

Laboratório de Sistemas Digitais

Aula Teórico-Prática 3

Ano Letivo 2021/22

Modelação em VHDL de circuitos
aritméticos e comparadores

Introdução à parametrização de
componentes



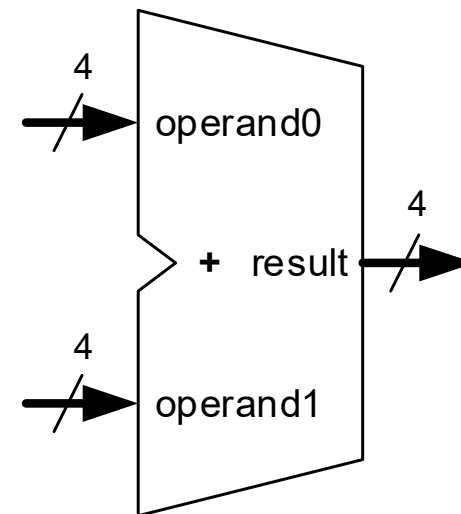
Conteúdo

- Circuitos aritméticos
 - Operadores aritméticos em VHDL
- Operações com quantidades *signed* e *unsigned*
- Modelação de comparadores em VHDL
- Introdução à parametrização de componentes em VHDL
 - Definição em VHDL
 - Instanciação em diagrama lógico e em VHDL

Exemplo de Circuito Aritmético – Somador Binário de 4 bits

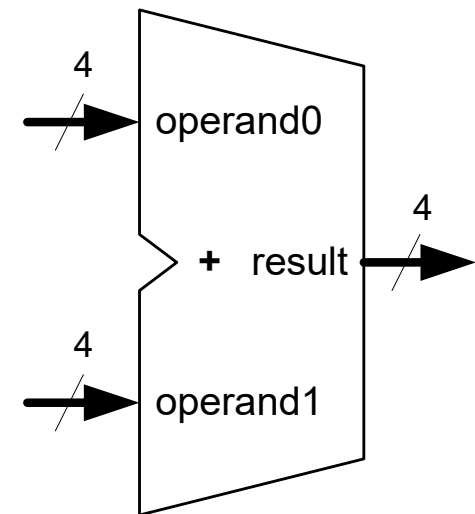
- *Entity*

```
entity Adder4 is
    port(operand0 : in  std_logic_vector(3 downto 0);
         operand1 : in  std_logic_vector(3 downto 0);
         result    : out std_logic_vector(3 downto 0));
end Adder4;
```



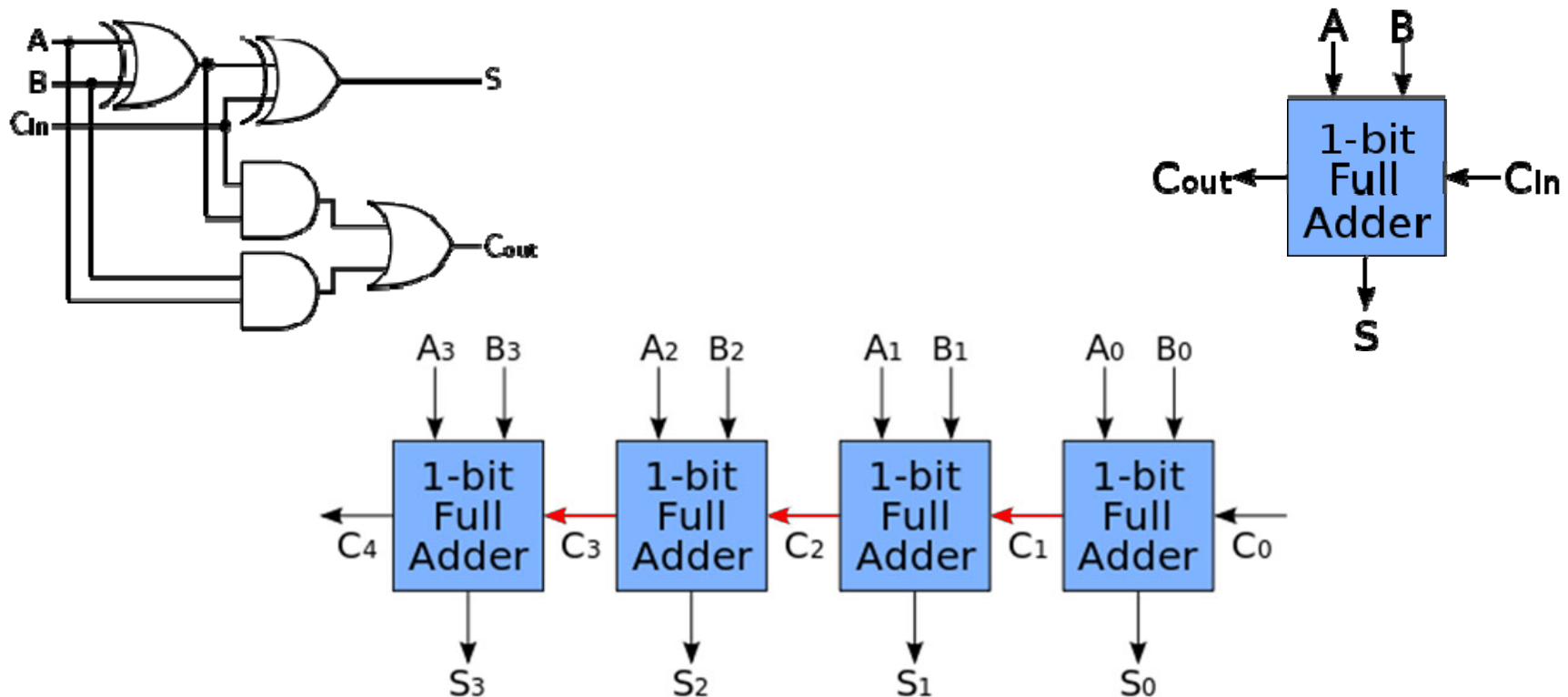
Somador Binário de 4 bits

- *Architecture*
 - Diversas abordagens de modelação possíveis em VHDL
 - Instanciar e interligar as portas lógicas necessárias (estrutural)
 - Escrever as equações lógicas para cada saída
 - Escrever a expressão aritmética da saída



Vamos apresentar e analisar as diversas abordagens, com ênfase na última das três...

Modelação Estrutural do Somador



Abordagem da parte I do guião prático 3: modelar em VHDL um Full Adder de 1 bit (**Entity FullAdder + Architecture** contendo as equações lógicas); instanciar e interligar 4 **FullAdder** para construir um somador de 4 bits (**Entity Adder4 + Architecture**).

TPC: modelar o somador de 4 bits num único ficheiro (**Entity Adder4 + Architecture**) através das equações lógicas.

Modelação Comportamental do Somador (sem Carry In/Out)

```
library IEEE;  
use IEEE.STD_LOGIC_1164.all;  
use IEEE.NUMERIC_STD.all;
```

Recomendação: usar sempre `std_logic(_vector)` nos portos da entidade

```
entity Adder4 is  
    port(operand0 : in  std_logic_vector(3 downto 0);  
          operand1 : in  std_logic_vector(3 downto 0);  
          result   : out std_logic_vector(3 downto 0));  
end Adder4;
```

```
architecture Behavioral of Adder4 is  
begin
```

```
    result <= std_logic_vector(unsigned(operand0) +  
                                unsigned(operand1));
```

```
end Behavioral;
```

Para que serve a biblioteca `IEEE.NUMERIC_STD`?

Conversão entre tipos:

`std_logic_vector(...)` e `unsigned(...)`

Adição da Saída Carry Out

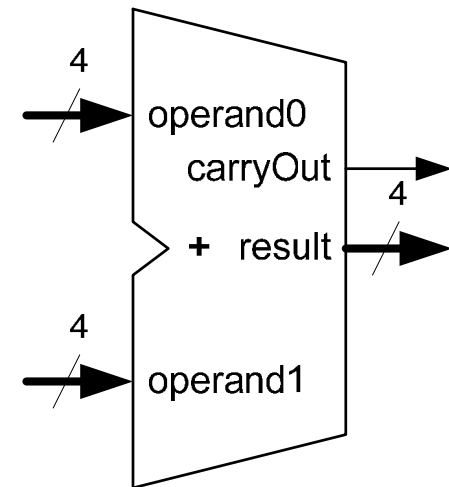
```
library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.all;
use IEEE.NUMERIC_STD.all;

entity Adder4 is
    port(operand0 : in  std_logic_vector(3 downto 0);
         operand1 : in  std_logic_vector(3 downto 0);
         result    : out std_logic_vector(3 downto 0);
         carryOut  : out std_logic);
end Adder4;

architecture Behavioral of Adder4 is

    signal s_operand0, s_operand1, s_result : unsigned(4 downto 0);

begin
    s_operand0 <= '0' & unsigned(operand0);
    s_operand1 <= '0' & unsigned(operand1);
    s_result   <= s_operand0 + s_operand1;
    result     <= std_logic_vector(s_result(3 downto 0));
    carryOut   <= std_logic(s_result(4)); -- std_logic(...) opcional
end Behavioral;
```



Operador "&" –
concatenação /
justaposição

Definição formal dos tipos **unsigned** e **signed** de VHDL em **IEEE.NUMERIC_STD**:

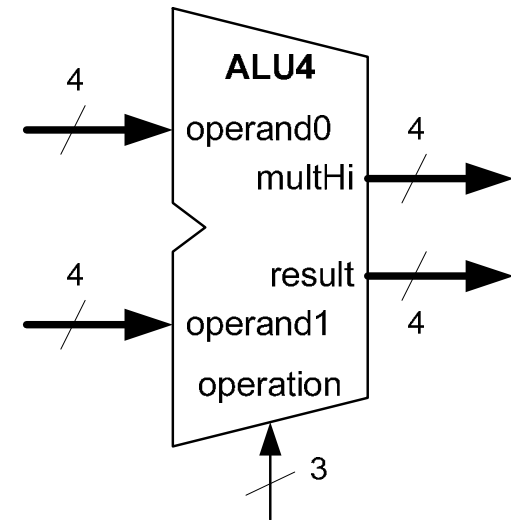
```
type unsigned is array (natural range <> ) of std_logic;
type signed   is array (natural range <> ) of std_logic;
```

TPC: O que seria necessário fazer para incluir também um "carryIn"?

Outros Operadores Aritméticos e Lógicos (ALU de 4 bits)

```
library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.all;
use IEEE.NUMERIC_STD.all;

entity ALU4 is
    port(operation: in  std_logic_vector(2 downto 0);
          operand0 : in  std_logic_vector(3 downto 0);
          operand1 : in  std_logic_vector(3 downto 0);
          result    : out std_logic_vector(3 downto 0);
          multHi    : out std_logic_vector(3 downto 0));
end ALU4;
```



Operation	
000	+
001	-
010	*
011	/
100	rem
101	and
110	or
111	xor

A saída **result** disponibiliza o resultado da operação realizada.

No caso das multiplicações, os 4 bits mais significativos do resultado são disponibilizados em **multHi**.

Arquitetura da ALU de 4 bits

```
architecture Behavioral of ALU4 is
    signal s_multRes : std_logic_vector(7 downto 0);
begin
    s_multRes <= std_logic_vector(unsigned(operand0) *
                                   unsigned(operand1));

    process(operation, operand0, operand1, s_multRes)
    begin
        case operation is
            when "000" =>
                result <= std_logic_vector(unsigned(operand0) + unsigned(operand1));
            when "001" =>
                result <= std_logic_vector(unsigned(operand0) - unsigned(operand1));
            when "010" =>
                result <= s_multRes(3 downto 0);
            when "011" =>
                result <= std_logic_vector(unsigned(operand0) / unsigned(operand1));
            when "100" =>
                result <= std_logic_vector(unsigned(operand0) rem unsigned(operand1));
            when "101" =>
                result <= operand0 and operand1;
            when "110" =>
                result <= operand0 or operand1;
            when others =>
                result <= operand0 xor operand1;
        end case;
    end process;

    multHi <= s_multRes(7 downto 4) when (operation = "010") else (others => '0');
end Behavioral;
```

Utilização de sinais numa arquitetura para comunicação entre vários “blocos funcionais” (processos e atribuições concorrentes).

Assumindo:
Operand0 = "0100" e Operand1 = "1110"
Determine manualmente em decimal o resultado de cada operação. Simule e compare os resultados.

Nesta implementação perde-se o *carry/borrow out* do bit 3 da “+” e “-”. Proponha uma solução.

Implementação da ALU Gerada pelas Ferramentas de Compilação (síntese)

architecture Behavioral of ALU4 is

...

```
s_multRes <= std_logic_vector(unsigned(operand0) *  
                                unsigned(operand1));
```

```
process(operation, operand0, operand1, s_multRes)  
begin
```

```
  case operation is
```

```
    when "000" =>
```

```
      result <= std_logic_vector(unsigned(operand0) +  
                                  unsigned(operand1));
```

```
    when "001" =>
```

```
      result <= std_logic_vector(unsigned(operand0) -  
                                  unsigned(operand1));
```

```
    when "010" =>
```

```
      result <= s_multRes(3 downto 0);
```

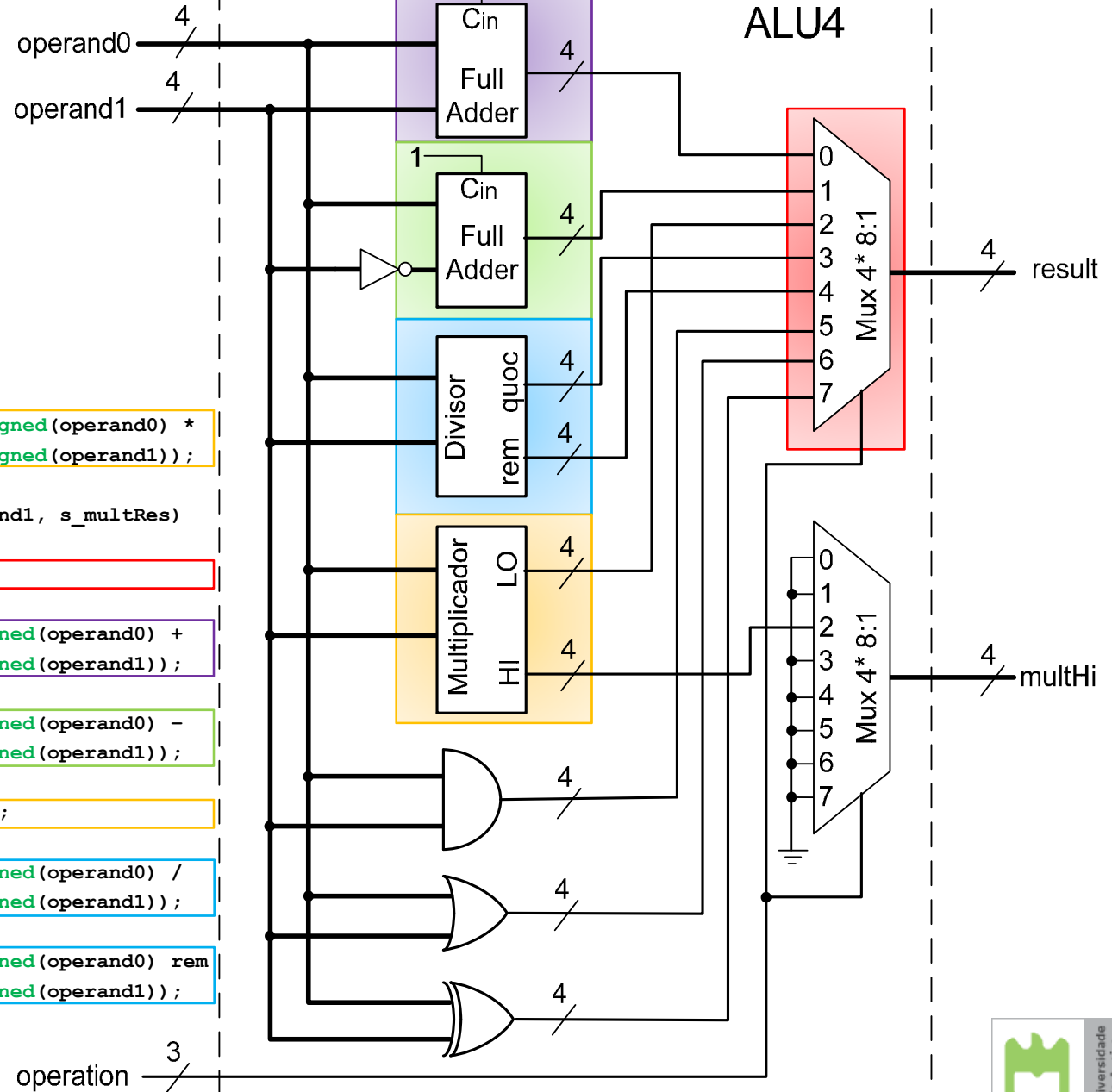
```
    when "011" =>
```

```
      result <= std_logic_vector(unsigned(operand0) /  
                                  unsigned(operand1));
```

```
    when "100" =>
```

```
      result <= std_logic_vector(unsigned(operand0) rem  
                                  unsigned(operand1));
```

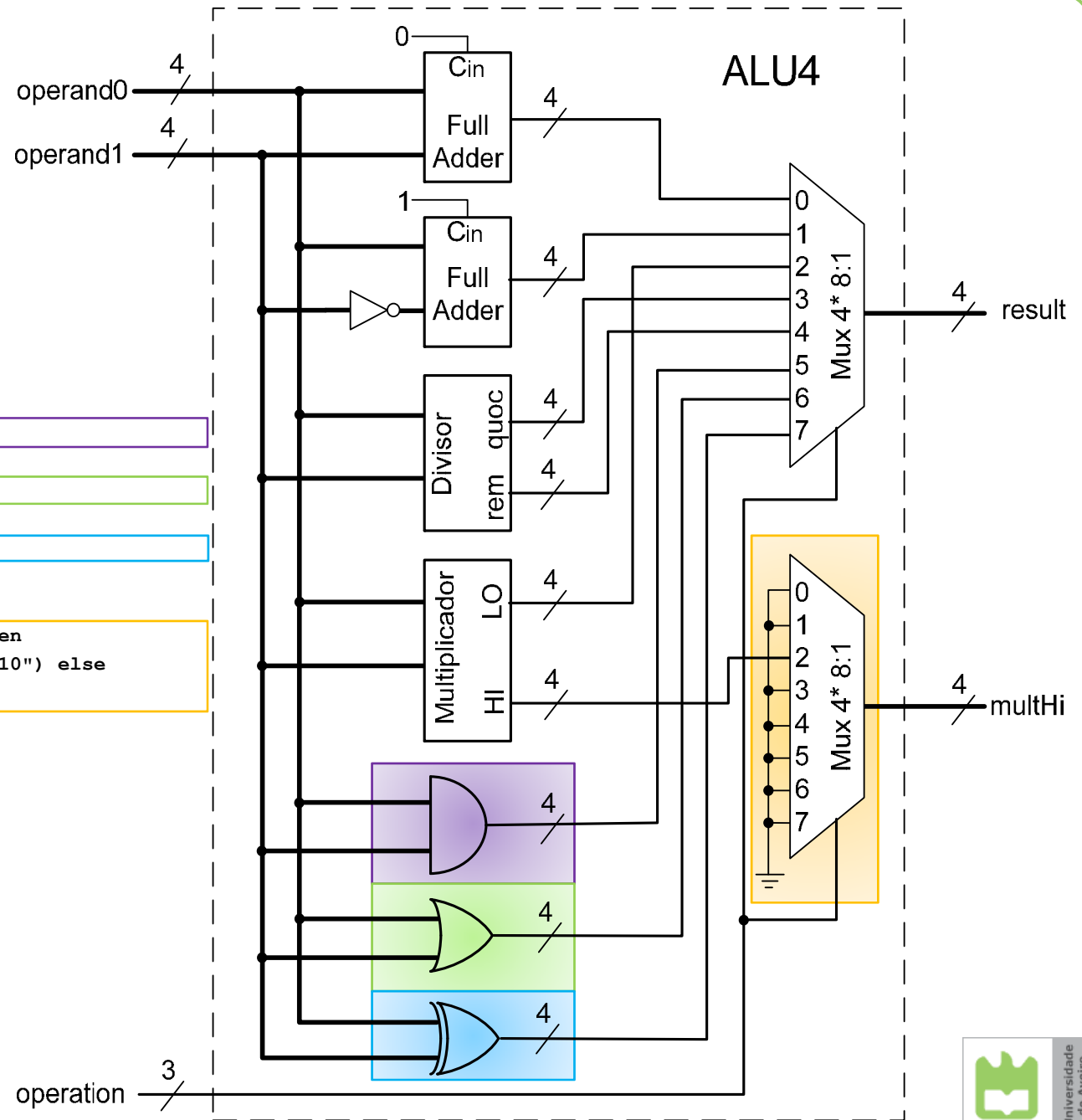
...



Implementação da ALU Gerada pelas Ferramentas de Compilação (síntese)

```

when "101" =>
  result <= operand0 and operand1;
when "110" =>
  result <= operand0 or operand1;
when others =>
  result <= operand0 xor operand1;
end case;
end process;
multHi <= s_multRes(7 downto 4) when
  (operation = "010") else
  (others => '0');
end Behavioral;
  
```



Operações com Quantidades Signed

```
architecture Behavioral of ALU4 is
    signal s_multRes : std_logic_vector(7 downto 0);
begin
    s_multRes <= std_logic_vector(signed(operand0) *
                                   signed(operand1));
    process(operation, operand0, operand1, s_multRes)
    begin
        case operation is
            when "000" =>
                result <= std_logic_vector(signed(operand0) + signed(operand1));
            when "001" =>
                result <= std_logic_vector(signed(operand0) - signed(operand1));
            when "010" =>
                result <= s_multRes(3 downto 0);
            when "011" =>
                result <= std_logic_vector(signed(operand0) / signed(operand1));
            when "100" =>
                result <= std_logic_vector(signed(operand0) rem signed(operand1));
            when "101" =>
                result <= operand0 and operand1;
            when "110" =>
                result <= operand0 or operand1;
            when others =>
                result <= operand0 xor operand1;
        end case;
    end process;

    multHi    <= s_multRes(7 downto 4) when (operation = "010") else (others => '0');
end Behavioral;
```

Adições e subtrações de quantidades com ou sem sinal representadas em complemento para 2 são realizadas da mesma forma. **O mesmo não acontece com as multiplicações e divisões!**

Assumindo: Operand0 = "0100" e Operand1 = "1110"

Determine manualmente em decimal o resultado de cada operação. Simule e compare os resultados.



Comparadores em VHDL

```
library IEEE;  
use IEEE.STD_LOGIC_1164.all;  
use IEEE.NUMERIC_STD.all;
```

```
entity Cmp4 is
```

```
    port(operand0    : in  std_logic_vector(3 downto 0);  
          operand1    : in  std_logic_vector(3 downto 0);  
          equal        : out std_logic;  
          notEqual     : out std_logic;  
          ltSigned     : out std_logic;  
          ltUnsigned   : out std_logic);
```

```
end Cmp4;
```

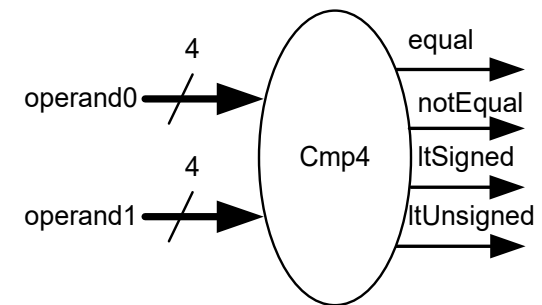
```
architecture Behavioral of Cmp4 is
```

```
begin
```

```
    equal      <= '1' when (operand0 = operand1) else  
                '0';  
    notEqual   <= '1' when (operand0 /= operand1) else  
                '0';  
    ltSigned   <= '1' when (signed(operand0) < signed(operand1)) else  
                '0';  
    ltUnsigned <= '1' when (unsigned(operand0) < unsigned(operand1)) else  
                '0';
```

```
end Behavioral;
```

Comparador de 4 bits
=, ≠, < (com e sem sinal)



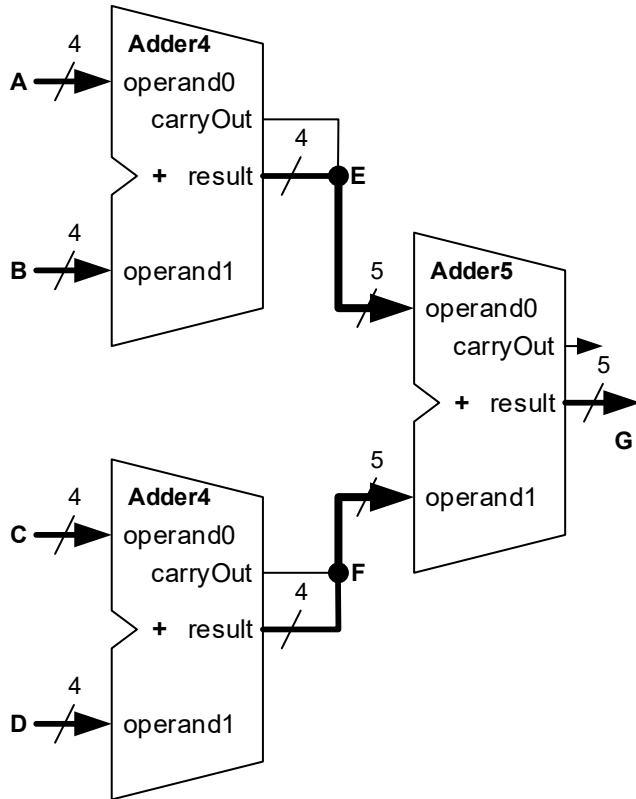
Assumindo:

Operand0 = "0100"

Operand1 = "1110"

Determine o resultado de cada comparação.

Exemplo de Motivação dos Componentes Parametrizáveis



E = A + B (4 + 4 bits = 5 bits)
F = C + D (4 + 4 bits = 5 bits)
G = E + F (5 + 5 bits = 6 bits)

- Passos de modelação com componentes convencionais (sem utilizar componentes parametrizáveis):
 - Modelar somador de 4 bits (Adder4.vhd)
 - Modelar somador de 5 bits (Adder5.vhd)
 - Instanciar 2 somadores de 4 bits, 1 somador de 5 bits e interligá-los (e.g. TripleAdder.vhd)
- E se no mesmo ou noutros projetos fossem utilizados somadores com outras dimensões?
 - Teríamos de possuir um módulo para cada dimensão do somador?

Somador de 5 bits com Carry Out

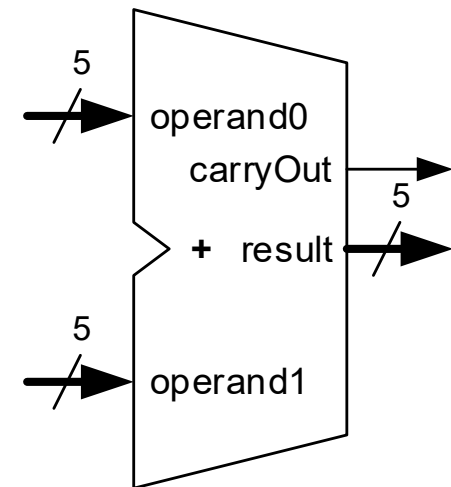
```
library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.all;
use IEEE.NUMERIC_STD.all;

entity Adder5 is
    port(operand0 : in  std_logic_vector(4 downto 0);
         operand1 : in  std_logic_vector(4 downto 0);
         result    : out std_logic_vector(4 downto 0);
         carryOut  : out std_logic);
end Adder5;

architecture Behavioral of Adder5 is

    signal s_operand0, s_operand1, s_result : unsigned(5 downto 0);

begin
    s_operand0 <= '0' & unsigned(operand0);
    s_operand1 <= '0' & unsigned(operand1);
    s_result   <= s_operand0 + s_operand1;
    result     <= std_logic_vector(s_result(4 downto 0));
    carryOut   <= std_logic(s_result(5));
end Behavioral;
```



Modelo semelhante ao **Adder4** diferindo apenas na dimensão dos vetores!

Instanciação e Ligação dos Somadores Convencionais

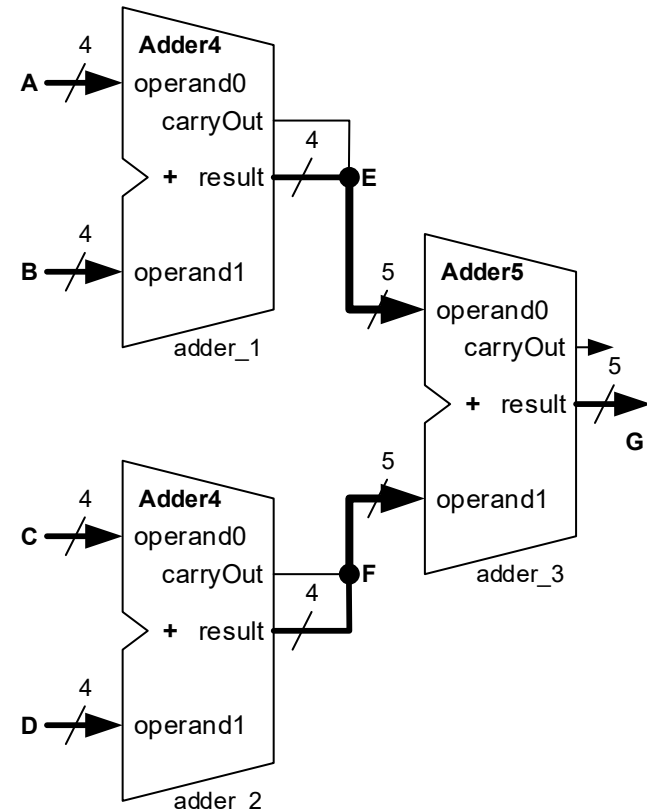
...

```
adder_1: entity WORK.Adder4 (Behavioral)
  port map (operand0 => A,
            operand1 => B,
            result  => E(3 downto 0),
            carryOut => E(4));
```

```
adder_2: entity WORK.Adder4 (Behavioral)
  port map (operand0 => C,
            operand1 => D,
            result  => F(3 downto 0),
            carryOut => F(4));
```

```
adder_3: entity WORK.Adder5 (Behavioral)
  port map (operand0 => E,
            operand1 => F,
            result  => G,
            carryOut => open);
```

...



A, B, C, D – sinais ou portas de entrada (4 bits)

E, F – sinais (5 bits)

G – sinal ou porto de saída (5 bits)

Componentes Parametrizáveis (em VHDL)

- O que são?
 - Componentes em que algumas das suas características podem ser especificadas (especializadas) aquando da sua instanciação (e.g. número de bits de um somador, multiplexador, etc.)
- Para que servem?
 - Evitar bibliotecas “enormes” com todas as especializações e variantes possíveis de todos os componentes standard (e.g. somadores de 1, 2, 3, ..., 30, 31, 32, ... bits)
- Como fazer?
 - Criação do componente (em VHDL) – descrever o comportamento e estrutura genérica do componente baseada em **generic constants** (ou parâmetros) definidos na interface do componente (entity)
 - Utilização do componente
 - Em VHDL - instanciar o componente, ligando os portos e atribuindo valores concretos às generic constants
 - Em diagramas lógicos – definir um símbolo, instanciar o componente e definir valores concretos para os parâmetros

Somador de “N” bits com Carry Out

```
library IEEE;  
use IEEE.STD_LOGIC_1164.all;  
use IEEE.NUMERIC_STD.all;
```

positive = inteiro positivo

```
entity AdderN is
```

```
    generic(N      : positive := 4); Valor por omissão do generic - útil apenas para facilitar a simulação
```

```
    port(operand0 : in  std_logic_vector(N - 1 downto 0);
```

```
          operand1 : in  std_logic_vector(N - 1 downto 0);
```

```
          result   : out std_logic_vector(N - 1 downto 0);
```

```
          carryOut : out std_logic);
```

```
end AdderN;
```

```
architecture Behavioral of AdderN is
```

```
    signal s_operand0, s_operand1, s_result : unsigned(N downto 0);
```

```
begin
```

```
    s_operand0 <= '0' & unsigned(operand0);
```

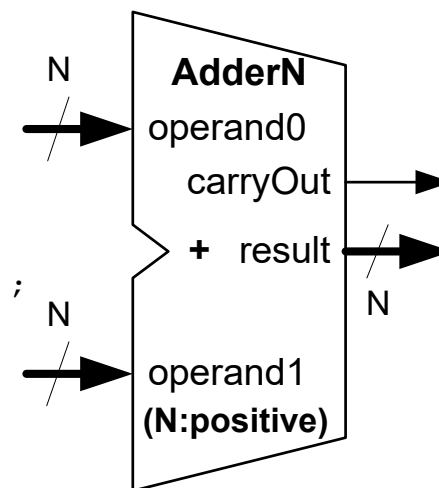
```
    s_operand1 <= '0' & unsigned(operand1);
```

```
    s_result   <= s_operand0 + s_operand1;
```

```
    result     <= std_logic_vector(s_result(N - 1 downto 0));
```

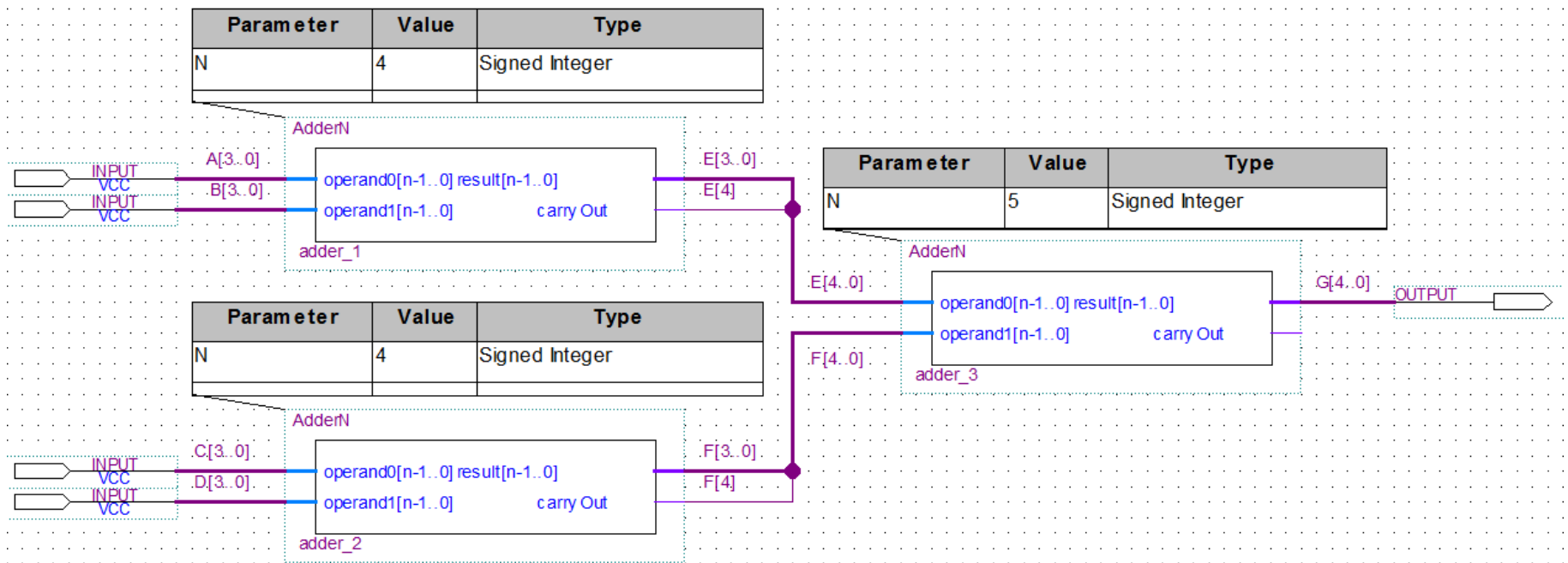
```
    carryOut   <= std_logic(s_result(N));
```

```
end Behavioral;
```



Implementação em função de “N”,
com “N” definido em compile time

Instanciação e Ligação dos Somadores Parametrizáveis (em diagrama lógico)



A, B, C, D – sinais ou portos de entrada (4 bits)
 E, F – sinais (5 bits)
 G – sinal ou porto de saída (5 bits)

Instanciação e Ligação dos Somadores Parametrizáveis (em VHDL)

...

```
adder_1: entity WORK.AdderN(Behavioral)
```

generic map(N => 4) Atribuição “obrigatória” de um valor concreto ao *generic* “N”

**Portos
do somador**

```
port map(operand0 => A,  
         operand1 => B,  
         result  => E(3 downto 0),  
         carryOut => E(4));
```

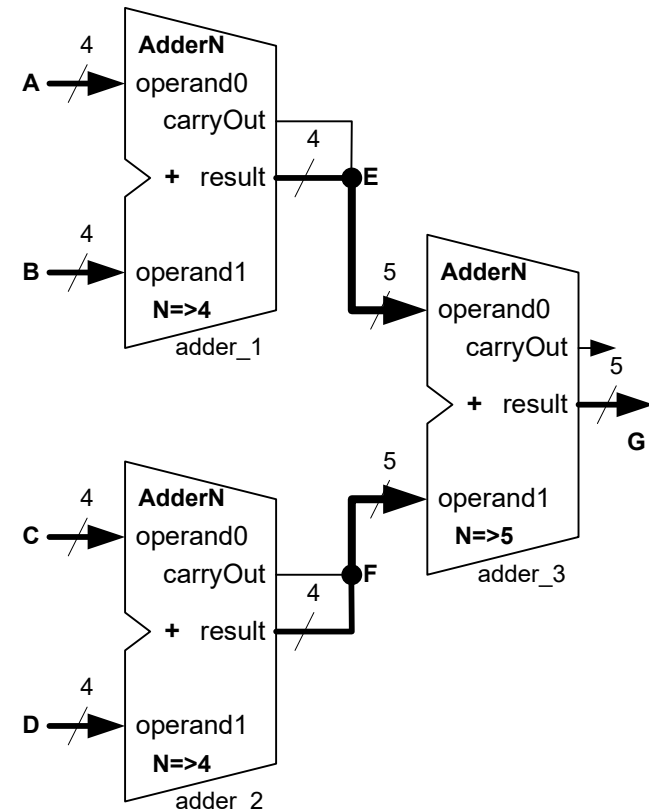
```
adder_2: entity WORK.AdderN(Behavioral)
```

```
generic map(N => 4)  
port map(operand0 => C,  
         operand1 => D,  
         result  => F(3 downto 0),  
         carryOut => F(4));
```

```
adder_3: entity WORK.AdderN(Behavioral)
```

```
generic map(N => 5)  
port map(operand0 => E,  
         operand1 => F,  
         result  => G,  
         carryOut => open);
```

...



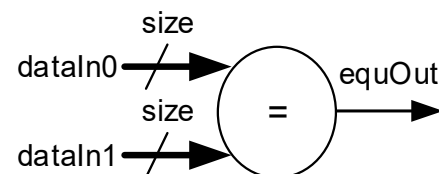
A, B, C, D – sinais ou portos de entrada (4 bits)
 E, F – sinais (5 bits)
 G – sinal ou porto de saída (5 bits)

Comparador Parametrizável de N bits

```
library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.all;

entity EqCmpN is
    generic(size : positive := 8);    Valor por omissão do generic
    port(dataIn0 : in  std_logic_vector((size - 1) downto 0);
          dataIn1 : in  std_logic_vector((size - 1) downto 0);
          equOut  : out std_logic);
end EqCmpN;

architecture Behavioral of EqCmpN is
begin
    equOut <= '1' when (dataIn0 = dataIn1) else
               '0';
end Behavioral;
```



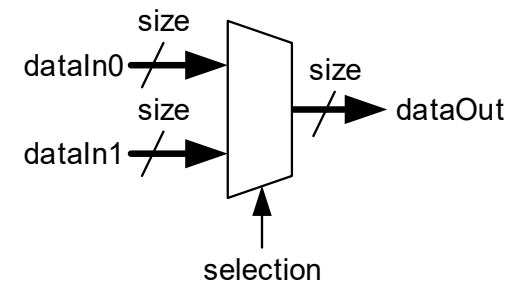
TPC: Substitua o comparador fixo de 4 bits do trabalho prático 1, por uma instanciação deste comparador parametrizável (com **size** = 4). Implemente e teste no kit DE2-115.

Mux 2→1 Parametrizável de N bits

```
library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.all;

entity Mux2N is
    generic(size      : positive := 8); Valor por omissão do generic
    port(selection    : in  std_logic;
          dataIn0      : in  std_logic_vector((size - 1) downto 0);
          dataIn1      : in  std_logic_vector((size - 1) downto 0);
          dataOut       : out std_logic_vector((size - 1) downto 0));
end Mux2N;

architecture Behavioral of Mux2N is
begin
    dataOut <= dataIn1 when (selection = '1') else
                dataIn0;
end Behavioral;
```



Comentários Finais

- No final desta aula e do trabalho prático 3 de LSD, deverá ser capaz de:
 - Descrever componentes com operações aritméticas simples (+, -, *, /, **rem**)
 - Usar adequadamente as bibliotecas e os tipos **std_logic_vector**, **signed** e **unsigned** do VHDL e as respetivas funções de conversão entre tipos
 - Modelar comparadores (<, =, ≠, >; *signed* e *unsigned*)
 - Usar adequadamente sinais numa arquitetura
- ... bom trabalho prático 3, disponível no site da UC 😊
 - elearning.ua.pt
- Os componentes parametrizáveis serão objeto de estudo no trabalho prático 5