



DIPARTIMENTO DI ELETTRONICA, INFORMAZIONE E BIOINGEGNERIA



POLITECNICO
DI MILANO

Reti Logiche Ingegneria Informatica



Introduzione al VHDL

Antonio Miele – antonio.miele@polimi.it



Perché c'è bisogno di un HDL?

- Perché c'è bisogno di un linguaggio di descrizione dello hardware?
 - In inglese «hardware description language» o HDL
- I linguaggi di programmazione non supportano pienamente la specifica di diverse caratteristiche fondamentali dello hardware:
 - Interfacce input/output
 - Tipi di dati e specifica dell'ampiezza dei dati
 - Temporizzazione
 - Concorrenza
 - Sincronizzazione



- Lo HDL permette di specificare componenti a diversi livelli di astrazione:
 - Livello logico
 - Porte AND, OR, NOT
 - Bistabili e flip-flop
 - Livello Register-Transfer
 - Addizionatori, multiplexer, registri, ...
- Lo HDL generalmente supporta diversi tipi di rappresentazione
 - Dataflow: mediante equazioni logiche
 - Strutturale: descrizione basata su uno schema a blocchi
 - Comportamentale: descrizione algoritmica

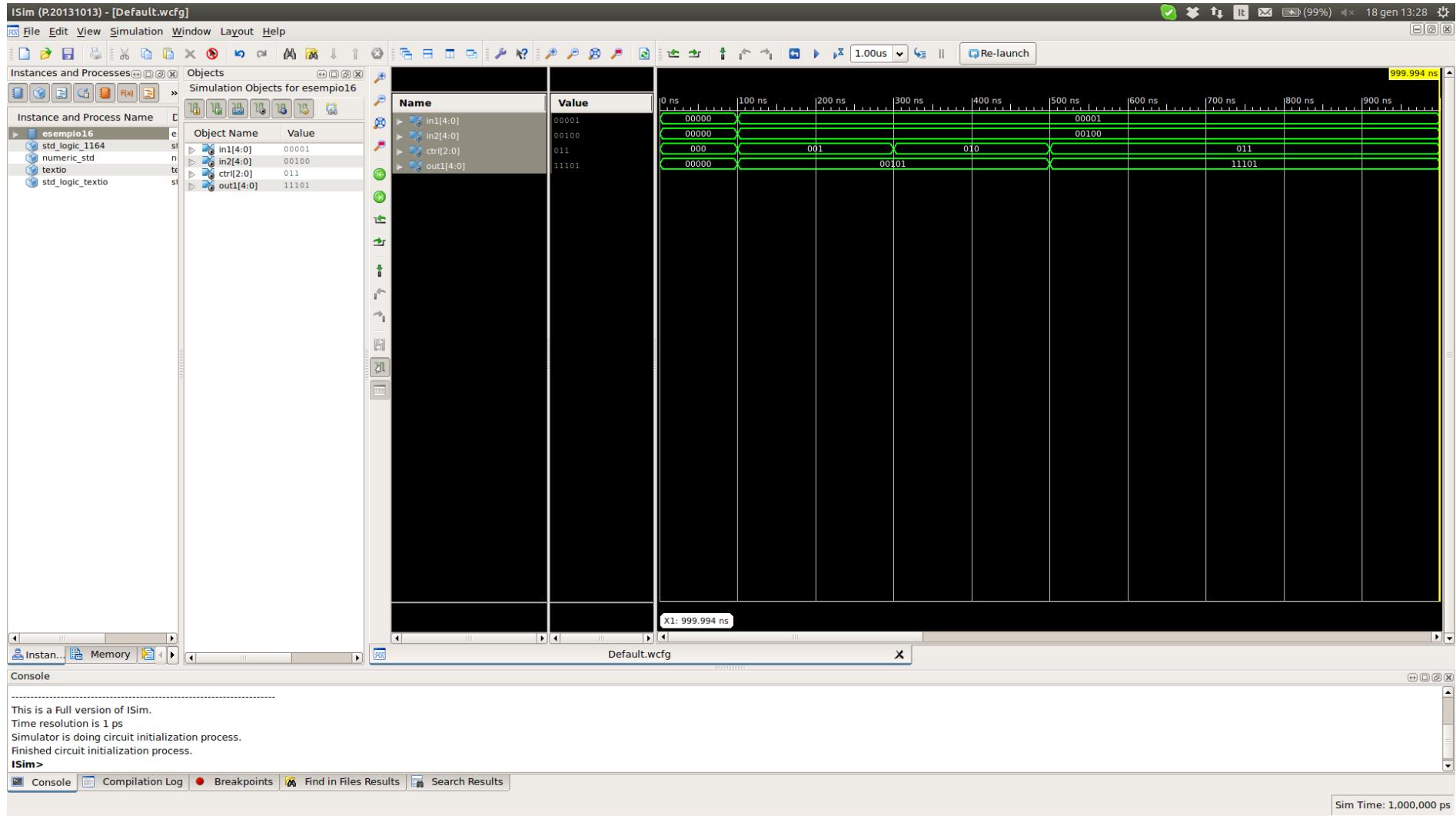
- Nel corso della progettazione di un componente hardware, lo HDL è utilizzato per diversi scopi:
 - Descrizione e documentazione formale del comportamento del componente
 - Input per un simulatore
 - Input per il processo di sintesi circuitale



- Una delle funzioni del HDL è quella di **descrivere/documentare** il funzionamento di un sistema in modo chiaro ed inequivocabile
- Non è detto che questo sistema debba essere realizzato
- Alle volte è **IMPOSSIBILE** la realizzazione fisica del circuito
- Potrebbe essere la descrizione di un sistema già in funzione
- Potrebbe essere un modo per descrivere gli stimoli da impiegare per testare un circuito

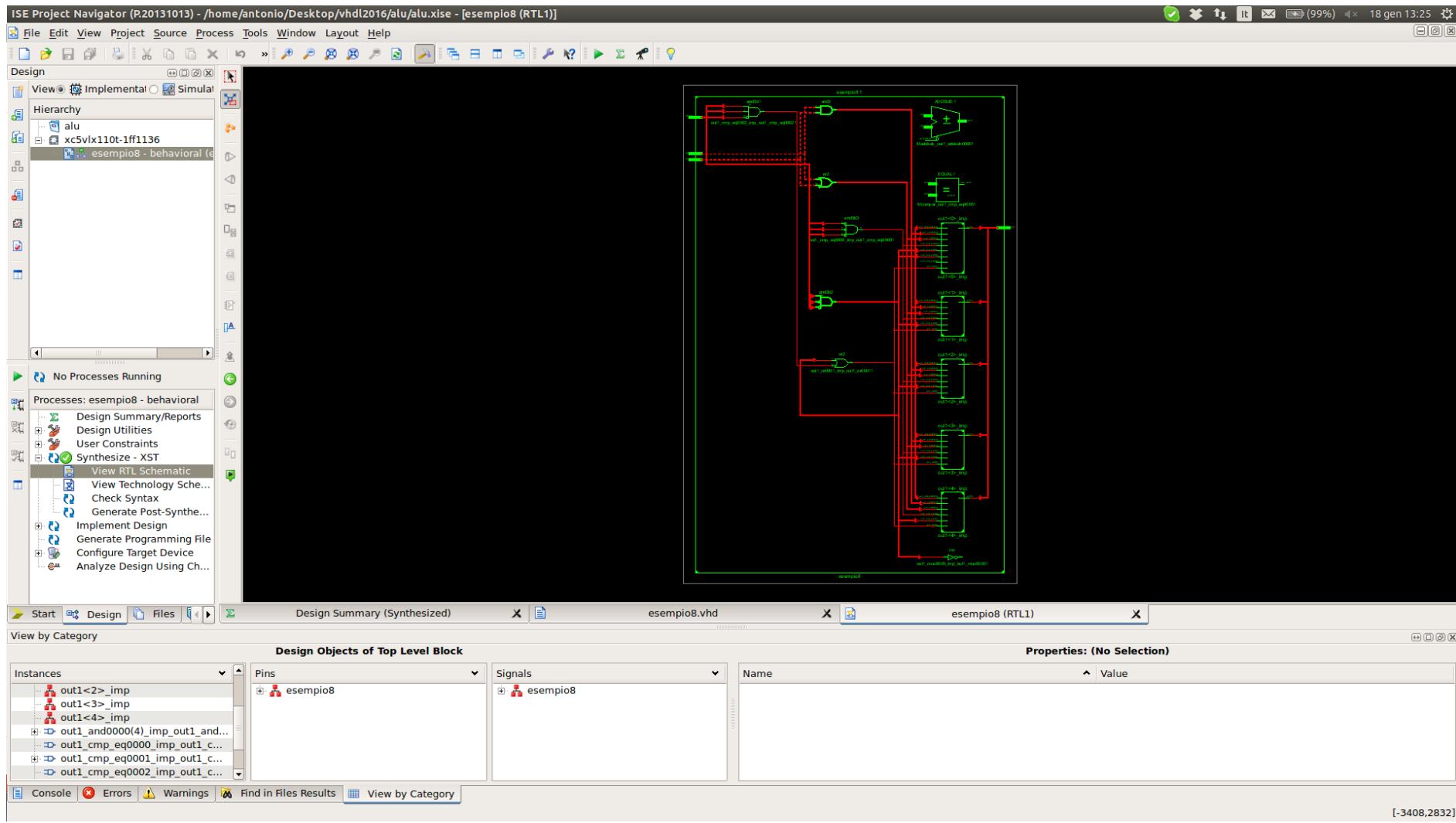
- Un sistema descritto in HDL viene solitamente simulato per analizzarne in comportamento (**simulazione comportamentale**)
- Bisogna
 - Fornire degli stimoli (INPUT), ed
 - Avere un sistema capace di
 - Osservare l'evoluzione del modello durante la simulazione,
 - Registrarne le variazioni per un'eventuale ispezione di funzionamento
- Il simulatore deve aver la possibilità di rappresentare valori “unknown” o “non-initialized” o alta impedenza

- Xilinx Istim per simulazione di specifiche HDL



- La **sintesi logica** è il passaggio tra descrizione comportamentale e descrizione basata su porte logiche
- La sintesi avviene tramite appositi programmi che si appoggiano a librerie dove sono descritte le porte logiche da impiegare (fornite dal venditore)
- La sintesi è un processo delicato che deve essere opportunamente “guidato ed ottimizzato”
- Solo un ristretto sottoinsieme del HDL si presta ad essere sintetizzato automaticamente
Non tutto ciò che è scritto in un HDL è sintetizzabile
- La restante parte è da impiegarsi per la descrizione e per la simulazione

- Xilinx ISE per realizzazioni di sistemi su dispositivi FPGA



- Il VHDL è un linguaggio di descrizione dello hardware
- VHDL sta per VHSIC-HDL cioè Very High Speed Integrated Circuit – Hardware Description Language
- Il VHDL è stato definito negli anni '80 dal dipartimento della difesa USA
- L'ultima versione pubblica risale al 1993 (IEEE std 1076-1993)

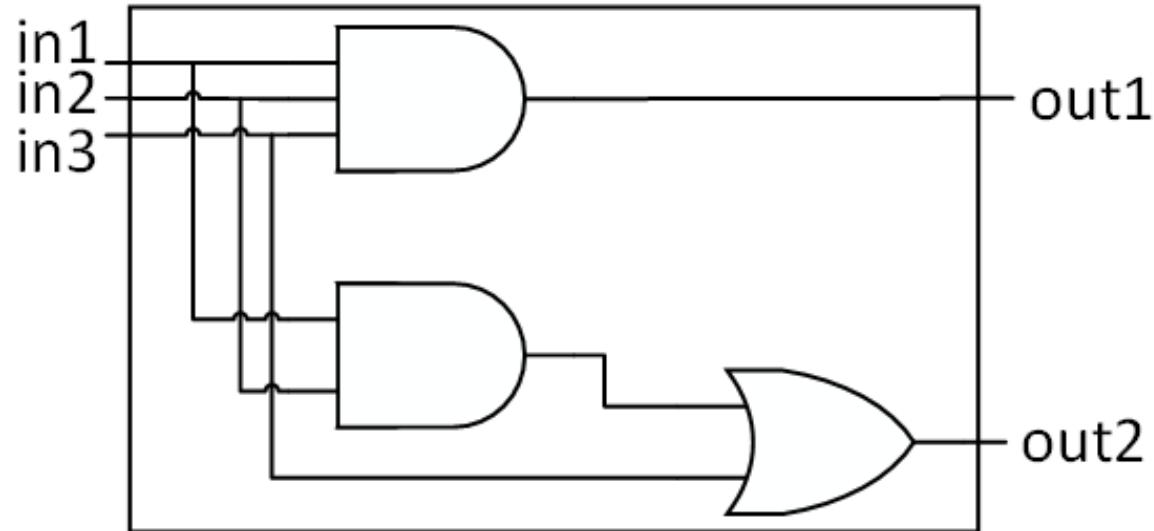


- Il codice sorgente di un modello VHDL è un file di semplice testo
- In genere si usa un nome uguale al nome dell'entità; l'estensione deve essere * .vhd
- Il VHDL è case insensitive
- “--” indica l'inizio di una riga di commento al codice



Esempio di circuito 1

- Vogliamo specificare il seguente circuito combinatorio multi-uscita





- La entity è l'unità di progetto che descrive l'interfaccia di un componente in termini di input e output
- La entity non fornisce alcuna informazione sulla funzionalità svolta dal componente o sull'implementazione interna
- La entity può rappresentare
 - Una singola porta logica
 - Un componente
 - Un intero sistema complesso



- La entity del circuito di esempio 1:

```
entity esempio1 is
  port(
    in1, in2, in3: in std_logic;
    out1 : out std_logic;
    out2 : out std_logic
  );
end esempio1;
```



Specifica dell'interfaccia del componente

- La entity del circuito di esempio 1:

```
entity esempio1 is
  port(
    in1, in2, in3: in std_logic;
    out1 : out std_logic;
    out2 : out std_logic
  );
end exemplo1;
```

Nome della entity

Elenco delle porte





- La entity del circuito di esempio 1:

```
entity esempio1 is
  port(
    in1, in2, in3: in std_logic;
    out1 : out std_logic;
    out2 : out std_logic
  );
end esempio1;
```

Per ogni porta
bisogna specificare:

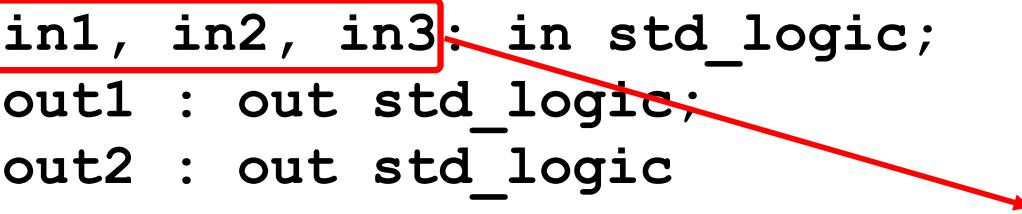
- Il nome
- La direzione
- Il tipo di dato

- La direzione può essere **in** o **out**
- La specifica del nome segue regole simili alla dichiarazione delle variabili in un linguaggio di programmazione
- Il tipo di dato **std_logic** serve per rappresentare i valori e le operazioni su valori logici ad un bit



- La entity del circuito di esempio 1:

```
entity esempio1 is
  port(
    in1, in2, in3: in std_logic;
    out1 : out std_logic;
    out2 : out std_logic
  );
end esempio1;
```



È possibile specificare più porte con le stesse caratteristiche in una singola dichiarazione

- Il tipo di dato **std_logic** è il più utilizzato per la rappresentare valori logici a un bit
- **Std_logic** definisce 9 valori:

- ‘0’
- ‘1’
- ‘-’: don’t care, indifferenza
- ‘Z’: alta impedenza

Valori sintetizzabili

- ‘U’: uninitialized
- ‘X’: unknown
- ‘W’: weak unknown
- ‘L’: weak 0
- ‘H’: weak 1

Valori utilizzati in simulazione
per avere un comportamento
deterministico

- I valori vengono indicati tra singoli apici
- Noi considereremo soltanto i primi tre valori nell’elenco (0, 1, -) e vedremo marginalmente alcuni degli altri (U, X)

- Per utilizzare il tipo **std_logic** va inclusa la seguente dichiarazione prima della specifica della entity:

```
LIBRARY ieee;  
USE ieee.std_logic_1164.ALL;
```

Tipi di dato:

- Il VHDL definisce diversi tipi di dato, non tutti sintetizzabili
 - **Bit, real, integer, time, boolean, file, character, ...**
- Il VHDL è un linguaggio fortemente tipizzato
 - Le operazioni possono essere eseguiti solo tra tipi compatibili
 - Non è possibile eseguire cast impliciti
 - Il VHDL fornisce funzioni specifiche per eseguire le conversioni

- La architecture è l'unità di progetto che descrive l'implementazione interna di un componente data la entity
- La architecture può essere descritta tramite tre approcci diversi:
 - Dataflow
 - Strutturale
 - Comportamentale (behavioral)
- È possibile usare anche un mix dei tre approcci



- La architecture del circuito di esempio 1:

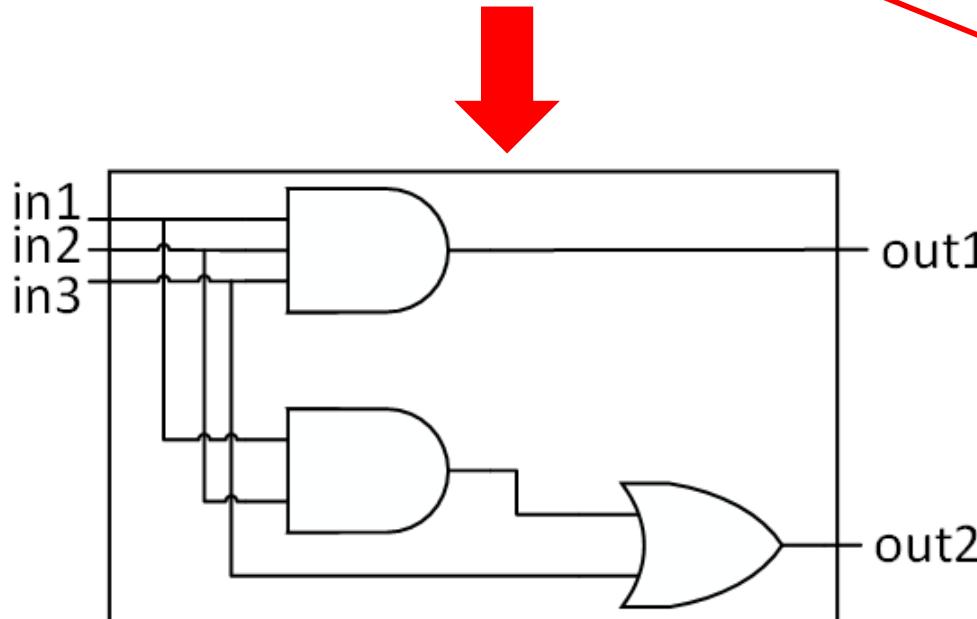
```
architecture dataflow of esempio1 is
```

```
begin
    out1 <= in1 and in2 and in3;
    out2 <= (in1 and in2) or in3;
end dataflow;
```



- La architecture del circuito di esempio 1:

```
architecture dataflow of esempio1 is
begin
    out1 <= in1 and in2 and in3;
    out2 <= (in1 and in2) or in3;
end dataflow;
```



Nome della entity implementata

Nome della architecture

Implementazione tramite equazioni logiche (dataflow)



- La architecture del circuito di esempio 1:

```
architecture dataflow of esempio1 is
```

```
begin
```

```
    out1 <= in1 and in2 and in3;  
    out2 <= (in1 and in2) or in3;
```

```
end dataflow;
```

Istruzioni concorrenti

- Le equazioni logiche **NON** sono un blocco di codice sequenziale
- Le equazioni logiche
 - Descrivono una serie di coni di logica
 - Descrivono un comportamento concorrente
 - Il loro ordinamento è quindi ininfluente



- La architecture del circuito di esempio 1:

```
architecture dataflow of esempio1 is
```

```
begin
```

```
    out1 <= in1 and in2 and in3;  
    out2 <= (in1 and in2) or in3;
```

```
end dataflow;
```

Istruzioni concorrenti

Comportamento durante la simulazione:

- Ciascuna equazione è rivalutata ogniqualvolta c'è una variazione in uno dei segnali nell'espressione sulla destra dell'assegnamento
- L'aggiornamento del valore del segnale alla sinistra dell'assegnamento è istantaneo



- La architecture del circuito di esempio 1:

```
architecture dataflow of esempio1 is
```

```
begin
```

```
    out1 <= in1 and in2 and in3;
```

```
    out2 <= (in1 and in2) or in3;
```

```
end dataflow;
```

Assegnamento di un valore a una porta (o a un segnale)

Espressione logica

- **Std_logic** supporta gli operatori logici: **and, or, not, xor, nand, nor, ...**
- Attenzione:
 - Non è possibile eseguire assegnamenti su porte di input
 - Non è possibile utilizzare una porta di output all'interno di espressioni logiche alla destra di un assegnamento



Codice completo per l'esempio 1

Commento { -- esempio1

Inclusione [LIBRARY ieee;
delle librerie] USE ieee.std_logic_1164.ALL;

Entity [entity esempio1 is
port(
 in1, in2, in3: in std_logic;
 out1 : out std_logic;
 out2 : out std_logic
);
end esempio1;

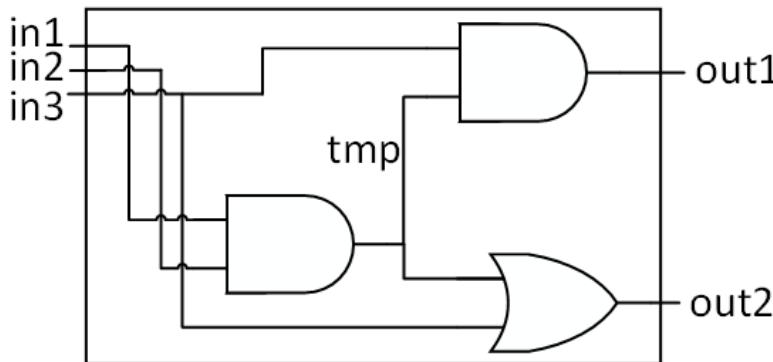
Architecture [architecture dataflow of esempio1 is
begin
 out1 <= in1 and in2 and in3;
 out2 <= (in1 and in2) or in3;
end dataflow;



- Un'altra implementazione della architecture dell'esempio 1:

```
architecture dataflow of esempio1 is
    signal tmp : std_logic := '0';
begin
    tmp <= in1 and in2;
    out1 <= tmp and in3;
    out2 <= tmp or in3;
end dataflow;
```

- Il segnale rappresenta un collegamento interno al componente



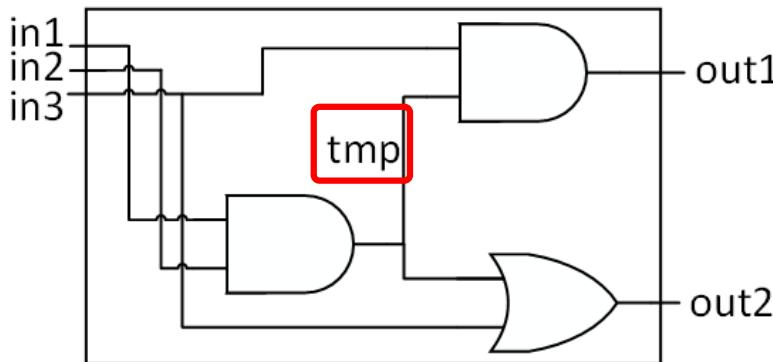


- Un'altra implementazione della architecture dell'esempio 1:

```
architecture dataflow of esempio1 is
    signal tmp : std_logic := '0';
begin
    tmp <= in1 and in2;
    out1 <= tmp and in3;
    out2 <= tmp or in3;
end dataflow;
```

Dichiarazione di un segnale
(da specificare prima di
begin)

- Il segnale rappresenta un collegamento interno al componente



- Un'altra implementazione della architecture dell'esempio 1:

```
architecture dataflow of esempio1 is
    signal tmp : std_logic := '0';
begin
    tmp <= in1 and in2;
    out1 <= tmp and in3;
    out2 <= tmp or in3;
end dataflow;
```

`:= '0'`

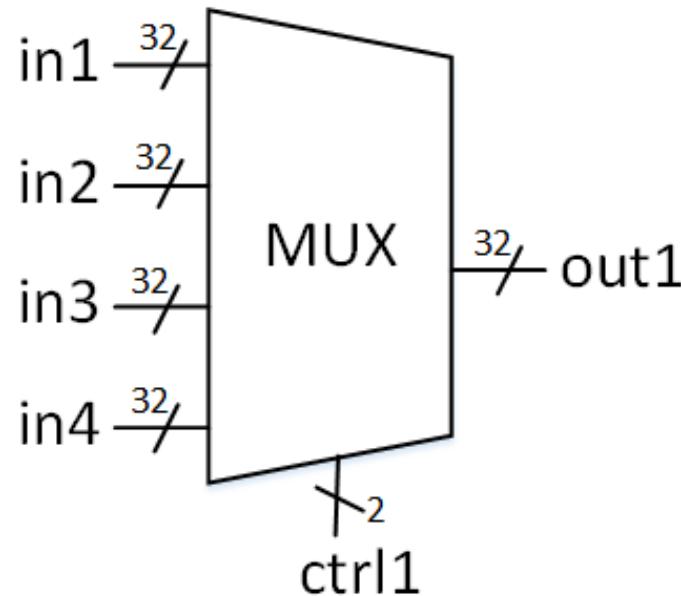
L'inizializzazione
del segnale
I valori `std_logic` si
indicano tra singoli apici

- L'inizializzazione del segnale è facoltativa ed è considerata soltanto in simulazione per poter dare un valore ad inizio simulazione
- Lo stesso segnale NON può comparire sia alla sinistra che alla destra dell'assegnamento nella stessa equazione logica (loop combinatorio!)



Esempio di circuito 2

- Vogliamo specificare un multiplexer con 4 ingressi dati, dove ciascuna ingresso dati (e l'uscita) è composto da un bus a 32 bit



- La entity del circuito di esempio 2:

```
entity esempio2 is
  port(
    in1, in2, in3, in4: in std_logic_vector(31 downto 0);
    ctrl1: in std_logic_vector(1 downto 0);
    out1 : out std_logic_vector(31 downto 0)
  );
end esempio2;
```

- La entity del circuito di esempio 2:

```
entity esempio2 is
  port(
    in1, in2, in3, in4: in std_logic_vector(31 downto 0);
    ctrl1: in std_logic_vector(1 downto 0);
    out1 : out std_logic_vector(31 downto 0)
  );
end esempio2;
```

- Il tipo di dato **std_logic_vector** serve per rappresentare un vettore (un bus) di valori **std_logic**
- L'intervallo degli indici (estremi inclusi) viene specificato tramite le parole chiave **downto** (intervallo decrescente) o **to** (intervallo crescente)



- La architecture del circuito di esempio 2:

```
architecture dataflow of esempio2 is
begin
```

```
    out1 <= in1 when ctrl1 = "00" else
                  in2 when ctrl1 = "01" else
                  in3 when ctrl1 = "10" else
                  in4;
end dataflow;
```



- La architecture del circuito di esempio 2:

```
architecture dataflow of esempio2 is
begin
```

```
    out1 <= in1 when ctrl1 = "00" else
                in2 when ctrl1 = "01" else
                in3 when ctrl1 = "10" else
                in4;
```

```
end dataflow;
```

- Istruzione di assegnamento condizionale
- La condizione restituisce **true** o **false** (tipo **boolean**)
- Attenzione: un valore **boolean** non può essere assegnato ad un segnale **std_logic** (VHDL è un linguaggio formalmente tipizzato!)



- La architecture del circuito di esempio 2:
architecture dataflow of esempio2 is begin

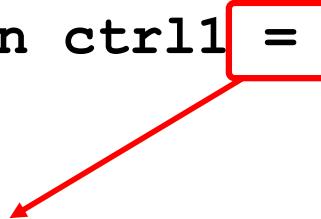
```
out1 <= in1 when ctrl1 = "00" else
               in2 when ctrl1 = "01" else
               in3 when ctrl1 = "10" else
               in4;
end dataflow;
```

- L'assegnamento corrispondente al primo risultato **true**
- È necessario che le condizioni coprano tutti i casi possibili
 - Per un circuito combinatorio ad ogni combinazione di valori di ingressi è definita l'uscita
 - Quindi è necessario specificare l'ultimo **else**



- La architecture del circuito di esempio 2:
architecture dataflow of esempio2 is begin

```
    out1 <= in1 when ctrl1 = "00" else
                  in2 when ctrl1 = "01" else
                  in3 when ctrl1 = "10" else
                  in4;
end dataflow;
```



- I tipi **std_logic** e **std_logic_vector** supportano le operazioni relazionali **=, /=, <, >, <=, >=**
- L'operazione viene eseguita bit per bit da sinistra verso destra (come se i vettori rappresentassero dei valori binari naturali)
- I vettori operandi devono avere la stessa dimensione
 - Tralasciamo il caso di operandi di dimensione diversa



- La architecture del circuito di esempio 2:

```
architecture dataflow of esempio2 is
begin
```

```
    out1 <= in1 when ctrl1 = "00" else
                in2 when ctrl1 = "01" else
                in3 when ctrl1 = "10" else
                in4;
```

```
end dataflow;
```

- I valori **std_logic_vector** sono indicati tra doppi apici



- Altra architecture per il circuito di esempio 2:

```
architecture dataflow of esempio2 is
begin
    with ctrl1 select
        out1 <= in1 when "00",
                    in2 when "01",
                    in3 when "10",
                    in4 when others;
end dataflow;
```



- Altra architecture per il circuito di esempio 2:
architecture dataflow of esempio2 is begin

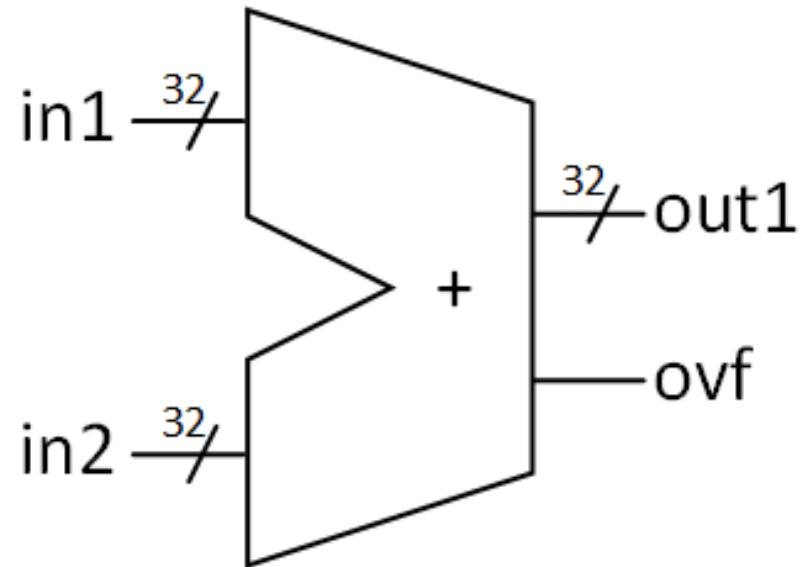
```
with ctrl1 select
    out1 <= in1 when "00",
                in2 when "01",
                in3 when "10",
                in4 when others;
end dataflow;
```

- Istruzione di assegnamento selettivo
- Permette di rappresentare agevolmente le tabelle delle verità
- Attenzione:
 - I vari casi specificati nella clausola **when** devono essere mutuamente esclusivi
 - È possibile elencare più valori in una clausola **when** separati dal simbolo |
 - **Others** rappresenta tutti gli altri casi non elencati (è necessario specificarlo come l'**else** dell'assegnamento condizionale)



Esempio di circuito 3

- Vogliamo specificare un circuito combinatorio esegue la somma di due valori in ingresso a 32 bit codificati in complemento a 2 e produce in uscita il risultato dell'operazione a 32 bit ed un segnale di overflow





- La entity del circuito di esempio 3:

```
entity esempio3 is
  port(
    in1, in2: in std_logic_vector(31 downto 0);
    out1 : out std_logic_vector(31 downto 0);
    ovf : out std_logic
  );
end esempio3;
```

- **Std_logic_vector** non supporta le operazioni aritmetiche
- Il VHDL ha altri due tipi di dato
 - **unsigned** per rappresentare numeri interi binari naturali
 - **signed** per rappresentare numeri interi binari relativi (codificati in complemento a due)
- I tipi **signed** ed **unsigned** definiscono le operazioni aritmetiche e relazionali sui due insiemi rappresentati
- Per poter utilizzare i tipi **signed** ed **unsigned** è necessario includere la libreria

```
use ieee.numeric_std.all;
```

- La architecture del circuito di esempio 3:

```
architecture dataflow of esempio3 is
    signal sum : SIGNED(31 downto 0);
    signal msb : std_logic;
begin
    sum <= SIGNED(in1) + SIGNED(in2);
    out1 <= std_logic_vector(sum);
    msb <= std_logic(sum(31));
    ovf <= (in1(31) and in2(31) and not msb) or
            (not in1(31) and not in2(31) and msb);
end dataflow;
```

- La architecture del circuito di esempio 3:

```
architecture dataflow of esempio3 is
    signal sum : SIGNED(31 downto 0);
    signal msb : std_logic;
begin
    sum <= SIGNED(in1) + SIGNED(in2);
    out1 <= std_logic_vector(sum);
    msb <= std_logic(sum(31));
    ovf <= (in1(31) and in2(31) and not msb) or
            (not in1(31) and not in2(31) and msb);
end dataflow;
```

- Dichiarazione di un segnale di tipo **signed**
 - È necessario specificare l'intervallo degli indici come nel caso del tipo **std_logic_vector**

- La architecture del circuito di esempio 3:

```
architecture dataflow of esempio3 is
    signal sum : SIGNED(31 downto 0);
    signal msb : std_logic;
begin
    sum <= SIGNED(in1) + SIGNED(in2);
    out1 <= std_logic_vector(sum);
    msb <= std_logic(sum(31));
    ovf <= (in1(31) and in2(31) and not msb) or
            (not in1(31) and not in2(31) and msb);
end dataflow;
```

- Il VHDL è un linguaggio fortemente tipizzato
 - È necessario eseguire un cast esplicito in modo tale da eseguire le operazioni tra tipi compatibili
 - **Std_logic_vector** e **signed/unsigned** non sono tipi compatibili

- La architecture del circuito di esempio 3:

```
architecture dataflow of esempio3 is
    signal sum : SIGNED(31 downto 0);
    signal msb : std_logic;
begin
    sum <= SIGNED(in1) + SIGNED(in2);
    out1 <= std_logic_vector(sum);
    msb <= std_logic(sum(31));
    ovf <= (in1(31) and in2(31) and not msb) or
            (not in1(31) and not in2(31) and msb);
end dataflow;
```

Cast da **signed** a
std_logic_vector
(con stessa dimensione)

Cast da **std_logic_vector**
a **signed** (con stessa
dimensione)

- La architecture del circuito di esempio 3:

```
architecture dataflow of esempio3 is
    signal sum : SIGNED(31 downto 0);
    signal msb : std_logic;
begin
    sum <= SIGNED(in1) + SIGNED(in2);
    out1 <= std_logic_vector(sum);
    msb <= std_logic(sum(31));
    ovf <= (in1(31) and in2(31) and not msb) or
            (not in1(31) and not in2(31) and msb);
end dataflow;
```

- I tipi di dato **numeric** definiscono le operazioni aritmetiche e relazionali sui domini rappresentati
 - Non tutte le operazioni (per esempio la divisione) sono sintetizzabili; alle volte dipende dallo strumento di sintesi

- La architecture del circuito di esempio 3:

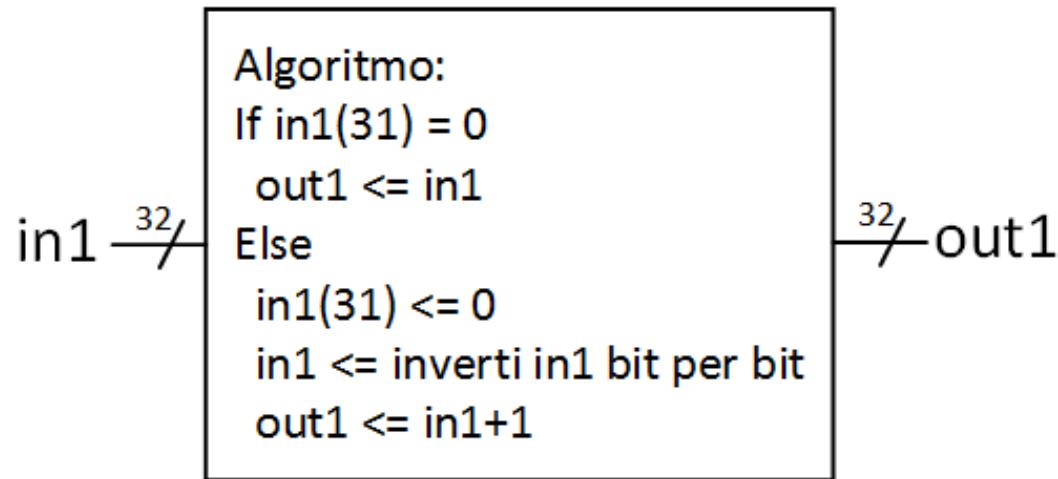
```
architecture dataflow of esempio3 is
    signal sum : SIGNED(31 downto 0);
    signal msb : std_logic;
begin
    sum <= SIGNED(in1) + SIGNED(in2);
    out1 <= std_logic_vector(sum);
    msb <= std_logic(sum(31));
    ovf <= (in1(31) and in2(31) and not msb) or
            (not in1(31) and not in2(31) and msb);
end dataflow;
```

- L'indirizzamento di un sottoinsieme dei valori in un segnale **std_logic_vector** o **numeric** si esegue con le parentesi tonde
- È possibile specificare un intervallo di valori mediante le parole chiave **to** e **downto**



Esempio di circuito 4

- Vogliamo specificare un circuito combinatorio converte un valore a 32 bit che rappresenta un numero espresso in codifica modulo e segno nell'equivalente in complemento a 2





- La entity del circuito di esempio 4:

```
entity esempio4 is
  port(
    in1: in std_logic_vector(31 downto 0);
    out1 : out std_logic_vector(31 downto 0)
  );
end esempio4;
```



- La architecture del circuito di esempio 4:

```
architecture dataflow of esempio4 is
    signal cpl1, inv1 : std_logic_vector(31 downto 0);
    constant vdd32 :
        std_logic_vector(31 downto 0) := (others => '1');
begin
    cpl1 <= vdd32 xor ('0' & in1(30 downto 0));
    inv1 <= std_logic_vector(signed(cpl1) + 1);
    out1 <= in1 when in1(31) = '0' else
        inv1;
end dataflow;
```

- La architecture del circuito di esempio 4:

```
architecture dataflow of esempio4 is
    signal cpl1, inv1 : std_logic_vector(31 downto 0);
    constant vdd32 :
        std_logic_vector(31 downto 0) := (others => '1');
begin
    cpl1 <= vdd32 xor ('0' & in1(30 downto 0));
    inv1 <= std_logic_vector(signed(cpl1) + 1);
    out1 <= in1 when in1(31) = '0' else
        inv1;
end dataflow;
```

- Definizione di un segnale costante

- La architecture del circuito di esempio 4:

```
architecture dataflow of esempio4 is
    signal cpl1, inv1 : std_logic_vector(31 downto 0);
    constant vdd32 :
        std_logic_vector(31 downto 0) := (others => '1');
begin
    cpl1 <= vdd32 xor ('0' & in1(30 downto 0));
    inv1 <= std_logic_vector(signed(cpl1) + 1);
    out1 <= in1 when in1(31) = '0' else
        inv1;
end dataflow;
```

- Inizializzazione della costante

- La architecture del circuito di esempio 4:

```
architecture dataflow of esempio4 is
    signal cpl1, inv1 : std_logic_vector(31 downto 0);
    constant vdd32 :
        std_logic_vector(31 downto 0) := (others => '1');
begin
    cpl1 <= vdd32 xor ('0' & in1(30 downto 0));
    inv1 <= std_logic_vector(signed(cpl1) + 1);
    out1 <= in1 when in1(31) = '0' else
        inv1;
end dataflow;
```

- In questo modo viene assegnato a tutti i bit il valore 1



- **constant foo : std_logic_vector(31 downto 0) := (1 downto 0 => '1', 4 => '1', others => '0');**
 - Si specificano gli indici di ciascun sotto-assegnamento
 - È possibile specificare intervalli con le parole chiave **to** e **downto** per assegnare lo stesso valore ad un bit a più indici
 - È possibile utilizzare la parola chiave **others** per specificare tutti gli altri bit



- La architecture del circuito di esempio 4:

```
architecture dataflow of esempio4 is
    signal cpl1, inv1 : std_logic_vector(31 downto 0);
    constant vdd32 :
        std_logic_vector(31 downto 0) := (others => '1');
begin
    cpl1 <= vdd32 xor ('0' & in1(30 downto 0));
    inv1 <= std_logic_vector(signed(cpl1) + 1);
    out1 <= in1 when in1(31) = '0' else
        inv1;
end dataflow;
```

Operatore di concatenamento tra due segnali

È possibile esprimere valori **numeric** in formato decimale



- La architecture del circuito di esempio 4:

```
architecture dataflow of esempio4 is
    signal cpl1, inv1 : std_logic_vector(31 downto 0);
    constant vdd32 :
        std_logic_vector(31 downto 0) := (others => '1');
begin
    cpl1 <= vdd32 xor ('0' & in1(30 downto 0));
    inv1 <= std_logic_vector(signed(cpl1) + 1);
    out1 <= in1 when in1(31) = '0' else
        inv1;
end dataflow;
```

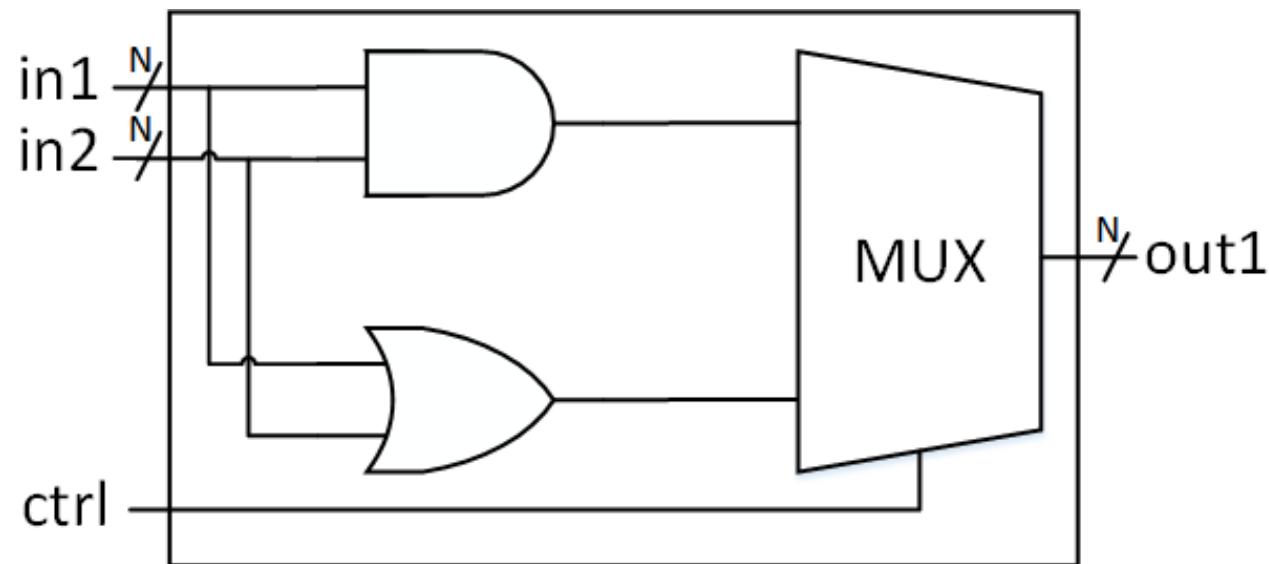
Equivalente a

```
cpl1 <= not('0' & in1(30 downto 0));
```



Esempio di circuito 5

- Vogliamo specificare un modulo che esegue le operazioni logiche and e or in base ad un segnale di controllo ad un bit su due operandi a N bit. Si vuole lasciare parametrico il valore N



- La entity del circuito di esempio 5:

```
entity esempio5 is
  generic (
    N : integer := 5
  );
  port(
    in1, in2 : in std_logic_vector(N-1 downto 0);
    ctrl : in std_logic;
    out1 : out std_logic_vector(N-1 downto 0)
  );
end esempio5;
```

- La entity del circuito di esempio 5:

```
entity esempio5 is
  generic (
    N : integer := 5
  );
  port(
    in1, in2 : in std_logic_vector(N-1 downto 0);
    ctrl : in std_logic;
    out1 : out std_logic_vector(N-1 downto 0)
  );
end esempio5;
```

Specifica di un parametro
generic di tipo intero

Utilizzo del **generic** per rendere
parametrica l'interfaccia

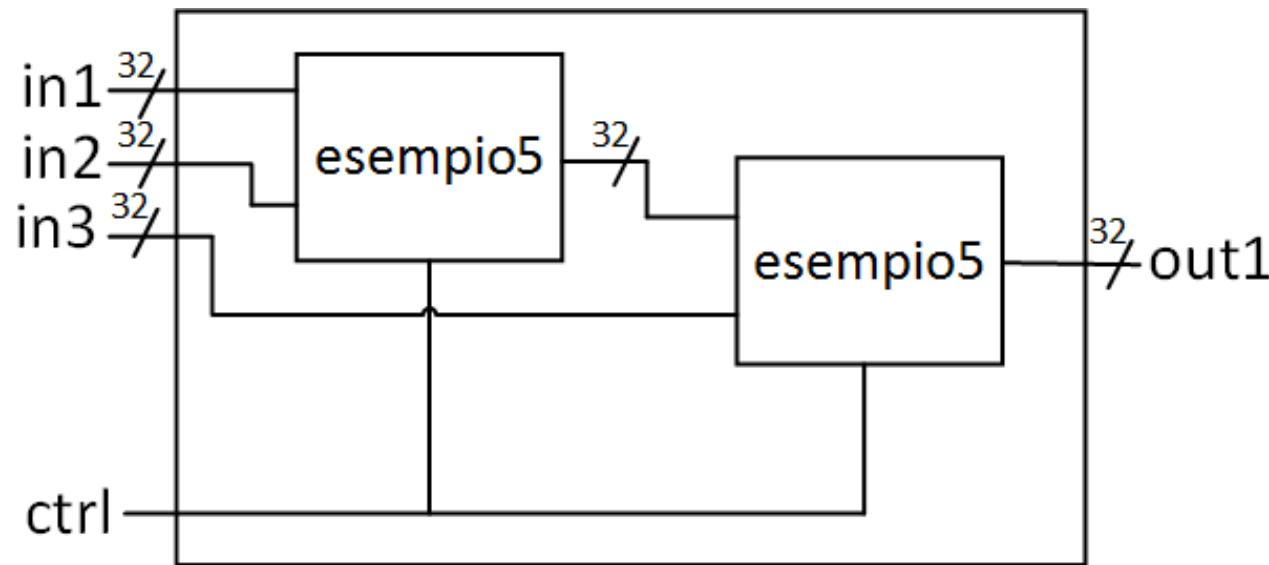
- La architecture del circuito di esempio 5:

```
architecture dataflow of esempio5 is
begin
    out1 <= in1 and in2 when ctrl = '0' else
                    in1 or in2;
end dataflow;
```

- La architecture non subisce variazioni in questo caso rispetto all'equivalente specifica non parametrica
 - In altri casi potrebbe essere necessario l'utilizzo del parametro N, per esempio per dichiarare segnali interni della stessa dimensione delle porte



- Vogliamo specificare un modulo che esegue le operazioni logiche and e or in base ad un segnale di controllo ad un bit su tre operandi a 32 bit. Si vuole riutilizzare il componente specificato nell'esempio 5





- La entity del circuito di esempio 6:

```
entity esempio6 is
  port(
    in1, in2, in3 : in std_logic_vector(31 downto 0);
    ctrl : in std_logic;
    out1 : out std_logic_vector(31 downto 0)
  );
end esempio6;
```



- La architecture del circuito di esempio 6:

```
architecture structural of esempio6 is
    signal tmp : std_logic_vector(31 downto 0);

component esempio5 is
    generic (N : integer := 5);
    port(
        in1, in2 : in std_logic_vector(N-1 downto 0);
        ctrl : in std_logic;
        out1 : out std_logic_vector(N-1 downto 0)
    );
end component;

begin
    --...
```



- La architecture del circuito di esempio 6:

```
architecture structural of esempio6 is
    signal tmp : std_logic_vector(31 downto 0);
```

```
component esempio5 is
    generic (N : integer := 5);
    port(
        in1, in2 : in std_logic_vector(N-1 downto 0);
        ctrl : in std_logic;
        out1 : out std_logic_vector(N-1 downto 0)
    );
end component;
```

```
begin
--...
```

- I componenti che si vogliono utilizzare vanno elencati prima del **begin**
- Il component non è altro che la entity del modulo



- La architecture del circuito di esempio 6 (seconda parte):

```
architecture structural of esempio6 is
--...
begin
    es1 : esempio5
        generic map(32)
        port map(in1, in2, ctrl, tmp);

    es2 : esempio5
        generic map(N => 32)
        port map(in1 => tmp, in2 => in3,
                  ctrl => ctrl, out1 => out1);
end structural;
```



- La architecture del circuito di esempio 6 (seconda parte):

```
architecture structural of esempio6 is
```

```
--...
```

```
begin
```

```
    es1 : esempio5
        generic map(32)
        port map(in1, in2, ctrl, tmp);
```

Istanziazione del componente

```
    es2 : esempio5
```

```
        generic map(N => 32)
```

```
        port map(in1 => tmp, in2 => in3,
```

```
                      ctrl => ctrl, out1 => out1);
```

```
end structural;
```

- Durante l'istanziazione del componente bisogna specificare il nome dell'istanza ed i collegamenti alle sue porte



- La architecture del circuito di esempio 6 (seconda parte):
architecture structural of esempio6 is

```
-- . . .

begin
    es1 : esempio5
        generic map(32)
        port map(in1, in2, ctrl, tmp);

    es2 : esempio5
        generic map(N => 32)
        port map(in1 => tmp, in2 => in3,
                  ctrl => ctrl, out1 => out1);
end structural;
```

Nome dell'istanza

Nome del componente



- La architecture del circuito di esempio 6 (seconda parte):

```
architecture structural of esempio6 is
```

```
--...
```

```
begin
```

```
    es1 : esempio5
```

```
        generic map(32)
```

```
            port map(in1, in2, ctrl, tmp);
```

```
    es2 : esempio5
```

```
        generic map(N => 32)
```

```
            port map(in1 => tmp, in2 => in3,
```

```
                      ctrl => ctrl, out1 => out1);
```

```
end structural;
```

- Il **generic map** non va specificato se il componente non ha nessun parametro **generic**
- Può essere omesso se si vuole usare il valore di default specificato

Assegnamento
posizionale del
valore al parametro

Assegnamento
nominale del valore
al parametro



- La architecture del circuito di esempio 6 (seconda parte):

```
architecture structural of esempio6 is
```

```
--...
```

```
begin
```

```
    es1 : esempio5
```

```
        generic map(32)
```

```
        port map(in1, in2, ctrl, tmp);
```

Assegnamento
posizionale dei
segnali (o costanti)
alle porte

```
es2 : esempio5
```

```
        generic map(N => 32)
```

```
        port map(in1 => tmp, in2 => in3,  
                  ctrl => ctrl, out1 => out1);
```

```
end structural;
```

La parola chiave **open** permette di
lasciare non connessa una porta

Assegnamento nominale dei
segnali (o costanti) alle porte



- La architecture del circuito di esempio 6 (seconda parte):

```
architecture structural of esempio6 is
--...
begin
    es1 : esempio5
        generic map(32)
        port map(in1, in2, ctrl, tmp);
    es2 : esempio5
        generic map(N => 32)
        port map(in1 => tmp, in2 => in3,
                  ctrl => ctrl, out1 => out1);
end structural;
```

Istruzioni concorrenti

- Ogni istanza agirà come un modulo concorrente a tutti gli altri (come succedeva con le equazioni logiche in una specifica dataflow)



- Un'implementazione alternativa del circuito di esempio 6:

```
architecture structural of esempio6 is
```

```
--...
```

```
begin
```

```
    es1 : esempio5
    generic map(32)
    port map(in1, in2, ctrl, tmp);
```

Strutturale

```
        out1 <= in3 and tmp when ctrl = '0' else
                           in3 or tmp;
```

Dataflow

```
end structural;
```

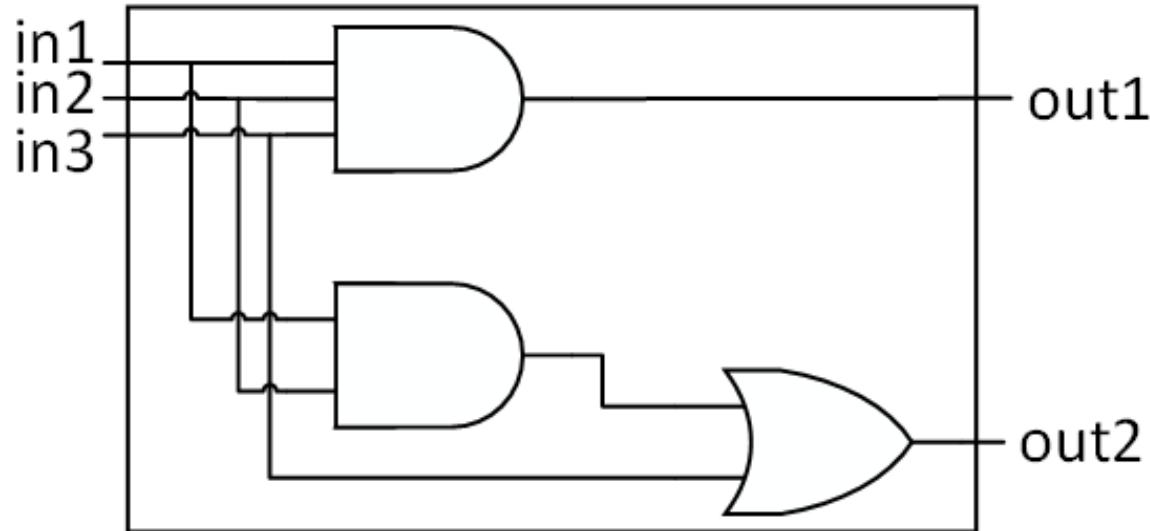
Istruzioni concorrenti

- È possibile specificare una descrizione mista dataflow-strutturale (e comportamentale)



Esempio di circuito 7

- Riprendiamo in considerazione il circuito di esempio 1: vogliamo scrivere una specifica comportamentale del circuito combinatorio multi-uscita in esame





- La entity del circuito di esempio 7:

```
entity esempio7 is
  port(
    in1, in2, in3: in std_logic;
    out1 : out std_logic;
    out2 : out std_logic
  );
end esempio7;
```

- (non è variato niente rispetto all'esempio 1)



- Un'implementazione del circuito di esempio 7:

```
architecture behavioral of esempio7 is
```

```
begin
    process(in1, in2, in3)
        variable tmp1, tmp2 : std_logic;
    begin
        tmp1 := in3 and in2;
        out1 <= tmp1 and in1;
        tmp2 := in1 and in2;
        out2 <= tmp2 or in3;
    end process;
end architecture;
```



- Un'implementazione del circuito di esempio 7:
architecture behavioral of esempio7 is

```
begin
  process(in1, in2, in3)
    variable tmp1, tmp2 : std_logic;
  begin
    tmp1 := in3 and in2;
    out1 <= tmp1 and in1;
    tmp2 := in1 and in2;
    out2 <= tmp2 or in3;
  end process;
end architecture;
```

- Il costrutto **process** permette di descrivere il comportamento di un circuito in forma algoritmica



architecture behavioral of esempio7 is

```
begin
    process(in1, in2, in3)
        variable tmp1, tmp2 : std_logic;
    begin
        tmp1 := in3 and in2;
        out1 <= tmp1 and in1;
        tmp2 := in1 and in2;
        out2 <= tmp2 or in3;
    end process;
end architecture;
```

- La descrizione comportamentale è ad un livello di astrazione maggiore rispetto a quelle dataflow e strutturale
- Non c'è una corrispondenza diretta tra la realizzazione algoritmica e la struttura interna del circuito descritto



- Un'implementazione del circuito di esempio 7:

```
architecture behavioral of esempio7 is
```

```
begin
```

```
process(in1, in2, in3)
```

```
variable tmp1, tmp2 : std_logic;
```

```
begin
```

```
tmp1 := in3 and in2;  
out1 <= tmp1 and in1;  
tmp2 := in1 and in2;  
out2 <= tmp2 or in3;
```

```
end process;
```

```
end architecture;
```

Facoltativamente si può assegnare un nome al processo:

```
prova: process(in1, in2, in3)
```

Lista di sensibilità

Dichiarazione delle variabili

Descrizione algoritmica della funzionalità implementata



In simulazione:

1. Il processo viene risvegliato quando si verifica una variazione in uno dei segnali specificati nella lista di sensibilità
 2. Il corpo del processo viene eseguito in modo strettamente sequenziale ed atomicamente
 3. Tutti i segnali che hanno subito un assegnamento vengono aggiornati **SOLO** al termine dell'esecuzione del corpo del processo
 - Se sono stati eseguiti più assegnamenti allo stesso segnale solo l'ultimo risulta valido
- ATTENZIONE:
 - Assegnamenti a segnali durante l'esecuzione di un processo non sono istantanei
 - Se nella stessa esecuzione del processo si legge un segnale dopo che ha subito un assegnamento, verrà letto il valore iniziale



Esecuzione di un processo

- Un'implementazione del circuito di esempio 7:

```
architecture behavioral of esempio7 is
```

```
begin
```

```
process(in1, in2, in3)
```

```
variable tmp1, tmp2 : std_logic;
```

```
begin
```

```
tmp1 := in3 and in2;
```

```
out1 <= tmp1 and in1;
```

```
tmp2 := in1 and in2;
```

```
out2 <= tmp2 or in3;
```

```
end process;
```

```
end architecture;
```

1. Variazione in uno dei segnali specificati

2. Esecuzione del corpo del processo

3. Aggiornamento dei segnali (**out1** e **out2** sono aggiornati effettivamente solo dopo l'esecuzione)



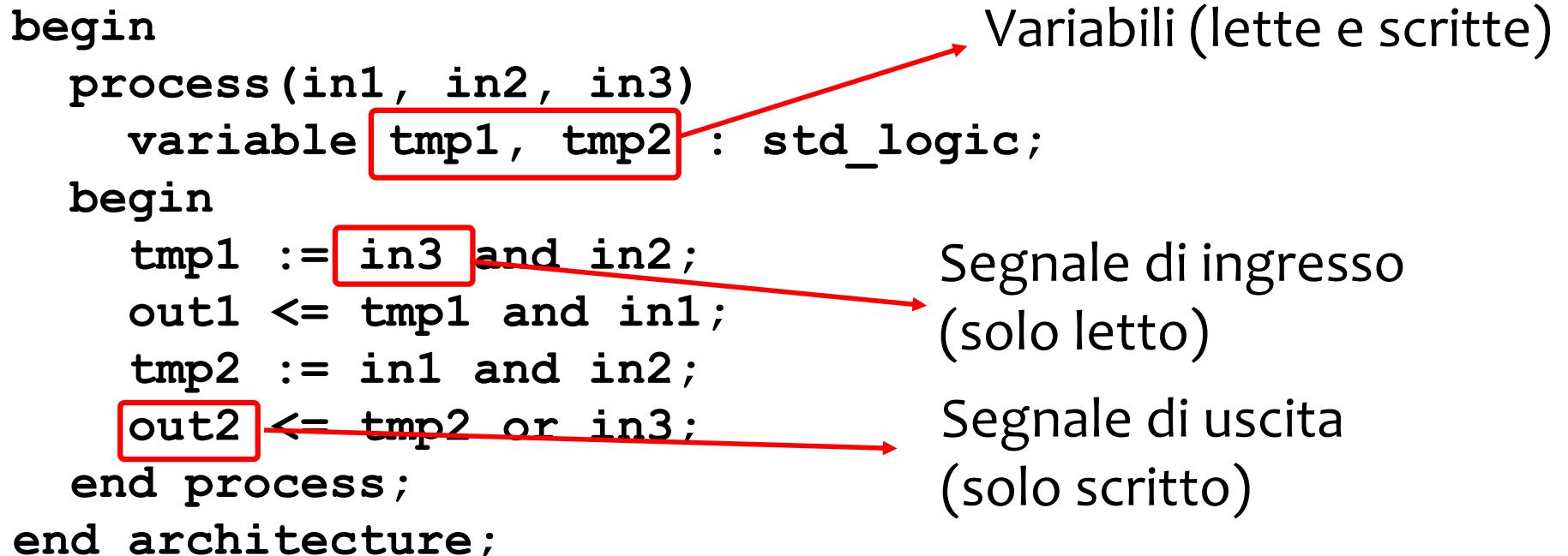
- Un'implementazione del circuito di esempio 7:
architecture behavioral of esempio7 is

```
begin
  process(in1, in2, in3)
    variable tmp1, tmp2 : std_logic;
  begin
    tmp1 := in3 and in2;
    out1 <= tmp1 and in1;
    tmp2 := in1 and in2;
    out2 <= tmp2 or in3;
  end process;
end architecture;
```

Variabili (lette e scritte)

Segnale di ingresso (solo letto)

Segnale di uscita (solo scritto)



- Il processi comunicano con l'esterno tramite i segnali
- Lavorano all'interno mediante variabili

- Un'implementazione del circuito di esempio 7:

```
architecture behavioral of esempio7 is
```

```
begin
```

```
process(in1, in2, in3)
```

```
variable tmp1, tmp2 : std_logic;
```

```
begin
```

```
tmp1 := in3 and in2;
```

```
out1 <= tmp1 and in1;
```

```
tmp2 := in1 and in2;
```

```
out2 <= tmp2 or in3;
```

```
end process;
```

```
end architecture;
```

- Dichiarazione di una variabile
- La visibilità è limitata al processo

- Assegnamento a variabili
- L'assegnamento è istantaneo

- Le variabili rappresentano un concetto più astratto rispetto ai segnali

- Non rappresentano necessariamente un collegamento

- Un'implementazione del circuito di esempio 7:

```
architecture behavioral of esempio7 is
```

```
begin
  process(in1, in2, in3)
    variable tmp1 : std_logic;
  begin
    tmp1 := in3 and in2;
    out1 <= tmp1 and in1;
    tmp1 := in1 and in2;
    out2 <= tmp1 or in3;
  end process;
end architecture;
```

- **tmp2** non è necessaria; si può riutilizzare **tmp1**
- Come si nota la variabile non corrisponde ad un collegamento fisico
- Le variabili rappresentano un concetto più astratto rispetto ai segnali
 - Non rappresentano necessariamente un collegamento

	Segnali	Variabili
Dichiarazione	Parte dichiarativa di un'architettura	Parte dichiarativa di un processo
Assegnamento	\leq	$:=$
Inizializzazione		$:=$
Natura dell'assegnamento	Concorrente	Sequenziale
Utilizzo	In architetture e processi	Solo in processi
Effetto dell'assegnamento	Non immediato (in base ai “tempi” della simulazione)	Immediato



- Un'implementazione alternativa del circuito di esempio 7:

```
architecture behavioral of esempio7 is
signal tmp2 : std_logic;
begin
    process(in1, in2, in3)
        variable tmp1 : std_logic;
    begin
        tmp1 := in1 and in2;
        out1 <= tmp1 and in3;
        tmp2 <= tmp1;
    end process;
    out2 <= tmp2 or in3;
end architecture;
```

Comportamentale

Dataflow



- Un'implementazione alternativa del circuito di esempio 7:

```
architecture behavioral of esempio7 is
signal tmp2 : std_logic;
begin
    process(in1, in2, in3)
        variable tmp1 : std_logic;
    begin
        tmp1 := in1 and in2;
        out1 <= tmp1 and in3;
        tmp2 <= tmp1;
    end process;
    out2 <= tmp2 or in3;
end architecture;
```

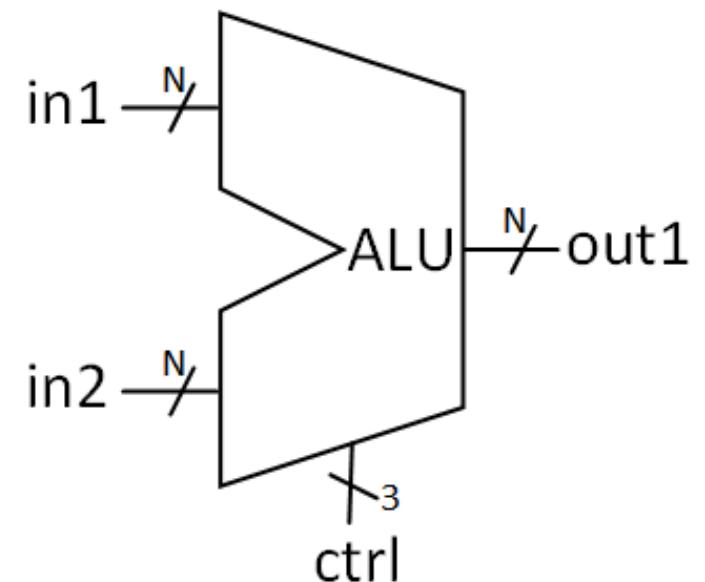
Istruzioni concorrenti

Istruzioni sequenziali

- Le istruzioni sono eseguite sequenzialmente all'interno di un processo
- Ogni processo è visto dall'esterno come una sola istruzione concorrente



- Vogliamo specificare un'unità aritmetico-logica in grado di eseguire le operazioni and, or, +, -, = su due valori in ingresso ad N bit. Per le operazioni aritmetiche assumere che i valori in ingresso siano codificati in complemento a due. Un ingresso di controllo a 3 bit permette di selezionare l'operazione (and:000, or:001, +:010, -:011, =:100); nel caso venga specificato il codice di un'operazione non supportata il modulo presenta in ingresso un vettore di 0





- La entity del circuito di esempio 8:

```
entity esempio8 is
  generic (
    N : integer := 5
  );
  port(
    in1, in2: in std_logic_vector(N-1 downto 0);
    ctrl: in std_logic_vector(2 downto 0);
    out1: out std_logic_vector(N-1 downto 0)
  );
end esempio8;
```

- La architecture del circuito di esempio 8:

```
architecture behavioral of esempio8 is
begin
    process(in1, in2, ctrl)
        constant GROUND : std_logic_vector(N-1 downto 0)
                            := (others => '0');
    begin
        if ctrl = "000" then
            out1 <= in1 and in2;
        elsif ctrl = "001" then
            out1 <= in1 or in2;
        elsif ctrl = "010" then
            out1 <= std_logic_vector(SIGNED(in1) + SIGNED(in2));
        -- ...
    end process;
end;
```

- La architecture del circuito di esempio 8:

```
architecture behavioral of esempio8 is
begin
    process(in1, in2, ctrl)
        constant GROUND : std_logic_vector(N-1 downto 0)
                            := (others => '0');

    begin
        if ctrl = "000" then
            out1 <= in1 and in2;
        elsif ctrl = "001" then
            out1 <= in1 or in2;
        elsif ctrl = "010" then
            out1 <= std_logic_vector(SIGNED(in1) + SIGNED(in2));
        -- ...
    end process;
end behavioral;
```

Il costrutto **if** funziona come in qualsiasi linguaggio di programmazione

- La architecture del circuito di esempio 8 (seconda parte):

```
elsif ctrl = "011" then
    out1 <= std_logic_vector(SIGNED(in1) - SIGNED(in2));
elsif ctrl = "100" then
    if in1 = in2 then
        out1 <= (0 => '1', others => '0');
    else
        out1 <= (others => '0');
    end if;
else
    out1 <= GROUND;
end if;
end process;
end behavioral;
```

- La architecture del circuito di esempio 8 (seconda parte):

```
--  
    elsif ctrl = "011" then  
        out1 <= std_logic_vector(SIGNED(in1) - SIGNED(in2));  
    elsif ctrl = "100" then  
        if in1 = in2 then  
            out1 <= (0 => '1', others => '0');  
        else  
            out1 <= (others => '0');  
        end if;  
    else  
        out1 <= GROUND;  
    end if;  
end process;  
end behavioral;
```

Possiamo annidare istruzioni if

- La architecture del circuito di esempio 8 (seconda parte):

```
--  
  
    elsif ctrl = "011" then  
        out1 <= std_logic_vector(SIGNED(in1) - SIGNED(in2)) ;  
    elsif ctrl = "100" then  
        if in1 = in2 then  
            out1 <= (0 => '1', others => '0') ;  
        else  
            out1 <= (others => '0') ;  
        end if;  
    else  
        out1 <= GROUND ;  
    end if;  
end process;  
end behavioral;
```

- Come nel caso degli assegnamenti condizionali del dataflow, è necessario specificare l'ultimo **else**
- Inoltre, se un segnale è assegnato in un ramo di un **if**, **DEVE** esserci un assegnamento sullo stesso segnale in **TUTTI** altri rami dell'**if**

- Un'altra architecture del circuito di esempio 8:

```
architecture behavioral of esempio8 is
begin
    process(in1, in2, ctrl)
        constant GROUND : std_logic_vector(N-1 downto 0)
                        := (others => '0');
    begin
        case ctrl is
            when "000" =>
                out1 <= in1 and in2;
            when "001" =>
                out1 <= in1 or in2;
            when "010" =>
                out1 <= std_logic_vector(SIGNED(in1) + SIGNED(in2));
            --...
        end case;
    end process;
end;
```

- Un'altra architecture del circuito di esempio 8:

```
architecture behavioral of esempio8 is
begin
    process(in1, in2, ctrl)
        constant GROUND : std_logic_vector(N-1 downto 0)
                        := (others => '0');

    begin
        case ctrl is
            when "000" =>
                out1 <- in1 and in2; → Costrutto case
            when "001" =>
                out1 <= in1 or in2;
            when "010" =>
                out1 <= std_logic_vector(SIGNED(in1) + SIGNED(in2));
            -- ...
        end case;
    end process;
end;
```

- Un'altra architecture del circuito di esempio 8 (seconda parte):

```
when "011" =>
    out1 <= std_logic_vector(SIGNED(in1) - SIGNED(in2));
when "100" =>
    if in1 = in2 then
        out1 <= (0 => '1', others => '0');
    else
        out1 <= (others => '0');
    end if;
when others =>
    out1 <= GROUND;
end case;
end process;
end behavioral;
```

- Un'altra architecture del circuito di esempio 8 (seconda parte):

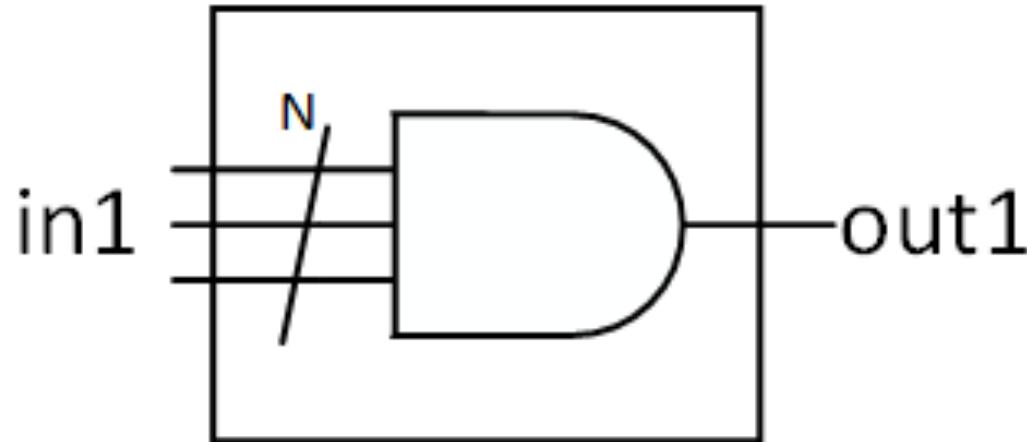
```
when "011" =>
    out1 <= std_logic_vector(SIGNED(in1) - SIGNED(in2));
when "100" =>
    if in1 = in2 then
        out1 <= (0 => '1', others => '0');
    else
        out1 <= (others => '0');
    end if;
when others =>
    out1 <= GROUND;
end case;
end process;
end behavioral;
```

- Come nel caso degli assegnamenti selettivi del dataflow, è necessario specificare il caso **others**
- Inoltre, se un segnale è assegnato in un ramo di un **case**, DEVE esserci un assegnamento sullo stesso segnale in **TUTTI** altri rami del **case**



Esempio di circuito 9

- Vogliamo realizzare un modulo che riceve in ingresso un segnale a N bit e produce in uscita l'and di tutti i singoli bit ricevuti





- La entity del circuito di esempio 9:

```
entity esempio9 is
  generic (
    N : integer := 5
  );
  port(
    in1: in std_logic_vector(N-1 downto 0);
    out1: out std_logic
  );
end esempio9;
```

- La architecture del circuito di esempio 9:

```
architecture behavioral of esempio9 is
begin
    process(in1)
        variable tmp : std_logic;
    begin
        tmp := in1(0);
        for i in 1 to N-1 loop
            tmp := tmp and in1(i);
        end loop;
        out1 <= tmp;
    end process;
end architecture;
```

- La architecture del circuito di esempio 9:

```
architecture behavioral of esempio9 is
begin
    process(in1)
        variable tmp : std_logic;
    begin
        tmp := in1(0);
        for i in 1 to N-1 loop
            tmp := tmp and in1(i);
        end loop;
        out1 <= tmp;
    end process;
end architecture;
```

Affinché il circuito sia realizzabile, il ciclo **for** deve iterare su un intervallo noto durante la specifica del circuito



- Cosa succede se non specifichiamo il ramo **else** di un'istruzione **if**? O più in generale se un segnale è assegnato solo in alcuni rami di un **if** ma non in tutti?

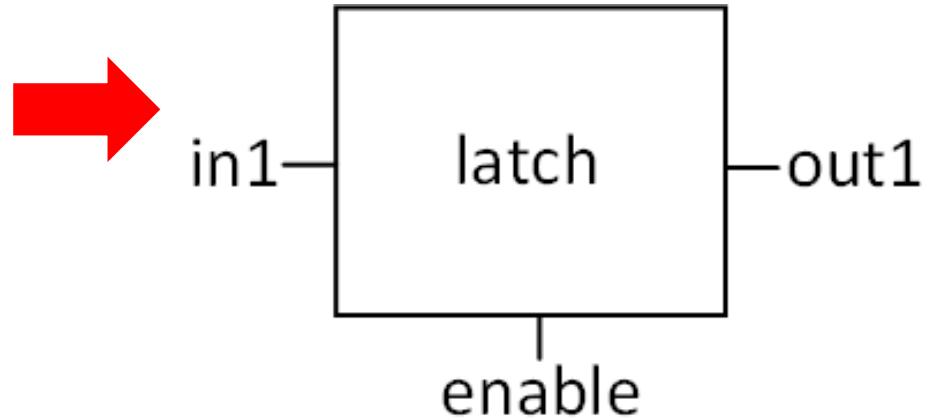
```
entity esempio10 is
port( in1 : in std_logic;
      enable : in std_logic;
      out1 : out std_logic
);
end esempio10;

architecture behavioral
of esempio10 is
begin
  process(in1, enable)
  begin
    if enable = '1' then
      out1 <= in1;
    end if;
  end process;
end behavioral;
```



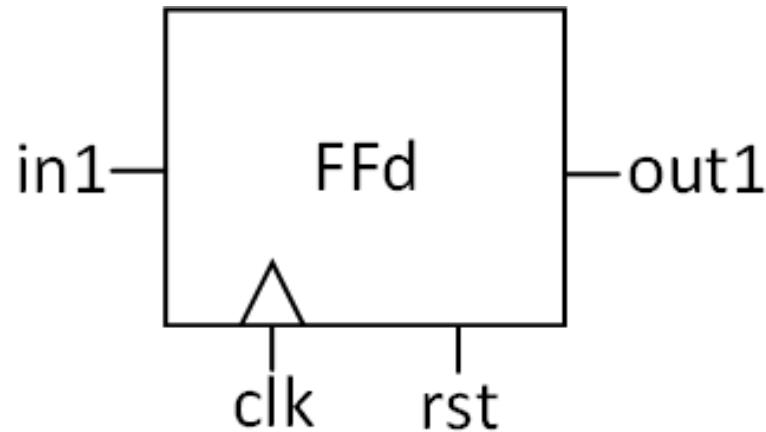
- Lo valore di **out1**
 - È aggiornato soltanto in specifiche condizioni
 - Negli altri casi rimane invariato
- Stiamo specificando un latch con segnale di enable!

```
architecture behavioral
  of esempio10 is
begin
  process(in1, enable)
  begin
    if enable = '1' then
      out1 <= in1;
    end if;
  end process;
end behavioral;
```





- Vogliamo realizzare un flip-flop di tipo D con reset asincrono



- Specifica di un flip-flop di tipo D con reset asincrono:

```
entity esempio11 is
port( in1 : in std_logic;
      clk, rst : in std_logic;
      out1 : out std_logic
);
end esempio11;

architecture behavioral
of esempio11 is
begin
  process(clk, rst)
begin
  if rst = '1' then
    out1 <= '0';
  elsif clk = '1' and
        clk'event then
    out1 <= in1;
  end if;
  end process;
end behavioral;
```



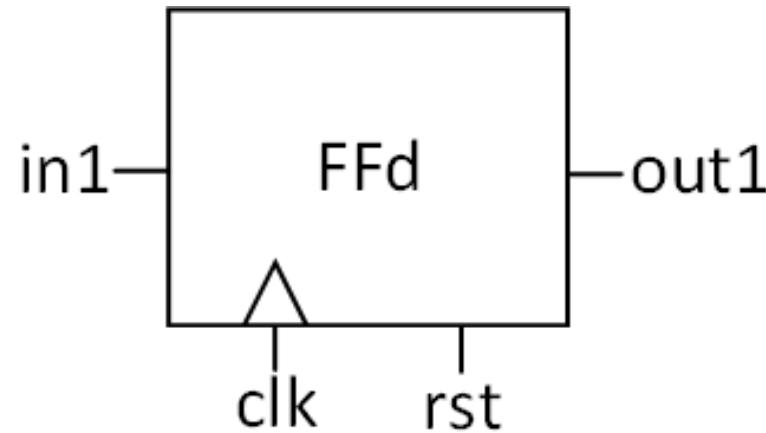
- Specifica di un flip-flop di tipo D con reset asincrono:

```
architecture behavioral
  of esempio11 is
begin
  process(clk, rst)
  begin
    if rst = '1' then
      out1 <= '0';
    elsif clk = '1' and
          clk'event then
      out1 <= in1;
    end if;
  end process;
end behavioral;
```

- Non è necessario specificare **in1** (lo stato si aggiorna soltanto quando cambiano **clk** e **rst**)
- Specifica di un reset asincrono
- **event** indica se c'è stato un cambiamento nel segnale
- L'intera condizione indica se si è verificato un fronte di salita
- La condizione può essere sostituita con l'equivalente **rising_edge (clk)**



- Vogliamo realizzare un flip-flop di tipo D con reset sincrono



- Specifica di un flip-flop di tipo D con reset sincrono:

```
entity esempio12 is
port( in1 : in std_logic;
      clk, rst : in std_logic;
      out1 : out std_logic
);
end esempio12;
```

```
architecture behavioral
of esempio12 is
begin
  process(clk, rst)
  begin
    if rising_edge(clk) then
      if rst = '1' then
        out1 <= '0';
      else
        out1 <= in1;
      end if;
    end if;
  end process;
end behavioral;
```

- Specifica di un flip-flop di tipo D con reset sincrono:

```
entity esempio12 is
port( in1 : in std_logic;
      clk, rst : in std_logic;
      out1 : out std_logic
);
end esempio12;
```

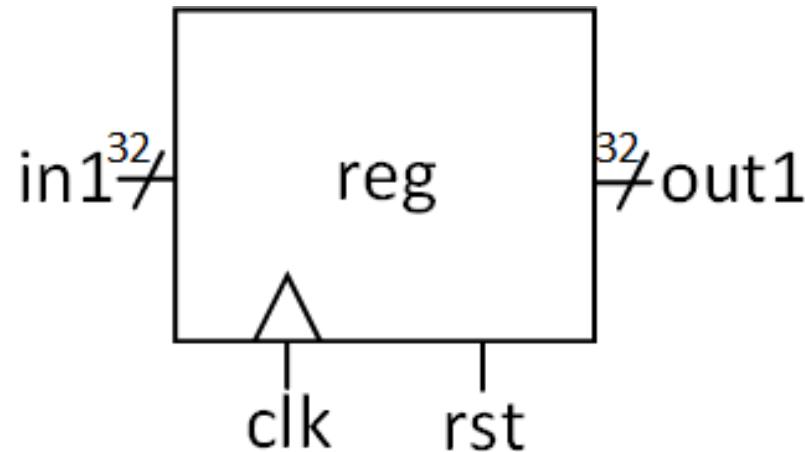
Specifiche del reset sincrono

```
architecture behavioral
of esempio12 is
begin
  process(clk, rst)
  begin
    if rising edge(clk) then
      if rst = '1' then
        out1 <= '0';
      else
        out1 <= in1;
      end if;
    end if;
  end process;
end behavioral;
```



Esempio di circuito 13

- Vogliamo realizzare un registro parallelo-parallelo ad 32 bit con reset asincrono



- Specifica del registro:

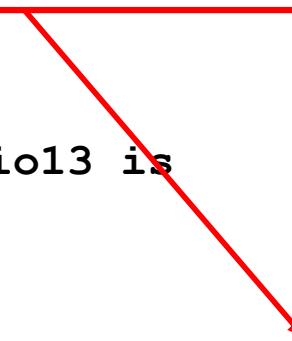
```
entity esempio13 is
  port( in1 : in std_logic_vector(31 downto 0) ;
        clk, rst : in std_logic;
        out1 : out std_logic_vector(31 downto 0)
      );
end esempio13;

architecture behavioral of esempio13 is
begin
  process(clk, rst)
  begin
    if rst = '1' then
      out1 <= (others => '0');
    elsif clk = '1' and
          clk'event then
      out1 <= in1;
    end if;
  end process;
end behavioral;
```

- Specifica del registro:

```
entity esempio13 is
port( in1 : in std_logic_vector(31 downto 0);
      clk, rst : in std_logic;
      out1 : out std_logic_vector(31 downto 0)
);
end esempio12;

architecture behavioral of esempio13 is
begin
  process(clk, rst)
  begin
    if rst = '1' then
      out1 <= (others => '0');
    elsif clk = '1' and
          clk'event then
      out1 <= in1;
    end if;
  end process;
end behavioral;
```

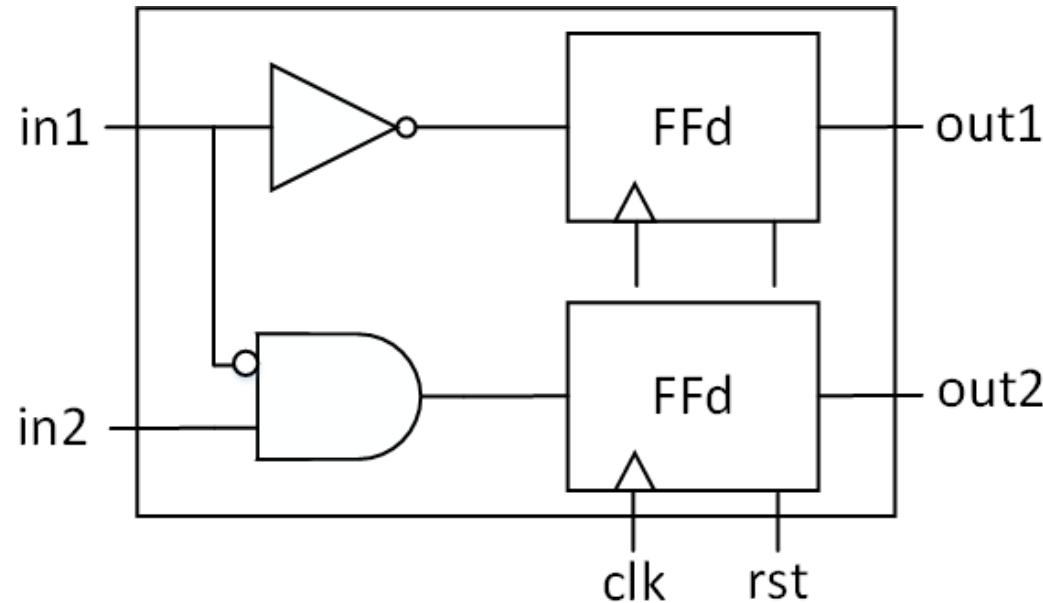


L'unica differenza rispetto al flip-flop è la dimensione delle porte e dei segnali



Esempio di circuito 14

- Vogliamo realizzare il seguente circuito sequenziale





- Realizzazione del circuito di esempio 14:

```
entity esempio14 is
port( in1, in2 : in std_logic;
      clk, rst : in std_logic;
      out1, out2 : out std_logic
);
end esempio14;
```

```
architecture behavioral of
esempio14 is
begin
  process(clk, rst)
  begin
    if rst = '1' then
      out1 <= '0';
      out2 <= '0';
    elsif rising_edge(clk) then
      out1 <= not in1;
      out2 <= not in1 and in2;
    end if;
  end process;
end behavioral;
```



- Realizzazione del circuito di esempio 14:

```
entity esempio14 is
port( in1, in2 : in std_logic;
      clk, rst : in std_logic;
      out1, out2 : out std_logic
);
end esempio14;
```

Espressioni combinatorie
specificate all'interno della
descrizione del flip-flop

```
architecture behavioral of
esempio14 is
begin
  process(clk, rst)
  begin
    if rst = '1' then
      out1 <= '0';
      out2 <= '0';
    elsif rising edge(clk) then
      out1 <= not in1;
      out2 <= not in1 and in2;
    end if;
  end process;
end behavioral;
```



- Realizzazione alternativa del circuito di esempio 14:

```
architecture behavioral of esempio14 is
signal tmp1, tmp2 : std_logic;
begin
  process(clk, rst)
  begin
    if rst = '1' then
      out1 <= '0';
      out2 <= '0';
    elsif rising_edge(clk) then
      out1 <= tmp1;
      out2 <= tmp2;
    end if;
  end process;

  tmp1 <= not in1;
  tmp2 <= not in1 and in2;
end behavioral;
```



- Realizzazione alternativa del circuito di esempio 14:

```
architecture behavioral of esempio14 is
signal tmp1, tmp2 : std_logic;
begin
    process(clk, rst)
    begin
        if rst = '1' then
            out1 <= '0';
            out2 <= '0';
        elsif rising_edge(clk) then
            out1 <= tmp1;
            out2 <= tmp2;
        end if;
    end process;

    tmp1 <= not in1;
    tmp2 <= not in1 and in2;
end behavioral;
```

- Notare bene che le due istruzioni dataflow ed il processo sono istruzioni concorrenti
- L'ordine delle istruzioni è ininfluente



- Vogliamo specificare in VHDL una macchina a stati finiti con un ingresso ed un'uscita ad un bit in grado di riconoscere la sequenza in ingresso 001. La macchina presenta un 1 in uscita per un ciclo di clock quando riconosce la sequenza, altrimenti 0
- Tabella degli stati della macchina:

	0	1	U
S0	S1	S0	0
S1	S2	S0	0
S2	S2	S3	0
S3	S1	S0	1



- La entity del circuito dell'esempio 15:

```
entity esempio15 is
  port(
    i:  in std_logic;
    clk:  in std_logic;
    rst:  in std_logic;
    o:  out std_logic
  );
end esempio15;
```

- (non presenta alcun aspetto nuovo rispetto agli esempi precedenti)



- La architecture del circuito di esempio 15:

```
architecture FSM of esempio15 is
    type state_type is (S0, S1, S2, S3);
    signal next_state, current_state: state_type;
begin
    state_reg: process(clk, rst)
begin
    if rst='1' then
        current_state <= S0;
    elsif rising_edge(clk) then
        current_state <= next_state;
    end if;
end process;
--...
```



- La architecture del circuito di esempio 15:

```
architecture FSM of esempio15 is
    type state_type is (S0, S1, S2, S3);
    signal next_state, current_state: state_type;
begin
    state_reg: process(clk, rst)
begin
    if rst='1' then
        current_state <= S0;
    elsif rising_edge(clk) then
        current_state <= next_state;
    end if;
end process;
--...
```

Dichiarazione di un tipo enumerativo per rappresentare l'elenco degli stati della macchina



- La architecture del circuito di esempio 15:

```
architecture FSM of esempio15 is
    type state_type is (S0, S1, S2, S3);
    signal next_state, current_state: state_type;
begin
    state_reg: process(clk, rst)
begin
    if rst='1' then
        current_state <= S0;
    elsif rising_edge(clk) then
        current_state <= next_state;
    end if;
end process;
--...
```

Segnali che rappresentano lo stato presente e lo stato prossimo

Registri della macchina a stati



- La architecture del circuito di esempio 15 (seconda parte):

--...

```
lambda: process(current_state, i)
begin
    case current_state is
        when S0 =>
            if i='0' then
                next_state <= S1;
            else
                next_state <= S0;
            end if;
        when S1 =>
            if i='0' then
                next_state <= S2;
            else
                next_state <= S0;
            end if;
    end case;
end process;
```

Specifiche della funzione
di stato prossimo

```
when S2 =>
    if i='0' then
        next_state <= S2;
    else
        next_state <= S3;
    end if;
when S3 =>
    if i='1' then
        next_state <= S1;
    else
        next_state <= S0;
    end if;
end case;
end process;
```

--...



- La architecture del circuito di esempio 15 (terza parte):

-- . . .

```
delta: process (current_state)
begin
    case current_state is
        when S0 =>
            o <= '0';
        when S1 =>
            o <= '0';
        when S2 =>
            o <= '0';
        when S3 =>
            o <= '1';
    end case;
end process;

end FSM;
```

Specifiche della funzione
di uscita



- È possibile anche specificare le funzioni di stato prossimo e di uscita tramite un singolo processo:

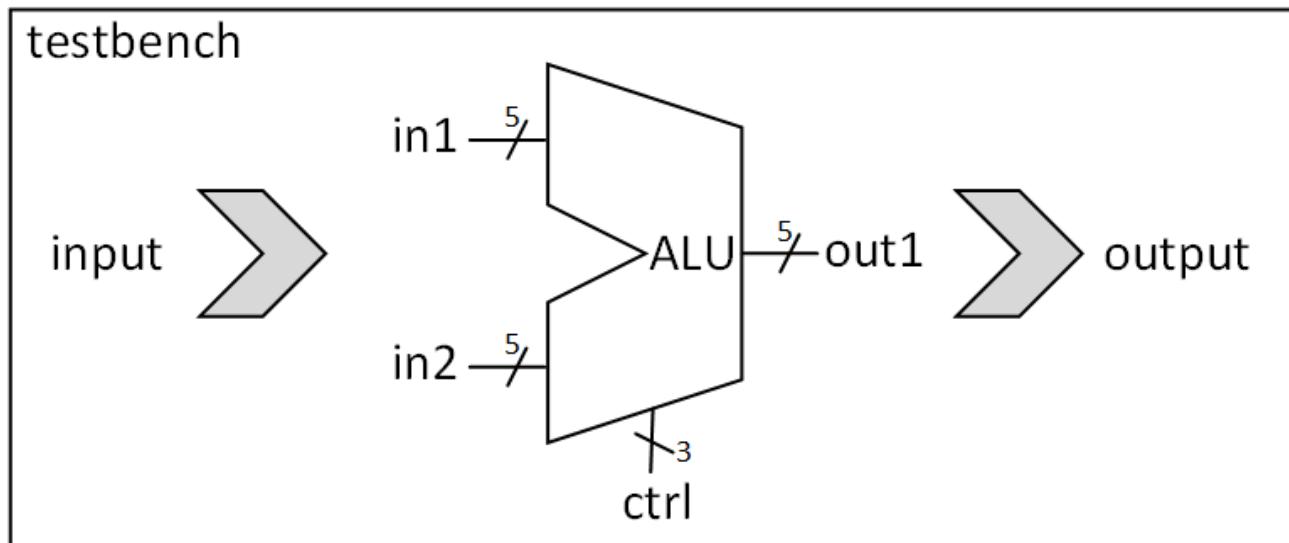
```
-- . . .
lambda_delta: process (current_state, i)
begin
    case current_state is
        when S0 =>
            o <= '0';
            if i='0' then
                next_state <= S1;
            else
                next_state <= S0;
            end if;
        when S1 =>
            o <= '0';
            if i='0' then
                next_state <= S2;
            else
                next_state <= S0;
            end if;
-- . . .
```



- Per descrivere FSM non completamente specificate
 - Possiamo assegnare '-' (don't care) all'uscita
 - Per poter assegnare '-' allo stato prossimo dobbiamo definire i segnali che rappresentano lo stato presente e lo stato prossimo di tipo `std_logic` (e quindi definire una codifica)



- Vogliamo specificare in VHDL un circuito di test (testbench) per l'esempio 8 (utilizziamo il valore di default per il parametro N)
- Il testbench è un banco di prova da usare durante una simulazione come ambiente che genera gli stimoli per il circuito e raccoglie/analizza gli output





- La entity del circuito di esempio 16:

```
library IEEE;  
USE IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;  
USE IEEE.STD_LOGIC_TEXTIO.ALL;  
USE STD.TEXTIO.ALL;  
  
ENTITY esempio16 IS  
END esempio16;
```



- La entity del circuito di esempio 16:

```
library IEEE;  
USE IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;  
USE IEEE.STD_LOGIC_TEXTIO.ALL;  
USE STD.TEXTIO.ALL;
```

```
ENTITY esempio16 IS  
END esempio16;
```

La entity non contiene alcuna porta

Nel testbench possiamo utilizzare altri tipi di dato non sintetizzabili (**file**, **string**, ...)



- La architecture del circuito di esempio 16:

```
ARCHITECTURE testbench_arch OF esempio16 IS
COMPONENT esempio8
generic (
    N : integer := 5
);
port(
    in1, in2: in std_logic_vector(N-1 downto 0);
    ctrl: in std_logic_vector(2 downto 0);
    out1: out std_logic_vector(N-1 downto 0)
);
END COMPONENT;

SIGNAL in1 : std_logic_vector (4 DownTo 0) := "00000";
SIGNAL in2 : std_logic_vector (4 DownTo 0) := "00000";
SIGNAL ctrl : std_logic_vector (2 DownTo 0) := "000";
SIGNAL out1 : std_logic_vector (4 DownTo 0) := "00000";
--...
```



- La architecture del circuito di esempio 16:

```
ARCHITECTURE testbench arch OF esempio16 IS
COMPONENT esempio8
generic (
    N : integer := 5
);
port(
    in1, in2: in std_logic_vector(N-1 downto 0);
    ctrl: in std_logic_vector(2 downto 0);
    out1: out std_logic_vector(N-1 downto 0)
);
END COMPONENT;
```

Componente
da testare
Segnali da
connettere
alle porte
dell'istanza

```
SIGNAL in1 : std_logic_vector (4 DownTo 0) := "00000";
SIGNAL in2 : std_logic_vector (4 DownTo 0) := "00000";
SIGNAL ctrl : std_logic_vector (2 DownTo 0) := "000";
SIGNAL out1 : std_logic_vector (4 DownTo 0) := "00000";
--...
```



- La architecture del circuito di esempio 16 (seconda parte):

---...

BEGIN

```
UUT : esempio8
PORT MAP (
    in1 => in1,
    in2 => in2,
    ctrl => ctrl,
    out1 => out1
);
```

---...



- La architecture del circuito di esempio 16 (seconda parte):

BEGIN

```
UUT : esempio8
PORT MAP (
    in1 => in1,
    in2 => in2,
    ctrl => ctrl,
    out1 => out1
);
```

- Istanziazione del componente da testare
- Connessione dei segnali che verranno stimolati e letti



- La architecture del circuito di esempio 16 (terza parte):

-- . . .

PROCESS

BEGIN

-- ----- Current Time: 100ns

WAIT FOR 100 ns;
in1 <= "00001";
in2 <= "00100";
ctrl <= "001";

-- ----- Current Time: 300ns

WAIT FOR 200 ns;
ctrl <= "010";

-- ----- Current Time: 500ns

WAIT FOR 200 ns;
ctrl <= "011";

-- -----

WAIT FOR 1500 ns;
ASSERT(FALSE) REPORT "Simulation OK." SEVERITY FAILURE;
END PROCESS;

END testbench_arch;



- La architecture del circuito di esempio 16 (terza parte):

```
--  
PROCESS  
BEGIN  
-- ----- Current Time: 100ns  
WAIT FOR 100 ns;  
in1 <= "00001";  
in2 <= "00100";  
ctrl <= "001";  
-- ----- Current Time: 300ns  
WAIT FOR 200 ns;  
ctrl <= "010";  
-- ----- Current Time: 500ns  
WAIT FOR 200 ns;  
ctrl <= "011";  
-- -----  
WAIT FOR 1500 ns;  
ASSERT(FALSE) REPORT "Simulation OK." SEVERITY FAILURE;  
END PROCESS;  
  
END testbench_arch;
```

- Nessuna lista di sensibilità
- Il processo è avviato a tempo 0 (e un volta terminato immediatamente riavviato)



- La architecture del circuito di esempio 16 (terza parte):

```
--...  
PROCESS  
BEGIN  
  -- ----- Current Time: 100ns  
  WAIT FOR 100 ns;  
  in1 <= "00001";  
  in2 <= "00100";  
  ctrl <= "001";  
  -- ----- Current Time: 300ns  
  WAIT FOR 200 ns;  
  ctrl <= "010";  
  -- ----- Current Time: 500ns  
  WAIT FOR 200 ns;  
  ctrl <= "011";  
  -- -----  
  WAIT FOR 1500 ns;  
  ASSERT(FALSE) REPORT "Simulation OK." SEVERITY FAILURE;  
END PROCESS;  
  
END testbench_arch;
```

- I segnali di ingresso vengono forzato ad assumere un dato valore
- L'istruzione **wait** forza l'aggiornamento dei segnali scritti e sospende il processo per un intervallo di tempo specificato



- La architecture del circuito di esempio 16 (terza parte):

--...

```
PROCESS
BEGIN
-- -----
    Current Time: 100ns
WAIT FOR 100 ns;
in1 <= "00001";
in2 <= "00100";
ctrl <= "001";
-- -----
    Current Time: 300ns
WAIT FOR 200 ns;
ctrl <= "010";
-- -----
    Current Time: 500ns
WAIT FOR 200 ns;
ctrl <= "011";
-- -----
WAIT FOR 1500 ns;
ASSERT(FALSE) REPORT "Simulation OK." SEVERITY FAILURE;
END PROCESS;

END testbench_arch;
```

- In questo testbench non vengono collezionati gli output
- Si usa direttamente il simulatore per disegnare le forme d'onda



- La architecture del circuito di esempio 16 (terza parte):

```
-- . . .  
PROCESS  
BEGIN  
  -- ----- Current Time: 100ns  
  WAIT FOR 100 ns;  
  in1 <= "00001";  
  in2 <= "00100";  
  ctrl <= "001";  
  -- ----- Current Time: 300ns  
  WAIT FOR 200 ns;  
  ctrl <= "010";  
  -- ----- Current Time: 500ns  
  WAIT FOR 200 ns;  
  ctrl <= "011";  
  -- -----  
  WAIT FOR 1500 ns;  
  ASSERT(FALSE) REPORT "Simulation OK." SEVERITY FAILURE;  
END PROCESS;  
  
END testbench_arch;
```

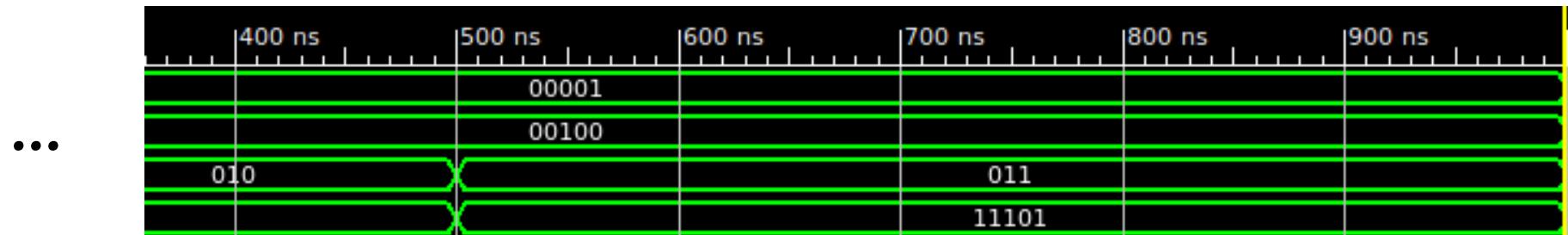
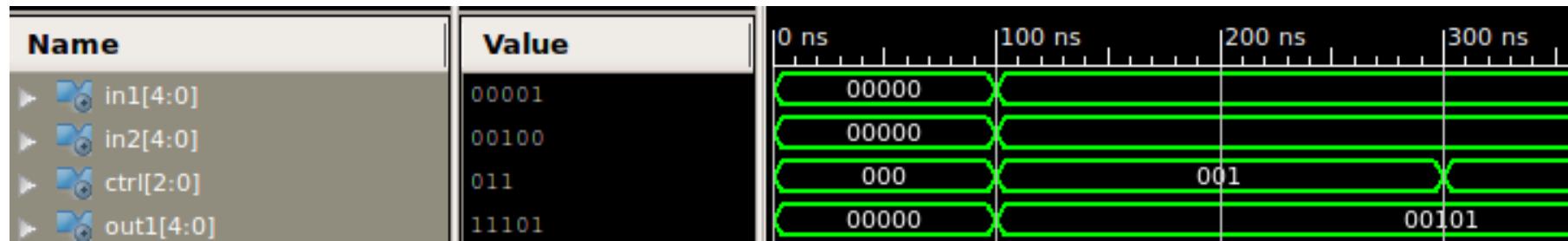
Ferma la simulazione





Esecuzione del testbench

- Output del simulatore:





- La architecture del circuito di esempio 16 (terza parte):

```
--...  
PROCESS  
BEGIN  
  -- ----- Current Time: 100ns  
  WAIT FOR 100 ns;  
  in1 <= "00001";  
  in2 <= "00100";  
  ctrl <= "001";  
  -- ----- Current Time: 300ns  
  WAIT FOR 200 ns;  
  ctrl <= "010";  
  -- ----- Current Time: 500ns  
  WAIT FOR 200 ns;  
  ctrl <= "011";  
  -- -----  
  WAIT FOR 1500 ns;  
  ASSERT(FALSE) REPORT "Simulation OK." SEVERITY FAILURE;  
END PROCESS;  
  
END testbench_arch;
```

ATTENZIONE: questa descrizione non può essere sintetizzata ma solo simulata!



- Implementazione alternativa con lettura ed analisi automatizzata dei risultati nella architecture del circuito di esempio 16:

```
--  
PROCESS  
BEGIN  
  -- ----- Current Time: 100ns  
  WAIT FOR 100 ns;  
  in1 <= "00001";  
  in2 <= "00100";  
  ctrl <= "001";  
  WAIT FOR 0 ns;  
  ASSERT (out1="00101") REPORT "Simulation Failure." SEVERITY FAILURE;  
  WAIT FOR 200 ns;  
--  
END PROCESS;
```



- Implementazione alternativa con lettura ed analisi automatizzata dei risultati nella architecture del circuito di esempio 16:

```
--  
PROCESS  
BEGIN  
    -- ----- Current Time: 100ns  
    WAIT FOR 100 ns;  
    in1 <= "00001";  
    in2 <= "00100";  
    ctrl <= "001";  
    WAIT FOR 0 ns;  
    ASSERT (out1="00101") REPORT "Simulation Failure." SEVERITY FAILURE;  
    WAIT FOR 200 ns;  
--  
END PROCESS;
```

- Il processo è sospeso per permettere l'aggiornamento dei segnali
 - Suspendiamo la simulazione per 0 secondi perché il componente testato non porta ritardi



- Implementazione alternativa con lettura ed analisi automatizzata dei risultati nella architecture del circuito di esempio 16:

```
--  
PROCESS  
BEGIN  
    -- ----- Current Time: 100ns  
    WAIT FOR 100 ns;  
    in1 <= "00001";  
    in2 <= "00100";  
    ctrl <= "001";  
    WAIT FOR 0 ns;  
    ASSERT (out1="00101") REPORT "Simulation Failure." SEVERITY FAILURE;  
    WAIT FOR 200 ns;  
    --...  
END PROCESS;
```

- Lettura ed analisi dei risultati
- La **assert** bloccherà l'esecuzione nel caso di valore differente da quello atteso



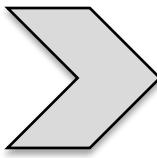
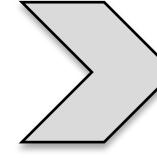
- Implementazione alternativa con lettura ed analisi automatizzata dei risultati nella architecture del circuito di esempio 16:

```
--  
PROCESS  
BEGIN  
    -- ----- Current Time: 100ns  
    WAIT FOR 100 ns;  
    in1 <= "00001";  
    in2 <= "00100";  
    ctrl <= "001";  
    WAIT FOR 0 ns;  
    ASSERT (out1="00101") REPORT "Simulation Failure." SEVERITY FAILURE;  
    WAIT FOR 200 ns;  
--  
END PROCESS;
```

- I dati di input possono anche essere letti da file ed i risultati scritti su file



- Vogliamo specificare in VHDL un testbench per la macchina sequenziale dell'esempio 15

Input   Output

	0	1	U
S0	S1	S0	0
S1	S2	S0	0
S2	S2	S3	0
S3	S1	S0	1



- La entity del circuito di esempio 17:

```
library IEEE;  
USE IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;  
USE IEEE.STD_LOGIC_TEXTIO.ALL;  
USE STD.TEXTIO.ALL;
```

```
ENTITY esempio17 IS  
END esempio17;
```



- La architecture del circuito di esempio 17:

```
ARCHITECTURE testbench_arch OF esempio17 IS
COMPONENT esempio15 is
port(
    i:  in std_logic;
    clk:  in std_logic;
    rst:  in std_logic;
    o:  out std_logic
);
END COMPONENT;

CONSTANT clk_period : time := 1 ns;
```

Costante che rappresenta
il periodo del clock

```
SIGNAL clk : std_logic := '0';
SIGNAL rst : std_logic := '1';
SIGNAL i : std_logic := '0';
SIGNAL o : std_logic := '0';

--...
```



- La architecture del circuito di esempio 17 (seconda parte):

```
--...
```

```
BEGIN
```

```
    es15: esempio15
        PORT MAP(i, clk, rst, o);
```

```
clk_process: PROCESS
BEGIN
    clk <= '0';
    WAIT FOR clk_period/2;
    clk <= '1';
    WAIT FOR clk_period/2;
END PROCESS;
```

- Generazione dell'onda quadra del clock
- Il processo una volta terminato viene immediatamente riavviato

```
--...
```



- La architecture del circuito di esempio 17 (terza parte):

```
--...
stimula_process: PROCESS
BEGIN
    WAIT FOR clk_period;
    rst <= '0';
    i <= '0';
    WAIT FOR clk_period;
    i <= '0';
    WAIT FOR clk_period;
    i <= '0';
    WAIT FOR clk_period;
    i <= '1';
    WAIT FOR clk_period;
    i <= '0';
    WAIT FOR clk_period;
    i <= '1';
    WAIT FOR clk_period;
    i <= '1';
    WAIT FOR clk_period;
    ASSERT(FALSE) REPORT "Simulation OK." SEVERITY FAILURE;
END PROCESS;

END testbench_arch;
```

... Domande?