '0' AND s0='1' ELSE
12        i2 WHEN s1_s0="10"           ELSE
13        i3;
14 END teste;
```

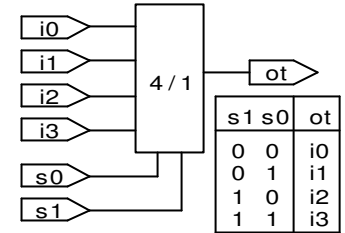
Construção WITH SELECT

- Transferência condicional de um sinal
- Contém: uma lista de opções e expressões
- Todas condições da expressão de escolha devem ser consideradas
 - não existe uma prioridade como na construção WHEN ELSE
- Opções pode ser agrupadas:
 - caracter | equivale a “ou”
 - TO e DOWNTO delimitam faixas de opções
- Opções restantes: palavra reservada OTHERS
- Formato da construção:

```
WITH expressao_escolha SELECT          -- expressao_escolha =
  sinal_destino <= expressao_a WHEN condicao_1,      -- condicao_1
                    expressao_b WHEN condicao_2,      -- condicao_2
                    expressao_c WHEN condicao_3 | condicao_4,  -- condicao_3 ou condicao_4
                    expressao_d WHEN condicao_5 TO condicao_7, -- condicao_5 ate condicao_7
                    expressao_e WHEN OTHERS;          -- condicoes restantes
```

Exemplo: circuito de seleção - WITH SELECT

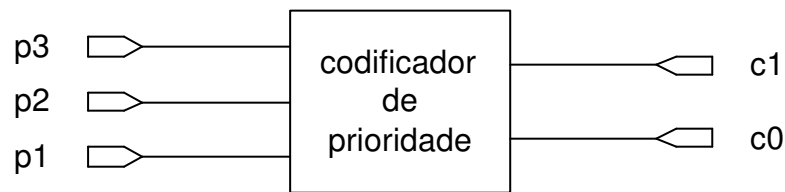
- nível de abstração mais elevado
- descrição mais próxima do comportamento do circuito
- expressão de escolha:
sinal **sel** = **s1** e **s0** concatenados



```
1 ENTITY mux_9 IS
2   PORT (i0, i1, i2, i3   : IN  BIT;
3         s0, s1           : IN  BIT;
4         ot               : OUT BIT);
5 END mux_9;
6
7 ARCHITECTURE teste OF mux_9 IS
8   SIGNAL sel : BIT_VECTOR (1 DOWNTO 0);
9 BEGIN
10  sel <= s1 & s0;
11  WITH sel SELECT
12    ot <= i0 WHEN "00",
13         i1 WHEN "01",
14         i2 WHEN "10",
15         i3 WHEN "11";
16 END teste;
```

Exercício

- Desenvolver uma descrição para um codificador de prioridade empregando a construção **WHEN ELSE**
 - três entradas denominadas p3, p2 e p1
 - p3 a de maior privilégio
 - código da entrada: saídas c1 e c0



p3	p2	p1	c1	c0
1	-	-	1	1
0	1	-	1	0
0	0	1	0	1
0	0	0	0	0

- ⇒ não importa

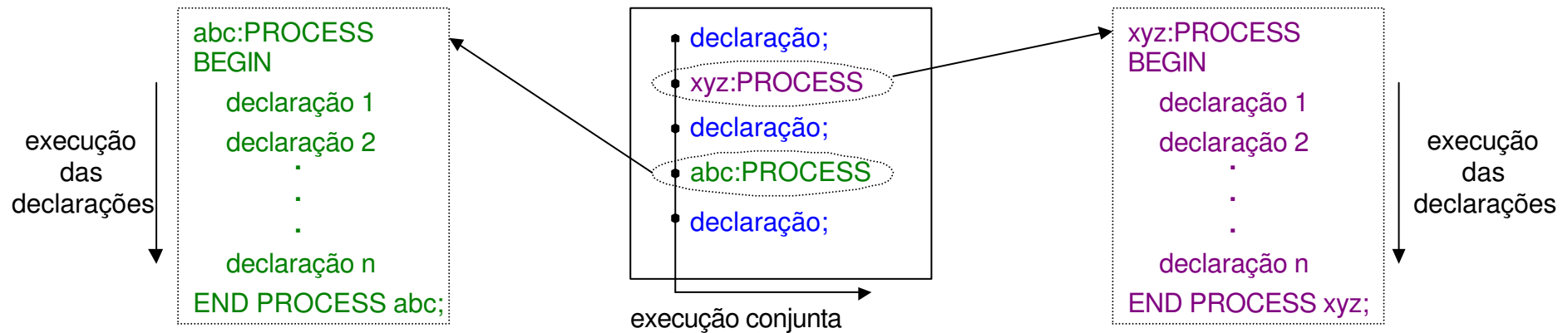
- Repita o exercício anterior empregando a construção **WITH SELECT**

Comandos seqüenciais básicos

- Processos
- Lista de sensibilidade em processos
- Construção IF ELSE
- Construção CASE WHEN

Comandos seqüenciais

- Comandos seqüenciais podem ocorrer em:
 - processos
 - subprogramas
- Processo
 - é um comando concorrente
 - delimita uma região contendo código seqüencial
- Uma descrição: composta de comandos concorrentes
 - todas são executadas concorrentemente



Lista de sensibilidade em processos

- Após a palavra reservada **PROCESS**:
 - possível declarar a lista de sensibilidade
- Lista de sensibilidade:
 - define quais sinais causam a execução do processo
- Execução do processo ocorre se:
 - um sinal da lista tem valor alterado
- Iniciada a execução:
 - comandos são avaliados na seqüência
 - ao término da avaliação do último comando:
 - processo é suspenso (aguarda uma nova alteração de valor - sinais da lista)

```
abc: PROCESS(sinal_a, sinal_b)      -- (lista de sensibilidade)
    BEGIN
        comando_1;
        comando_2;
        ..
        comando_n;
    END PROCESS abc;
```


Construção seqüencial IF ELSE

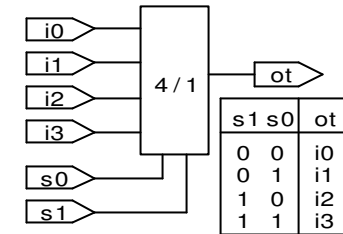
(similar: construção WHEN ELSE)

- Execução condicional de um ou mais comandos seqüenciais
- Teste: definido por uma lista de condições
- Primeira condição verdadeira: define as comandos executados
- Condição de teste: qualquer expressão que retorne **BOOLEAN**
- Início da construção: comandos **IF**
- Cláusulas **ELSIF** e **ELSE**: opcionais
- Formato da construção:

```
IF condicao_1 THEN
    comando_sequencial;
    comando_sequencial;
ELSIF condicao_2 THEN      -- clausula ELSIF opcional
    comando_sequencial;
    comando_sequencial;
ELSIF condicao_3 THEN
    comando_sequencial;
ELSE                      -- clausula ELSE opcional
    comando_sequencial;
END IF;
```

Exemplo: - circuito de seleção - IF ELSE

- Comando seqüencial: necessário definir um processo
- Lista de sensibilidade: sinais **i0 i1 i2 i3 sel**
 - remoção de um destes sinais: consequência?



```
1 ENTITY mux_4aa IS
2   PORT (i0, i1, i2, i3 : IN BIT; -- entradas
3         s0, s1         : IN BIT; -- selecao
4         ot             : OUT BIT); -- saida
5 END mux_4aa;
6
7 ARCHITECTURE teste OF mux_4aa IS
8   SIGNAL sel : BIT_VECTOR (1 DOWNTO 0);
9 BEGIN
10  sel <= s1 & s0;
11  abc: PROCESS (i0, i1, i2, i3, sel)
12  BEGIN
13    IF sel = "00" THEN ot <= i0;
14    ELSIF sel = "01" THEN ot <= i1;
15    ELSIF sel = "10" THEN ot <= i2;
16    ELSE ot <= i3;
17    END IF;
18  END PROCESS abc;
19 END teste;
```

Construção CASE WHEN

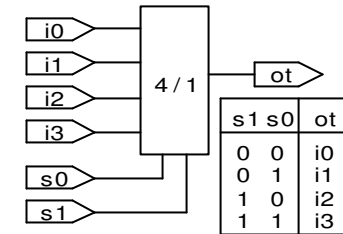
(similar: construção WITH SELECT)

- Execução condicional de um ou mais comando seqüenciais
- A execução dos comando: controlada pelo valor de uma expressão
- Todas condições da expressão de escolha devem ser consideradas
 - não existe prioridade (como na construção WHEN ELSE)
- Opções podem ser agrupadas:
 - caracter | equivale a “ou”
 - TO e DOWNTO delimitam faixas de opções
- Opções restantes: palavra reservada OTHERS
- Formato da construção:

```
CASE expressao_escolha IS                                -- expressao_escolha =
  WHEN condicao_1                                          => comando_a;                                -- condicao_1
  WHEN condicao_2                                          => comando_b; comando_c;                        -- condicao_2
  WHEN condicao_3 | condicao_4                             => comando_d;                                -- condicao_3 ou condicao_4
  WHEN condicao_5 TO condicao_9                           => comando_d;                                -- condicao_5 ate condicao_9
  WHEN OTHERS                                            => comando_e; comando_f;                        -- condicoes restantes
END CASE;
```

Exemplo : - circuito de seleção - CASE WHEN

- Comando seqüencial: necessário definir um processo
- Nota: **s1** e **s2** agrupados no sinal **sel**



```
1 ENTITY mux_3aa IS
2   PORT (i0, i1, i2, i3 : IN BIT;
3         s1, s0       : IN BIT;
4         ot           : OUT BIT);
5 END mux_3aa;
6
7 ARCHITECTURE teste OF mux_3aa IS
8   SIGNAL sel : BIT_VECTOR (1 DOWNT0 0);
9 BEGIN
10  sel <= s1 & s0;
11  abc: PROCESS (i0, i1, i2, i3, sel)
12  BEGIN
13    CASE sel IS
14      WHEN "00" => ot <= i0;
15      WHEN "01" => ot <= i1;
16      WHEN "10" => ot <= i2;
17      WHEN OTHERS => ot <= i3;
18    END CASE;
19  END PROCESS abc;
20 END teste;
```

Estratégias de descrição de circuitos síncronos

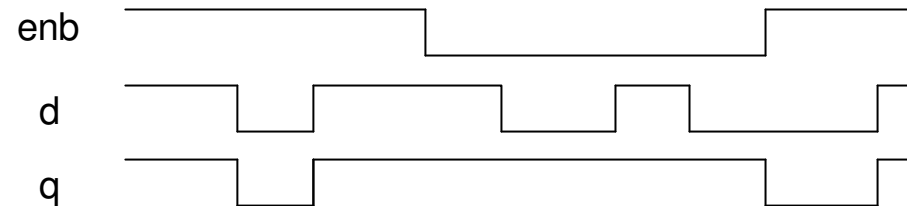
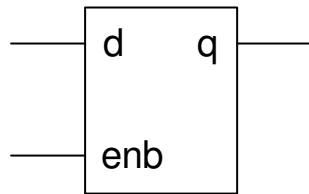
- Registrador sensível a nível
- Registrador sensível a borda - inicialização síncrona
- Registrador sensível a borda - inicialização assíncrona
- Máquinas de estado finito

Inferência de um elemento de memória em VHDL

- Inferência de um elemento de memória:
 - um valor é atribuído a um sinal - variável em pelo menos uma condição e nenhum valor é atribuído a este objeto em pelo menos uma condição

Registrador sensível a nível

- Exemplo:



- Formato geral: empregando processo

- sinal d: deve estar na lista de sensibilidade

```
PROCESS (ena, d)
BEGIN
    IF (ena = '1') THEN    d <= q ;
    END IF ;
END PROCESS;
```

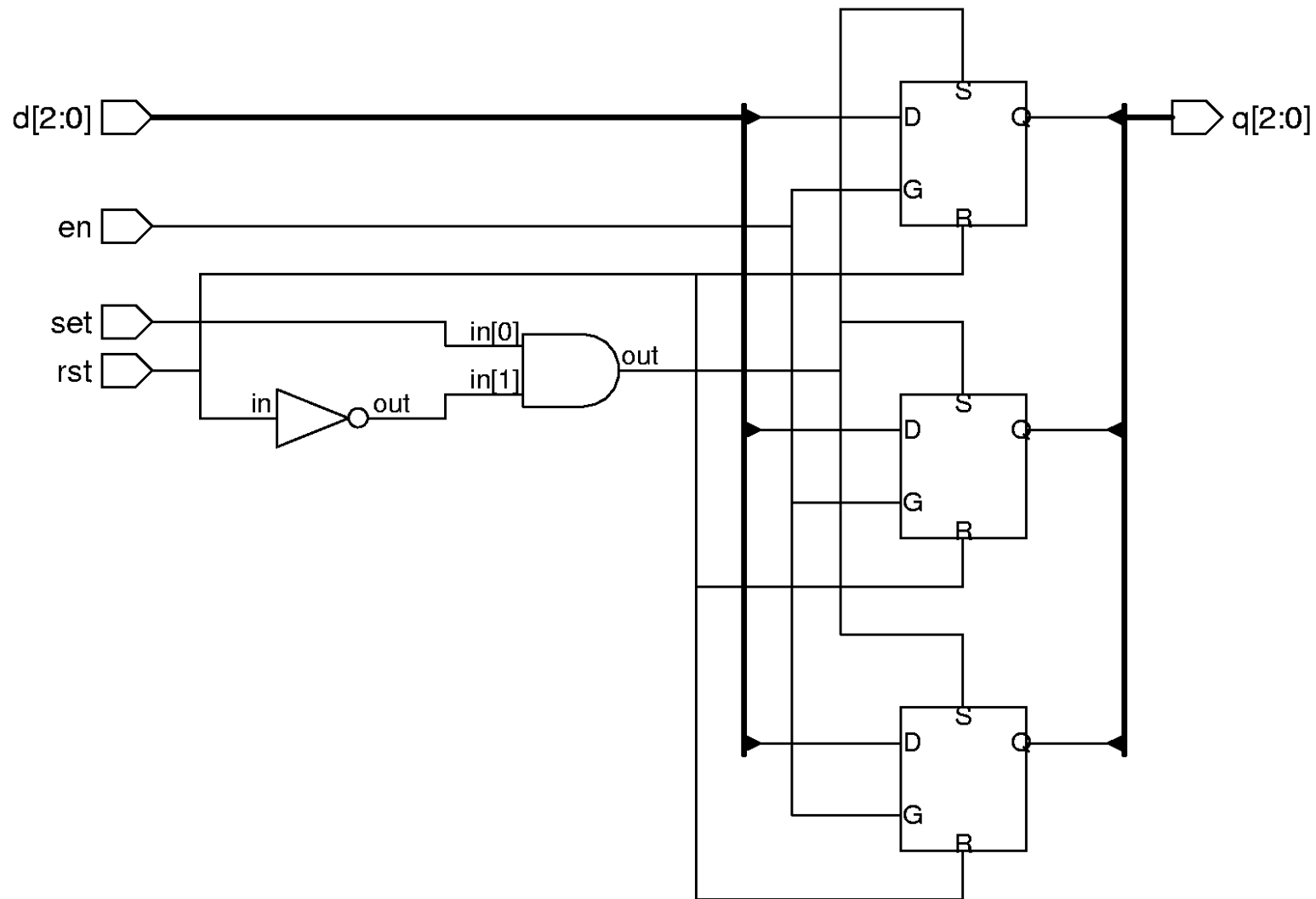
Registrador sensível a nível

- Exemplo: *reset* e *set* assíncronos (devem ser incluídos na lista de sensibilidade)
- Qual o comportamento da descrição se *rst* ou *set* forem removidos?

```
1 ENTITY latch3_1 IS
2   PORT (en      : IN  BIT;           -- habilita
3         rst     : IN  BIT;           -- rst=1 leva q=000
4         set     : IN  BIT;           -- set=1 leva q=111
5         d       : IN  BIT_VECTOR(2 DOWNTO 0);
6         q       : OUT BIT_VECTOR(2 DOWNTO 0));
7 END latch3_1;
8
9 ARCHITECTURE teste OF latch3_1 IS
10 BEGIN
11   PROCESS (en, d, rst, set)
12   BEGIN
13     IF      (rst = '1') THEN q <= "000"; -- q=000 independente de en
14     ELSIF   (set = '1') THEN q <= "111"; -- q=111 independente de en
15     ELSIF   (en  = '1') THEN q <= d;    -- condicao do sinal para habilitar
16     END IF;
17   END PROCESS;
18 END teste;
```


Registrador sensível a nível

- Resultado da síntese (nível RTL):

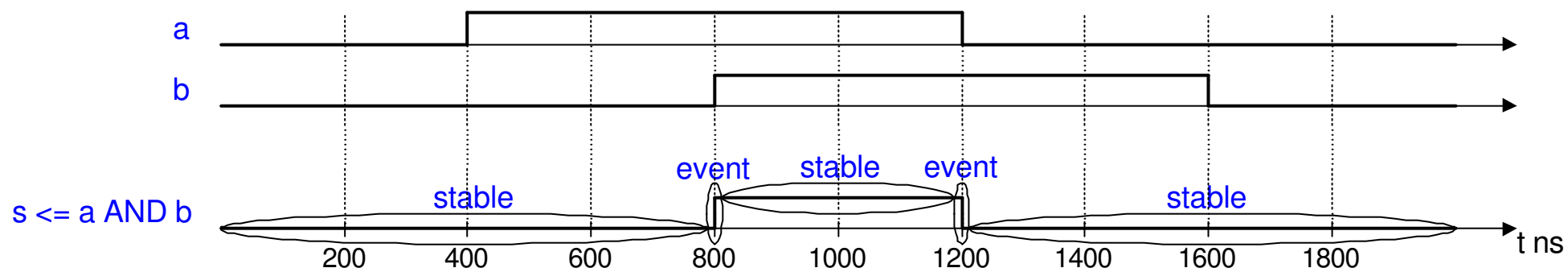


Atributos

- Informações adicionais
 - associadas: tipos objetos e unidades de projeto
 - um objeto: (num dado instante de tempo)
 - pode conter um único valor
 - pode possuir vários atributos
- Atributo pode ser referenciado na forma: **prefixo'**nome_atributo
 - **prefixo**: corresponde ao item (por exemplo um sinal)
 - **nome_atributo** : atributo desejado do item
 - **'** : separa o **prefixo** e o **nome_atributo**

Atributos - exemplos

• s' STABLE	- verdadeiro: <u>não ocorreu</u> <u>uma troca</u> de valor - falso caso contrario
• s' EVENT	- verdadeiro: <u>ocorreu</u> uma <u>troca de valor</u> - falso: caso contrario



Atributos - aplicação

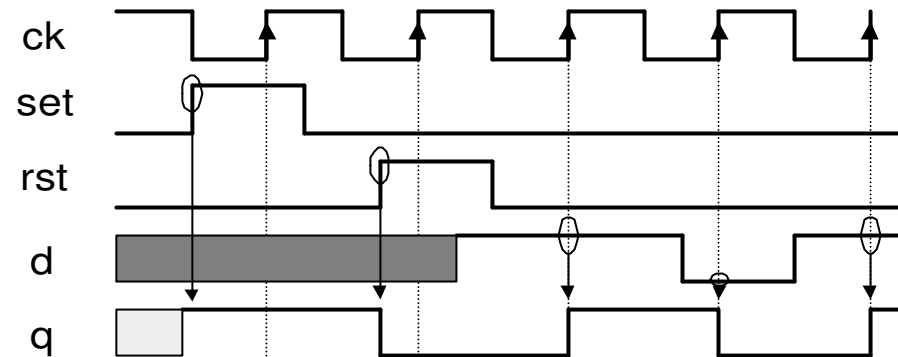
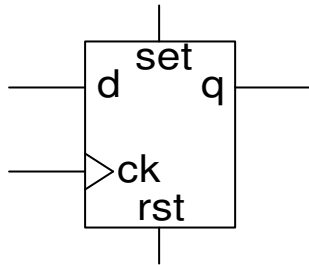
- verificação de bordas de subida ou descida em sinais

```

(ck'EVENT AND ck = '1')      -- borda de subida
(ck'EVENT AND ck = '0')      -- borda de descida
(NOT ck'STABLE AND ck = '1') -- borda de subida
(NOT ck'STABLE AND ck = '0') -- borda de descida

```

Registrador sensível a borda - inicialização assíncrona - (exemplo)



- Formato geral: empregando processo
 - sinais **ck** **rst** e **set** necessitam estar na lista de sensibilidade

```
PROCESS (ck, rst, set)
BEGIN
    IF      (rst = '1')      THEN q <= '0'; -- eventos assincronos
    ELSIF   (set = '1')      THEN q <= '1'; --
                                --
                                --
    ELSIF (ck'EVENT AND ck = '1') THEN q <= d; -- detecta borda de subida do relógio
    END IF;
END PROCESS;
```

Registrador sensível a borda - inicialização assíncrona

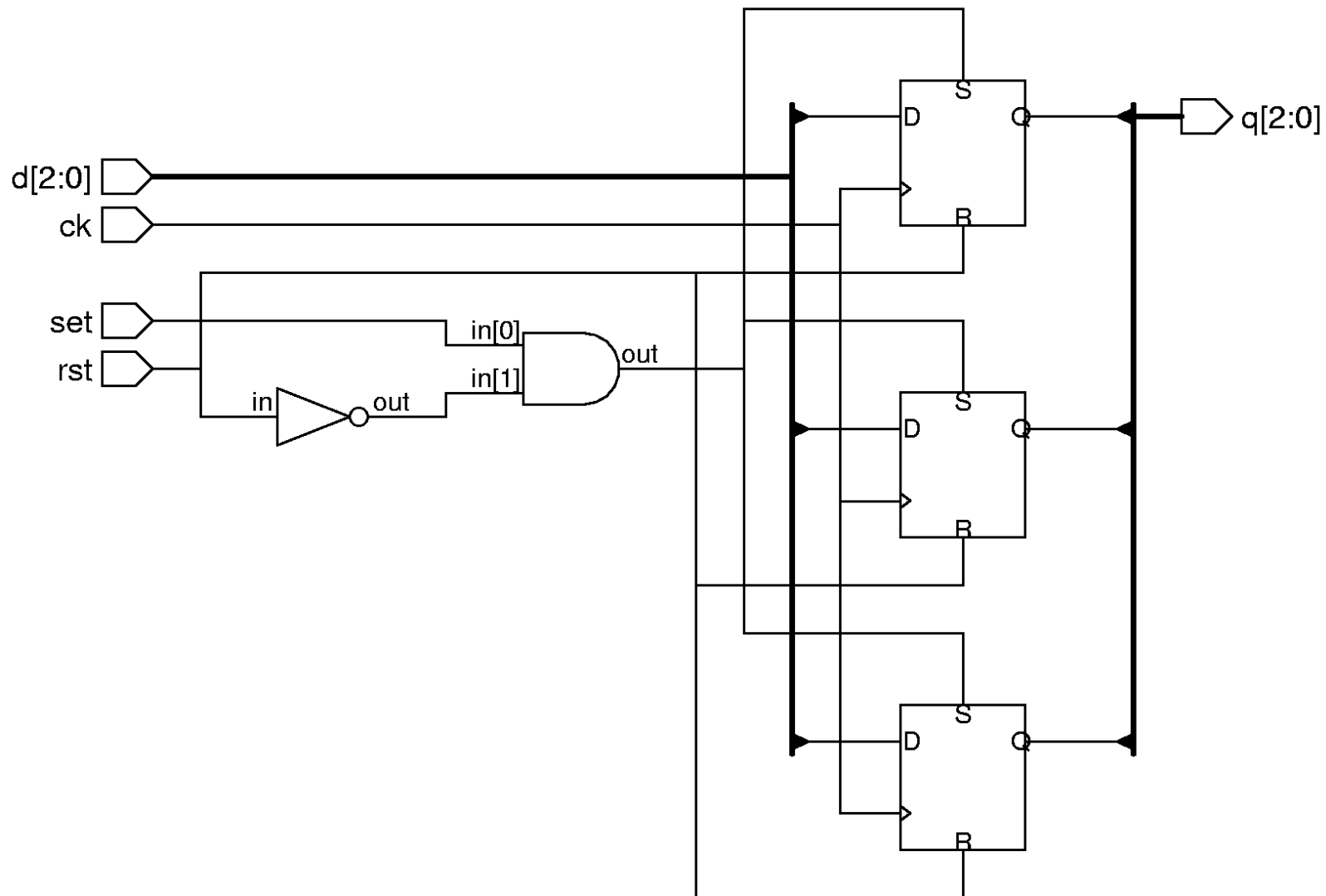
- Exemplo:

- 3 bits
- *reset* e *set* assíncronos (é necessário inclusão na lista de sensibilidade)

```
1 ENTITY flip3_3 IS
2   PORT (ck      : IN  BIT;           -- relógio
3         rst      : IN  BIT;           -- rst=1 leva q=000 assíncrono
4         set      : IN  BIT;           -- set=1 leva q=111 assíncrono
5         d        : IN  BIT_VECTOR(2 DOWNTO 0);
6         q        : OUT BIT_VECTOR(2 DOWNTO 0));
7 END flip3_3;
8
9 ARCHITECTURE teste OF flip3_3 IS
10 BEGIN
11   PROCESS (ck, rst, set)
12   BEGIN
13     IF      (rst = '1')      THEN q <="000"; -- q=000 independente de ck
14     ELSIF   (set = '1')      THEN q <="111"; -- q=111 independente de ck
15     ELSIF   (ck'EVENT AND ck = '1') THEN q <=d;      -- condição do sinal relógio
16     END IF;
17   END PROCESS;
18 END teste;
```

Registrador sensível a borda - inicialização assíncrona

- Resultado da síntese (nível RTL):



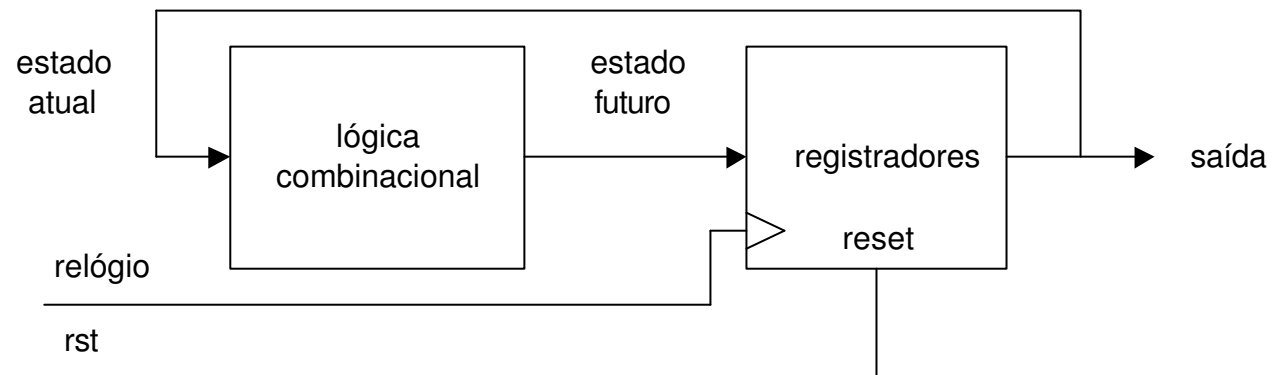
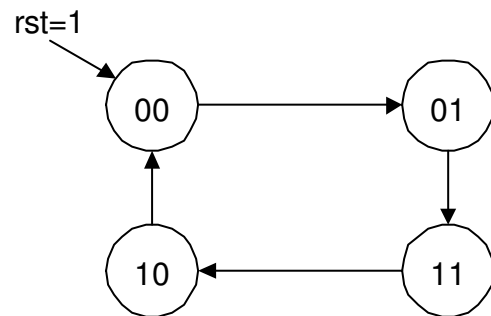
Máquinas de estado finito

- Construção do tipo **IF ELSE** detecta:
 - inicialização **rst** =1
 - ocorrência de uma borda de subida no sinal de relógio
- Construção **CASE WHEN**:
 - definição das transições de estado
 - força a especificação de todos os estados

```
PROCESS (ck, rst)
BEGIN
    IF rst = '1' THEN                                -- estado inicial
        estado <= estado_inicial;
    ELSIF (ck'EVENT and ck = '1') THEN                -- __/-- proximo estado
        CASE estado IS                                -- ciclo de estados
            WHEN estado_inicial => estado <= estado_1; -- .
            WHEN estado_1       => estado <= estado_2; -- .
            -- .
            WHEN estado_x       => estado <= estado_final;
        END CASE;
    END IF;
END PROCESS;
```

Máquinas de estado finito - exemplo

- Contador
- Saída dos registradores corresponde ao valor de saída
 - código do estado = valor de saída
 - não é necessário decodificar

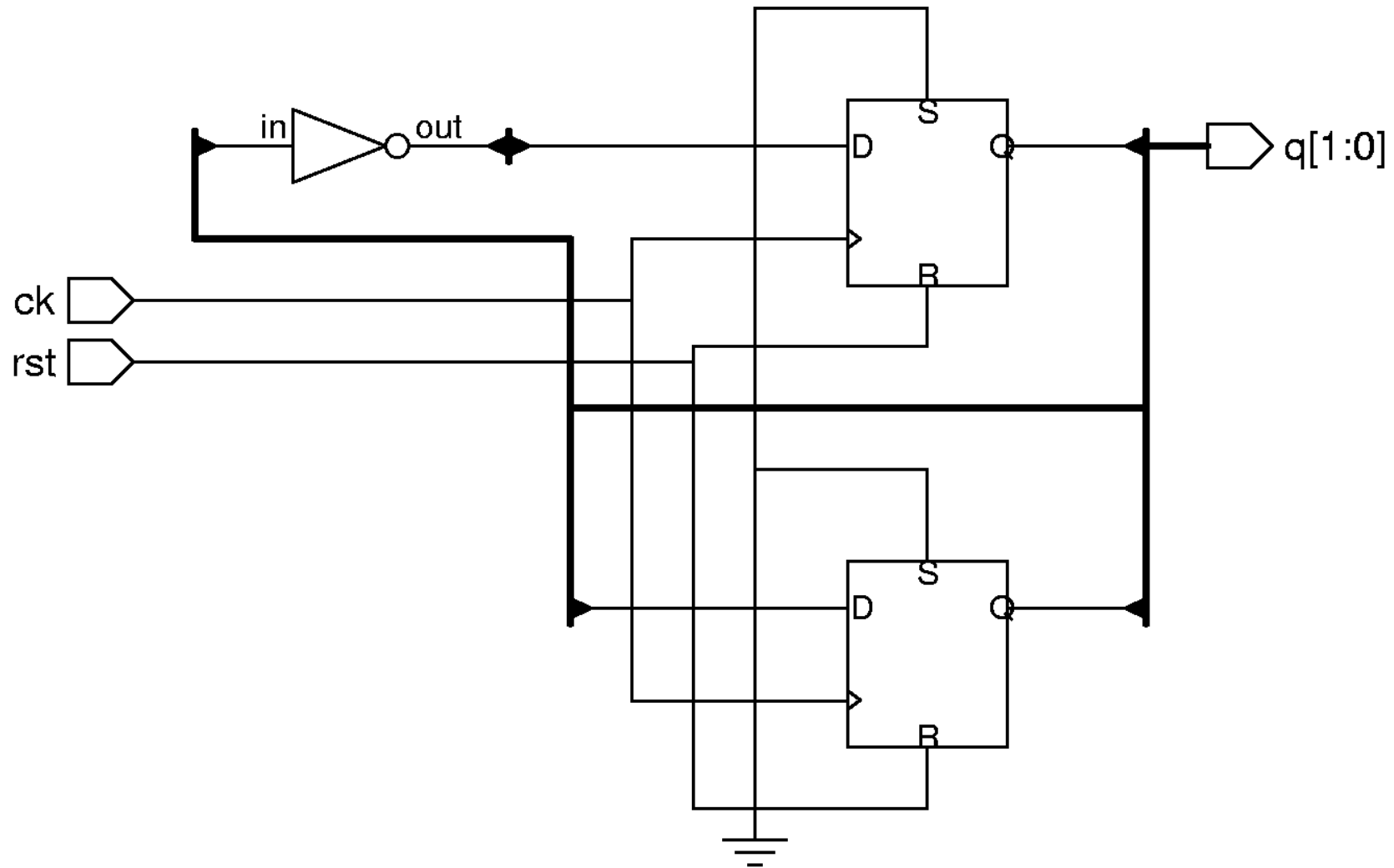


Máquinas de estado finito - descrição

```
1 ENTITY maq_est1 IS
2   PORT (ck      : IN      BIT;           -- relógio borda subida
3         rst      : IN      BIT;           -- rst=1, q=00
4         q        : BUFFER BIT_VECTOR (1 DOWNTO 0)); -- saída código Gray
5 END maq_est1;
6
7 ARCHITECTURE teste OF maq_est1 IS
8
9 BEGIN
10  abc: PROCESS (ck, rst)
11  BEGIN
12    IF rst = '1' THEN                    -- estado inicial
13      q <= "00";
14    ELSIF (ck'EVENT and ck = '1') THEN    -- ciclo de estados
15      CASE q IS
16        WHEN "00" => q <= "01";
17        WHEN "01" => q <= "11";
18        WHEN "11" => q <= "10";
19        WHEN "10" => q <= "00";
20      END CASE;
21    END IF;
22  END PROCESS abc;
23 END teste;
```

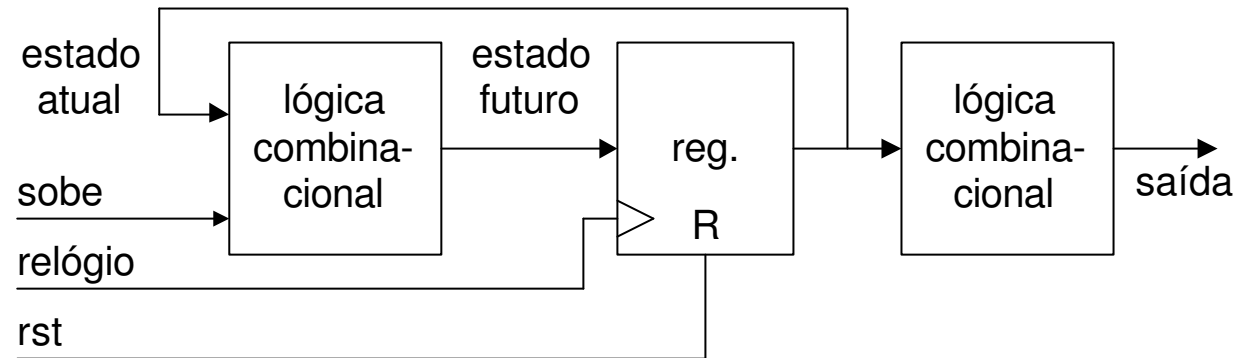
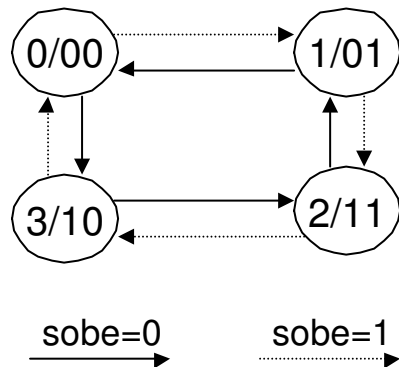
Máquinas de estado finito - descrição

- Resultado da síntese (nível RTL):



Exercício

- Implementar uma máquina de estados
 - contador crescente decrescente código GRAY
 - entrada sobe define sentido crescente / decrescente



- Simule e verifique a descrição

Fim

Codificador de prioridade: possíveis soluções

- solução empregando a construção concorrente: **WHEN ELSE**

```
1 ENTITY pr_cod1 IS
2 PORT (p      : IN  BIT_VECTOR(3 DOWNTO 1);
3       c      : OUT BIT_VECTOR(1 DOWNTO 0));
4 END pr_cod1;
5
6 ARCHITECTURE teste OF pr_cod1 IS
7 BEGIN
8     c <= "11" WHEN p(3)='1' ELSE -- p3 p1 p0  c1 c0
9         "10" WHEN p(2)='1' ELSE --  1  -  -   1  1
10        "01" WHEN p(1)='1' ELSE --  0  1  -   1  0
11        "00";                  --  0  0  1   0  1
12                                --  0  0  0   0  0
13 END teste;
```

Codificador de prioridade: possíveis soluções

- solução empregando a construção concorrente: **WITH SELECT**

```
1 ENTITY pr_cod2 IS
2 PORT (p      : IN  BIT_VECTOR(3 DOWNTO 1);
3       c      : OUT BIT_VECTOR(1 DOWNTO 0));
4 END pr_cod2;
5
6 ARCHITECTURE teste OF pr_cod2 IS
7 BEGIN
8     WITH p SELECT
9     c <= "11" WHEN "111" | "110" | "101" | "100",
10         "10" WHEN "011" | "010",
11         "01" WHEN "001",
12         "00" WHEN "000";
13 END teste;
```

Máquina de estado: possível solução

```
1 ENTITY maq_est2 IS
2   PORT (ck      : IN      BIT;           -- relógio borda subida
3         sobe     : IN      BIT;           -- sobe=1, q=00,01,11,10,00...
4         rst      : IN      BIT;           -- rst=1, q=00
5         q        : OUT     BIT_VECTOR (1 DOWNTO 0)); -- saída código Gray
6 END maq_est2;
7
8 ARCHITECTURE teste OF maq_est2 IS
9   SIGNAL estado : INTEGER RANGE 3 DOWNTO 0;
10 BEGIN
11   abc: PROCESS (ck, rst)
12   BEGIN
13     IF rst = '1' THEN                     -- estado inicial
14       estado <= 0;
15     ELSIF (ck'EVENT and ck = '1') THEN    -- ciclo de estados
16       CASE estado IS
17         WHEN 0 =>                          -- s0
18           IF sobe = '1' THEN estado <= 1; -- s1
19           ELSE estado <= 3; -- s3
20           END IF;
21         WHEN 1 =>                          -- s1
22           IF sobe = '1' THEN estado <= 2; -- s2
23           ELSE estado <= 0; -- s0
24           END IF;
25         WHEN 2 =>                          -- s2
26           IF sobe = '1' THEN estado <= 3; -- s3
27           ELSE estado <= 1; -- s1
28           END IF;
29         WHEN 3 =>                          -- s3
30           IF sobe = '1' THEN estado <= 0; -- s0
31           ELSE estado <= 2; -- s2
32           END IF;
33       END CASE;
34     END IF;
35   END PROCESS abc;
36
37   WITH estado SELECT
38     q <= "00" WHEN 0,
39         "01" WHEN 1,
40         "11" WHEN 2,
41         "10" WHEN 3;
42 END teste;
```