



UNIVERSITÀ⁹ DEGLI STUDI DI
NAPOLI FEDERICO II

Scuola Politecnica e delle Scienze di Base
Corso di Laurea in Ingegneria Informatica

Elaborato in Architettura dei Sistemi Digitali

Elaborato finale

Anno Accademico 2024/25

Studenti

Filomena Vigliotti
matr. M63001734
Ciro Scognamilgio
matr. M63001748
Antonio Sirignano
matr. M63001732

Indice

1 Esercizio 1	1
1.1 Multiplexer 16:1	1
1.1.1 Progetto e architettura	3
1.1.2 Implementazione	8
1.1.3 Simulazione	12
1.1.4 Implementazione 2.0	14
1.2 Rete di interconnessione a 16 ingressi e 4 uscite	19
1.2.1 Progettazione	20
1.2.2 Implementazione	23
1.2.3 Simulazione	29
1.3 Implementazione su board del punto precedente	34
1.3.1 Implementazione	35
1.3.2 Funzionamento	40
2 Esercizio 2 - Sistema ROM+M	42
2.1 Progettazione	43
2.2 Implementazione	43
2.3 Simulazione	47
2.4 Implementazione su board	50

2.4.1	Implementazione	50
3 Esercizio 3		53
3.1	Riconoscitore di sequenze	53
3.1.1	Progettazione e architettura	54
3.1.2	Implementazione	55
3.1.3	Simulazione	58
3.2	Implementazione su board del punto precedente	62
3.2.1	Implementazione	62
4 Esercizio 4		68
4.1	Shift Register - Approccio comportamentale	68
4.1.1	Progetto e architettura	68
4.1.2	Implementazione	70
4.1.3	Simulazione	71
4.2	Shift Register - Approccio strutturale	74
4.2.1	Progetto e architettura	74
4.2.2	Implementazione	78
4.2.3	Simulazione	82
5 Esercizio 5		87
5.1	Cronometro	87
5.1.1	Progettazione	87
5.1.2	Implementazione	94
5.1.3	Simulazione	106
5.2	Implementazione su board del punto precedente	108
5.2.1	Implementazione	109

6 Esercizio 6	128
6.1 Sistema di lettura - elaborazione - scrittura PO_PC	128
6.1.1 Progettazione	129
6.1.2 Implementazione	131
6.1.3 Simulazione	138
6.1.4 Timing Analysis	141
6.2 Implementazione su board del punto precedente	141
6.2.1 Implementazione	142
7 Esercizio 7	150
7.1 Moltiplicatore di Booth	150
7.1.1 Progettazione	150
7.1.2 Implementazione	154
7.1.3 Simulazione	165
7.2 Implementazione su board del punto precedente	167
7.2.1 Implementazione	167
8 Esercizio 8	172
8.1 Comunicazione con handshaking	172
8.1.1 Progettazione	173
8.1.2 Implementazione	175
8.1.3 Simulazione	193
9 Esercizio 9	197
9.1 Il processore Mic-1	197
9.1.1 Unità operativa	198
9.1.2 Microistruzioni	200

9.1.3	Unità di Controllo	201
9.2	La microistruzione ISUB	202
9.2.1	Simulazione	204
9.3	La microistruzione IOR	206
9.3.1	Simulazione	208
9.4	Implmentazione della microistruzione IXOR	209
10 Esercizio 10		214
10.1	Progettazione	215
10.1.1	UART-RS232	215
10.1.2	Contatore mod-8	222
10.1.3	ROM	222
10.1.4	MEM	223
10.1.5	Unità di controllo A	224
10.1.6	Unità di controllo B	225
10.1.7	Unità A	226
10.1.8	Unità B	227
10.2	Implementazione	228
10.2.1	Contatore modulo 8	228
10.2.2	ROM	229
10.2.3	Mem	231
10.2.4	Unità di controllo di A	232
10.2.5	Unità di controllo di B	234
10.2.6	Unità A	235
10.2.7	Unità B	238
10.2.8	System	241

10.3 Simulazione	243
11 Esercizio 11	245
11.1 Switch Multistadio	245
11.1.1 Progettazione	245
11.1.2 Implementazione	248
11.1.3 Simulazione	255
12 Esercizio 12	258
12.1 Prova di esame del 19 dicembre 2024	258
12.1.1 Traccia	258
12.1.2 Progettazione	259
12.1.3 Implementazione	261
12.1.4 Simulazione	278
13 Esercizio 13	283
13.1 Controllo di una Mano Stampata in 3D tramite FPGA e VHDL: Studio e Implementazione	283
13.1.1 Funzionamento	285
13.1.2 Implementazione	286
Bibliografia	294

Capitolo 1

Esercizio 1

1.1 Multiplexer 16:1

Un multiplexer è una **macchina combinatoria**, ovvero una macchina la cui uscita in un determinato istante di tempo dipende solo dall'ingresso nel medesimo istante, e quindi realizza una funzione del tipo:

$$U = f(I)$$

dove I e U rappresentano rispettivamente gli insiemi limitati dei valori di ingresso e di uscita.

Il Multiplexer realizza una connessione $n:1$, ovvero connette n sorgenti a un'unica destinazione sulla base di segnali di selezione.

Un **Multiplexer lineare** è composto da n segnali in ingresso e n segnali di selezione. Tale dispositivo convoglia uno specifico segnale in ingresso verso l'uscita solo se il corrispondente segnale di selezione è

alto. Uno svantaggio di un dispositivo di questo tipo è il numero eccessivo di fili per i segnali di selezione. Per risolvere ciò si può aggiungere un **Decoder**, un altro dispositivo notevole, che riceve in ingresso una parola codice di n bit e presenta in uscita la sua rappresentazione decodificata di 2^n bit.

Unendo un Multiplexer lineare a un Decoder, l'architettura diventa quella in figura, e si ottiene un componente definito **Multiplexer indirizzabile**, che diversamente da quello lineare, prende solo 2 segnali di selezione in ingresso. Un MUX indirizzabile è a sua volta una macchina notevole, caratterizzata da 2^n ingressi, n ingressi di selezione e un'unica uscita.

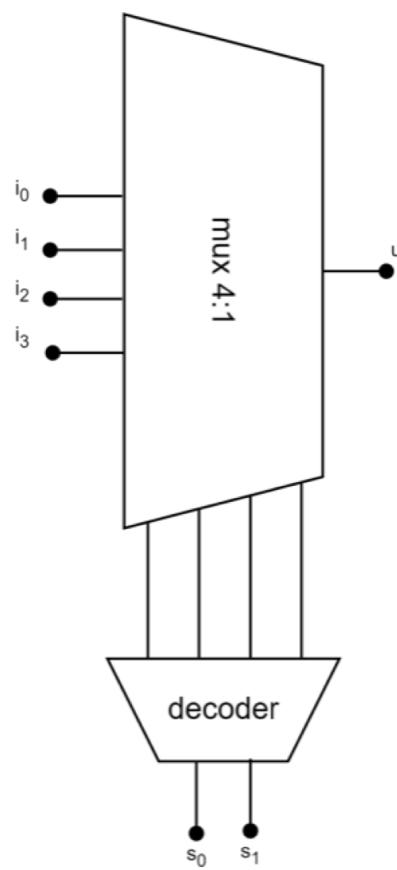


Figura 1.1: multiplexer indirizzabile

Si vuole ora progettare un multiplexer indirizzabile 16:1, utilizzando un approccio per composizione, a partire da multiplexer 4:1.
Tale multiplexer è rappresentato di seguito.

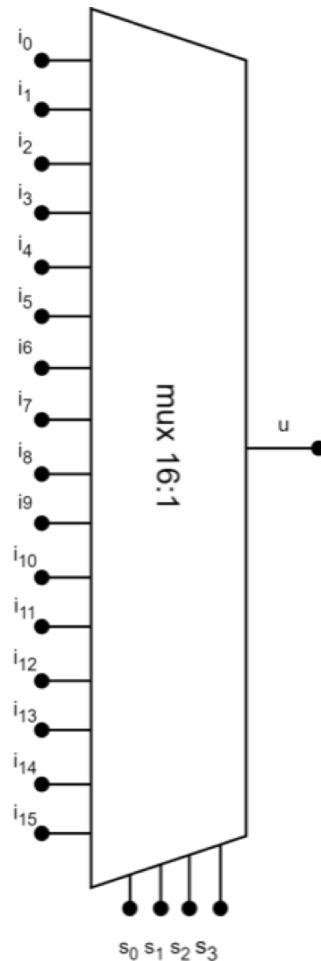


Figura 1.2: multiplexer 16:1

1.1.1 Progetto e architettura

Dapprima si utilizza un approccio per composizione per realizzare un multiplexer 4:1 con multiplexer 2:1.

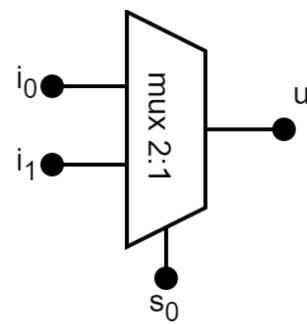


Figura 1.3: multiplexer 2:1

Il primo componente che si realizza è un multiplexer 2:1, caratterizzato dalla seguente tabella di verità:

s₀	i₁	i₀	u
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	1

Tabella 1.1: Tabella di verità di un Mux 2:1

da cui si ottiene l'equazione:

$$u = (i_0 \text{ AND } \bar{s}_0) \text{ OR } (i_1 \text{ AND } s_0)$$

Il successivo componente da costruire è un multiplexer 4:1.

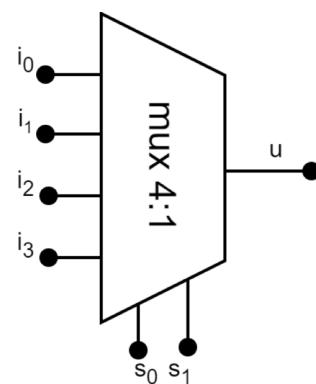


Figura 1.4: multiplexer 4:1

Per composizione, a partire da 3 multiplexer 2:1, si può ottenere un multiplexer 4:1

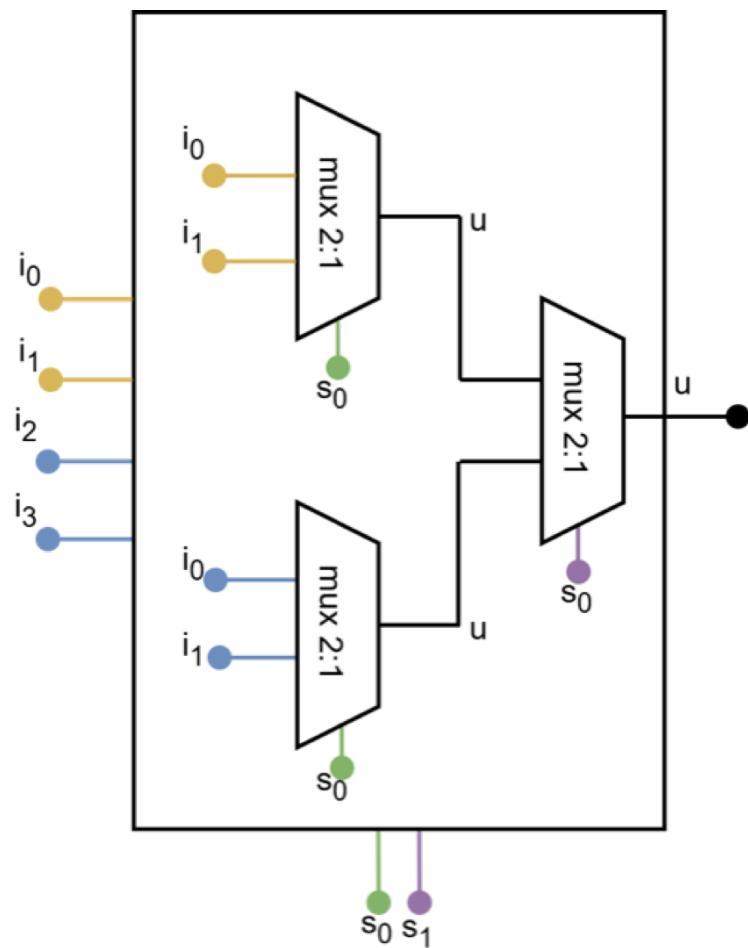


Figura 1.5: multiplexer 4:1 per composizione di multiplexer 2:1

I 4 ingressi entrano in due multiplexer 2:1, che prendono due ingressi e producono un'uscita ciascuno; tali uscite vengono immesse nel terzo multiplexer, che produrrà l'unico output finale. Concettualmente, si divide la selezione in ingresso al multiplexer esterno in due parti:

- la parte meno significativa (indicata dal colore verde) s_0 , viene posta in ingresso ai multiplexer del primo stadio e seleziona per ciascuno un filo in uscita;
- la parte più significativa (indicata dal colore viola) s_1 entra nel multiplexer del secondo stadio e decide quale dei due fili, provenienti dai due blocchi precedenti, sarà immessa in uscita.

In maniera analoga si procede con la progettazione del multiplexer 16:1.

Anche in questo caso, sono stati usati dei colori per identificare i collegamenti tra le componenti.

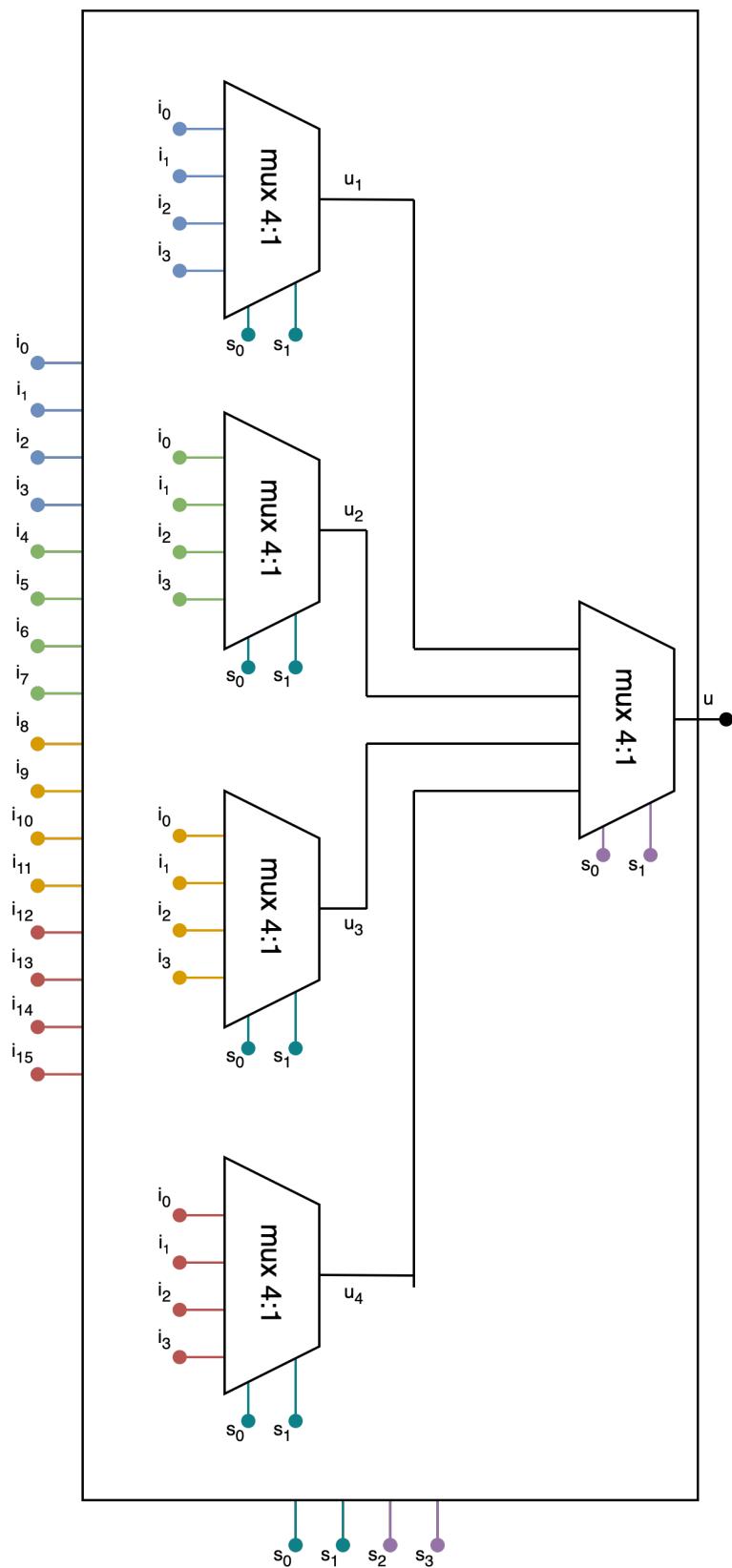


Figura 1.6: multiplexer 16:1 per composizione di multiplexer 4:1

1.1.2 Implementazione

Per l'implementazione si procede con un approccio di tipo strutturale, iniziando quindi dalla codifica del multiplexer 2:1, e, a partire da questo si compongono dispositivi sempre più complessi fino ad arrivare all'obiettivo del multiplexer 16:1.

Mux 2:1 Di seguito il codice riguardante il Mux 2:1.

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.all;
3
4 entity mux_21 is
5     port
6     (
7         i0, i1: in std_logic;
8         s0: in std_logic;
9         u: out std_logic
10    );
11 end mux_21;
12
13 architecture rtl of mux_21 is
14 begin
15     u <= i0 when s0='0' else
16         i1 when s0='1' else
17             ' ';
18 end rtl;
```

Code 1.1: Multiplexer 2:1 in VHDL

L'interfaccia del componente ha come ingressi `i0` ed `i1`, come selezione `s0` e come uscita `u`.

Al seguito della definizione dell'interfaccia, si definisce il comportamento dell'entità, che risponde alla tabella della verità 1.1.

Mux 4:1 Si prosegue con il Mux 4:1.

Come anticipato, viene costruito a partire da tre mux 2:1.

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.std_logic_1164.all;
3
4 entity mux_41 is
5     port
6     (
7         i: in std_logic_vector(0 to 3);
8         s: in std_logic_vector(1 downto 0);
9         u: out std_logic
10    );
11 end mux_41;
12
13 architecture structural of mux_41 is
14     signal u_mid: std_logic_vector(0 to 1);
15
16     component mux_21 is
17         port (
18             i0, i1: in std_logic;
19             s0: in std_logic;
20             u: out std_logic
21         );
22     end component;
23
24 begin
25     mux0to1: FOR k IN 0 TO 1 GENERATE
26         m: mux_21
27             port map
28             (
29                 i(k*2),
30                 i(k*2 + 1),
31                 s(0),
32                 u_mid(k)
33             );
34     end GENERATE;
35
36     mux_2: mux_21
37         port map
38         (
39             u_mid(0),
40             u_mid(1),
41             s(1),
```

```
42           u
43       );
44
45 end structural;
46
```

Code 1.2: Multiplexer 4:1 in VHDL

In quest'entità, l'interfaccia è dichiarata come segue:

- Il parametro `i` vettore di 4 elementi, ognuno corrispondente ad un ingresso del mux 4:1.
- Il parametro `s` vettore di 2 elementi, ognuno corrispondente ad un ingresso di selezione.
- Il parametro `u` corrispondente all'uscita del multiplexer.

A seguire si definisce la struttura del mux 4:1, utilizzando mux 2:1 come componenti.

Con il ciclo `for`, vengono stanziati i primi due mux 2:1, i quali riceveranno in ingresso rispettivamente, gli ingressi del mux 4:1 e la loro uscita è il vettore d'appoggio `u_mid`, il quale è talvolta l'ingresso del terzo mux 2:1.

Mux 16:1 In maniera analoga si procede con la costruzione del mux 16:1. Il codice è il seguente:

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.std_logic_1164.all;
3
4 entity mux_161 is
```

```
5      port
6      (
7          i: in std_logic_vector(0 to 15);
8          s: in std_logic_vector(3 downto 0);
9          u: out std_logic
10     );
11 end mux_161;
12
13 architecture structural of mux_161 is
14
15     signal u_mid: std_logic_vector(0 to 3);
16
17     component mux_41 is
18         port
19         (
20             i: in std_logic_vector(0 to 3);
21             s: in std_logic_vector(0 to 1);
22             u: out std_logic
23         );
24     end component;
25
26 begin
27     mux0to3: FOR k IN 0 TO 3 GENERATE
28         m: mux_41
29         port map
30         (
31             i => i((k*4) to (k*4 + 3)),
32             s => s(1 downto 0),
33             u => u_mid(k)
34         );
35     end GENERATE;
36
37     mux_2: mux_41
38         port map
39         (
40             i => u_mid,
41             s => s(3 downto 2),
42             u => u
43         );
44
45 end structural;
```

Code 1.3: Multiplexer 16:1 in VHDL

1.1.3 Simulazione

Per la simulazione, vi è la necessità di un testbench, il quale generiamo in maniera automatica tramite software appositi.

In tale progetto la generazione viene effettuata tramite ChatGPT ed il codice è il seguente:

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.std_logic_1164.all;
3 use IEEE.numeric_std.all; -- Libreria necessaria per `to_unsigned`  

4
5 entity tb_mux_161 is
6 end tb_mux_161;  

7
8 architecture behavior of tb_mux_161 is
9     -- Component declaration
10    component mux_161
11        port (
12            i: in std_logic_vector(0 to 15);
13            s: in std_logic_vector(3 downto 0);
14            u: out std_logic
15        );
16    end component;  

17
18    -- Signals for testing
19    signal i: std_logic_vector(0 to 15);
20    signal s: std_logic_vector(3 downto 0);
21    signal u: std_logic;  

22
23 begin
24     -- Instantiate the unit under test (UUT)
25     uut: mux_161
26         port map (
27             i => i,
28             s => s,
29             u => u
30         );
31
32     -- Test process
33     stim_proc: process
34         variable expected_output: std_logic; -- Variabile per il  

35             controllo
```

```
35 begin
36     -- Initialize inputs
37     i <= (others => '0');
38     s <= "0000";
39     wait for 10 ns;
40
41     -- Apply test cases
42     for sel in 0 to 15 loop
43         -- Set the ith bit of i to '1'
44         i <= (others => '0');
45         i(sel) <= '1';
46
47         -- Set the selector
48         s <= std_logic_vector(to_unsigned(sel, 4));
49
50         -- Aspetta che l'uscita si stabilizzi
51         wait for 10 ns;
52
53         -- Calcola l'uscita attesa
54         expected_output := i(sel);
55
56         -- Controlla se l'uscita è corretta
57         if u = expected_output then
58             report "Test passed for s = " & integer'image(sel) &
59                     ", u = " & std_logic'image(u);
60         else
61             report "Test failed for s = " & integer'image(sel) &
62                     ": expected = " &
63                     ← std_logic'image(expected_output) &
64                     ", got = " & std_logic'image(u)
65                     severity error;
66         end if;
67     end loop;
68
69     -- Fine simulazione
70     report "All tests completed";
71     wait;
72 end process;
73 end behavior;
```

Code 1.4: Testbench multiplexer 16:1 in VHDL

Una volta generato ciò, utilizzando i software GHDL e GTKWAVE,

vengono eseguiti i seguenti comandi:

```
[antoniosirignano@Antonios-MacBook-Pro Problema_1 % ghdl -a mux_2_1.vhdl
[antoniosirignano@Antonios-MacBook-Pro Problema_1 % ghdl -a mux_4_1.vhdl
[antoniosirignano@Antonios-MacBook-Pro Problema_1 % ghdl -a mux_16_1.vhdl
[antoniosirignano@Antonios-MacBook-Pro Problema_1 % ghdl -a tb_mux_16_1.vhdl
[antoniosirignano@Antonios-MacBook-Pro Problema_1 % ghdl -e tb_mux_16_1
antoniosirignano@Antonios-MacBook-Pro Problema_1 % ghdl -r tb_mux_16_1 --wave=mux_16_1.ghw

tb_mux_16_1.vhdl:58:17:@20ns:(report note): Test passed for s = 0, u = '1'
tb_mux_16_1.vhdl:58:17:@30ns:(report note): Test passed for s = 1, u = '1'
tb_mux_16_1.vhdl:58:17:@40ns:(report note): Test passed for s = 2, u = '1'
tb_mux_16_1.vhdl:58:17:@50ns:(report note): Test passed for s = 3, u = '1'
tb_mux_16_1.vhdl:58:17:@60ns:(report note): Test passed for s = 4, u = '1'
tb_mux_16_1.vhdl:58:17:@70ns:(report note): Test passed for s = 5, u = '1'
tb_mux_16_1.vhdl:58:17:@80ns:(report note): Test passed for s = 6, u = '1'
tb_mux_16_1.vhdl:58:17:@90ns:(report note): Test passed for s = 7, u = '1'
tb_mux_16_1.vhdl:58:17:@100ns:(report note): Test passed for s = 8, u = '1'
tb_mux_16_1.vhdl:58:17:@110ns:(report note): Test passed for s = 9, u = '1'
tb_mux_16_1.vhdl:58:17:@120ns:(report note): Test passed for s = 10, u = '1'
tb_mux_16_1.vhdl:58:17:@130ns:(report note): Test passed for s = 11, u = '1'
tb_mux_16_1.vhdl:58:17:@140ns:(report note): Test passed for s = 12, u = '1'
tb_mux_16_1.vhdl:58:17:@150ns:(report note): Test passed for s = 13, u = '1'
tb_mux_16_1.vhdl:58:17:@160ns:(report note): Test passed for s = 14, u = '1'
tb_mux_16_1.vhdl:58:17:@170ns:(report note): Test passed for s = 15, u = '1'
tb_mux_16_1.vhdl:69:9:@170ns:(report note): All tests completed
antoniosirignano@Antonios-MacBook-Pro Problema_1 % gtkwave mux_16_1.ghw

GTKWave Analyzer v3.4.0 (w)1999-2022 BSI

[0] start time.
[1700000000] end time.
2024-11-25 18:54:06.970 gtkwave[78165:3049537] +[IMKClient subclass]: chose IMKClient_Modern
2024-11-25 18:54:06.970 gtkwave[78165:3049537] +[IMKInputSession subclass]: chose IMKInputSession_Modern
```

Figura 1.7: Comandi per la simulazione

Con l'esecuzione dell'ultimo comando, vi si apre una nuova finestra che permette la visualizzazione delle onde:

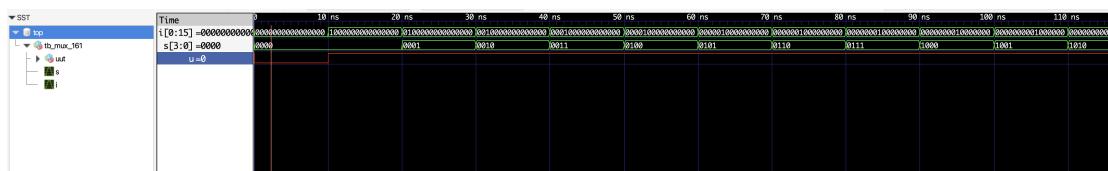


Figura 1.8: Risultati della simulazione: waveform

1.1.4 Implementazione 2.0

In alcuni casi, può essere utile specificare i singoli ingressi, in particolare quando gli ingressi provengono da fonti diverse; in tal caso, è preferibile l'implementazione che segue:

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity mux16_1 is
5     port(      i0 : in STD_LOGIC;
6                 i1 : in STD_LOGIC;
7                 i2 : in STD_LOGIC;
8                 i3 : in STD_LOGIC;
9                 i4 : in STD_LOGIC;
10                i5 : in STD_LOGIC;
11                i6 : in STD_LOGIC;
12                i7 : in STD_LOGIC;
13                i8 : in STD_LOGIC;
14                i9 : in STD_LOGIC;
15                i10 : in STD_LOGIC;
16                i11 : in STD_LOGIC;
17                i12 : in STD_LOGIC;
18                i13 : in STD_LOGIC;
19                i14 : in STD_LOGIC;
20                i15 : in STD_LOGIC;
21                s0 : in STD_LOGIC;
22                s1 : in STD_LOGIC;
23                s2 : in STD_LOGIC;
24                s3 : in STD_LOGIC;
25                y0 : out STD_LOGIC
26 );
27 end mux16_1;
28
29 architecture structural of mux16_1 is
30     signal u0 : STD_LOGIC := '0';
31     signal u1 : STD_LOGIC := '0';
32     signal u2 : STD_LOGIC := '0';
33     signal u3 : STD_LOGIC := '0';
34
35 component mux_2_1
36     port(      a0          : in STD_LOGIC;
37                  a1          : in STD_LOGIC;
38                  s           : in STD_LOGIC;
39                  y           : out STD_LOGIC
40 );
41 end component;
42
43 component mux_4_1
44     port(      b0 : in STD_LOGIC;
45                 b1 : in STD_LOGIC;
```

```
46          b2 : in STD_LOGIC;
47          b3 : in STD_LOGIC;
48          s0 : in STD_LOGIC;
49          s1 : in STD_LOGIC;
50          y0 : out STD_LOGIC
51      );
52  end component;
53
54 begin
55     mux_0: mux_4_1
56         Port map(    b0 => i0,
57                     b1 => i1,
58                     b2 => i2,
59                     b3 => i3,
60                     s0 => s0,
61                     s1 => s1,
62                     y0 => u0
63                 );
64
65     mux_1: mux_4_1
66         Port map(    b0 => i4,
67                     b1 => i5,
68                     b2 => i6,
69                     b3 => i7,
70                     s0 => s0,
71                     s1 => s1,
72                     y0 => u1
73                 );
74     mux_2: mux_4_1
75         Port map(    b0 => i8,
76                     b1 => i9,
77                     b2 => i10,
78                     b3 => i11,
79                     s0 => s0,
80                     s1 => s1,
81                     y0 => u2
82                 );
83
84     mux_3: mux_4_1
85         Port map(    b0 => i12,
86                     b1 => i13,
87                     b2 => i14,
88                     b3 => i15,
89                     s0 => s0,
90                     s1 => s1,
```

```
92          y0 => u3
93      );
94
95      mux_4: mux_4_1
96      Port map ( b0 => u0,
97                  b1 => u1,
98                  b2 => u2,
99                  b3 => u3,
100                 s0 => s2,
101                 s1 => s3,
102                 y0 => y0
103             );
104
105 end structural;
```

Code 1.5: Multiplexer 16:1 in VHDL: ingressi trattati separatamente

Ovviamente, la macchina sarà fatta allo stesso modo, come si può vedere dallo schematico generato da Vivado:

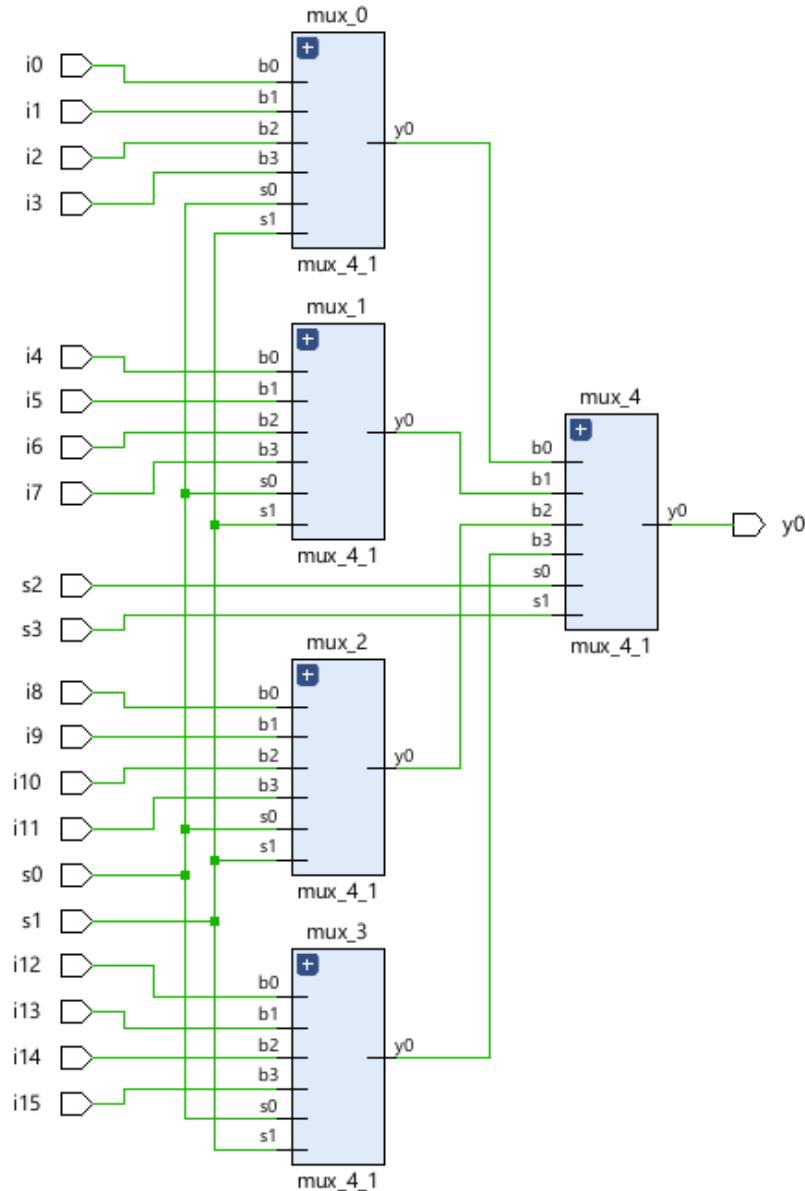


Figura 1.9: Schematic Vivado: Mux 16:1

Il multiplexer lavorerà allo stesso modo, con gli stessi risultati simulativi.

1.2 Rete di interconnessione a 16 ingressi e 4 uscite

Una rete di interconnessione è un tipo di rete di commutazione che permette di instradare i segnali da un insieme di ingressi a un insieme più ridotto di uscite. Tale rete può essere progettata attraverso un adeguato utilizzo di Multiplexer e Demultiplexer.

Nel caso in esame, si vuole progettare una rete che prenda 16 ingressi e restituisca 4 uscite. Si utilizza anche in questo caso un approccio per composizione, a partire dal Multiplexer 16:1 implementato nell'esercizio precedente, la cui uscita sarà posta in ingresso a un Demultiplexer 1:4.

La rete complessiva sarà fatta in questo modo:

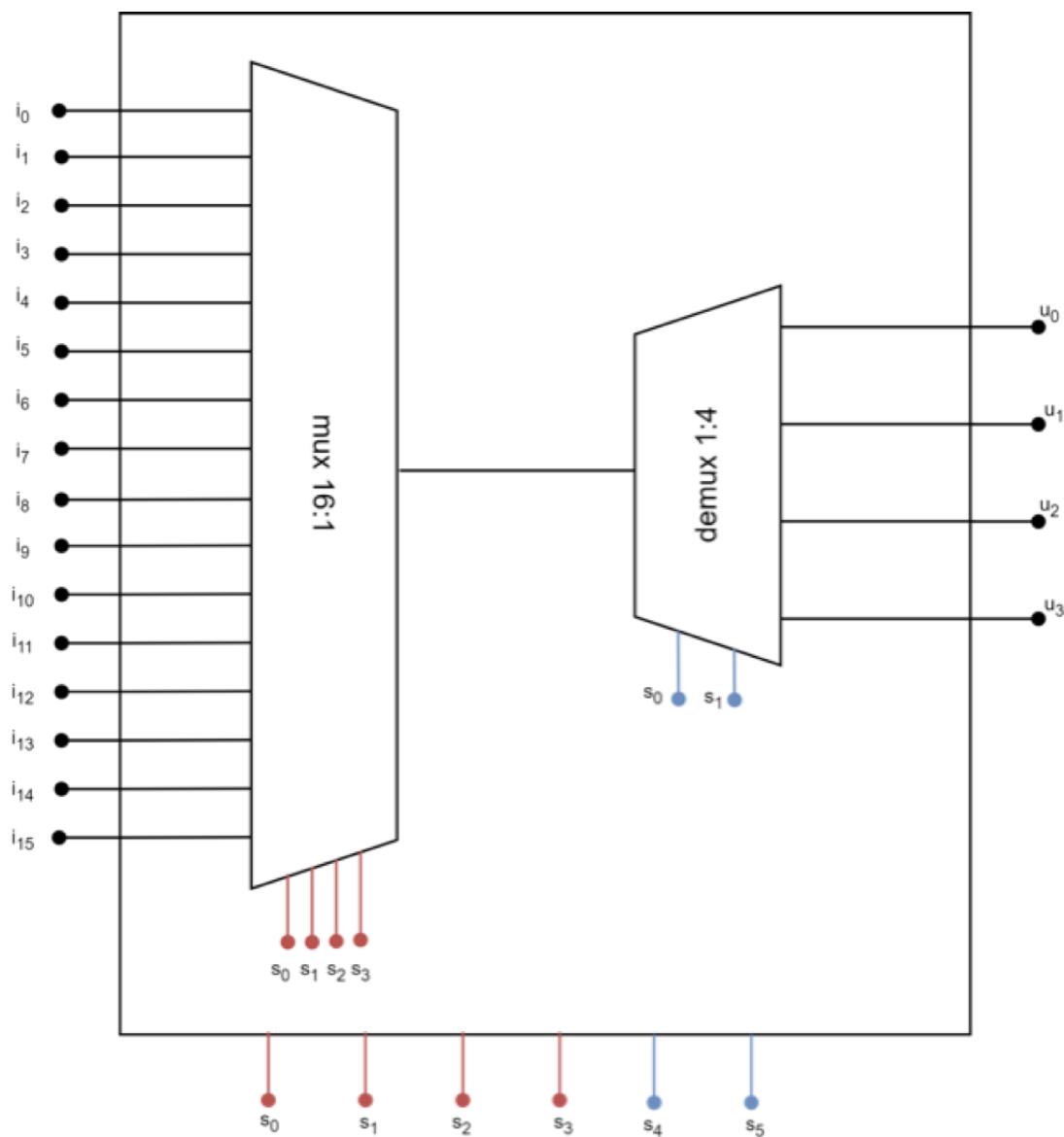


Figura 1.10: Rete di interconnessione

1.2.1 Progettazione

Anche in questo caso, prima di procedere all'implementazione della rete nel complesso, si costruisce il Demultiplexer 4:1 a partire da Demultiplexer 2:1.

Un Demultiplexer $1 : u$ è un dispositivo che prende un solo segnale di

ingresso, due segnali di selezione e a partire da essi restituisce u uscite.

Un Demultiplexer 2:1 è un dispositivo fatto in questo modo:

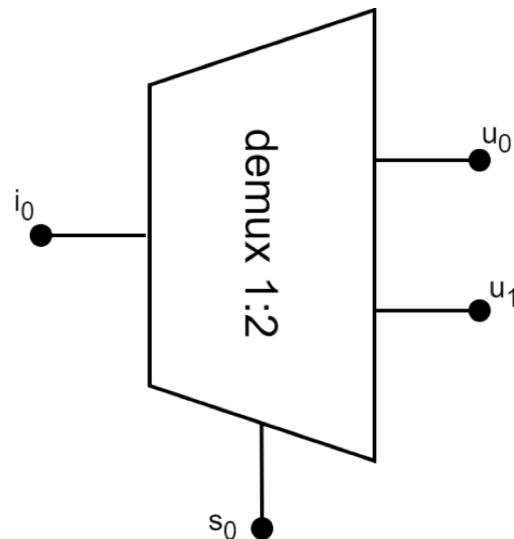


Figura 1.11: Demux 1:2

Tale componente è caratterizzato dalla seguente tabella di verità:

s₀	i₀	u₀	u₁
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	1	0	1

Tabella 1.2: Tabella di verità di un Demux 2:1

Da cui si ricavano le seguenti equazioni relative alle uscite:

$$u_0 = (i_0 \text{ AND } \bar{s}_0)$$

$$u_1 = (i_0 \text{ AND } s_0)$$

A partire dalla composizione di dispositivi di questo tipo, si può realizzare un Demultiplexer 1:4, come rappresentato in figura.

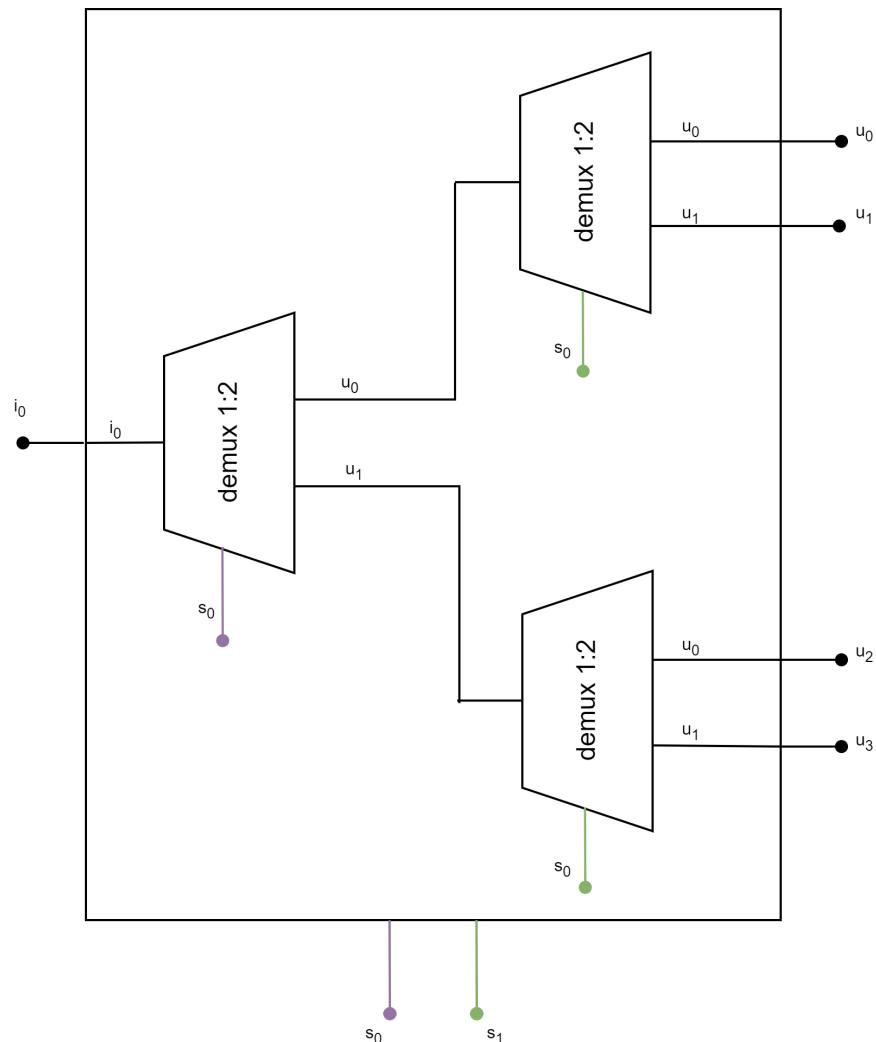


Figura 1.12: Demux 1:4 composto a partire da Demux 1:2

Utilizzando il Demultiplexer appena progettato, al cui ingresso si fa corrispondere l'uscita del Multiplexer 16:1, progettato nell'esercizio precedente, si ottiene la rete di interconnessione, così formata:

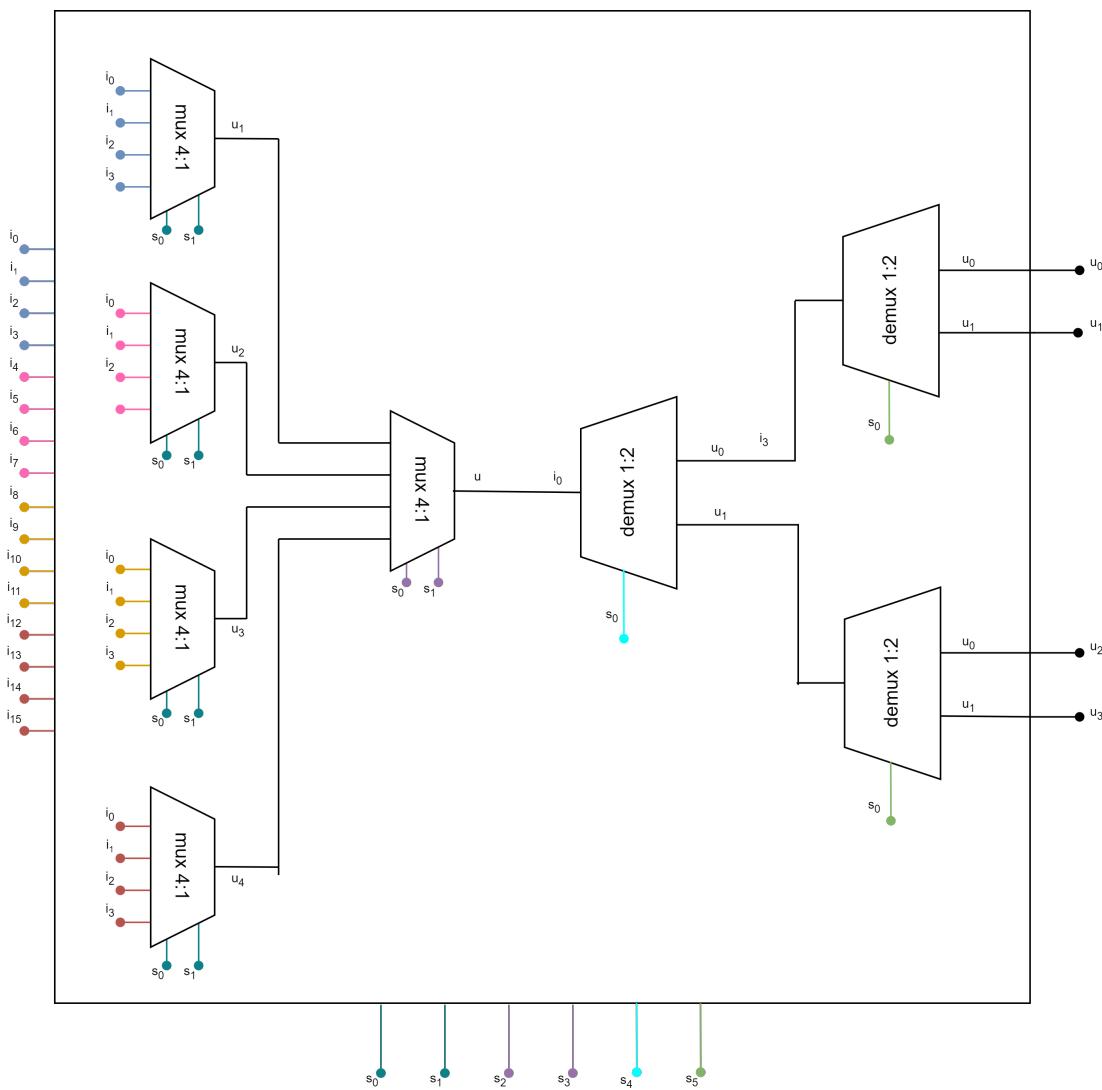


Figura 1.13: Rete di interconnessione: funzionamento interno

Nell'immagine, i colori sono stati usati per rendere più chiari i collegamenti tra segnali.

1.2.2 Implementazione

Si inizia mostrando l'implementazione del Demultiplexer 1:2, fatta seguendo un'architettura di tipo Dataflow.

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity demux1_2 is
5     port(
6         a0 :in STD_LOGIC;
7         s0 :in STD_LOGIC;
8         y0 :out STD_LOGIC;
9         y1 :out STD_LOGIC
10    );
11 end demux1_2;
12
13
14
15 architecture dataflow of demux1_2 is
16
17 begin
18     y0 <= (not s0 AND a0);
19     y1 <= (s0 AND a0);
20
21
22 end dataflow;
```

Code 1.6: Demultiplexer 1:2

Come mostrato dalla figura 1.12 presente nella fase di progettazione, a partire da 3 demux 1:2 si può realizzare un demux 1:4 seguendo un approccio di tipo strutturale. Segue il codice:

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity demux1_4 is
5     port(
6         i0 :in STD_LOGIC;
7         s0 :in STD_LOGIC;
8         s1 :in STD_LOGIC;
9         y0 :out STD_LOGIC;
10        y1 :out STD_LOGIC;
11        y2 :out STD_LOGIC;
12        y3 :out STD_LOGIC
13    );
```

```
14 end demux1_4;
15
16 architecture structural of demux1_4 is
17     signal u0: STD_LOGIC := '0';
18     signal u1: STD_LOGIC := '0';
19
20
21 component demux1_2
22     port(
23         a0: in STD_LOGIC;
24         s0: in STD_LOGIC;
25         y0: out STD_LOGIC;
26         y1: out STD_LOGIC
27     );
28 end component;
29
30 begin
31
32     demux0: demux1_2
33         Port map(
34             a0 =>i0,
35             s0 =>s0,
36             y0 =>u0,
37             y1 =>u1
38         );
39     demux1: demux1_2
40         Port map(
41             a0 =>u0,
42             s0 =>s1,
43             y0 =>y0,
44             y1 =>y1
45         );
46     demux2: demux1_2
47         Port map(
48             a0 =>u1,
49             s0 =>s1,
50             y0 =>y2,
51             y1 =>y3
52         );
53
54 end structural;
```

Code 1.7: Demultiplexer 1:4

Tramite un'appropriata connessione del Multiplexer realizzato nell'esercizio precedente e il Demux 1:4, si ottiene la rete di interconnessione richiesta:

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity interc16_4 is
5     port( i0 : in STD_LOGIC;
6             i1 : in STD_LOGIC;
7             i2 : in STD_LOGIC;
8             i3 : in STD_LOGIC;
9             i4 : in STD_LOGIC;
10            i5 : in STD_LOGIC;
11            i6 : in STD_LOGIC;
12            i7 : in STD_LOGIC;
13            i8 : in STD_LOGIC;
14            i9 : in STD_LOGIC;
15            i10 : in STD_LOGIC;
16            i11 : in STD_LOGIC;
17            i12 : in STD_LOGIC;
18            i13 : in STD_LOGIC;
19            i14 : in STD_LOGIC;
20            i15 : in STD_LOGIC;
21            s0 : in STD_LOGIC;
22            s1 : in STD_LOGIC;
23            s2 : in STD_LOGIC;
24            s3 : in STD_LOGIC;
25            s4 : in STD_LOGIC;
26            s5 : in STD_LOGIC;
27            y0 : out STD_LOGIC;
28            y1 : out STD_LOGIC;
29            y2 : out STD_LOGIC;
30            y3 : out STD_LOGIC
31        );
32    end interc16_4;
33
34 architecture structural of interc16_4 is
35 signal a0 : STD_LOGIC;
36
37 component mux16_1
38     port(
39             i0 : in STD_LOGIC;
```

```
40          i2 : in STD_LOGIC;
41          i3 : in STD_LOGIC;
42          i4 : in STD_LOGIC;
43          i5 : in STD_LOGIC;
44          i6 : in STD_LOGIC;
45          i7 : in STD_LOGIC;
46          i8 : in STD_LOGIC;
47          i9 : in STD_LOGIC;
48          i10 : in STD_LOGIC;
49          i11 : in STD_LOGIC;
50          i12 : in STD_LOGIC;
51          i13 : in STD_LOGIC;
52          i14 : in STD_LOGIC;
53          i15 : in STD_LOGIC;
54          s0 : in STD_LOGIC;
55          s1 : in STD_LOGIC;
56          s2 : in STD_LOGIC;
57          s3 : in STD_LOGIC;
58          y0 : out STD_LOGIC
59      );
60  end component;
61
62 component demux1_4
63     port(      i0      : in STD_LOGIC;
64                 s0      : in STD_LOGIC;
65                 s1      : in STD_LOGIC;
66                 y0      : out STD_LOGIC;
67                 y1      : out STD_LOGIC;
68                 y2      : out STD_LOGIC;
69                 y3      : out STD_LOGIC
70      );
71  end component;
72
73
74
75 begin
76     mux_0: mux16_1
77         Port map(
78             i0 => i0,
79             i1 => i1,
80             i2 => i2,
81             i3 => i3,
82             i4 => i4,
83             i5 => i5,
84             i6 => i6,
85             i7 => i7,
```

```
86          i8 => i8,
87          i9 => i9,
88          i10 => i10,
89          i11 => i11,
90          i12 => i12,
91          i13 => i13,
92          i14 => i14,
93          i15 => i15,
94          s0 => s0,
95          s1 => s1,
96          s2 => s2,
97          s3 => s3,
98          y0 => a0
99      );
100
101     demux0: demux1_4
102     Port map(
103         i0 => a0,
104         s0 => s4,
105         s1 => s5,
106         y0 => y0,
107         y1 => y1,
108         y2 => y2,
109         y3 => y3
110     );
111
112 end structural;
113
```

Code 1.8: Rete di interconnessione 16:4 in VHDL

La rete realizzata è osservabile come schematic generato da Vivado:

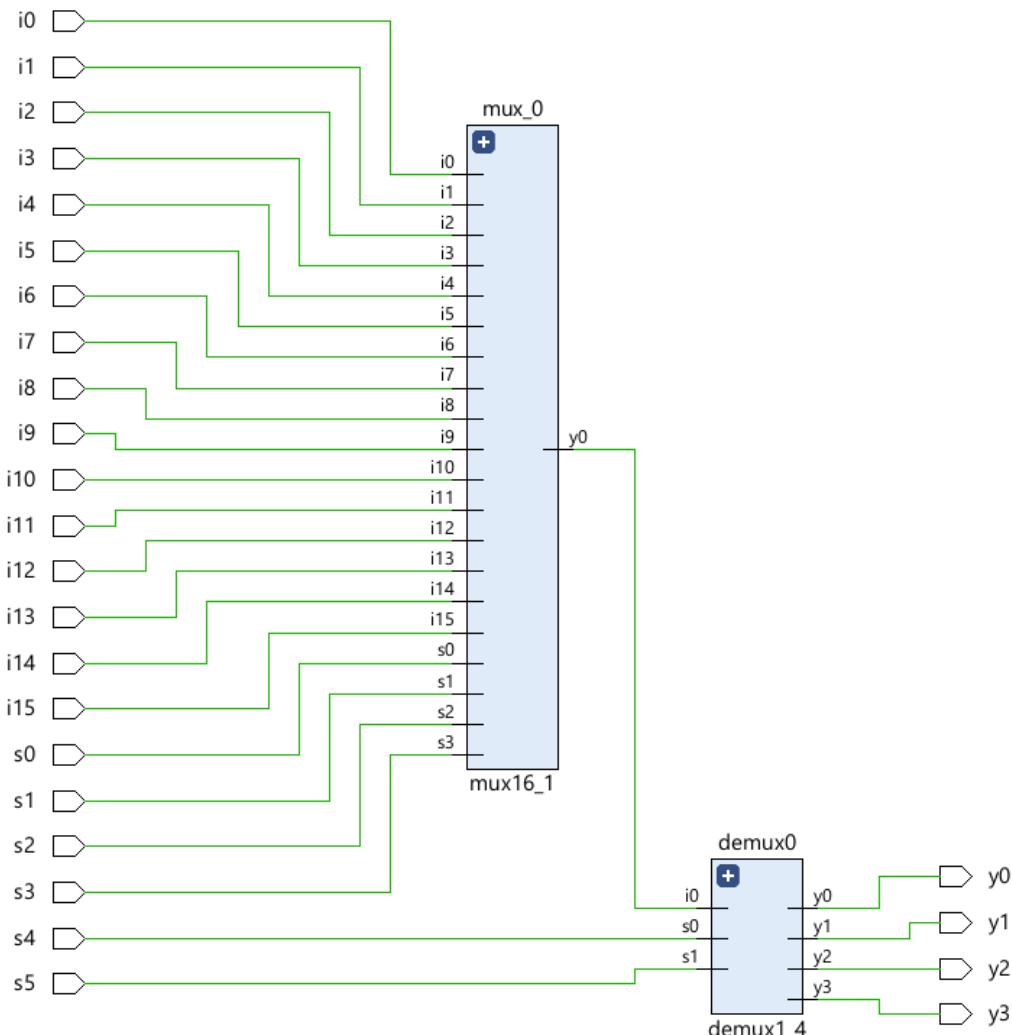


Figura 1.14: Rete di interconnessione: schematic

1.2.3 Simulazione

Per procedere con la simulazione della rete realizzata, si utilizza un tesbench. Tale testebnch è stato realizzato tramite il sito Doulos, e sono stati manualmente aggiunti diversi casi di test:

```

1 library IEEE;
2 use IEEE.Std_logic_1164.all;
3 use IEEE.Numeric_Signed.all;
4
5 entity interc16_4_tb is

```

```
6 end;
7
8 architecture bench of interc16_4_tb is
9
10 component interc16_4
11     port( i0 : in STD_LOGIC;
12             i1 : in STD_LOGIC;
13             i2 : in STD_LOGIC;
14             i3 : in STD_LOGIC;
15             i4 : in STD_LOGIC;
16             i5 : in STD_LOGIC;
17             i6 : in STD_LOGIC;
18             i7 : in STD_LOGIC;
19             i8 : in STD_LOGIC;
20             i9 : in STD_LOGIC;
21             i10 : in STD_LOGIC;
22             i11 : in STD_LOGIC;
23             i12 : in STD_LOGIC;
24             i13 : in STD_LOGIC;
25             i14 : in STD_LOGIC;
26             i15 : in STD_LOGIC;
27             s0 : in STD_LOGIC;
28             s1 : in STD_LOGIC;
29             s2 : in STD_LOGIC;
30             s3 : in STD_LOGIC;
31             s4 : in STD_LOGIC;
32             s5 : in STD_LOGIC;
33             y0 : out STD_LOGIC;
34             y1 : out STD_LOGIC;
35             y2 : out STD_LOGIC;
36             y3 : out STD_LOGIC
37         );
38     end component;
39
40 signal i0: STD_LOGIC;
41 signal i1: STD_LOGIC;
42 signal i2: STD_LOGIC;
43 signal i3: STD_LOGIC;
44 signal i4: STD_LOGIC;
45 signal i5: STD_LOGIC;
46 signal i6: STD_LOGIC;
47 signal i7: STD_LOGIC;
48 signal i8: STD_LOGIC;
49 signal i9: STD_LOGIC;
50 signal i10: STD_LOGIC;
51 signal i11: STD_LOGIC;
```

```
52  signal i12: STD_LOGIC;
53  signal i13: STD_LOGIC;
54  signal i14: STD_LOGIC;
55  signal i15: STD_LOGIC;
56  signal s0: STD_LOGIC;
57  signal s1: STD_LOGIC;
58  signal s2: STD_LOGIC;
59  signal s3: STD_LOGIC;
60  signal s4: STD_LOGIC;
61  signal s5: STD_LOGIC;
62  signal y0: STD_LOGIC;
63  signal y1: STD_LOGIC;
64  signal y2: STD_LOGIC;
65  signal y3: STD_LOGIC ;
66
66
67 begin
68
69  uut: interc16_4 port map ( i0    => i0,
70                            i1    => i1,
71                            i2    => i2,
72                            i3    => i3,
73                            i4    => i4,
74                            i5    => i5,
75                            i6    => i6,
76                            i7    => i7,
77                            i8    => i8,
78                            i9    => i9,
79                            i10   => i10,
80                            i11   => i11,
81                            i12   => i12,
82                            i13   => i13,
83                            i14   => i14,
84                            i15   => i15,
85                            s0    => s0,
86                            s1    => s1,
87                            s2    => s2,
88                            s3    => s3,
89                            s4    => s4,
90                            s5    => s5,
91                            y0    => y0,
92                            y1    => y1,
93                            y2    => y2,
94                            y3    => y3 ) ;
95
96  stimulus: process
97  begin
```

```

98
99    -- Inizializzazione segnali
100   i0 <= '0'; i1 <= '0'; i2 <= '0'; i3 <= '0';
101   i4 <= '0'; i5 <= '0'; i6 <= '0'; i7 <= '0';
102   i8 <= '0'; i9 <= '0'; i10 <= '0'; i11 <= '0';
103   i12 <= '0'; i13 <= '0'; i14 <= '0'; i15 <= '0';
104   s0 <= '0'; s1 <= '0'; s2 <= '0'; s3 <= '0';
105   s4 <= '0'; s5 <= '0';
106   wait for 10 ns;
107
108   -- Test Case 1: Selezione i0
109   i0 <= '1'; s0 <= '0'; s1 <= '0'; s2 <= '0'; s3 <= '0'; s4 <= '0';
110   ↵ s5 <= '0';
111   wait for 10 ns;
112
113   -- Test Case 2: Selezione i3
114   i3 <= '1'; s0 <= '1'; s1 <= '1'; s2 <= '0'; s3 <= '0'; s4 <= '0';
115   ↵ s5 <= '0';
116   wait for 10 ns;
117
118   -- Test Case 3: Selezione i7
119   i7 <= '1'; s0 <= '1'; s1 <= '1'; s2 <= '1'; s3 <= '0'; s4 <= '0';
120   ↵ s5 <= '0';
121   wait for 10 ns;
122
123
124   -- Test Case 4: Selezione i12
125   i12 <= '1'; s0 <= '0'; s1 <= '0'; s2 <= '0'; s3 <= '1'; s4 <=
126   ↵ '1'; s5 <= '0';
127   wait for 10 ns;
128
129   -- Test Case 5: Selezione i15
130   i15 <= '1'; s0 <= '1'; s1 <= '1'; s2 <= '1'; s3 <= '1'; s4 <=
131   ↵ '1'; s5 <= '0';
132   wait for 10 ns;
133
134   -- Test Case 6: Nessun ingresso attivo
135   i0 <= '0'; i1 <= '0'; i2 <= '0'; i3 <= '0';
136   i4 <= '0'; i5 <= '0'; i6 <= '0'; i7 <= '0';
137   i8 <= '0'; i9 <= '0'; i10 <= '0'; i11 <= '0';
138   i12 <= '0'; i13 <= '0'; i14 <= '0'; i15 <= '0';
139   s0 <= '0'; s1 <= '0'; s2 <= '0'; s3 <= '0'; s4 <= '0'; s5 <=
140   ↵ '0';
141   wait for 10 ns;
142
143
144   -- Test Case 7: Selezione i5

```

```
137      i5 <= '1'; s0 <= '1'; s1 <= '0'; s2 <= '1'; s3 <= '0'; s4 <= '0';
138      ↵ s5 <= '0';
139      wait for 10 ns;
140
140      -- Test Case 8: Selezione i10
141      i10 <= '1'; s0 <= '0'; s1 <= '1'; s2 <= '0'; s3 <= '1'; s4 <=
142          ↵ '0'; s5 <= '0';
142      wait for 10 ns;
143
144      -- Test Case 9: Selezione i6
145      i6 <= '1'; s0 <= '1'; s1 <= '0'; s2 <= '1'; s3 <= '1'; s4 <=
146          ↵ s5 <= '0';
146      wait for 10 ns;
147
148      -- Test Case 10: Selezione i9
149      i9 <= '1'; s0 <= '0'; s1 <= '1'; s2 <= '1'; s3 <= '0'; s4 <=
150          ↵ s5 <= '0';
150      wait for 10 ns;
151
152      -- Test Case 11: Selezione i14
153      i14 <= '1'; s0 <= '1'; s1 <= '1'; s2 <= '0'; s3 <= '1'; s4 <=
154          ↵ '1'; s5 <= '0';
154      wait for 10 ns;
155
156      -- Fine del test
157      wait;
158      end process;
159
160 end;
```

Code 1.9: Testbench: Rete di interconnessione 16:4

I risultati di tale simulazione sono osservabili nella seguente waveform realizzata dal tool di Vivado.

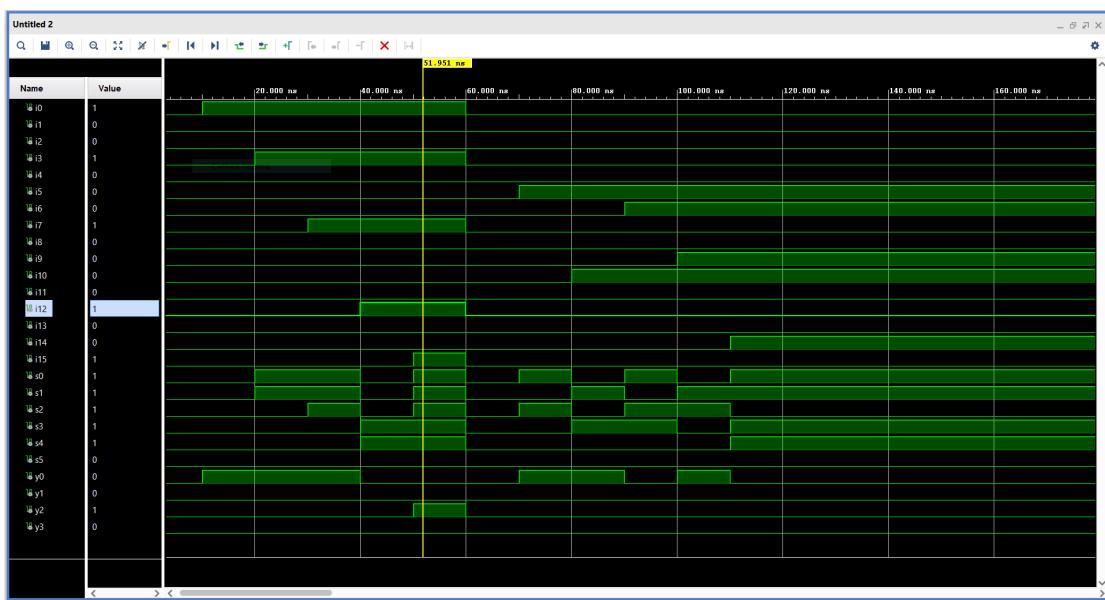


Figura 1.15: Rete di interconnessione: waveform

1.3 Implementazione su board del punto precedente

La board utilizzata è la **Nexys A7**, una scheda di sviluppo basata su FPGA progettata da Digilent.

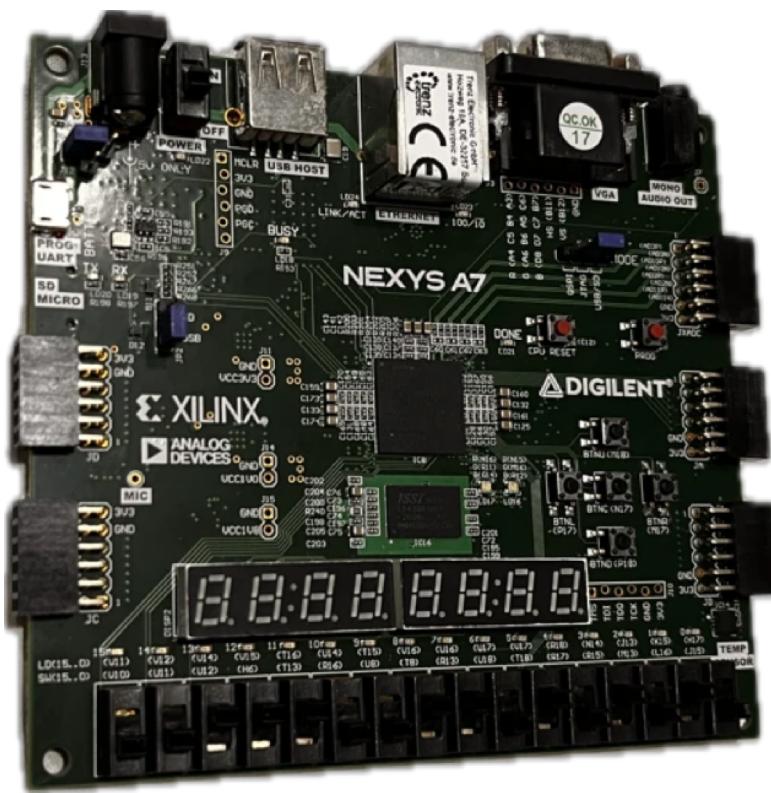


Figura 1.16: Board Nexys A7

Sintetizzare ed implementare su board il progetto della rete di interconnessione sviluppato al punto 1.2, utilizzando gli switch per fornire gli input di selezione e i led per visualizzare i 4 bit di uscita. Per quanto riguarda i 16 bit dato in input, essi devono essere immessi mediante switch, 8 bit alla volta, sviluppando un'apposita “rete di controllo” per l’acquisizione che utilizzi due bottoni della board per caricare rispettivamente la prima e la seconda metà del dato in ingresso.

1.3.1 Implementazione

Per permettere lo sviluppo sulla board, è stato necessario gestire gli input in modo appropriato; per fare ciò che viene richiesto, si è scelto

di usare il bottone *BTNL* per il caricamento della prima metà degli ingressi, il bottone *BTNR* per il caricamento della seconda metà degli ingressi, e il bottone *BTNU* per il caricamento dei segnali di selezione; inoltre è stato previsto un bottone per il reset, *BTNC*. Gli ingressi sono stati gestiti con gli switch, e le uscite sono visualizzabili tramite i led. I primi 8 switch (da 0 a 7) sono stati utilizzati per gli ingressi, mentre i successivi 6 (da 8 a 13) per le selezioni. I led utilizzati per le uscite sono invece i primi 4 (da 0 a 3). Per permettere opportune connessioni tra i componenti hardware e i segnali utilizzati nella rete di interconnessione, è stata implementata una unità di controllo, che ha gestito gli ingressi in due fasi distinte, oltre che i segnali di selezione.

Segue il codice dell'unità di controllo:

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity control_unit is
5     Port (
6         clock : in STD_LOGIC;
7         reset : in STD_LOGIC;
8         load_first_part : in STD_LOGIC;
9         load_second_part : in STD_LOGIC;
10        load_selection: in STD_LOGIC;
11        value8_in : in STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0);
12        --valore acquisito dai primi 8 switch
13        value16_out: out STD_LOGIC_VECTOR(15 downto 0);
14        selection_in: in STD_LOGIC_VECTOR(5 downto 0);
15        sel_out: out STD_LOGIC_VECTOR(5 downto 0)
16    );
17 end control_unit;
18
19 architecture Behavioral of control_unit is
20
21 signal reg_value : STD_LOGIC_VECTOR(15 downto 0) := (others => '0');
22 signal selection_value: STD_LOGIC_VECTOR(5 downto 0);
```

```
22
23 begin
24     value16_out <= reg_value;
25     sel_out <= selection_value;
26
27 main: process(clock)
28 begin
29
30     if clock'event and clock = '1' then
31         if reset = '1' then
32             reg_value <= (others => '0');
33         else
34             if load_first_part = '1' then
35                 reg_value(7 downto 0) <= value8_in;
36             elsif load_second_part = '1' then
37                 reg_value(15 downto 8) <= value8_in;
38             elsif load_selection = '1' then
39                 selection_value <= selection_in;
40             end if;
41         end if;
42     end if;
43
44 end process;
45
46
47 end Behavioral;
```

Code 1.10: Control unit

Inoltre, per consentire il funzionamento del sistema sulla board, è stato implementato il seguente codice:

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4
5 entity interc_16_4onBoard is
6 Port(
7     clock : in STD_LOGIC; --clock board
8     reset : in STD_LOGIC; --reset, associato al
9     ↪ bottone BTNC
10    load_first_part : in STD_LOGIC; --comando di
11    ↪ caricamento 8 bit meno significativi
```

```

10          load_second_part : in STD_LOGIC; --comando di
11          ↳ caricaernto 16bit piu' significativi
12          value8_in : in STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0);
13          ↳ --input di 8 bit inserito tramite switch (di
14          ↳ volta in volta
15          --in base al segnale di controllo corrispondera'
16          ↳ alle due meta' del valore da visualizzare
17          selection_in: in STD_LOGIC_VECTOR(5 downto 0); --
18          ↳ selezione acquisita dagli switch
19          load_selection: in STD_LOGIC; --comando per
20          ↳ caricare i segnali di selezione: BTNU
21          y0, y1, y2, y3: out STD_LOGIC
22          );
23
24      end interc_16_4onBoard;
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
architecture structural of interc_16_4onBoard is
component control_unit is
Port (
    clock : in STD_LOGIC;
    reset : in STD_LOGIC;
    load_first_part : in STD_LOGIC;
    load_second_part : in STD_LOGIC;
    load_selection: in STD_LOGIC;
    value8_in : in STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0);
    ↳ --valore acquisito da 8 switch alla volta
    value16_out: out STD_LOGIC_VECTOR(15 downto 0);
    selection_in: in STD_LOGIC_VECTOR(5 downto 0);
    sel_out: out STD_LOGIC_VECTOR(5 downto 0)
    );
end component;
component interc16_4 is
port (
    i0 : in STD_LOGIC;
    i1 : in STD_LOGIC;
    i2 : in STD_LOGIC;
    i3 : in STD_LOGIC;
    i4 : in STD_LOGIC;
    i5 : in STD_LOGIC;
    i6 : in STD_LOGIC;
    i7 : in STD_LOGIC;
    i8 : in STD_LOGIC;
    i9 : in STD_LOGIC;
    i10 : in STD_LOGIC;
    i11 : in STD_LOGIC;
    i12 : in STD_LOGIC;

```

```
49                     i13 : in STD_LOGIC;
50                     i14 : in STD_LOGIC;
51                     i15 : in STD_LOGIC;
52                     s0 : in STD_LOGIC;
53                     s1 : in STD_LOGIC;
54                     s2 : in STD_LOGIC;
55                     s3 : in STD_LOGIC;
56                     s4 : in STD_LOGIC;
57                     s5 : in STD_LOGIC;
58                     y0 : out STD_LOGIC;
59                     y1 : out STD_LOGIC;
60                     y2 : out STD_LOGIC;
61                     y3 : out STD_LOGIC
62                 );
63 end component;
64
65 signal cu_value: STD_LOGIC_VECTOR(15 downto 0);
66 signal cu_sel: STD_LOGIC_VECTOR( 5 downto 0);
67
68 begin
69 cu: control_unit
70     port map(
71         clock => clock,
72         reset => reset,
73         load_first_part => load_first_part,
74         load_second_part => load_second_part,
75         load_selection => load_selection,
76         value8_in => value8_in,
77         value16_out => cu_value,
78         selection_in => selection_in,
79         sel_out => cu_sel
80     );
81
82 ri: interc16_4
83     port map(
84         i0 => cu_value(0),
85         i1 => cu_value(1),
86         i2 => cu_value(2),
87         i3 => cu_value(3),
88         i4 => cu_value(4),
89         i5 => cu_value(5),
90         i6 => cu_value(6),
91         i7 => cu_value(7),
92         i8 => cu_value(8),
93         i9 => cu_value(9),
94         i10 => cu_value(10),
```

```
95      i11 => cu_value(11),
96      i12 => cu_value(12),
97      i13 => cu_value(13),
98      i14 => cu_value(14),
99      i15 => cu_value(15),
100     s0 => cu_sel(0),
101     s1 => cu_sel(1),
102     s2 => cu_sel(2),
103     s3 => cu_sel(3),
104     s4 => cu_sel(4),
105     s5 => cu_sel(5),
106     y0 => y0,
107     y1 => y1,
108     y2 => y2,
109     y3 => y3
110   );
111
112 end structural;
```

Code 1.11: Implementazione: Rete di interconnessione on Board

1.3.2 Funzionamento

Di seguito si mostra l'esecuzione su board di uno dei casi di test visti in precedenza nella fase di simulazione. In particolare è stato testato ciò che avveniva a 51 ns, e si può vedere che il led acceso corrisponde con l'uscita attesa $y2$.

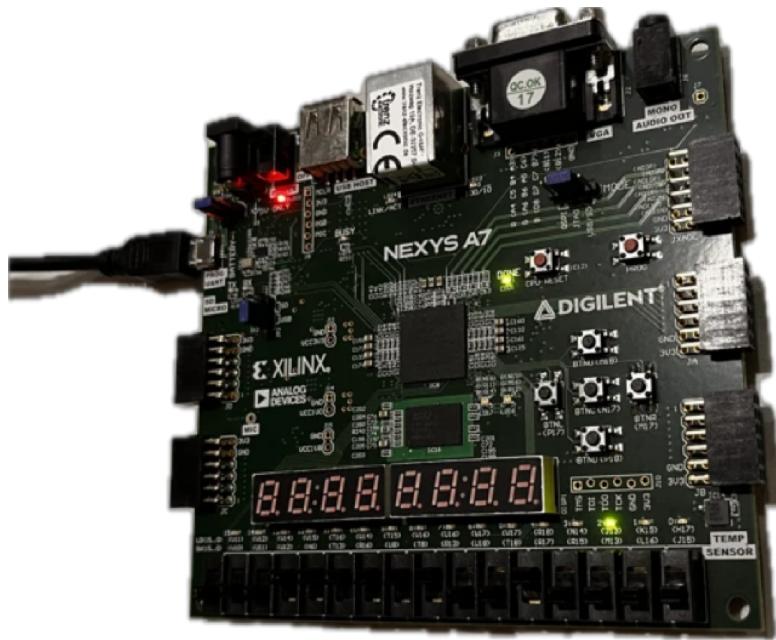


Figura 1.17: Uscita y2 attiva

Capitolo 2

Esercizio 2 - Sistema ROM+M

Il sistema che si vuole costruire consiste in due elementi principali: una ROM (Read-Only-Memory) puramente combinatoria e una macchina combinatoria M, che esegue una trasformazione sui dati letti da M e li pone in uscita. La ROM si compone di 16 locazioni di memoria, ciascuna contenente una stringa di 8 bit. Il sistema prende in ingresso un indirizzo di 4 bit, che permetterà di accedere a una delle locazioni della ROM; il dato in tale locazione viene posto in uscita alla ROM, e quindi in ingresso alla macchina M. La macchina M deve effettuare una trasformazione sulla stringa di 8 bit, in modo da restituire in uscita una stringa di 4 bit. La trasformazione scelta consiste nel sommare i 4 bit più significativi della stringa con i 4 bit meno significativi, la stringa di 4 bit risultante sarà restituita come uscita all'intero sistema.

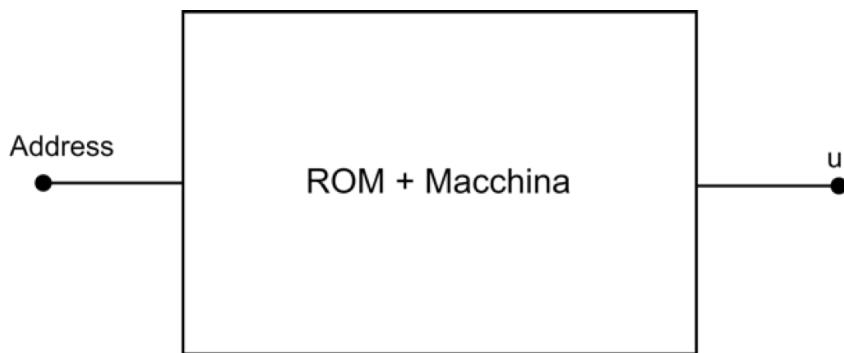


Figura 2.1: ROM + M

2.1 Progettazione

La progettazione consiste nella realizzazione dei due componenti fondamentali del sistema: ROM e M.

2.2 Implementazione

Dapprima si implementa la ROM, in cui sono memorizzati 16 elementi, ciascuno da 8 bit. Il codice sottostante crea l'entità ROM, al cui ingresso è presente un vettore da 4 bit di `std_logic` che rappresenta l'indirizzo, e in uscita restituisce un vettore di 8 bit. Vengono poi definite le stringhe di bit contenute nella ROM. Nel processo `main`, si pone in uscita l'elemento corrispondente alla locazione `address`.

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3 use IEEE.NUMERIC_STD.ALL;
4
5
```

```

6
7 entity ROM is
8     port(
9         address: in STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
10        dout: out STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0)
11    );
12 end entity ROM;
13
14 architecture RTL of ROM is
15
16 type MEMORY is array(15 downto 0) of STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0);
17     --memoria da N locazioni che contengono 8 bit
18 constant ROM_N: MEMORY := (
19     "01000000", -- in locazione 15
20     "01000001",
21     "01000010",
22     "01000011",
23     "00010100",
24     "01000101",
25     "00000110",
26     "01000111",
27     "00001000",
28     "00001001",
29     "01001010",
30     "00001011",
31     "00001100",
32     "00001101",
33     "10001010",
34     "00001001" --in locazione 0
35 );
36
37 begin
38 main: process(address)
39 begin
40 dout<= ROM_N(TO_INTEGER(unsigned(address))); --lettura dalla rom
41 end process main;
42 end architecture RTL;

```

Code 2.1: Implementazione ROM in VHDL

Si procede poi con l'implementazione del componente M, che effettua la trasformazione.

```

1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3 use IEEE.NUMERIC_STD.ALL;
4
5 entity M is
6     port(
7         ingresso: in std_logic_vector(7 downto 0);
8         uscita: out std_logic_vector(3 downto 0)
9     );
10
11 end entity M;
12
13 architecture Behavioral of M is
14 begin
15     process(ingresso)
16     begin
17         -- Somma dei 4 bit piu' significativi e dei 4 meno
18         -- significativi
19         uscita <= std_logic_vector(unsigned(ingresso(7 downto 4)) +
20             unsigned(ingresso(3 downto 0)));
21     end process;
22 end Behavioral;

```

Code 2.2: Macchina M

Nel processo si pone come uscita della macchina la somma tra i bit più significativi dell'ingresso (dal bit 7 al 4) e dei bit meno significativi (dal bit 3 allo 0).

Le due componenti sono parte del sistema S che è così implementato:

```

1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3 use IEEE.NUMERIC_STD.ALL;
4
5 entity ROMplusM is
6     Port (
7         A: in std_logic_vector(3 downto 0); --indirizzo in ingresso
8             -- al sistema

```

```

8         bout: out std_logic_vector(3 downto 0) --uscita complessiva
9             → del sistema
10        );
11    end ROMplusM;
12
13 architecture structural of ROMplusM is
14 signal u0 : std_logic_vector(7 downto 0) := "00000000";
15
16 component ROM
17     port(
18         address: in STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
19         dout: out STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0)
20     );
21     end component;
22 component M
23     port(
24         ingresso: in std_logic_vector(7 downto 0);
25         uscita: out std_logic_vector(3 downto 0)
26     );
27     end component;
28
29 begin
30     -- Istanza della ROM
31     rom_instance: ROM
32     port map(
33         address => A,
34         dout => u0
35     );
36     -- Istanza della macchina combinatoria M
37     transform: M
38     port map(
39         ingresso => u0,
40         uscita => bout
41     );
42 end structural;

```

Code 2.3: Sistema S

Tale sistema è stato costruito come structural: sono stati dichiarati i componenti, e ne sono state definite le istanze. Si è utilizzato un segnale di supporto u_0 , che funge da segnale intermedio tra l'uscita della ROM e l'ingresso della macchina.

Si osserva lo schematic fornito dall'ambiente di sviluppo Vivado:



Figura 2.2: Schematic di S

2.3 Simulazione

Per procedere alla simulazione si realizza un testbench, con diversi casi di test, che permettano di osservare il comportamento del sistema.

```

1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3 use IEEE.NUMERIC_STD.ALL;
4
5 entity ROMplusM_tb is
6     -- Un testbench non ha porte, e' un'entita' vuota.
7 end ROMplusM_tb;
8
9 architecture behavior of ROMplusM_tb is
10
11     -- Component declaration for the unit under test (UUT)
12     component ROMplusM
13         Port (
14             A: in std_logic_vector(3 downto 0);
15             bout: out std_logic_vector(3 downto 0)
16         );
17     end component;
18
19     -- Signals to connect to the UUT
20     signal A_tb: std_logic_vector(3 downto 0) := (others => '0'); --
21     -- Ingresso inizializzato a 0
22     signal bout_tb: std_logic_vector(3 downto 0); -- Uscita

```

```

23 begin
24
25     -- Instantiation of the UUT (Unit Under Test)
26     uut: ROMplusM
27     Port map (
28         A => A_tb,
29         bout => bout_tb
30     );
31
32     -- Stimulus process to provide inputs and check outputs
33     stimulus_process: process
34     begin
35         -- Test 1: Indirizzo A = 0
36         A_tb <= "0000";
37         wait for 10 ns;
38
39         -- Test 2: Indirizzo A = 1
40         A_tb <= "0001";
41         wait for 10 ns;
42
43         -- Test 3: Indirizzo A = 2
44         A_tb <= "0010";
45         wait for 10 ns;
46
47         -- Test 4: Indirizzo A = 3
48         A_tb <= "0011";
49         wait for 10 ns;
50
51         -- Test 5: Indirizzo A = 5
52         A_tb <= "0101";
53         wait for 10 ns;
54
55         -- Test 6: Indirizzo A = 7
56         A_tb <= "0111";
57         wait for 10 ns;
58
59         -- Test 7: Indirizzo A = 10
60         A_tb <= "1010";
61         wait for 10 ns;
62
63         -- Test 8: Indirizzo A = 255
64         A_tb <= "1111";
65         wait for 10 ns;
66
67         -- Fine simulazione
68         wait;

```

```

69      end process;
70
71 end behavior;
```

Code 2.4: Testbench

La seguente figura permette la visualizzazione delle waveform.

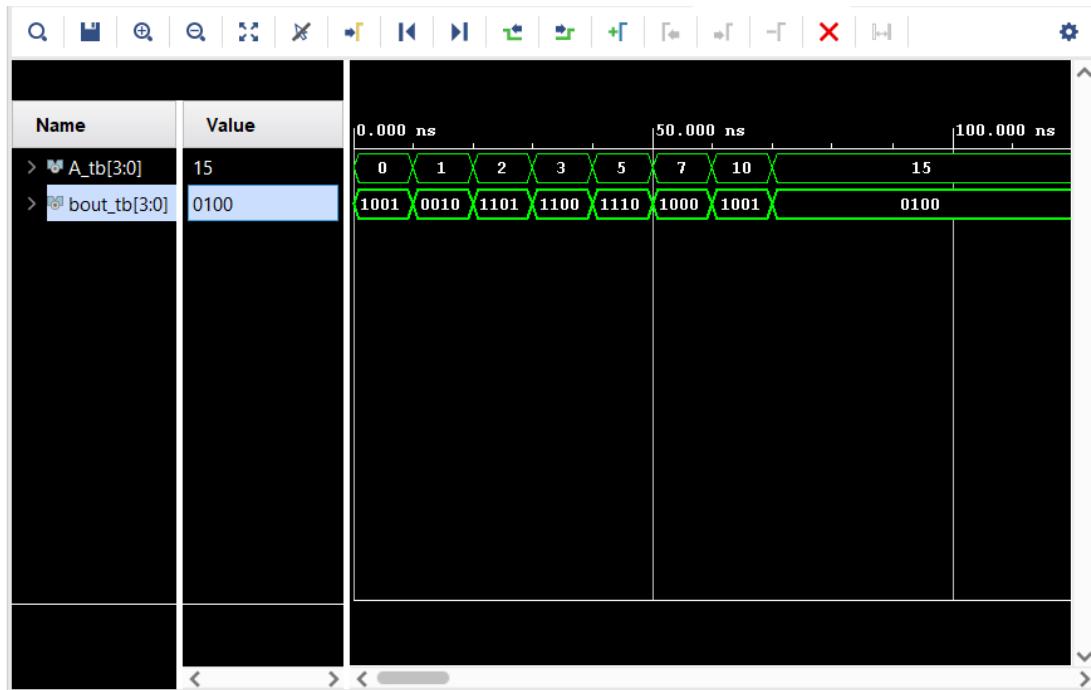


Figura 2.3: Waveform della simulazione di S

Si procede con dei test effettuati manualmente per mostrare la correttezza nel funzionamento del sistema S. Per consentire una maggiore leggibilità, si è scelto di visualizzare gli indirizzi come Unsigned Decimal.

Nel caso $A = 0$, si accede alla stringa 00001001, sommando i bit meno significativi con quelli più significativi si ottiene $0000 + 1001 = 1001$; nel caso $A = 5$, si accede alla stringa 01001010, e procedendo come sopra si ottiene $0100 + 1010 = 1110$.

Come si può vedere, i risultati di questi test coincidono con il comportamento atteso dal sistema e che sono mostrati nella waveform relativa alla simulazione.

2.4 Implementazione su board

Sintetizzare ed implementare su board il progetto del sistema ROM+M sviluppato al punto 2.1, utilizzando gli switch per fornire l'indirizzo della ROM da cui leggere i valori da trasformare e i led per visualizzare i 4 bit di uscita.

2.4.1 Implementazione

In questo caso, per implementare il sistema sulla board, è stato sufficiente modificare il file `Nexys-A7-50T-Master.xdc`, collegando i primi 4 switch (da 0 a 3) all'indirizzo *A* in ingresso, e i led da 0 a 3 alle uscite bout della macchina.

In particolare, il file xdc è composto dalle seguenti righe utili:

```
#GESTIONE SWITCH
set_property -dict {PACKAGE_PIN J15 IOSTANDARD LVCMOS33} [get_ports{ A[0]}];
# IO_L24N_T3_RS0_15 Sch=sw[0]

set_property -dict {PACKAGE_PIN L16 IOSTANDARD LVCMOS33} [get_ports{ A[1]}];
# IO_L3N_T0_DQS_EMCCCLK_14 Sch=sw[1]

set_property -dict {PACKAGE_PIN M13 IOSTANDARD LVCMOS33} [get_ports{ A[2]}];
# IO_L6N_T0_D08_VREF_14 Sch=sw[2]

set_property -dict {PACKAGE_PIN R15 IOSTANDARD LVCMOS33} [get_ports{ A[3]}];
# IO_L13N_T2_MRCC_14 Sch=sw[3]

#GESTIONE LED
set_property -dict {PACKAGE_PIN H17 IOSTANDARD LVCMOS33} [get_ports {bout[0]}];
```

CAPITOLO 2. ESERCIZIO 2 - SISTEMA ROM+M

```
#IO_L18P_T2_A24_15 Sch=led[0]
set_property -dict {PACKAGE_PIN K15 IOSTANDARD LVCMOS33} [get_ports {bout[1]}];
#IO_L24P_T3_RS1_15 Sch=led[1]
set_property -dict {PACKAGE_PIN J13 IOSTANDARD LVCMOS33} [get_ports {bout[2]}];
#IO_L17N_T2_A25_15 Sch=led[2]
set_property -dict {PACKAGE_PIN N14 IOSTANDARD LVCMOS33} [get_ports {bout[3]}];
#IO_L8P_T1_D11_14 Sch=led[3]
```

Si mostrano in seguito alcuni test eseguiti sulla board, che hanno confermato i risultati ottenuti dalla simulazione.

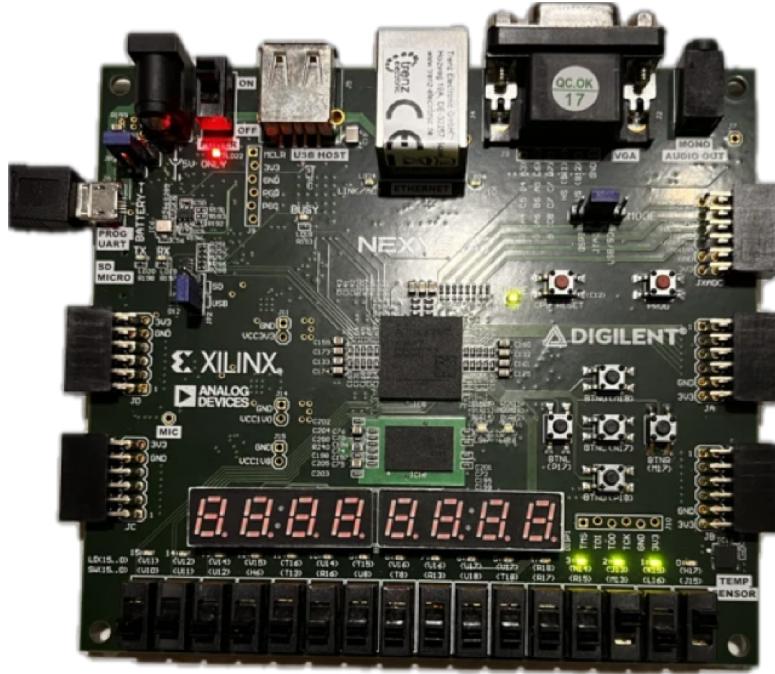


Figura 2.4: $A = "0101"$, $bout = "1110"$

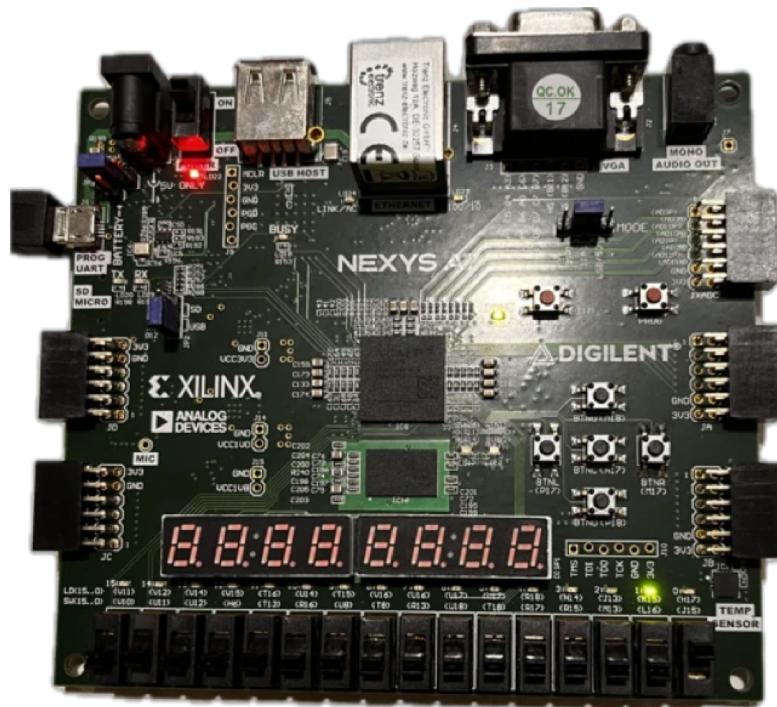


Figura 2.5: $A = "0001"$, $bout = "0010"$

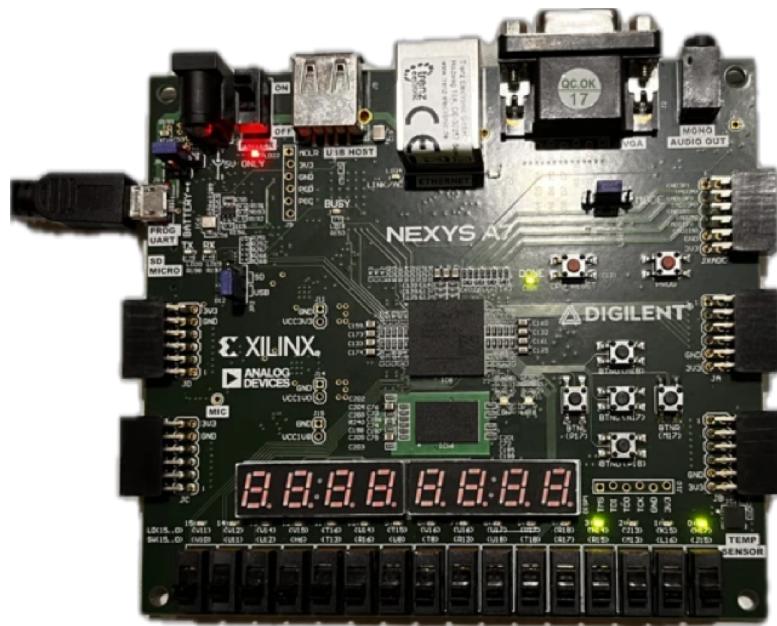


Figura 2.6: $A = "1001"$, $bout = "1001"$

Confrontando i risultati ottenuti con la waveform generata dalla simulazione si confermano le conclusioni precedenti.

Capitolo 3

Esercizio 3

3.1 Riconoscitore di sequenze

Un **riconoscitore di sequenze**, è una macchina sequenziale impulsiva¹ che riceve una sequenza di bit in ingresso e che, a seconda se tale sequenza sia uguale o non ad una data, ritorni i valori 1 e 0, rispettivamente.

In particolare si possono avere due tipi di riconoscitori:

1. **riconoscitori di sequenze non sovrapposte**: valuta i bit in ingresso a gruppi di n elementi alla volta;
2. **riconoscitori di sequenze parzialmente sovrapposte**: valuta i bit in ingresso a uno alla volta, tornando allo stato iniziale ogni qual volta la sequenza viene riconosciuta.

¹Macchina in cui l'uscita è vera solo per un determinato stato e per un determinato ingresso, e poi torna ad essere falsa.

Nel caso in esame si vuole implementare un riconoscitore della sequenza **101**.

Oltre al dato, tale macchina ha in ingresso la tempificazione A e il valore M , che nel caso in cui $M = 0$, la macchina lavora come riconoscitore di sequenze non sovrapposte, mentre se $M = 1$ lavora come riconoscitore di sequenze parzialmente sovrapposte.

3.1.1 Progettazione e architettura

Per progettare una macchina sequenziale, vi è bisogno dell'automa a stati finiti.

Nel caso in questione, vi è il seguente risultato

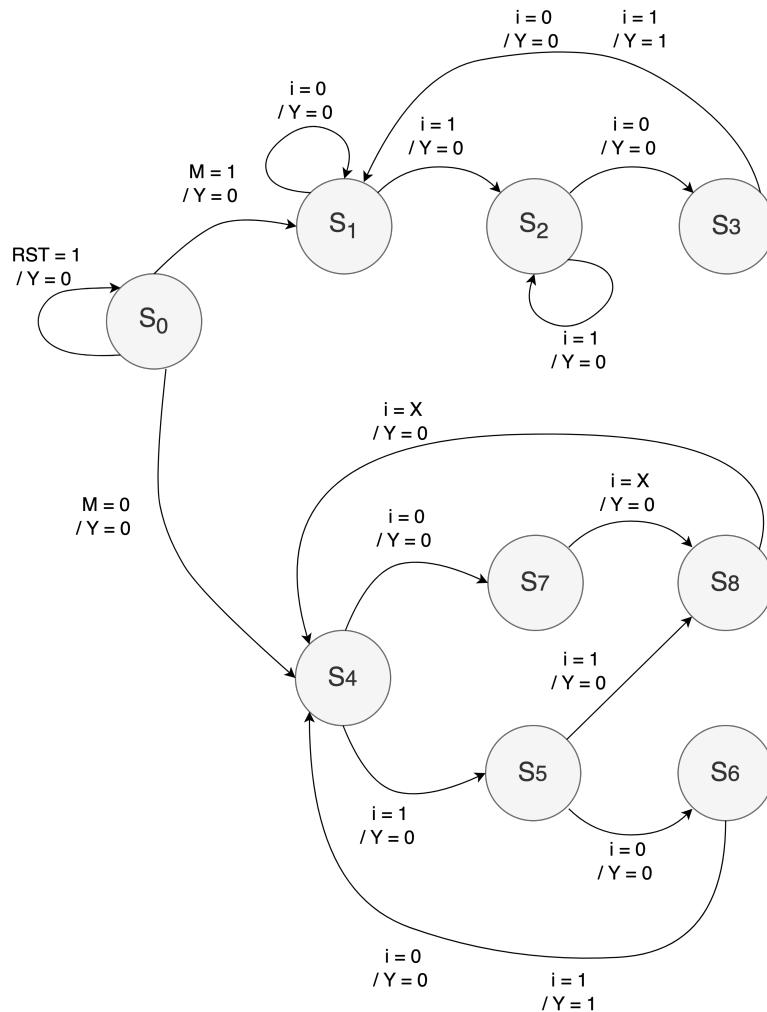


Figura 3.1: Automa riconoscitore di sequenza

3.1.2 Implementazione

Per l'implementazione VHDL dell'automa, si dichiarano dapprima gli ingressi

- RST: permette il reset della macchina, portandola allo stato S_0 ;
- A: rappresenta l'abilitazione, ovvero il clock;
- i : è l'ingresso;

- M: permette di selezionare con quale modalità far lavorare la macchina: se $M = 0$ effettua il riconoscimento a gruppi di tre bit per volta; se $M = 1$ effettua il riconoscimento un bit alla volta

L'uscita è rappresentata dal segnale Y.

L'architettura è costruita con un approccio comportamentale e vi è una variazione di stato ad ogni fronte di salita del clock (A).

Si vuole notare che il segnale RST è sincrono.

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.all;
3
4 entity riconoscitore is
5     port
6     (
7         RST:    in  std_logic;
8         i:      in  std_logic;
9         A:      in  std_logic;
10        M:      in  std_logic;
11        Y:      out std_logic
12    );
13 end riconoscitore;
14
15 architecture Behavioral of riconoscitore is
16     type state_type is (S0, S1, S2, S3, S4, S5 , S6, S7, S8);
17     signal current_state, next_state: state_type;
18     signal temp_y: std_logic;
19
20 begin
21     process(A, RST)
22     begin
23         if rising_edge(A) then          -- (A's event and A='1')
24             if RST = '1' then
25                 current_state  <= S0;
26                 Y            <= '0';
27             else
28                 current_state  <= next_state;
29                 Y            <= temp_y;
```

```
30         end if;
31     end if;
32 end process;
33
34 process (current_state, i, M)
35 begin
36     next_state           <= current_state;
37     --Y                  <= '0';
38
39     case current_state is
40     when S0 =>
41         if M = '1' then
42             next_state      <= S1;
43             temp_y          <= '0';
44         elsif M = '0' then
45             next_state      <= S4;
46             temp_y          <= '0';
47         end if;
48     when S1 =>
49         if i = '0' then
50             next_state      <= current_state;
51             temp_y          <= '0';
52         elsif i = '1' then
53             next_state      <= S2;
54             temp_y          <= '0';
55         end if;
56     when S2 =>
57         if i = '1' then
58             next_state      <= current_state;
59             temp_y          <= '0';
60         elsif i = '0' then
61             next_state      <= S3;
62             temp_y          <= '0';
63         end if;
64     when S3 =>
65         next_state       <= S1;
66         if i = '0' then
67             temp_y          <= '0';
68         elsif i = '1' then
69             temp_y          <= '1';
70         end if;
71
72     when S4 =>
73         if i = '0' then
74             next_state      <= S7;
75             temp_y          <= '0';
```

```

76      elsif i = '1' then
77          next_state      <=  S5;
78          temp_y         <=  '0';
79      end if;
80
81      when S5 =>
82          if i = '1' then
83              next_state      <=  S8;
84              temp_y         <=  '0';
85          elsif i = '0' then
86              next_state      <=  S6;
87              temp_y         <=  '0';
88          end if;
89      when S6 =>
90          next_state      <=  S4;
91          if i = '1' then
92              temp_y         <=  '1';
93          end if;
94      when S7 =>
95          next_state      <=  S8;
96          temp_y         <=  '0';
97      when S8 =>
98          next_state      <=  S4;
99          temp_y         <=  '0';
100     end case;
101 end process;
102 end Behavioral;
```

Code 3.1: riconoscitore.vhdl

3.1.3 Simulazione

Per effettuare la simulazione, è stato necessario il seguente testbench.

```

1 -- Testbench for riconoscitore (sequence 101 detection)
2 library IEEE;
3 use IEEE.Std_logic_1164.all;
4 use IEEE.Numeric_Std.all;
5
6 entity riconoscitore_tb is
```

```

7  end;
8
9  architecture bench of riconoscitore_tb is
10
11  component riconoscitore
12    port
13    (
14      RST:  in std_logic;
15      i:    in std_logic; -- Input signal
16      A:    in std_logic; -- Clock signal
17      M:    in std_logic; -- Mode or another input (adjust as
18      -- needed)
19      Y:    out std_logic -- Output signal (detects "101")
20    );
21  end component;
22
23  signal RST: std_logic := '0';
24  signal i: std_logic := '0';
25  signal A: std_logic := '0'; -- Clock
26  signal M: std_logic := '0';
27  signal Y: std_logic;
28
29  constant clock_period: time := 10 ns;
30  signal stop_the_clock: boolean := false;
31
32 begin
33
34  uut: riconoscitore port map (
35    RST => RST,
36    i    => i,
37    A    => A,
38    M    => M,
39    Y    => Y
40  );
41
42  -- Clock generation
43  clocking: process
44  begin
45    while not stop_the_clock loop
46      A <= '0';
47      wait for clock_period/2;
48      A <= '1';
49      wait for clock_period/2;
50    end loop;
51    wait;
52  end process;

```

```
52
53    -- Stimulus process
54  stimulus: process
55  begin
56      -- Initialization
57      RST <= '1';
58      wait for 2 * clock_period; -- Hold reset for 2 clock cycles
59      RST <= '0';
60      wait for clock_period;
61
62      M <= '1';
63      wait for 2 * clock_period;
64      i <= '1';
65      wait for clock_period;
66      i <= '1';
67      wait for clock_period;
68      i <= '0';
69      wait for clock_period;
70      i <= '1';
71      wait for clock_period;
72      i <= '0';
73      wait for clock_period;
74      i <= '0';
75      wait for clock_period;
76      i <= '1';
77      wait for clock_period;
78      i <= '0';
79      wait for clock_period;
80      i <= '1';
81      wait for clock_period;
82
83      RST <= '1';
84      wait for 2 * clock_period;
85      RST <= '0';
86      wait for clock_period;
87
88      M <= '0';
89      wait for 2 * clock_period;
90      i <= '1';
91      wait for clock_period;
92      i <= '1';
93      wait for clock_period;
94      i <= '0';
95      wait for clock_period;
96      i <= '1';
97      wait for clock_period;
```

```

98      i <= '0';
99      wait for clock_period;
100     i <= '1';
101     wait for clock_period;
102     i <= '1';
103     wait for clock_period;
104     i <= '0';
105     wait for clock_period;
106     i <= '1';
107     wait for clock_period;
108
109
110     -- End simulation
111     stop_the_clock <= true;
112     wait;
113   end process;
114
115 end bench;

```

Code 3.2: riconoscitore_tb.vhdl

Gli ingressi sono i seguenti:

- $M = 1$:
– 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1
- $M = 0$:
– 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1

Il risultato è il seguente:

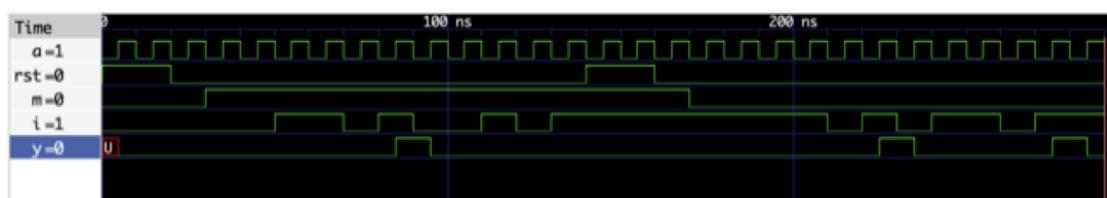


Figura 3.2: Simulazione Riconosciore

3.2 Implementazione su board del punto precedente

Sintetizzare e implementare su board la rete sviluppata al punto precedente, utilizzando uno switch S1 per codificare l'input i e uno switch S2 per codificare il modo M, in combinazione con due bottoni B1 e B2 utilizzati rispettivamente per acquisire l'input da S1 e S2 in sincronismo con il segnale di temporizzazione A, che deve essere ottenuto a partire dal clock della board. Infine, l'uscita Y può essere codificata utilizzando un led.

3.2.1 Implementazione

Il Riconoscitore di sequenza viene ripreso dal punto precedente, di conseguenza il suo codice viene importato nel progetto senza variazioni. Per gestire il funzionamento di tale sistema su board, prima di tutto si rende necessario l'utilizzo di un divisore di frequenze che ha la funzione di generare un segnale di clock con una frequenza più bassa rispetto al clock di ingresso. In particolare il processo implementato genera un clock di uscita con una frequenza pari a quella di ingresso divisa per il valore di *DIVISOR*. Si mostra il codice:

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3 use IEEE.NUMERIC_STD.ALL;
4
5 entity frequency_divider is
```

```

6   Port (
7     clock_in : in STD_LOGIC; -- Clock di ingresso
8     reset : in STD_LOGIC; -- Segnale di reset
9     clock_out : out STD_LOGIC -- Clock di uscita, divisore di
      → frequenza
10   );
11 end frequency_divider;
12
13 architecture Behavioral of frequency_divider is
14
15   -- Definire il valore massimo del contatore in base alla
      → divisione desiderata
16   -- clock di ingresso di 100 MHz, si vuole ottenere una frequenza
      → di uscita di 1 Hz:
17   constant CLOCK_FREQ : integer := 100_000_000; -- Frequenza del
      → clock di ingresso (100 MHz)
18   constant DIVISOR : integer := 100_000_000; -- Divisione
      → desiderata (1 Hz: 100 MHz / 100_000_000)
19   constant COUNT_MAX : integer := DIVISOR / 2 - 1; -- Calcola il
      → massimo valore del contatore (per ottenere un periodo
      → completo)
20
21   signal counter : integer range 0 to COUNT_MAX := 0; -- Contatore
      → per dividere la frequenza
22   signal clock_signal : STD_LOGIC := '0'; -- Segnale di clock di
      → uscita
23
24 begin
25
26   -- Processo che divide la frequenza
27   process(clock_in)
28   begin
29     if rising_edge(clock_in) then
30       if reset = '1' then
31         counter <= 0; -- Reset del contatore
32         clock_signal <= '0'; -- Reset del segnale di clock di
          → uscita
33       else
34         if counter = COUNT_MAX then
35           counter <= 0; -- Reset del contatore al
             → raggiungimento del massimo
36           clock_signal <= not clock_signal; -- Si inverte
             → il segnale di clock di uscita
37         else
38           counter <= counter + 1; -- Incrementa il
             → contatore

```

```
39         end if;
40     end if;
41   end if;
42 end process;
43
44 -- Collega il segnale di uscita al segnale di clock
45 clock_out <= clock_signal;
46
47 end Behavioral;
```

Code 3.3: frequency_divider.vhdl

Per la gestione degli input tramite i bottoni della board, è stata realizzata una unità di controllo; si usa lo *switch[0]* unito al bottone *BTNL* per l'ingresso "i", e lo *switch[1]* unito al bottone *BTNR* per l'ingresso "M". Si è scelto inoltre di mostrare le variazioni del clock sul *led[0]*, in modo da poter inserire correttamente gli input in corrispondenza del fronte di salita. L'uscita viene invece visualizzata sul *led[1]*.

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity control_unit is
5   Port (
6     A, reset: in STD_LOGIC;
7     load_in, load_sel: in STD_LOGIC;
8     value_in: in STD_LOGIC;
9     sel_in: in STD_LOGIC;
10    value_out: out STD_LOGIC;
11    sel_out: out STD_LOGIC
12  );
13 end control_unit;
14
15 architecture Behavioral of control_unit is
16 signal reg_value: STD_LOGIC;
17 signal reg_sel: STD_LOGIC;
18
19 begin
```

```

20 value_out <= reg_value;
21 sel_out <= reg_sel;
22
23 main: process (A)
24 begin
25   if (A'event AND A = '1') then
26     if (reset = '1') then
27       reg_value <= '0';
28       reg_sel <= '0';
29     elsif (load_sel = '1') then
30       reg_sel <= sel_in;
31     elsif (load_in = '1') then
32       reg_value <= value_in;
33     end if;
34   end if;
35 end process;
36 end Behavioral;

```

Code 3.4: control_unit.vhdl

Il codice del sistema su board, nel suo complesso, è stato realizzato seguendo un approccio di tipo strutturale:

```

1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity seqRecOnBoard is
5   Port (
6     A, reset: in STD_LOGIC;
7     load_i, load_M: in STD_LOGIC;
8     i, M: in STD_LOGIC;
9     Y: out STD_LOGIC;
10    led_out: out STD_LOGIC
11
12  );
13 end seqRecOnBoard;
14
15 architecture structural of seqRecOnBoard is
16   component control_unit
17     Port (
18       A, reset: in STD_LOGIC;
19       load_in, load_sel: in STD_LOGIC;
20       value_in: in STD_LOGIC;
21       sel_in: in STD_LOGIC;

```

```

22         value_out: out STD_LOGIC;
23         sel_out: out STD_LOGIC
24     );
25 end component;

26
27 component riconoscitore is
28     port
29     (
30         RST:    in  std_logic;
31         i:      in  std_logic;
32         A:      in  std_logic;
33         M:      in  std_logic;
34         Y:      out std_logic
35     );
36 end component;

37
38 component frequency_divider is
39     Port (
40         clock_in : in STD_LOGIC; -- Clock di ingresso
41         reset : in STD_LOGIC;    -- Segnale di reset
42         clock_out : out STD_LOGIC -- Clock di uscita, divisore di
43             ← frequenza
44     );
45 end component;

46 signal M_cu: STD_LOGIC;
47 signal i_cu: STD_LOGIC;
48 signal clock_temp: STD_LOGIC;
49
50 begin
51 cu: control_unit
52     port map(
53         A => A,
54         reset => reset,
55         load_in => load_i,
56         load_sel => load_M,
57         value_in => i,
58         sel_in => M,
59         value_out => i_cu,
60         sel_out => M_cu
61     );
62
63 sr: riconoscitore
64     port map(
65         RST => reset,
66         i => i_cu,

```

```
67      A => clock_temp,
68      M => M_cu,
69      Y => Y
70  );
71
72 fd: frequency_divider
73  port map(
74      clock_in => A,
75      reset => reset,
76      clock_out => clock_temp
77  );
78 led_out <= clock_temp;
79 end structural;
```

Code 3.5: Riconoscitore su board in vhdl

Capitolo 4

Esercizio 4

4.1 Shift Register - Approccio comportamentale

Si vuole implementare uno Shift Register con approccio comportamentale, la cui dimensione è N .

Tale macchina ha come ingresso un valore y con il quale si può scegliere di fare shift verso destra o sinistra e di fare shift di uno o due bit.

4.1.1 Progetto e architettura

La macchina da implementare è la seguente:

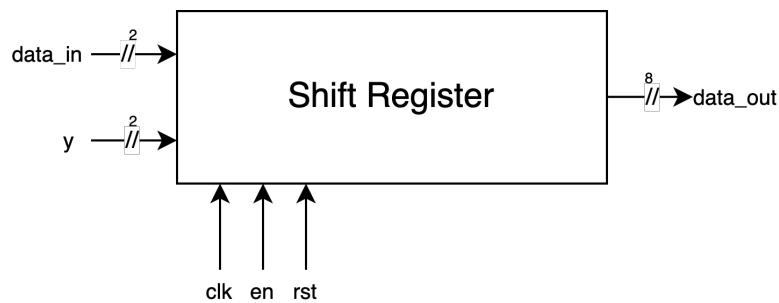


Figura 4.1: Shift Register

Dall'immagine si può notare che è stato scelto $N = 8$.

Gli ingressi sono i seguenti:

- `clk`: il clock, necessario per la temporizzazione. La macchina lavorerà sul fronte di salita;
- `en`: l'abilitazione, la quale permette di abilitare o disabilitare la macchina;
- `rst`: reset sincrono della macchina;
- `y`: vettore di 2 elementi che sceglie la modalità di funzionamento della macchina; in particolare:
 - $y = 00$: shift a sinistra di 1;
 - $y = 01$: shift a sinistra di 2;
 - $y = 10$: shift a destra di 1;
 - $y = 11$: shift a destra di 2;

- `data_in`: rappresenta i dati in ingresso; esso è un vettore di due elementi poiché quando vi è la necessità di fare uno shift di 2, si ha bisogno di due bit

L'uscita della macchina è `data_out`, vettore di 8 bit.

4.1.2 Implementazione

L'implementazione è la seguente

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3 use IEEE.NUMERIC_STD.ALL;
4
5 entity shift_register_beh is
6     generic ( N: integer := 8 );      --lunghezza registro
7
8     port
9     (
10         clk      : in  std_logic;
11         rst      : in  std_logic;
12         en       : in  std_logic;
13         y        : in  std_logic_vector(1 downto 0);
14         data_in : in  std_logic_vector(1 downto 0);
15         data_out: out std_logic_vector(N-1 downto 0)
16     );
17 end entity;
18
19 architecture behavioral of shift_register_beh is
20     signal reg  : std_logic_vector(N-1 downto 0);
21
22 begin
23     process(clk)
24     begin
25         if (rising_edge(clk)) then
26             if (rst = '1') then
27                 reg <= (others => '0');
28             end if;
29
30             if (en = '1') then
```

```

31      case y is
32        when "00" =>          --shift a sinistra di 1
33          reg(7 downto 1) <= reg(6 downto 0);
34          reg(0)           <= data_in(0);
35        when "01" =>          --shift a sinistra di 2
36          reg(7 downto 2) <= reg(5 downto 0);
37          reg(1)           <= data_in(1);
38          reg(0)           <= data_in(0);
39        when "10" =>          --shift a destra di 1
40          reg(6 downto 0) <= reg(7 downto 1);
41          reg(7)           <= data_in(0);
42        when "11" =>          --shift a destra di 2
43          reg(5 downto 0) <= reg(6 downto 1);
44          reg(6)           <= data_in(0);
45          reg(7)           <= data_in(1);
46        when others =>
47          null;
48      end case;
49    end if;
50  end if;
51 end process;
52
53 data_out <= reg;
54 end behavioral;

```

Code 4.1: shift_register_beh.vhdl

4.1.3 Simulazione

Per effettuare la simulazione, si utilizza il seguente testbench:

```

1 library IEEE;
2 use IEEE.Std_logic_1164.all;
3 use IEEE.Numeric_Std.all;
4
5 entity shift_register_beh_tb is
6 end;
7
8 architecture bench of shift_register_beh_tb is
9
10 component shift_register_beh
11   generic ( N: integer := 8 );

```

```

12      port
13      (
14          clk      : in  std_logic;
15          rst      : in  std_logic;
16          en       : in  std_logic;
17          Y        : in  std_logic_vector(1 downto 0);
18          data_in : in  std_logic_vector(1 downto 0);
19          data_out: out std_logic_vector(N-1 downto 0)
20      );
21  end component;
22
23  -- Signal declarations
24  signal clk      : std_logic := '0';
25  signal rst      : std_logic := '0';
26  signal en       : std_logic := '0';
27  signal Y        : std_logic_vector(1 downto 0) := "00";
28  signal data_in : std_logic_vector(1 downto 0) := "00";
29  signal data_out: std_logic_vector(7 downto 0);
30
31  constant clock_period: time := 10 ns;
32  signal stop_the_clock: boolean := false;
33
34 begin
35
36  -- Instanziazione del componente sotto test
37  uut: shift_register_beh
38  generic map ( N => 8 )  -- Dimensione del registro
39  port map (
40      clk      => clk,
41      rst      => rst,
42      en       => en,
43      Y        => Y,
44      data_in  => data_in,
45      data_out => data_out
46  );
47
48  -- Stimoli
49  stimulus: process
50  begin
51      -- Reset iniziale
52      rst <= '1';
53      wait for clock_period;
54      rst <= '0';
55      wait for clock_period;
56
57      -- Abilitazione e shift a sinistra di 1

```

```
58      en <= '1';
59      y <= "00";
60      data_in <= "01"; -- Input dati
61      wait for clock_period;
62
63      -- Shift a sinistra di 2
64      y <= "01";
65      data_in <= "10";
66      wait for clock_period;
67
68      -- Shift a destra di 1
69      y <= "10";
70      data_in <= "11";
71      wait for clock_period;
72
73      -- Shift a destra di 2
74      y <= "11";
75      data_in <= "01";
76      wait for clock_period;
77
78      -- Disabilitazione
79      en <= '0';
80      data_in <= "00";
81      wait for clock_period;
82
83      -- Concludi la simulazione
84      stop_the_clock <= true;
85      wait;
86  end process;
87
88  -- Processo di generazione del clock
89  clocking: process
90  begin
91      while not stop_the_clock loop
92          clk <= '0', '1' after clock_period / 2;
93          wait for clock_period;
94      end loop;
95      wait;
96  end process;
97
98 end;
```

Code 4.2: shift_register_beh_tb.vhdl

Il risultato della simulazione è il seguente:

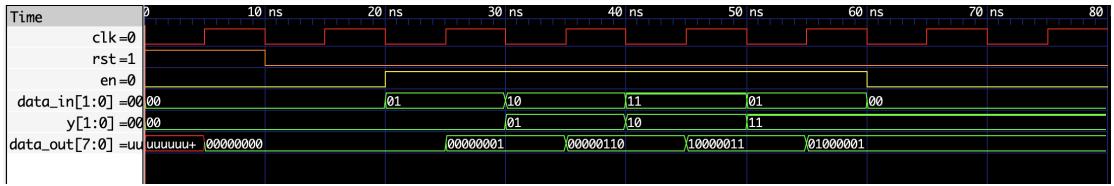


Figura 4.2: Simulazione Shift Register con approccio comportamentale

Si può facilmente notare dall'immagine che la macchina lavora come desiderato: ad ogni fronte di salita del clock e quando l'abilitazione è alta, in base alla modalità di lavoro, shifta a destra o a sinistra, di uno o due bit.

4.2 Shift Register - Approccio strutturale

Si vuole riprogettare la macchina precedente, figura 4.1, utilizzando un approccio strutturale.

Le componenti della macchina sono 8 registri da 1 bit e 8 mux 4:1.

Si sono scelti 8 registri poiché in tale esempio si realizza un registro da 8 bit ($N = 8$).

4.2.1 Progetto e architettura

Registro da un bit

Il primo componente necessario è il registro da un bit.

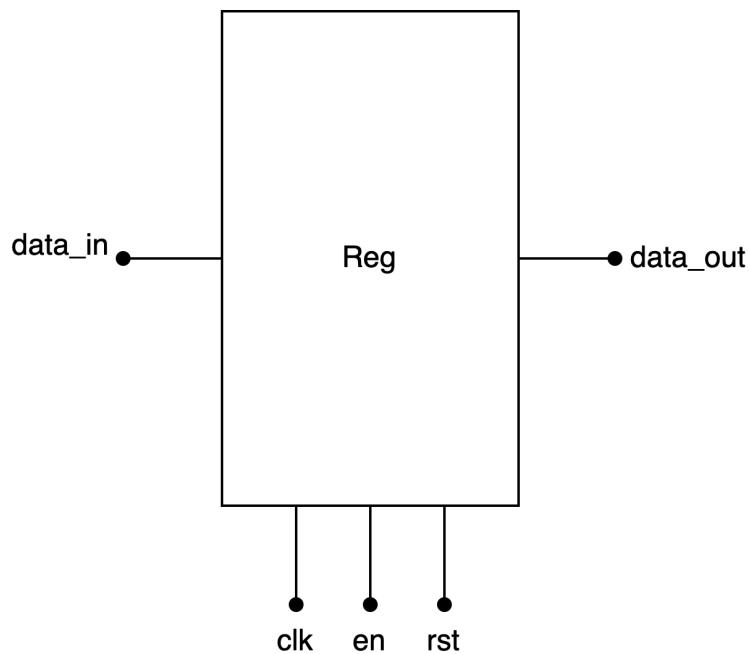


Figura 4.3: Registro da 1 bit

Gli ingressi di tale componente sono i seguenti:

- **data_in**: bit in ingresso, che verrà memorizzato nel registro;
- **clk**: il clock per la temporizzazione; il registro lavora sul fronte di salita di quest'ultimo;
- **en**: segnale di abilitazione; il registro memorizza il bit in ingresso solo quando tale segnale è alto;
- **rst**: segnale che quando è alto resetta il registro, portando il valore al suo interno a 0; il reset è sincrono.

La sua uscita è **data_out**, che altro non rappresenta il bit memorizzato nel registro.

Mux 4:1

Il secondo componente è il mux 4:1.

Tramite quest'ultimo si decide qual è l'ingresso di un registro, attraverso la selezione.

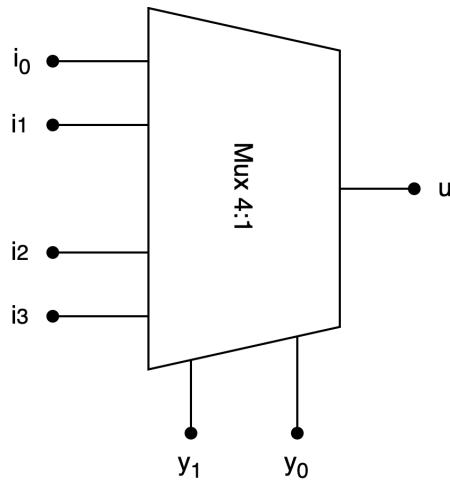


Figura 4.4: Mux 4:1

Tale multiplexer lavora seguendo la seguente tabella: Si può banalmente

y₁	y₀	u
0	0	i₀
0	1	i₁
1	0	i₂
1	1	i₃

Tabella 4.1: Tabella di verità del multiplexer 4:1 per lo Shift Register

te notare che l'uscita altro non è che uno dei 4 ingressi del multiplexer, scelto tramite la selezione.

Si può ora comporre lo Shift Register.

Facendo gli opportuni collegamenti, si ottiene il seguente schema

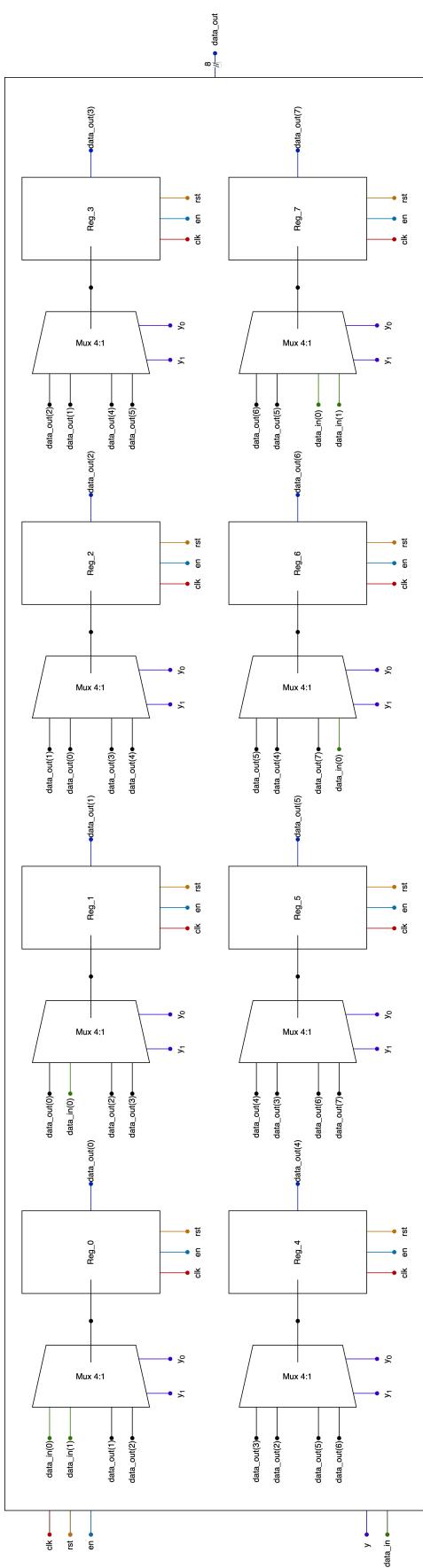


Figura 4.5: Shift Register con approccio strutturale

Gli ingressi e l'uscita dello Shift Register sono identici a quelli visti nell'esercizio precedente.

Quello che si vuole mettere in evidenza in questo caso è come tali ingressi siano collegati con le strutture interni: in particolare si vede che y , che sceglie la modalità di lavoro della macchina, è collegato alla selezione dei multiplexer, mentre `data_in`, è collegato solo ai primi due e agli ultimi due multiplexer.

I restanti sono collegati direttamente ai registri.

4.2.2 Implementazione

Si vuole ora procedere con l'implementazione in VHDL.

Partendo dal registro, si ha:

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3 use IEEE.NUMERIC_STD.ALL;
4
5 entity reg is
6     port
7     (
8         data_in:    in  std_logic;
9         en:        in  std_logic;
10        clk:        in  std_logic;
11        rst:        in  std_logic;
12        data_out:   out std_logic
13    );
14 end entity;
15
16 architecture Behavioral of reg is
17 begin
18     process(clk)
19     begin
20         if(rising_edge(clk))then
21             if (rst = '1') then
```

```
22         data_out <= '0';
23     end if;
24
25     if (en = '1') then
26         data_out <= data_in;
27     end if;
28 end if;
29 end process;
30 end architecture;
```

Code 4.3: register.vhdl

Si prosegue con il multiplexer 4:1

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity mux_41 is
5     port
6     (
7         i: in std_logic_vector(0 to 3);
8         y: in std_logic_vector(1 downto 0);
9         output: out std_logic
10    );
11 end entity;
12
13 architecture Behavioral of mux_41 is
14 begin
15     process(y, i)
16     begin
17         case y is
18             when "00" =>
19                 output <= i(0);
20             when "01" =>
21                 output <= i(1);
22             when "10" =>
23                 output <= i(2);
24             when "11" =>
25                 output <= i(3);
26             when others =>
27                 output <= '-';
28         end case;
29     end process;
30 end architecture;
```

Code 4.4: mux_4_1.vhdl

Implementate le componenti base per il progetto, si prosegue con lo Shift Register:

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity shift_register is
5 port
6 (
7     clk:      in  std_logic;
8     rst:      in  std_logic;
9     en:       in  std_logic;
10    Y:        in  std_logic_vector(1 downto 0);
11    data_in:   in  std_logic_vector(1 downto 0);
12    data_out:  out std_logic_vector(7 downto 0)
13 );
14 end entity;
15
16 architecture structural of shift_register is
17 signal in_mux:      std_logic_vector(0 to 31);
18 signal out_mux:     std_logic_vector(0 to 7);
19 signal temp_out:    std_logic_vector(0 to 7);
20
21 component reg is
22 port
23 (
24     data_in:   in  std_logic;
25     en:       in  std_logic;
26     clk:      in  std_logic;
27     rst:      in  std_logic;
28     data_out:  out std_logic
29 );
30 end component;
31
32 component mux_41 is
33 port
34 (
35     i:        in  std_logic_vector(0 to 3);
36     y:        in  std_logic_vector(1 downto 0);
37     output:   out std_logic
38 );
```

```

39 end component;
40
41 begin
42     data_out      <=  temp_out;
43
44     mux0to7: for k in 0 to 7 generate
45         m: mux_41
46         port map
47         (
48             in_mux(4*k to (k*4 + 3)),
49             Y,
50             out_mux(k)
51         );
52     end generate;
53
54     reg0_to7: for k in 0 to 7 generate
55         r: reg
56         port map
57         (
58             out_mux(k),
59             en,
60             clk,
61             rst,
62             temp_out(k)
63         );
64     end generate;
65
66     --assignment input signals for mux
67     --mux_0
68     in_mux(0)      <=  data_in(0);
69     in_mux(1)      <=  data_in(1);
70     in_mux(2)      <=  temp_out(1);
71     in_mux(3)      <=  temp_out(2);
72
73     --mux_1
74     in_mux(4)      <=  temp_out(0);
75     in_mux(5)      <=  data_in(0);
76     in_mux(6)      <=  temp_out(2);
77     in_mux(7)      <=  temp_out(3);
78
79     --mux_2 to mux_5
80
81     conn_mux2to5: for k in 2 to 5 generate
82         in_mux(4*k)      <=  temp_out(k-1);
83         in_mux(4*k + 1)  <=  temp_out(k-2);
84         in_mux(4*k + 2)  <=  temp_out(k+1);

```

```
85      in_mux(4*k + 3) <= temp_out(k+2);
86  end generate;
87
88  --mux_6
89  in_mux(24) <= temp_out(5);
90  in_mux(25) <= temp_out(4);
91  in_mux(26) <= temp_out(7);
92  in_mux(27) <= data_in(0);
93
94  --mux_7
95  in_mux(28) <= temp_out(6);
96  in_mux(29) <= temp_out(5);
97  in_mux(30) <= data_in(0);
98  in_mux(31) <= data_in(1);
99
100 end structural;
```

Code 4.5: shift_register.vhdl

Si può notare come nella architettura, sono state prima generate le componenti e solo dopo sono stati effettuati i vari collegamenti, utilizzando variabili ausiliarie.

4.2.3 Simulazione

Per effettuare la simulazione, si implementa il seguente testbench

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.Std_logic_1164.all;
3 use IEEE.Numeric_Signed.all;
4
5 entity shift_register_tb is
6 end;
7
8 architecture bench of shift_register_tb is
9
10    component shift_register
11    port
12    (
13        clk:          in  std_logic;
```

```

14      rst:      in  std_logic;
15      en:       in  std_logic;
16      y:        in  std_logic_vector(1 downto 0);
17      data_in:   in  std_logic_vector(1 downto 0);
18      data_out:  out std_logic_vector(7 downto 0)
19 );
20 end component;
21
22 signal clk: std_logic := '0';
23 signal rst: std_logic := '0';
24 signal en: std_logic := '0';
25 signal y: std_logic_vector(1 downto 0) := "00";
26 signal data_in: std_logic_vector(1 downto 0) := "00";
27 signal data_out: std_logic_vector(7 downto 0);
28
29 begin
30
31     uut: shift_register port map ( clk      => clk,
32                                     rst      => rst,
33                                     en       => en,
34                                     y        => y,
35                                     data_in  => data_in,
36                                     data_out => data_out );
37
38     clk_process: process
39 begin
40     -- Clock generation
41     clk <= not clk after 10 ns;
42     wait for 10 ns;
43 end process;
44
45     stimulus: process
46 begin
47     -- Test Case 1: Apply reset
48     rst <= '1';           -- Assert reset
49     wait for 20 ns;       -- Wait for reset to propagate
50     rst <= '0';           -- Deassert reset
51     wait for 20 ns;
52
53     -- Test Case 2: Enable shift register with y = "00"
54     en <= '1';           -- Enable shift register
55     y <= "00";            -- Set y to "00"
56     data_in <= "01";       -- Apply data "01"
57     wait for 40 ns;
58
59     -- Test Case 3: Apply data_in while changing y to "01"

```

```

60      y <= "01";           -- Change y to "01"
61      data_in <= "10";     -- Apply data "10"
62      wait for 40 ns;
63
64      -- Test Case 4: Apply data_in while changing y to "10"
65      y <= "10";           -- Change y to "10"
66      data_in <= "11";     -- Apply data "11"
67      wait for 40 ns;
68
69      -- Test Case 5: Disable shift register with y = "11"
70      en <= '0';           -- Disable shift register
71      y <= "11";           -- Set y to "11"
72      data_in <= "00";     -- Change data input
73      wait for 40 ns;
74
75      -- Test Case 6: Apply data_in with y = "00" and reset active
76      rst <= '1';           -- Assert reset
77      y <= "00";           -- Set y to "00"
78      data_in <= "10";     -- Apply data "10" while reset is active
79      wait for 20 ns;
80      rst <= '0';           -- Deassert reset
81      wait for 40 ns;
82
83      -- Test Case 7: Apply data_in while y = "01" and enable shifting
84      y <= "01";           -- Set y to "01"
85      en <= '1';           -- Enable shift register
86      data_in <= "11";     -- Apply data "11"
87      wait for 40 ns;
88      data_in <= "00";     -- Change data to "00"
89      wait for 40 ns;
90
91      -- Test Case 8: Apply reset while shifting and changing y
92      rst <= '1';           -- Assert reset
93      y <= "10";           -- Change y to "10"
94      data_in <= "11";     -- Apply data "11"
95      wait for 20 ns;
96      rst <= '0';           -- Deassert reset
97      wait for 40 ns;
98
99      -- Test Case 9: Apply y = "11" and shift continuously with
100     -- data_in changes
101    y <= "11";           -- Set y to "11"
102    en <= '1';           -- Enable shift register
103    data_in <= "00";     -- Apply data "00"
104    wait for 40 ns;
105    data_in <= "01";     -- Apply data "01"

```

```
105      wait for 40 ns;
106      data_in <= "10";           -- Apply data "10"
107      wait for 40 ns;
108      data_in <= "11";           -- Apply data "11"
109      wait for 40 ns;

110
111      -- Test Case 10: Reset during shifting with y = "00"
112      rst <= '1';              -- Assert reset during shift
113      y <= "00";                -- Set y to "00"
114      data_in <= "01";           -- Apply data "01"
115      wait for 20 ns;
116      rst <= '0';              -- Deassert reset
117      wait for 40 ns;

118
119      -- Test Case 11: Changing y while shifting with enabled register
120      y <= "01";                -- Set y to "01"
121      en <= '1';                -- Enable shift register
122      data_in <= "01";           -- Apply data "01"
123      wait for 40 ns;
124      y <= "10";                -- Change y to "10"
125      data_in <= "11";           -- Change data to "11"
126      wait for 40 ns;

127
128      -- Test Case 12: Apply y = "11" and shift with reset active
129      rst <= '1';              -- Assert reset
130      y <= "11";                -- Set y to "11"
131      data_in <= "10";           -- Apply data "10"
132      wait for 20 ns;
133      rst <= '0';              -- Deassert reset
134      wait for 40 ns;

135
136      -- Test Case 13: Disable shifting during changes in y
137      en <= '0';                -- Disable shift register
138      y <= "00";                -- Set y to "00"
139      data_in <= "11";           -- Change data to "11"
140      wait for 40 ns;
141      y <= "01";                -- Change y to "01"
142      data_in <= "00";           -- Change data to "00"
143      wait for 40 ns;

144
145      -- End
146  end process;
147
148 end;
```

Code 4.6: tb_shift_register.vhd

Lanciando la simulazione, il risultato è il seguente:

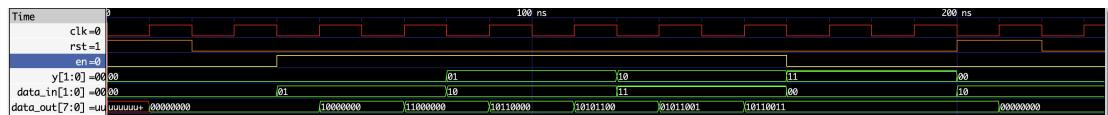


Figura 4.6: Simulazione dello Shift Register con approccio strutturale

Si nota chiaramente un corretto funzionamento della macchina.

Capitolo 5

Esercizio 5

5.1 Cronometro

Si vuole progettare, implementare e testare un cronometro, in grado di scandire secondi, minuti e ore, a partire da una base dei tempi prefissata (clock).

Si vuole inoltre che l'inizializzazione del cronometro possa essere fatta anche con un valore iniziale, espresso in ore, minuti e secondi, mediante un ingresso di `set`, e deve prevedere un ingresso di `reset` per azzerare il tempo.

5.1.1 Progettazione

Per la progettazione di tale macchina, si utilizza un approccio strutturale.

In linea generale, si parte da un flip-flop D per la composizione di con-

tatori di modulo 64 e modulo 32. Questi ultimi saranno necessari per la progettazione di due contatori modulo 60 e un contatore modulo 24, rispettivamente.

Questi ultimi tre, collegati opportunamente, andranno a comporre il cronometro.

Flip-Flop D

Il Flip-Flop D è progettato come segue:

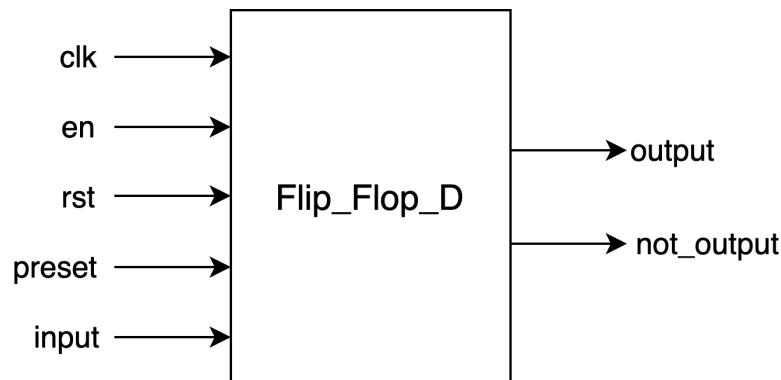


Figura 5.1: Flip-Flop D

La macchina lavora sul fronte di salita del clock e quando il valore `en` è alto.

Ha due uscite, la prima `output` presenta in uscita ciò che è memorizzato nel Flip-Flop, mentre `not_output`, presenta il negato.

Contatore modulo 64

Il contatore modulo 64 che si vuole progettare è il seguente:

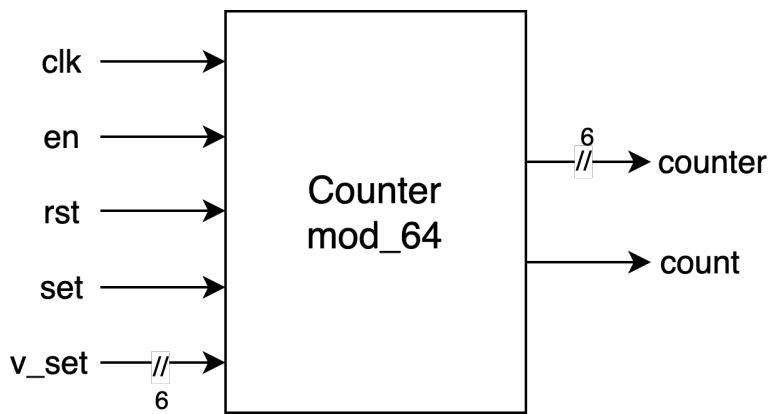


Figura 5.2: Contatore modulo 64

Gli ingessi sono:

- `clk`: clock per la temporizzazione;
- `en`: segnale di abilitazione;
- `rst`: segnale di reset;
- `set` e `v_set`: segnali necessari per il setting del valore di partenza

Le uscite sono `counter`, che altro non è il conteggio, e `count`, uscita necessaria per permettere il collegamento con altri contatori.

Si vuole progettare tale macchina strutturalmente, utilizzando come componente base il Flip-Flop D.

Per far ciò si collegano parallelamente cinque Flip-Flop D, nel modo seguente:

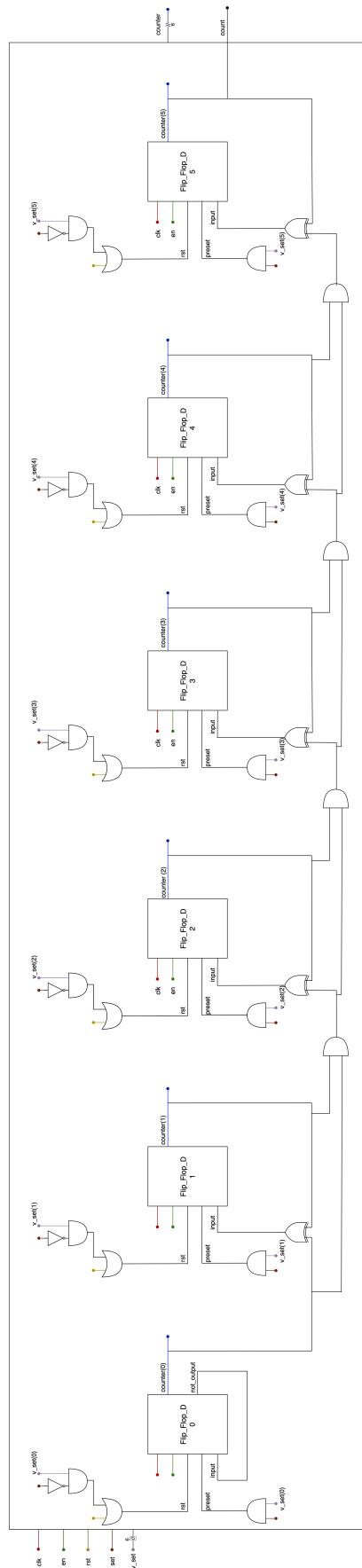


Figura 5.3: Contatore modulo 64 - approccio strutturale

Contatore modulo 32

Il contatore modulo 32 è esteriormente identico a quello modulo 64:

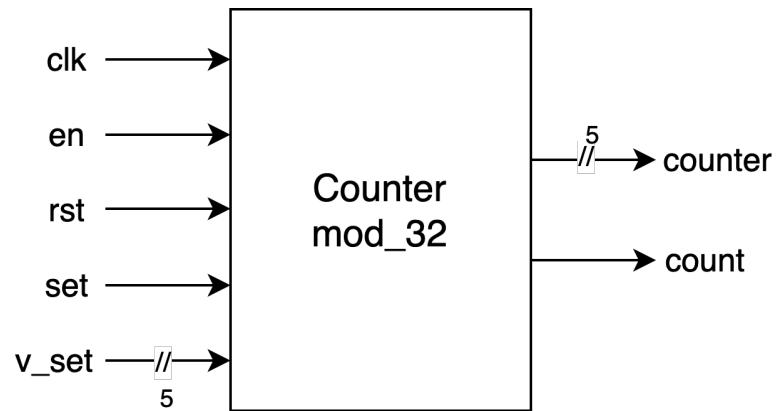


Figura 5.4: Contatore modulo 32

Analogamente al caso precedente, si compone strutturalmente con i Flip-Flop D:

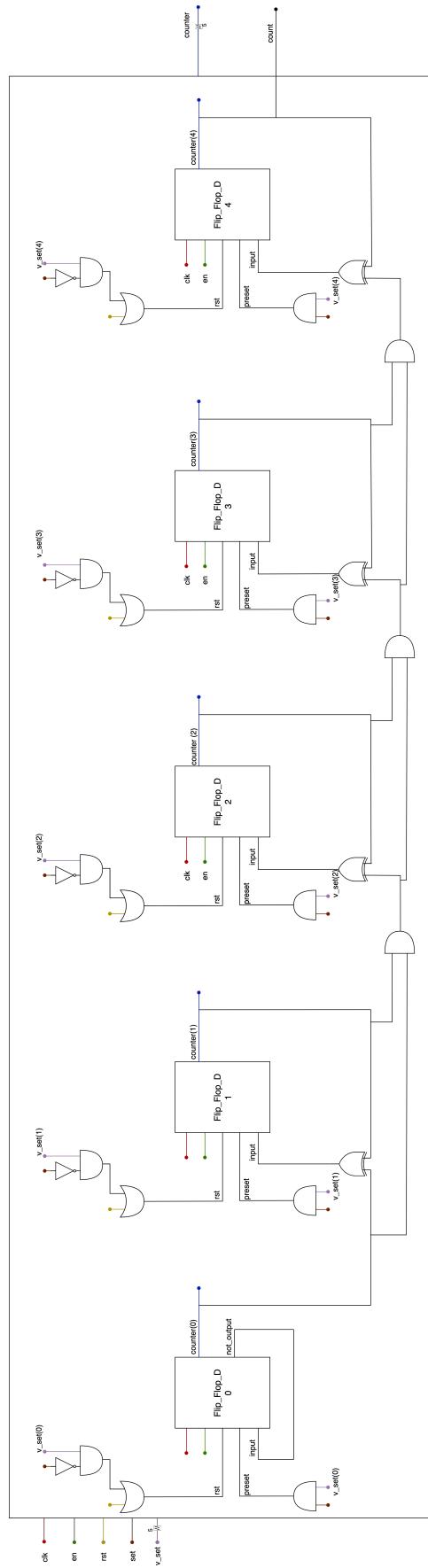


Figura 5.5: Contatore modulo 32 - approccio strutturale

Contatore modulo 60

Per progettare un contatore modulo 60, si parte da un contatore modulo 64 facendo in modo che ogni volta raggiunga 59 si resetti.

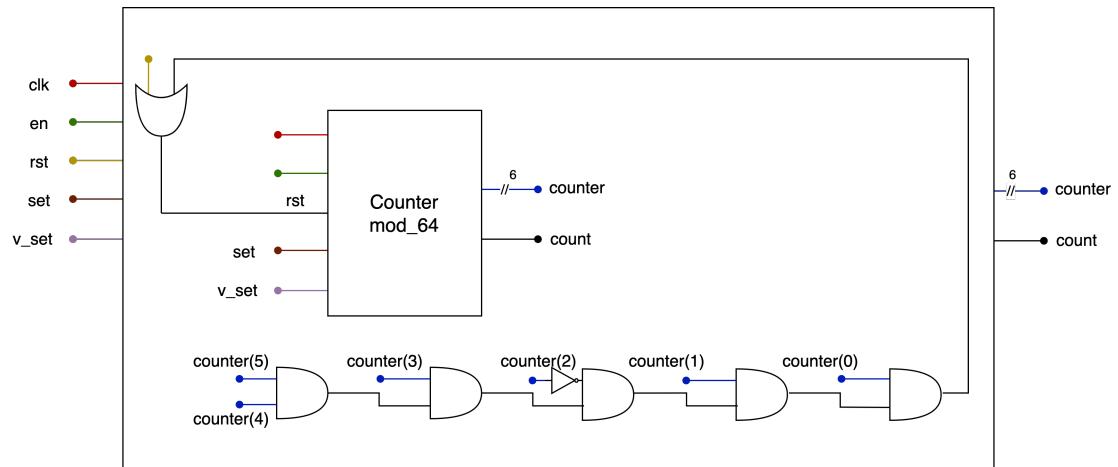


Figura 5.6: Contatore modulo 60

Contatore modulo 24

Analogamente al contatore precedente, si realizza il contatore modulo 24 utilizzando il contatore modulo 32 in modo che si resetti ogni qualvolta raggiunga 23

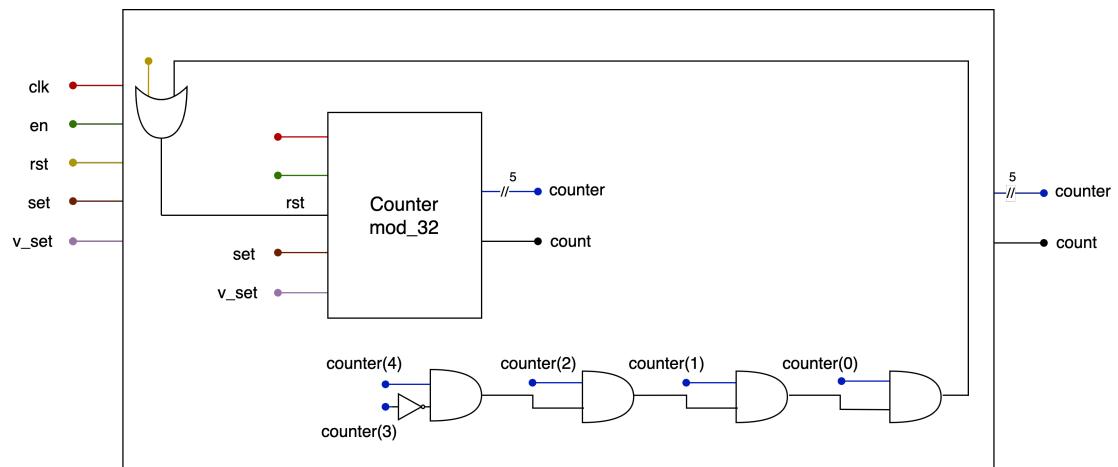


Figura 5.7: Contatore modulo 24

Cronometro

Si possono ora effettuare i collegamenti per creare un cronometro: ovviamente servono due contatori modulo 60 per secondi e minuti, e un contatore modulo 24:

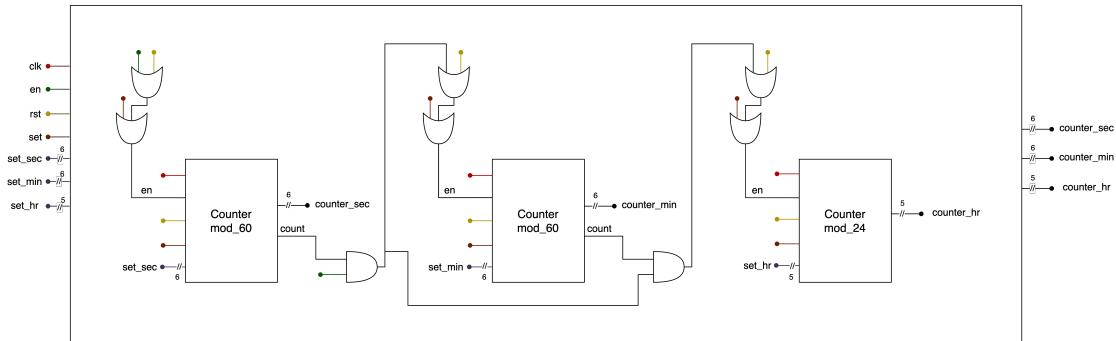


Figura 5.8: Cronometro

5.1.2 Implementazione

Si può a questo punto procedere con l'implementazione in VHDL del nostro progetto, partendo dalle sue componenti.

Flip-Flop D

```

1 library ieee;
2 use      ieee.std_logic_1164.all;
3
4 entity ffD is
5   port
6   (
7     clk          :  in  std_logic;
8     en           :  in  std_logic;
9     rst          :  in  std_logic;
10    preset       :  in  std_logic;
11    input         :  in  std_logic;
12    output        :  out std_logic;
13    not_output   :  out std_logic

```

```
14      );
15 end entity;
16
17 architecture behavioral of ffD is
18     signal temp      : std_logic;
19
20 begin
21     process(clk)
22     begin
23         if(clk'event and clk='1') then
24             if rst = '1' then
25                 temp      <=  '0';
26             elsif en = '1' then
27                 if preset = '1' then
28                     temp      <=  '1';
29                 else
30                     temp      <=  input;
31                 end if;
32             end if;
33         end if;
34     end process;
35     output      <=  temp;
36     not_output <=  not temp;
37 end behavioral;
```

Code 5.1: ffD.vhdl

Il Flip-Flop D è stato implementato con un approccio comportamentale e con reset sincrono.

Contatore modulo 64

Utilizzando il Flip-Flop D, si implementa ora il contatore modulo 64.

```
1 library ieee;
2 use      ieee.std_logic_1164.all;
3
4 entity counter_mod_64 is
5     port
6     (
7         clk      : in std_logic;
```

```

8      en      :  in  std_logic;
9      rst      :  in  std_logic;
10     set      :  in  std_logic;
11     v_set    :  in  std_logic_vector(5 downto 0);
12     counter :  out std_logic_vector(5 downto 0);
13     count    :  out std_logic
14   );
15 end entity;
16
17 architecture structural of counter_mod_64 is
18   signal temp_counter    :  std_logic_vector(5 downto 0)      := 
19   ← (others => '0');
20   signal back            :  std_logic;
21
22   signal resets          :  std_logic_vector(5 downto 0);
23   signal sets            :  std_logic_vector(5 downto 0);
24   signal counters         :  std_logic_vector(5 downto 0);
25
26
27 component ffD is
28   port
29   (
30     clk      :  in  std_logic;
31     en       :  in  std_logic;
32     rst      :  in  std_logic;
33     preset   :  in  std_logic;
34     input    :  in  std_logic;
35     output   :  out std_logic;
36     not_output :  out std_logic
37   );
38 end component;
39
40 begin
41   resets(0)    <=  (set and not (v_set(0))) or (rst);
42   sets(0)      <=  set and v_set(0);
43
44   counter_0 : ffD
45     port map (
46       clk,
47       en,
48       resets(0),
49       sets(0),
50       back,
51       temp_counter(0),
52       back

```

```
53      );
54
55      resets(1)    <=  (set and not v_set(1)) or rst;
56      sets(1)      <=  set and v_set(1);
57      counters(1)  <=  temp_counter(0) xor temp_counter(1);
58
59      counter_1 : ffD
60      port map (
61          clk,
62          en,
63          resets(1),
64          sets(1),
65          counters(1),
66          temp_counter(1)
67      );
68
69      resets(2)    <=  (set and not v_set(2)) or rst;
70      sets(2)      <=  set and v_set(2);
71      counters(2)  <=  (temp_counter(0) and temp_counter(1)) xor
72          ↳ temp_counter(2);
73
74      counter_2 : ffD
75      port map (
76          clk,
77          en,
78          resets(2),
79          sets(2),
80          counters(2),
81          temp_counter(2)
82      );
83
83      resets(3)    <=  (set and not v_set(3)) or rst;
84      sets(3)      <=  set and v_set(3);
85      counters(3)  <=  (temp_counter(0) and temp_counter(1) and
86          ↳ temp_counter(2)) xor temp_counter(3);
87
87      counter_3 : ffD
88      port map (
89          clk,
90          en,
91          resets(3),
92          sets(3),
93          counters(3),
94          temp_counter(3)
95      );
96
```

```
97      resets(4)    <=  (set and not v_set(4)) or rst;
98      sets(4)      <=  set and v_set(4);
99      counters(4)  <=  (temp_counter(0) and temp_counter(1) and
100        ↳ temp_counter(2) and temp_counter(3)) xor temp_counter(4);
101
102      counter_4 : ffD
103      port map (
104          clk,
105          en,
106          resets(4),
107          sets(4),
108          counters(4),
109          temp_counter(4)
110      );
111
112      resets(5)    <=  (set and not v_set(5)) or rst;
113      sets(5)      <=  set and v_set(5);
114      counters(5)  <=  (temp_counter(0) and temp_counter(1) and
115        ↳ temp_counter(2) and temp_counter(3) and temp_counter(4)) xor
116        ↳ temp_counter(5);
117
118      counter_5 : ffD
119      port map (
120          clk,
121          en,
122          resets(5),
123          sets(5),
124          counters(5),
125          temp_counter(5)
126      );
127
128      counter <= temp_counter;
129      count   <= temp_counter(5);
130
131  end structural;
```

Code 5.2: counter_mod_64.vhdl

Contatore modulo 32

In modo analogo, si procede per il contatore modulo 32.

```
1  library ieee;
2  use      ieee.std_logic_1164.all;
```

```

3
4 entity counter_mod_32 is
5   port
6   (
7     clk      : in std_logic;
8     en       : in std_logic;
9     rst      : in std_logic;
10    set      : in std_logic;
11    v_set    : in std_logic_vector(4 downto 0);
12    counter : out std_logic_vector(4 downto 0);
13    count    : out std_logic
14  );
15 end entity;
16
17 architecture structural of counter_mod_32 is
18   signal temp_counter    : std_logic_vector(4 downto 0)      := 
19   ← (others => '0');
20   signal back            : std_logic;
21   signal resets          : std_logic_vector(4 downto 0);
22   signal sets            : std_logic_vector(4 downto 0);
23   signal counters        : std_logic_vector(4 downto 0);
24
25
26 component ffD is
27   port
28   (
29     clk      : in std_logic;
30     en       : in std_logic;
31     rst      : in std_logic;
32     preset   : in std_logic;
33     input    : in std_logic;
34     output   : out std_logic;
35     not_output : out std_logic
36   );
37 end component;
38
39 begin
40
41   resets(0)    <= (set and not (v_set(0))) or (rst);
42   sets(0)      <= set and v_set(0);
43
44   counter_0 : ffD
45     port map (
46       clk,
47       en,

```

```
48         resets(0),
49         sets(0),
50         back,
51         temp_counter(0),
52         back
53     );
54
55     resets(1)    <=  (set and not v_set(1)) or rst;
56     sets(1)      <=  set and v_set(1);
57     counters(1)  <=  temp_counter(0) xor temp_counter(1);
58
59     counter_1 : ffD
60     port map (
61         clk,
62         en,
63         resets(1),
64         sets(1),
65         counters(1),
66         temp_counter(1)
67     );
68
69     resets(2)    <=  (set and not v_set(2)) or rst;
70     sets(2)      <=  set and v_set(2);
71     counters(2)  <=  (temp_counter(0) and temp_counter(1)) xor
72       ↳  temp_counter(2);
73
74     counter_2 : ffD
75     port map (
76         clk,
77         en,
78         resets(2),
79         sets(2),
80         counters(2),
81         temp_counter(2)
82     );
83
83     resets(3)    <=  (set and not v_set(3)) or rst;
84     sets(3)      <=  set and v_set(3);
85     counters(3)  <=  (temp_counter(0) and temp_counter(1) and
86       ↳  temp_counter(2)) xor temp_counter(3);
87
88     counter_3 : ffD
89     port map (
90         clk,
91         en,
92         resets(3),
```

```
92      sets(3),
93      counters(3),
94      temp_counter(3)
95  );
96
97  resets(4)    <=  (set and not v_set(4)) or rst;
98  sets(4)      <=  set and v_set(4);
99  counters(4)  <=  (temp_counter(0) and temp_counter(1) and
100   ↳ temp_counter(2) and temp_counter(3)) xor temp_counter(4);
101
102  counter_4 : ffD
103  port map (
104    clk,
105    en,
106    resets(4),
107    sets(4),
108    counters(4),
109    temp_counter(4)
110  );
111
112  counter <= temp_counter;
113  count   <= temp_counter(4);
end structural;
```

Code 5.3: counter_mod_32.vhdl

Contatore modulo 60

Si implemeta ora il contatore modulo 60, partendo da quello modulo 64.

```
1  library ieee;
2  use     ieee.std_logic_1164.all;
3
4  entity counter_mod_60 is
5    port
6    (
7      clk      : in std_logic;
8      en       : in std_logic;
9      rst      : in std_logic;
10     set      : in std_logic;
11     v_set    : in std_logic_vector(5 downto 0);
```

```
12      counter :  out std_logic_vector(5 downto 0);
13      count   :  out std_logic
14  );
15 end counter_mod_60;
16
17 architecture structural of counter_mod_60 is
18     signal temp_counter    :  std_logic_vector(5 downto 0);
19     signal last_number_rs  :  std_logic;
20
21     signal reset           :  std_logic;
22
23 component counter_mod_64 is
24     port
25     (
26         clk      :  in  std_logic;
27         en       :  in  std_logic;
28         rst      :  in  std_logic;
29         set      :  in  std_logic;
30         v_set    :  in  std_logic_vector(5 downto 0);
31         counter :  out std_logic_vector(5 downto 0);
32         count   :  out std_logic
33     );
34 end component;
35
36 begin
37     last_number_rs  <= temp_counter(5) and temp_counter(4) and
38             ← temp_counter(3) and temp_counter(2) and (not temp_counter(1))
39             ← and (not temp_counter(0));
40     reset           <= last_number_rs or rst;
41
42     counter_64: counter_mod_64
43     port map (clk, en, reset, set, v_set, temp_counter);
44
45     counter       <= temp_counter;
46     count        <= reset;
47 end structural;
```

Code 5.4: counter_mod_60.vhdl

Contatore modulo 24

Analogamente al contatore modulo 60, si implementa il contatore modulo 24 a partire da quello di modulo 32.

```

1 library ieee;
2 use      ieee.std_logic_1164.all;
3
4 entity counter_mod_24 is
5   port
6   (
7     clk      : in std_logic;
8     en       : in std_logic;
9     rst      : in std_logic;
10    set      : in std_logic;
11    v_set    : in std_logic_vector(4 downto 0);
12    counter : out std_logic_vector(4 downto 0);
13    count    : out std_logic
14  );
15 end counter_mod_24;
16
17 architecture structural of counter_mod_24 is
18   signal temp_counter      : std_logic_vector(4 downto 0);
19   signal last_number_rs    : std_logic;
20
21   signal reset             : std_logic;
22
23 component counter_mod_32 is
24   port
25   (
26     clk      : in std_logic;
27     en       : in std_logic;
28     rst      : in std_logic;
29     set      : in std_logic;
30     v_set    : in std_logic_vector(4 downto 0);
31     counter : out std_logic_vector(4 downto 0);
32     count    : out std_logic
33   );
34 end component;
35
36 begin
37   last_number_rs  <= temp_counter(4) and (not temp_counter(3)) and
38   ↳ temp_counter(2) and temp_counter(1) and temp_counter(0);
39

```

```

39      reset          <= last_number_rs or rst;
40
41      counter_32: counter_mod_32
42      port map (clk, en, reset, set, v_set, temp_counter);
43
44      counter        <= temp_counter;
45      count          <= reset;
46 end structural;

```

Code 5.5: counter_mod_24.vhdl

Cronometro

Si può finalmente implementare il cronometro, utilizzando gli ultimi due contatori implementati.

```

1  library ieee;
2  use     ieee.std_logic_1164.all;
3
4  entity stopwatch is
5      port
6      (
7          clk      : in std_logic;
8          rst      : in std_logic;
9          set      : in std_logic;
10         en       : in std_logic;
11         set_sec : in std_logic_vector(5 downto 0);
12         set_min : in std_logic_vector(5 downto 0);
13         set_hr  : in std_logic_vector(4 downto 0);
14         seconds : out std_logic_vector(5 downto 0);
15         minutes : out std_logic_vector(5 downto 0);
16         hours   : out std_logic_vector(4 downto 0)
17     );
18 end stopwatch;
19
20 architecture structural of stopwatch is
21     signal en_count    : std_logic_vector(1 downto 0);
22
23     signal temp_enable : std_logic_vector(2 downto 0);
24
25     component counter_mod_60
26         port

```

```

27      (
28          clk      :  in  std_logic;
29          en       :  in  std_logic;
30          rst      :  in  std_logic;
31          set      :  in  std_logic;
32          v_set    :  in  std_logic_vector(5 downto 0);
33          counter :  out std_logic_vector(5 downto 0);
34          count    :  out std_logic
35      );
36  end component;

37
38 component counter_mod_24
39     port
40     (
41         clk      :  in  std_logic;
42         en       :  in  std_logic;
43         rst      :  in  std_logic;
44         set      :  in  std_logic;
45         v_set    :  in  std_logic_vector(4 downto 0);
46         counter :  out std_logic_vector(4 downto 0);
47         count    :  out std_logic
48     );
49 end component;
50 begin
51     --seconds
52     temp_enable(0) <= en or rst or set;
53     counter_seconds:   counter_mod_60
54     port map (clk, temp_enable(0), rst, set, set_sec, seconds,
55               en_count(0));
56
57     --minutes
58     temp_enable(1) <= (en and en_count(0)) or rst or set;
59     counter_minutes:   counter_mod_60
60     port map (clk, temp_enable(1), rst, set, set_min, minutes,
61               en_count(1));
62
63     --hours
64     temp_enable(2) <= (en and en_count(0) and en_count(1)) or rst or
65               set;
66     counter_hours:   counter_mod_24
67     port map (clk, temp_enable(2), rst, set, set_hr, hours);
68 end structural;

```

Code 5.6: stopwatch.vhdl

5.1.3 Simulazione

Per la simulazione, si implementa il seguente testbench:

```

1  -- Testbench created online at:
2  --
3  → https://www.doulos.com/knowhow/perl/vhdl-testbench-creation-using-perl/
4  -- Copyright Doulos Ltd
5
6  library IEEE;
7  use IEEE.Std_logic_1164.all;
8  use IEEE.Numeric_Std.all;
9
10 entity stopwatch_tb is
11 end;
12
13 architecture bench of stopwatch_tb is
14
15 component stopwatch
16     port
17     (
18         clk      : in  std_logic;
19         rst      : in  std_logic;
20         set      : in  std_logic;
21         en       : in  std_logic;
22         set_sec : in  std_logic_vector(5 downto 0);
23         set_min : in  std_logic_vector(5 downto 0);
24         set_hr  : in  std_logic_vector(4 downto 0);
25         seconds : out std_logic_vector(5 downto 0);
26         minutes : out std_logic_vector(5 downto 0);
27         hours   : out std_logic_vector(4 downto 0)
28     );
29 end component;
30
31 signal clk: std_logic;
32 signal rst: std_logic;
33 signal set: std_logic;
34 signal en: std_logic;
35 signal set_sec: std_logic_vector(5 downto 0);
36 signal set_min: std_logic_vector(5 downto 0);
37 signal set_hr: std_logic_vector(4 downto 0);
38 signal seconds: std_logic_vector(5 downto 0);
39 signal minutes: std_logic_vector(5 downto 0);
40 signal hours: std_logic_vector(4 downto 0) ;

```

```

41 begin
42
43     uut: stopwatch port map ( clk      => clk,
44                               rst      => rst,
45                               set      => set,
46                               en       => en,
47                               set_sec  => set_sec,
48                               set_min  => set_min,
49                               set_hr   => set_hr,
50                               seconds  => seconds,
51                               minutes  => minutes,
52                               hours    => hours );
53
54     clock_process: process
55         begin
56             clk <= '0';
57             while True loop
58                 wait for 5 ns; -- Periodo del clock (adattare a seconda
59                             -- delle esigenze)
60                 clk <= not clk;
61             end loop;
62         end process;
63
64         -- Stimuli per il testbench
65         stimulus: process
66         begin
67             -- Inizializzazione
68             rst <= '1'; -- Reset iniziale
69             wait for 10 ns;
70             rst <= '0';
71
72             -- Test case 1: Avvio del cronometro da zero
73             en <= '1';
74             wait for 1 ms;
75             en <= '0';
76
77             -- Verifica dei risultati (es. utilizzando asserzioni)
78
79             -- Test case 2: Impostazione di un tempo iniziale e avvio
80             set_sec <= "000111";
81             set_min <= "000011";
82             set_hr  <= "00001";
83             set <= '1';
84             wait for 10 ns;
85             set <= '0';
86             en <= '1';

```

```

86      wait for 500 ms;
87      en <= '0';
88
89      -- Verifica dei risultati
90
91      -- ... Altri test case ...
92
93      wait for 5 ns;
94  end process;
95
96
97 end;

```

Code 5.7: stopwatch_tb.vhdl

Lanciando la simulazione si ha

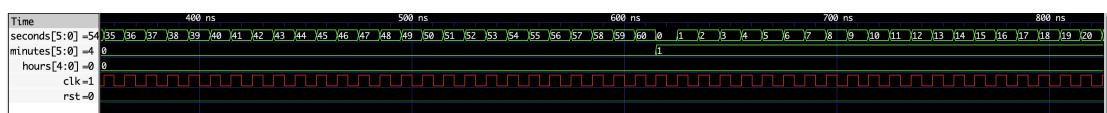


Figura 5.9: Simulazione Cronometro

Si vuole far notare che per materiali, è impossibile riportare nella documentazione l'intera simulazione.

Per cui qualore si volesse testare il cronometro, il codice VHDL si trova nella repository GitHub associata al progetto, nella cartella Esercizio 5 . 1.

5.2 Implementazione su board del punto precedente

Sintetizzare ed implementare su board il componente sviluppato al punto precedente, utilizzando i display a 7 segmenti per la visualizza-

zione dell'orario (o una combinazione di display e led nel caso in cui i display a disposizione siano in numero inferiore a quello necessario), gli switch per l'immissione dell'orario iniziale e due bottoni, uno per il set dell'orario e uno per il reset. Si utilizzi una codifica a scelta dello studente per la visualizzazione dell'orario sui display (esadecimale o decimale).

5.2.1 Implementazione

Per l'implementazione su board è stato necessario utilizzare il visore presente sulla board, per fare ciò sono stati usati i seguenti codici:

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity anodes_manager is
5     Port ( counter : in STD_LOGIC_VECTOR (2 downto 0);
6             enable_digit : in STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0);
7             anodes : out STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0)
8             );
9 end anodes_manager;
10
11 architecture Behavioral of anodes_manager is
12
13 signal anodes_switching : std_logic_vector(7 downto 0) := (others =>
14     '0');
15
16 begin
17
18 anodes <= not anodes_switching OR not enable_digit;
19
20 anodes_process: process(counter)
21 begin
22     --a seconda del valore di caunter le cifre si illuminano una
23     --alla volta da destra a sinistra
24     case counter is
```

```
24      when "000" =>
25          anodes_switching <= "00000001";
26      when "001" =>
27          anodes_switching <= "00000010";
28      when "010" =>
29          anodes_switching <= "00000100";
30      when "011" =>
31          anodes_switching <= "00001000";
32      when "100" =>
33          anodes_switching <= "00010000";
34      when "101" =>
35          anodes_switching <= "00100000";
36      when "110" =>
37          anodes_switching <= "01000000";
38      when "111" =>
39          anodes_switching <= "10000000";
40      when others =>
41          anodes_switching <= (others => '0');
42  end case;
43
44 end process;
45
46
47 end Behavioral;
```

Code 5.8: anodes_manager.vhdl

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity anodes_manager is
5     Port ( counter : in STD_LOGIC_VECTOR (2 downto 0);
6             enable_digit : in STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0);
7             anodes : out STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0)
8             );
9 end anodes_manager;
10
11 architecture Behavioral of anodes_manager is
12
13 signal anodes_switching : std_logic_vector(7 downto 0) := (others =>
14     '0');
15
16 begin
```

```

16
17
18 anodes <= not anodes_switching OR not enable_digit;
19
20 anodes_process: process(counter)
21 begin
22     --a seconda del valore di counter le cifre si illuminano una
     → alla volta da destra a sinistra
23     case counter is
24         when "000" =>
25             anodes_switching <= "00000001";
26         when "001" =>
27             anodes_switching <= "00000010";
28         when "010" =>
29             anodes_switching <= "00000100";
30         when "011" =>
31             anodes_switching <= "00001000";
32         when "100" =>
33             anodes_switching <= "00010000";
34         when "101" =>
35             anodes_switching <= "00100000";
36         when "110" =>
37             anodes_switching <= "01000000";
38         when "111" =>
39             anodes_switching <= "10000000";
40         when others =>
41             anodes_switching <= (others => '0');
42     end case;
43
44 end process;
45
46
47 end Behavioral;
48

```

Code 5.9: catode_manager.vhdl

```

1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity display_seven_segments is
5     Generic(
6         CLKIN_freq : integer := 100000000;
7         CLKOUT_freq : integer := 500

```

```

8                               );
9
10    Port ( CLK : in STD_LOGIC;
11           RST : in STD_LOGIC;
12           VALUE : in STD_LOGIC_VECTOR (31 downto 0);
13           ENABLE : in STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0); -- decide
14             -- quali cifre abilitare
15           DOTS : in STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0); -- decide quali
16             -- punti visualizzare
17           ANODES : out STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0);
18           CATHODES : out STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0));
19
20 end display_seven_segments;
21
22
23 architecture Structural of display_seven_segments is
24
25 signal counter : std_logic_vector(2 downto 0);
26 signal clock_filter_out : std_logic := '0';
27
28
29 COMPONENT counter_mod8
30   PORT(
31     clock : in STD_LOGIC;
32     reset : in STD_LOGIC;
33     enable : in STD_LOGIC;
34     counter : out STD_LOGIC_VECTOR (2 downto 0)
35   );
36 END COMPONENT;
37
38
39 COMPONENT cathodes_manager
40   PORT(
41     counter : IN std_logic_vector(2 downto 0);
42     value : IN std_logic_vector(31 downto 0);
43     dots : IN std_logic_vector(7 downto 0);
44     cathodes : OUT std_logic_vector(7 downto 0)
45   );
46 END COMPONENT;
47
48
49 COMPONENT anodes_manager
50   PORT(
51
52     counter : IN std_logic_vector(2 downto 0);
53     enable_digit : IN std_logic_vector(7 downto 0);
54       --
55     anodes : OUT std_logic_vector(7 downto 0)
56   );
57 END COMPONENT;
58
59
60 COMPONENT clock_filter

```

```

51      GENERIC (
52          CLKIN_freq : integer := 100000000;
53          CLKOUT_freq : integer := 500
54      );
55      PORT (
56          clock_in : IN std_logic;
57          reset : in STD_LOGIC;
58          clock_out : OUT std_logic
59      );
60  END COMPONENT;
61
62 begin
63     --il clock filter genera un segnale di abilitazione per il contatore
64     --→ mod8 che viene usato
65     --come segnale di conteggio e quindi di fatto fornisce la frequenza
66     --→ con cui viene modificata
67     --la cifra da mostrare
68
69
70     clk_filter: clock_filter GENERIC MAP (
71         CLKIN_freq => CLKIN_freq,
72         CLKOUT_freq => CLKOUT_freq
73     )
74     PORT MAP (
75         clock_in => CLK,
76         reset => RST,
77         clock_out => clock_filter_out
78     );
79
80     counter_instance: counter_mod8 port map (
81         clock => CLK,
82         enable => clock_filter_out,
83         reset => RST,
84         counter => counter
85     );
86     --il valore di conteggio viene usato dal gestore dei catodi e degli
87     --→ anodi per
88     --selezionare l'anodo da accendere e il suo rispettivo valore
89     cathodes_instance: cathodes_manager port map (
90         counter => counter,
91         value => value,
92         dots => dots,
93         cathodes => cathodes
94     );
95
96     anodes_instance: anodes_manager port map (
97         counter => counter,
98         enable_digit => enable,
99

```

```
94      anodes => anodes
95  );
96
97
98 end Structural;
99
```

Code 5.10: display_seven_segments.vhdl

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity clock_filter is
5     generic(
6         CLKIN_freq : integer := 100000000; --clock
7             -- board 100MHz
8         CLKOUT_freq : integer := 500
9             -- frequenza desiderata 500Hz
10    );
11
12    Port (
13        clock_in : in STD_LOGIC;
14        reset : in STD_LOGIC;
15        clock_out : out STD_LOGIC -- attenzione: non e' un vero
16            -- clock ma un impulso che sare' usato come enable
17    );
18 end clock_filter;
19
20
21
22 architecture Behavioral of clock_filter is
23
24 signal clockfx : std_logic := '0';
25
26 constant count_max_value : integer := CLKIN_freq / (CLKOUT_freq) -1;
27
28 begin
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
```

```

33                     counter := 0;
34                     clockfx <= '0';
35
36             else
37                 if counter = count_max_value then
38                     clockfx <= '1';
39                     counter := 0;
40
41             else
42                 clockfx <= '0';
43                 counter := counter + 1;
44
45             end if;
46
47         end if;
48
49     end process;

46

47

48 end Behavioral;
49

```

Code 5.11: clock_filter.vhd

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3 use IEEE.NUMERIC_STD.ALL;
4 -- contatore utilizzato scorrere le cifre da visualizzare
5 entity counter_mod8 is
6     Port ( clock : in STD_LOGIC;
7             reset : in STD_LOGIC;
8                 enable : in STD_LOGIC; --enable viene dal divisore
9                         -- di frequenza
10            counter : out STD_LOGIC_VECTOR (2 downto 0));
11 end counter_mod8;
12
13 architecture Behavioral of counter_mod8 is
14
15 signal c : std_logic_vector (2 downto 0) := (others => '0');
16 begin
17
18 counter <= c;
19
20 counter_process: process(clock)
21 begin
22
23     if(rising_edge(clock)) then
24         if reset = '1' then
25             c <= (others => '0');
```

```
24      elsif enable = '1' then
25          c <= std_logic_vector(unsigned(c) + 1);
26      end if;
27  end if;
28 end process;
29
30 end Behavioral;
```

Code 5.12: count_mod8.vhdl

Inoltre per avere una rappresentazione coerente sui visori, sono stati implementati i seguenti codici per distinguere decine e unità dalle uscite del cronometro:

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3 use IEEE.NUMERIC_STD.ALL;
4
5 entity separator is
6 port(
7     num_in : in std_logic_vector (5 downto 0);
8     clk : in std_logic;
9     unit : out std_logic_vector (3 downto 0);
10    dec : out std_logic_vector (3 downto 0)
11 );
12 end separator;
13
14 architecture Behavioral of separator is
15 signal temp_dec, temp_un : integer;
16 begin
17
18 calc : process(clk)
19 begin
20
21 temp_dec <= (to_integer(unsigned(num_in))) / 10;
22 temp_un <= (to_integer(unsigned(num_in))) mod 10;
23
24 end process;
25
26 unit <= std_logic_vector(to_unsigned(temp_un, 4));
27 dec <= '0' & std_logic_vector(to_unsigned(temp_dec, 3));
```

```

28
29  end Behavioral;
```

Code 5.13: separator.vhdl

```

1  library IEEE;
2  use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4  entity sep_h_m_s is
5    Port (
6      CLK: in STD_LOGIC;
7      sec, min: in STD_LOGIC_VECTOR(5 downto 0);
8      hours: in STD_LOGIC_VECTOR(4 downto 0);
9      sec_uni, min_uni, h_uni, sec_dec, min_dec, h_dec: out
10     STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0)
11   );
12 end sep_h_m_s;
13
14
15 architecture Behavioral of sep_h_m_s is
16
17 component separator
18 port(
19   num_in : in std_logic_vector (5 downto 0);
20   clk : in std_logic;
21   unit : out std_logic_vector (3 downto 0);
22   dec : out std_logic_vector (3 downto 0)
23 );
24 end component;
25
26 begin
27
28 sec_separator: separator
29   port map(
30     num_in => sec,
31     clk => CLK,
32     unit => sec_uni,
33     dec => sec_dec
34   );
35
36 min_separator: separator
37   port map(
38     num_in => min,
```

```

39         clk => CLK,
40         unit => min_uni,
41         dec => min_dec
42     );
43
44 h_temp <= '0' & hours;
45
46 h_separator: separator
47     port map(
48         num_in => h_temp,
49         clk => CLK,
50         unit => h_uni,
51         dec => h_dec
52     );
53
54 end Behavioral;

```

Code 5.14: anodes_manager.vhdl

Si è inoltre scelto di usare un divisore di frequenza per ottenere un clock più adatto al funzionamento del progetto:

```

1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3 use IEEE.NUMERIC_STD.ALL;
4
5 entity frequency_divider is
6     Port (
7         clock_in : in STD_LOGIC;    -- Clock di ingresso
8         reset : in STD_LOGIC;      -- Segnale di reset
9         clock_out : out STD_LOGIC -- Clock di uscita, divisore di
10            ↳ frequenza
11     );
12 end frequency_divider;
13
14
15 architecture Behavioral of frequency_divider is
16
17     -- Definire il valore massimo del contatore in base alla
18     -- divisione desiderata
19     -- Supponiamo un clock di ingresso di 100 MHz, per ottenere una
20     -- frequenza di uscita di 1 Hz:
21     constant CLOCK_FREQ : integer := 100_000_000; -- Frequenza del
22     -- clock di ingresso (100 MHz)

```

```

18  constant DIVISOR : integer := 100_000_000;      -- Divisione
   ← desiderata (1 Hz: 100 MHz / 100_000_000)
19  constant COUNT_MAX : integer := DIVISOR / 2 - 1; -- Calcola il
   ← massimo valore del contatore (per ottenere un periodo
   ← completo)
20
21  signal counter : integer range 0 to COUNT_MAX := 0; -- Contatore
   ← per dividere la frequenza
22  signal clock_signal : STD_LOGIC := '0'; -- Segnale di clock di
   ← uscita
23
24 begin
25
26  -- Processo che divide la frequenza
27  process(clock_in)
28  begin
29    if rising_edge(clock_in) then
30      if reset = '1' then
31        counter <= 0; -- Reset del contatore
32        clock_signal <= '0'; -- Reset del segnale di clock di
           ← uscita
33      else
34        if counter = COUNT_MAX then
35          counter <= 0; -- Reset del contatore al
           ← raggiungimento del massimo
36          clock_signal <= not clock_signal; -- Inverti il
           ← segnale di clock di uscita
37        else
38          counter <= counter + 1; -- Incrementa il
           ← contatore
39        end if;
40      end if;
41    end if;
42  end process;
43
44  -- Collega il segnale di uscita al segnale di clock
45  clock_out <= clock_signal;
46
47 end Behavioral;

```

Code 5.15: freq_divider.vhdl

Per la gestione degli input, soprattutto relativi al *SET* di secondi, minuti e ore, si è implementata una unità di controllo, che sulla base

del bottone premuto caricherà rispettivamente secondi (BTNU), minuti (BTNL) e ore (BTNR), e con un ulteriore bottone viene abilitato il SET (BTND). Inoltre con il bottone centrale si abilita il RESET.

```

1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity control_unit is
5   Port (
6     CLK, RST, SET: in STD_LOGIC;
7     load_s, load_m, load_h: in STD_LOGIC;
8     value_in: in STD_LOGIC_VECTOR(5 downto 0);
9     sec_out, min_out: out STD_LOGIC_VECTOR(5 downto 0);
10    h_out: out STD_LOGIC_VECTOR(4 downto 0)
11  );
12 end control_unit;
13
14 architecture Behavioral of control_unit is
15
16 signal sec_val, min_val: STD_LOGIC_VECTOR(5 downto 0);
17 signal h_val: STD_LOGIC_VECTOR(4 downto 0);
18 signal sec_set, min_set: STD_LOGIC_VECTOR(5 downto 0);
19 signal h_set: STD_LOGIC_VECTOR(4 downto 0);
20
21 begin
22
23 sec_out <= sec_val;
24 min_out <= min_val;
25 h_out <= h_val;
26
27 main: process(CLK)
28 begin
29   if (CLK'event AND CLK = '0') then
30     if (RST = '1') then
31       sec_val <= (others => '0');
32       min_val <= (others => '0');
33       h_val <= (others => '0');
34     else
35
36       if (load_s = '1') then
37         sec_set <= value_in;
38       elsif (load_m = '1') then
39         min_set <= value_in;

```

```

40      elsif (load_h = '1') then
41          h_set <= value_in(4 downto 0);
42      end if;
43      if SET = '1' then
44          sec_val <= sec_set;
45          min_val <= min_set;
46          h_val <= h_set;
47      end if;
48      end if;
49  end if;
50
51
52
53 end Behavioral;
```

Code 5.16: control_unit.vhdl

La gestione del sistema nel suo complesso è implementata con il seguente codice:

```

1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity cron_onBOARD is
5     Port (
6         CLK, RST, SET: in STD_LOGIC;
7         load_s, load_m, load_h: in STD_LOGIC;
8         value_in: in STD_LOGIC_VECTOR(5 downto 0);
9         anodes_out : out STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0); --anodi e
10        ↳ catodi delle cifre, sono un output del topmodule
11        cathodes_out : out STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0)
12    );
13
14 end cron_onBOARD;
15
16
17 architecture Behavioral of cron_onBOARD is
18 component control_unit
19     Port (
20         CLK, RST, SET: in STD_LOGIC;
21         load_s, load_m, load_h: in STD_LOGIC;
22         value_in: in STD_LOGIC_VECTOR(5 downto 0);
23         sec_out, min_out: out STD_LOGIC_VECTOR(5 downto 0);
24         h_out: out STD_LOGIC_VECTOR(4 downto 0)
25     );
26
27 end component;
```

```

24
25 component stopwatch
26   port
27   (
28     clk      : in std_logic;
29     rst      : in std_logic;
30     set      : in std_logic;
31     en       : in std_logic;
32     set_sec : in std_logic_vector(5 downto 0);
33     set_min : in std_logic_vector(5 downto 0);
34     set_hr  : in std_logic_vector(4 downto 0);
35     seconds : out std_logic_vector(5 downto 0);
36     minutes : out std_logic_vector(5 downto 0);
37     hours   : out std_logic_vector(4 downto 0)
38   );
39 end component;
40
41 component frequency_divider is
42   Port (
43     clock_in : in STD_LOGIC; -- Clock di ingresso
44     reset : in STD_LOGIC; -- Segnale di reset
45     clock_out : out STD_LOGIC -- Clock di uscita, divisore di
46     → frequenza
47   );
48 end component;
49
50 component display_seven_segments is
51   Generic(
52     CLKIN_freq : integer := 100000000;
53     CLKOUT_freq : integer := 500
54     );
55   Port ( CLK : in STD_LOGIC;
56         RST : in STD_LOGIC;
57         VALUE : in STD_LOGIC_VECTOR (31 downto 0);
58         ENABLE : in STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0); -- decide
59         → quali cifre abilitare
60         DOTS : in STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0); -- decide quali
61         → punti visualizzare
62         ANODES : out STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0);
63         CATHODES : out STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0));
64 end component;
65
66 component sep_h_m_s
67   Port (
68     CLK: in STD_LOGIC;
69     sec, min: in STD_LOGIC_VECTOR(5 downto 0);

```

```

67      hours: in STD_LOGIC_VECTOR(4 downto 0);
68      sec_uni, min_uni, h_uni, sec_dec, min_dec, h_dec: out
69      → STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0)
70  );
71
72
73 signal s_cu, m_cu: STD_LOGIC_VECTOR(5 downto 0);
74 signal h_cu: STD_LOGIC_VECTOR(4 downto 0);
75 signal sec_temp, min_temp: STD_LOGIC_VECTOR(5 downto 0);
76 signal h_temp: STD_LOGIC_VECTOR(4 downto 0);
77 signal fd_out: STD_LOGIC;
78 signal temp_sec_uni, temp_min_uni, temp_h_uni, temp_sec_dec,
79      → temp_min_dec, temp_h_dec: STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
80 begin
81 cu: control_unit
82     port map(
83         CLK => CLK,
84         RST => RST,
85         SET => SET,
86         load_s => load_s,
87         load_m => load_m,
88         load_h => load_h,
89         value_in => value_in,
90         sec_out => s_cu,
91         min_out => m_cu,
92         h_out => h_cu
93     );
94
95 cron: stopwatch
96     port map(
97         clk => fd_out,
98         rst => RST,
99         set => SET,
100        en => '1',
101        set_sec => s_cu,
102        set_min => m_cu,
103        set_hr => h_cu,
104        seconds => sec_temp,
105        minutes => min_temp,
106        hours   => h_temp
107    );
108 fd: frequency_divider
109     port map(
110         clock_in => CLK,

```

```

111      reset => '0',
112      clock_out => fd_out
113  );
114
115 sep: sep_h_m_s
116  port map(
117      CLK => CLK,
118      sec => sec_temp,
119      min => min_temp,
120      hours => h_temp,
121      sec_uni => temp_sec_uni,
122      min_uni => temp_min_uni,
123      h_uni => temp_h_uni,
124      sec_dec => temp_sec_dec,
125      min_dec => temp_min_dec,
126      h_dec => temp_h_dec
127  );
128
129 dss: display_seven_segments
130  port map(
131      CLK => CLK,
132      RST => RST,
133      VALUE(3 downto 0) => temp_sec_uni,
134      VALUE(7 downto 4) => temp_sec_dec,
135      VALUE(11 downto 8) => temp_min_uni,
136      VALUE(15 downto 12) => temp_min_dec,
137      VALUE(19 downto 16) => temp_h_uni,
138      VALUE(23 downto 20) => temp_h_dec,
139      VALUE(31 downto 24) => (others => '0'),
140      ENABLE => "11111111",
141      DOTS => "01010100",
142      anodes => anodes_out,
143      cathodes => cathodes_out
144  );
145
146 end Behavioral;

```

Code 5.17: cron_onBoard.vhdl

Si mostra anche il codice di Nexys-A7-50T-Master.xdc, fondamentale per la generazione del bitstream e di conseguenza per la programmazione della board.

```

## Clock signal
set_property -dict {PACKAGE_PIN E3 IO_STANDARD LVCMOS33}

```

```

[get_ports {CLK}]; #IO_L12P_T1_MRCC_35 Sch=clk100mhz
create_clock -add -name sys_clk_pin -period 10.00 -waveform {0 5}
[get_ports {CLK}];

##Switches

set_property -dict {PACKAGE_PIN J15    IOSTANDARD LVCMOS33}
[get_ports {value_in[0]}]; #IO_L24N_T3_RS0_15 Sch=sw[0]
set_property -dict { PACKAGE_PIN L16    IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { value_in[1] }]; #IO_L3N_T0_DQS_EMCCCLK_14 Sch=sw[1]
set_property -dict { PACKAGE_PIN M13    IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { value_in[2] }]; #IO_L6N_T0_D08_VREF_14 Sch=sw[2]
set_property -dict { PACKAGE_PIN R15    IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { value_in[3] }]; #IO_L13N_T2_MRCC_14 Sch=sw[3]
set_property -dict { PACKAGE_PIN R17    IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { value_in[4] }]; #IO_L12N_T1_MRCC_14 Sch=sw[4]
set_property -dict { PACKAGE_PIN T18    IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { value_in[5] }]; #IO_L7N_T1_D10_14 Sch=sw[5]

##7 segment display

set_property -dict { PACKAGE_PIN T10    IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { cathodes_out[0] }]; #IO_L24N_T3_A00_D16_14 Sch=ca
set_property -dict { PACKAGE_PIN R10    IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { cathodes_out[1] }]; #IO_25_14 Sch=cb
set_property -dict { PACKAGE_PIN K16    IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { cathodes_out[2] }]; #IO_25_15 Sch=cc
set_property -dict { PACKAGE_PIN K13    IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { cathodes_out[3] }]; #IO_L17P_T2_A26_15 Sch=cd
set_property -dict { PACKAGE_PIN P15    IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { cathodes_out[4] }]; #IO_L13P_T2_MRCC_14 Sch=ce
set_property -dict { PACKAGE_PIN T11    IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { cathodes_out[5] }]; #IO_L19P_T3_A10_D26_14 Sch=cf
set_property -dict { PACKAGE_PIN L18    IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { cathodes_out[6] }]; #IO_L4P_T0_D04_14 Sch=cg

```

```

set_property -dict { PACKAGE_PIN H15      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { cathodes_out[7] }]; #IO_L19N_T3_A21_VREF_15 Sch=dp
set_property -dict { PACKAGE_PIN J17      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { anodes_out[0] }]; #IO_L23P_T3_FOE_B_15 Sch=an[0]
set_property -dict { PACKAGE_PIN J18      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { anodes_out[1] }]; #IO_L23N_T3_FWE_B_15 Sch=an[1]
set_property -dict { PACKAGE_PIN T9       IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { anodes_out[2] }]; #IO_L24P_T3_A01_D17_14 Sch=an[2]
set_property -dict { PACKAGE_PIN J14      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { anodes_out[3] }]; #IO_L19P_T3_A22_15 Sch=an[3]
set_property -dict { PACKAGE_PIN P14      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { anodes_out[4] }]; #IO_L8N_T1_D12_14 Sch=an[4]
set_property -dict { PACKAGE_PIN T14      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { anodes_out[5] }]; #IO_L14P_T2_SRCC_14 Sch=an[5]
set_property -dict { PACKAGE_PIN K2       IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { anodes_out[6] }]; #IO_L23P_T3_35 Sch=an[6]
set_property -dict { PACKAGE_PIN U13      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { anodes_out[7] }]; #IO_L23N_T3_A02_D18_14 Sch=an[7]

##Buttons
#set_property -dict { PACKAGE_PIN C12      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { reset_in }]; #IO_L3P_T0_DQS_AD1P_15 Sch=cpu_resetn
set_property -dict { PACKAGE_PIN N17      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { RST }]; #IO_L9P_T1_DQS_14 Sch=btnc
set_property -dict { PACKAGE_PIN M18      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { load_s }]; #IO_L4N_T0_D05_14 Sch=btぬ
set_property -dict { PACKAGE_PIN P17      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { load_m }]; #IO_L12P_T1_MRCC_14 Sch=btnl
set_property -dict { PACKAGE_PIN M17      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { load_h }]; #IO_L10N_T1_D15_14 Sch=btぬ
set_property -dict { PACKAGE_PIN P18      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { SET }]; #IO_L9N_T1_DQS_D13_14 Sch=btぬ

```

CAPITOLO 5. ESERCIZIO 5

Capitolo 6

Esercizio 6

6.1 Sistema di lettura - elaborazione - scrittura PO_PC

Progettare, implementare in VHDL e verificare mediante simulazione un sistema dotato di una memoria ROM di N locazioni da 8 bit ciascuna, una macchina combinatoria M in grado di trasformare (secondo una funzione a scelta dello studente) la stringa di 8 bit letta dalla ROM in una stringa di 4 bit, e una memoria MEM di N locazioni che memorizza la stringa in output da M . Il sistema si avvia in corrispondenza di un segnale di START che viene fornito esternamente. Una volta avviato, tramite un'apposita unità di controllo che gestisce la temporizzazione del sistema, viene scandita una locazione alla volta della ROM e viene scritta la corrispondente locazione di MEM. Gli indirizzi di memoria sono forniti da un contatore. Le memorie ROM e MEM hanno

rispettivamente un read e un write sincrono.

6.1.1 Progettazione

Per il progetto di questo sistema si riprende l'esercizio nel capitolo 2:

Sistema ROM + M. Viene usato anche un contatore, per scandire una alla volta tutte le locazioni della ROM da cui prelevare la stringa contenente 8 bit. Come nell'esercizio precedente, l'uscita della ROM viene posta in ingresso alla macchina M, che somma i 4 bit più significativi dell'ingresso con i 4 bit meno significativi. L'uscita della macchina M viene posto in ingresso a una memoria MEM e poi caricato nella locazione corrispondente all'uscita del contatore; il funzionamento del sistema viene gestito da un'unità di controllo. La struttura del sistema sarà fatta in questo modo:

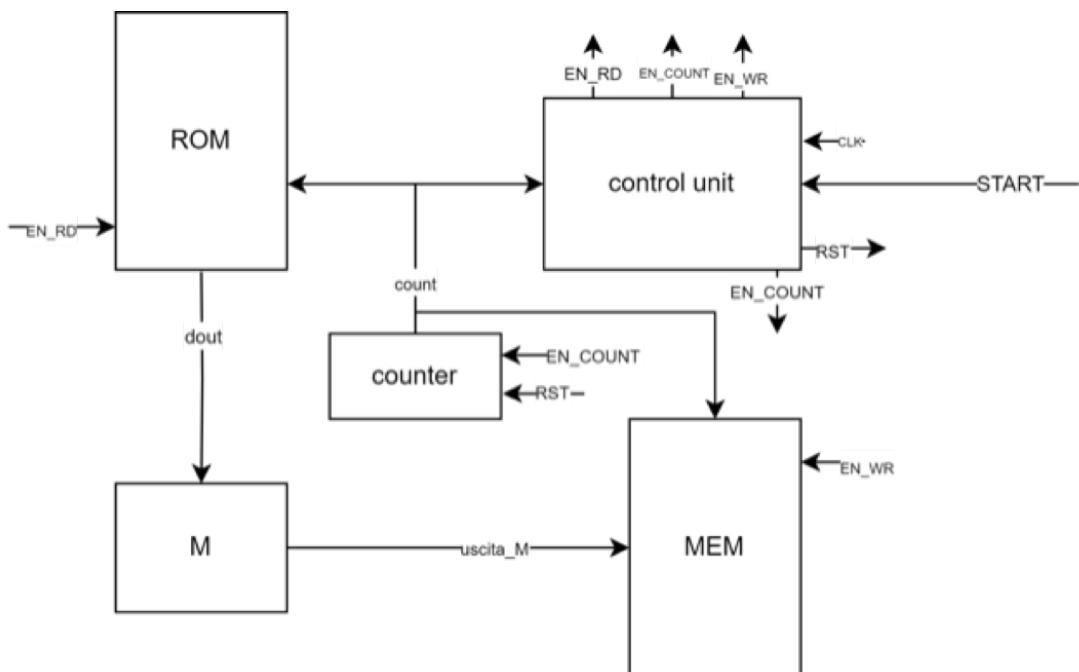


Figura 6.1: Schema a blocchi del sistema ROM + M + MEM

L'unità di controllo (CU) può essere efficacemente modellata come una macchina a stati finiti (FSM). Nel caso particolare avremo i seguenti stati:

- **idle**
- **read**
- **m_work**
- **write**

L'unità di controllo può essere quindi rappresentata da un automa come si mostra in figura:

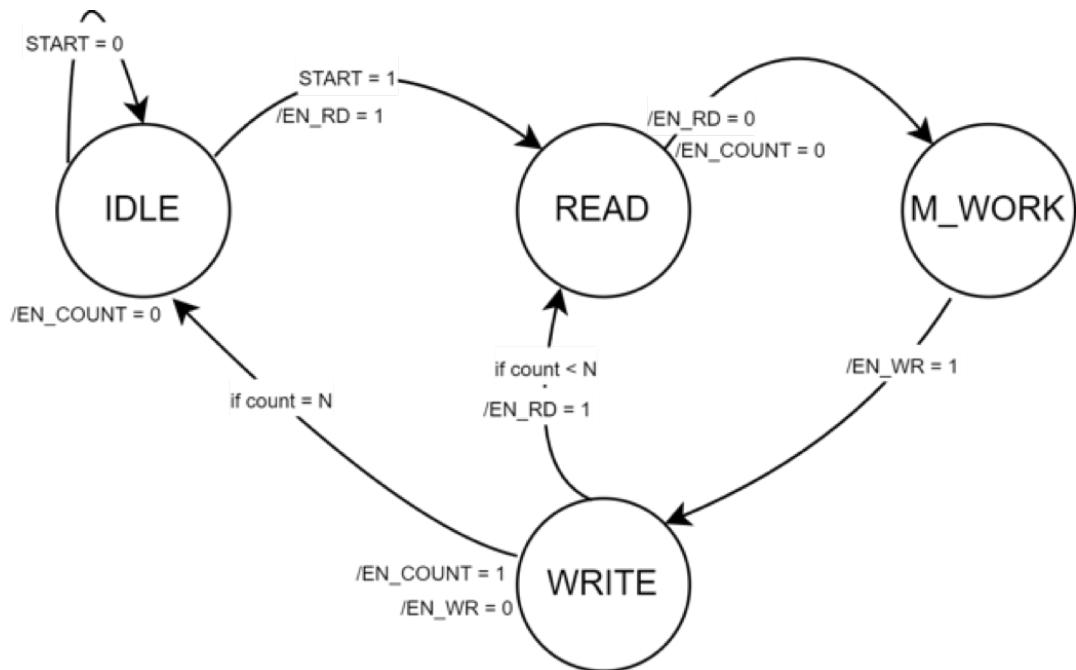


Figura 6.2: Macchina a stati della control unit di ROM + M + MEM

6.1.2 Implementazione

Il codice implementativo di M resta invariato, in quanto macchina puramente combinatoria. Si nota che viene richiesto che le operazioni di Read dalla ROM e di Write sulla memoria MEM siano svolte in modo sincrono. Quindi, a differenza della ROM usata nell'esercizio precedente, che era puramente combinatoria, le operazioni di lettura di questa ROM avvengono in sincronia con un segnale di clock. Questo segnale fornisce un riferimento temporale preciso per tutte le operazioni interne della ROM, garantendo così un funzionamento coerente e affidabile. Inoltre, sono stati utilizzati dei segnali di abilitazione alla lettura e alla scrittura, in modo da evitare conflitti e da permettere che i dati vengano letti al momento giusto. Si mostra innanzitutto il nuovo codice di ROM:

```

1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3 use IEEE.NUMERIC_STD.ALL;
4
5 entity ROM is
6     generic(N: integer range 0 to 32:= 16);
7     port(
8         CLK: in STD_LOGIC; --read sincrona
9         address: in STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0); --l'indirizzo in
10        -- ingresso viene dal contatore
11        EN_RD: in STD_LOGIC;
12        dout: out STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0)
13    );
14 end entity ROM;
15
16 architecture Behavioral of ROM is
17
18 type MEMORY is array(N-1 downto 0) of STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0);
19        --memoria da N locazioni che contengono 8 bit

```

```
18 constant ROM_N: MEMORY := (
19     "01000000", -- in locazione 15
20     "01000001",
21     "01000010",
22     "01000011",
23     "00010100",
24     "01000101",
25     "00000110",
26     "01000111",
27     "00001000",
28     "00001001",
29     "01001010",
30     "00001011",
31     "00001100",
32     "00001101",
33     "10001010",
34     "00001001" --in locazione 0
35 );
36
37
38 begin
39
40 lettura: process (EN_RD, address, CLK)
41 begin
42     if (CLK'event AND CLK = '1') then
43         if (EN_RD = '1') then
44             dout<= ROM_N(TO_INTEGER(unsigned(address))); --lettura
45             -- dalla rom
46         end if;
47     end if;
48 end process;
49
50
51 end architecture Behavioral;
```

Code 6.1: ROM.vhdl

Si è scelto di utilizzare le stesse stringhe dell'esercizio 2 per "popolare" la ROM, in modo da poter confrontare i risultati. Si mostra ora l'implementazione dell'unità di controllo del sistema; tale codice gestisce i cambiamenti di stato, e si può considerare il "cervello" del

sistema in esame.

Si noti che si è scelto di porre in uscita gli stati, in modo da visualizzare in simulazione anche le variazioni di stato, è una scelta ovviamente facoltativa, ma per ragione di debugging è stato scelto di visualizzare anche la variazione di stato, come sarà visibile dalla waveform nella prossima sezione.

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity control_unit is
5     Port (
6         START, RST: in STD_LOGIC;
7         CLK: in STD_LOGIC;
8         count: in STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
9         stato: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
10        EN_RD, EN_WR, EN_COUNT: out STD_LOGIC
11    );
12 end control_unit;
13
14 architecture Behavioral of control_unit is
15 type stati is (idle, read, m_work, write);
16 signal current_state: stati;
17 signal next_state: stati;
18
19 begin
20
21 reg_stato: process(CLK, RST)
22 begin
23     if (CLK'event AND CLK = '1') then
24         if RST = '1' then
25             current_state <= idle;
26         else
27             current_state <= next_state;
28         end if;
29     end if;
30 end process;
31
32 change: process(CLK, START, count)
33 begin
34     CASE current_state is
```

```

35      WHEN idle =>
36          EN_COUNT <= '0';
37          if (START = '0') then
38              next_state <= idle;
39          else
40              EN_RD <= '1';
41              next_state <= read;
42          end if;
43      WHEN read =>
44          EN_RD <= '0';
45          EN_COUNT <= '0';
46          next_state <= M_work;
47      WHEN M_work =>
48          EN_WR <= '1';
49          next_state <= write;
50      WHEN write =>
51          EN_WR <= '0';
52          EN_COUNT <= '1';
53          if (count = "1111") then
54              next_state <= idle;
55          else
56              EN_RD <= '1';
57              next_state <= read;
58          end if;
59      end CASE;
60
61 end process;
62
63 state <= "00" when current_state = idle else
64     "01" when current_state = read else
65     "10" when current_state = m_work else
66     "11" when current_state = write; -- Associa a ogni stato un
67     → codice binario
68 end Behavioral;

```

Code 6.2: control unit.vhdl

Si mostra infine il codice sistema nel suo complesso, composto dall'unità di controllo e da tutte le altre componenti utilizzate; è stato utilizzato un approccio di tipo strutturale:

```

1 library IEEE;
```

```

2  use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4  entity Rom_M_MEM is
5    generic(N: integer range 0 to 32:=16);
6    Port (
7      START, RST: in std_logic;
8      CLK: in std_logic;
9      stato: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
10     count: out STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
11     Y: out std_logic_vector(3 downto 0)
12   );
13 end Rom_M_MEM;
14
15 architecture structural of Rom_M_MEM is
16   --segnali intermedi:
17   signal Yc: std_logic_vector(3 downto 0);
18   signal yROM : std_logic_vector(7 downto 0); --uscita della ROM di 8
19   -- bit
20   signal yM: std_logic_vector(3 downto 0); --uscita dalla macchina di
21   -- trasform di 4 bit
22   signal ENABLE, WRITE, READ: std_logic;
23
24 component ROM is
25   port(
26     CLK: in STD_LOGIC;
27     address: in STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
28     EN_RD: in STD_LOGIC;
29     dout: out STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0)
30   );
31 end component;
32
33 component M is
34   port(
35     ingresso: in std_logic_vector(7 downto 0);
36     uscita: out std_logic_vector(3 downto 0)
37   );
38 end component;
39
40 component MEM
41   port(
42     CLK: in std_logic;
43     EN_WR: in std_logic;
44     ADD: in std_logic_vector(3 downto 0);
45     DATA_IN: in std_logic_vector(3 downto 0)
46   );
47 end component;

```

```

46
47 component cont_mod16 is
48     Port (
49         CLK: in std_logic;
50         RST: in std_logic;
51         EN_COUNT: in std_logic;
52         count: out std_logic_vector(3 downto 0)
53     );
54     end component;
55
56 component control_unit
57     Port (
58         START, RST: in STD_LOGIC;
59         CLK: in STD_LOGIC;
60         count: in STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
61         stato: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
62         EN_RD, EN_WR, EN_COUNT: out STD_LOGIC
63     );
64 end component;
65
66 begin
67
68 --collegamenti tra le componenti
69 ROM0: ROM
70     Port map(
71         CLK => CLK,
72         address => Yc,
73         EN_RD => READ,
74         dout => yROM
75     );
76 M0: M
77     Port map(
78         ingresso => yROM,
79         uscita => yM
80     );
81
82 MEM0: MEM
83     Port map(
84         CLK => CLK,
85         EN_WR => WRITE,
86         ADD => Yc,
87         DATA_IN => yM
88     );
89
90 cont: cont_mod16
91     port map(

```

```
92      CLK => CLK,
93      RST => RST,
94      EN_COUNT => ENABLE,
95      count => Yc --l'uscita del contatore deve andare in ingresso ad
96          ← address della ROM e della mem
97      );
98
99 cu: control_unit
100    port map(
101        START => START,
102        RST => RST,
103        CLK => CLK,
104        count => Yc,
105        stato => stato,
106        EN_RD => READ,
107        EN_WR => WRITE,
108        EN_COUNT => ENABLE
109    );
110
111 Y <= yM;
112 count <= Yc;
113 end structural;
```

Code 6.3: ROM + M + MEM.vhdl

Si vuole porre l'attenzione allo Schematic generato dall'ambiente Vivado, che mostra chiaramente i collegamenti e le dipendenze tra tutte le componenti del sistema.

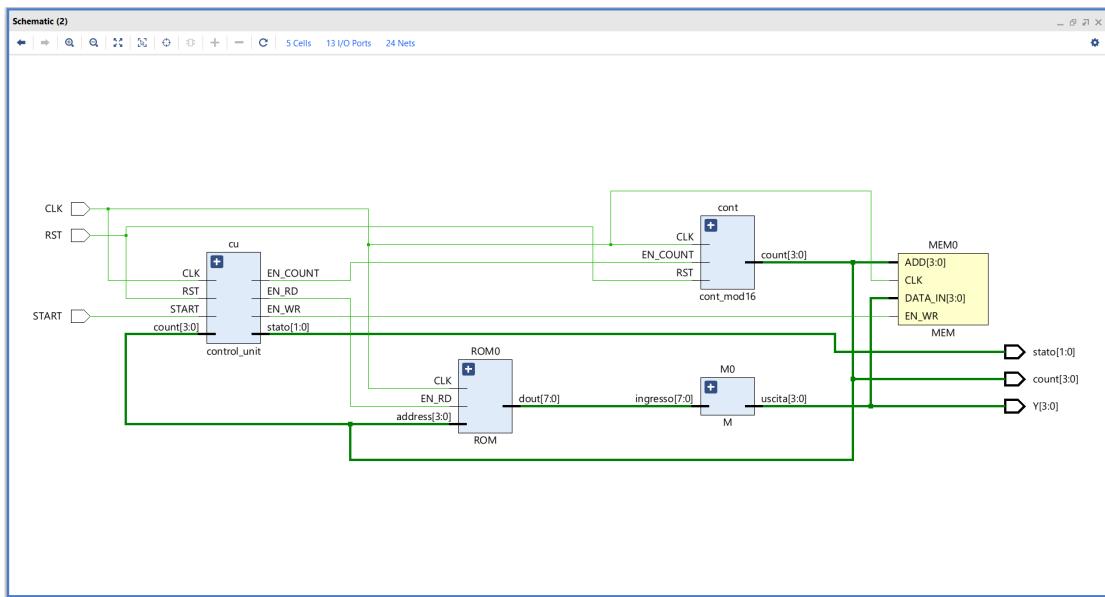


Figura 6.3: Schematic di ROM + M + MEM

6.1.3 Simulazione

Per procedere con la simulazione è stato necessario generare un testbench:

```

1 library ieee;
2 use ieee.std_logic_1164.all;
3 use ieee.numeric_std.all;
4
5 -- Testbench for Rom_M_MEM entity
6
7 entity tb_Rom_M_MEM is
8 end entity;
9
10
11 architecture Behavioral of tb_Rom_M_MEM is
12
13   -- Signals for the testbench
14   signal CLK: std_logic := '0';
15   signal RST: std_logic := '1';
16   signal START: std_logic := '0';
17   signal stato: std_logic_vector(1 downto 0);
18   signal count: STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
19   signal Y: std_logic_vector(3 downto 0);

```

```
20 begin
21
22     -- Clock generation
23     process
24     begin
25         wait for 5 ns;
26         CLK <= not CLK;
27     end process;
28
29     -- Test stimulus
30     process
31     begin
32         wait for 10 ns; -- Wait
33
34         -- Reset the system
35         RST <= '0';
36         wait for 10 ns;
37         RST <= '1';
38         wait for 10 ns;
39         RST <= '0';
40         wait for 10 ns;
41         -- Start the operation
42         START <= '1';
43         wait for 10 ns;
44         START <= '0';
45         wait for 10 ns;
46
47         wait for 100 ns;
48
49         -- End of simulation
50         wait;
51     end process;
52
53     uut: entity work.Rom_M_MEM
54         generic map (N => 16)
55         port map (
56             CLK => CLK,
57             RST => RST,
58             START => START,
59             stato => stato,
60             count => count,
61             Y => Y
62         );
63
64 end Behavioral;
```

Code 6.4: Testbench di ROM + M + MEM.vhd

Eseguendo la simulazione si avrà la seguente forma d'onda:

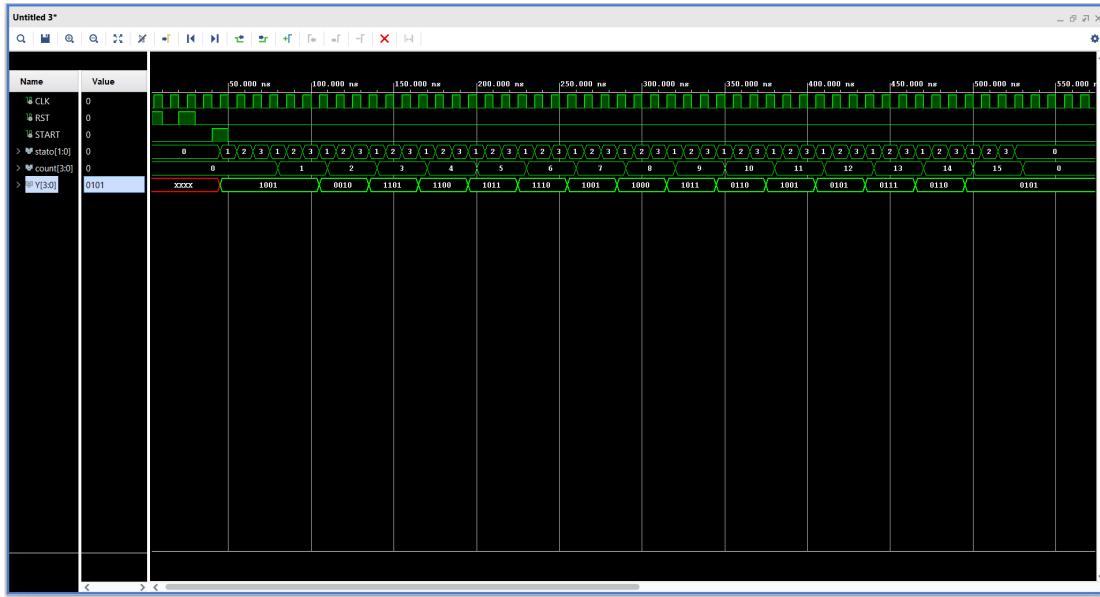


Figura 6.4: Waveform di ROM + M + MEM

Si analizzano alcuni casi per dimostrare la correttezza del sistema.

- **istante 0:** si accede alla locazione di memoria 0, in cui si trova la stringa "00001001", sommando i 4 bit più significativi con i 4 meno significativi si ottiene 1001;
 - **istante 1:** si accede alla locazione di memoria 1, in cui si trova la stringa "10001010", all'uscita della macchina M si ottiene 0010;
 - **istante 2:** si accede alla locazione di memoria 2, in cui si trova la stringa "00001101", procedendo come in precedenza si ottiene 1101.

Si può procedere in questo modo per tutte le locazioni di memoria scandite dal contatore confermando così il risultato della simulazione.

Come detto, si è scelto di mostrare anche le variazioni dello stato e del contatore, in modo da avere la possibilità di osservare in ogni istante il comportamento del sistema, tale scelta è del tutto opzionale.

6.1.4 Timing Analysis

Svolgendo la timing analysis di questo sistema è stato riscontrato che con un clock di 10 ns (clock della board) e quindi una frequenza di 100 MHz i requisiti temporali non sono rispettati.

Design Timing Summary			
Setup	Hold	Pulse Width	
Worst Negative Slack (WNS): -6,723 ns	Worst Hold Slack (WHS): 0,088 ns	Worst Pulse Width Slack (WPWS):	4,500 ns
Total Negative Slack (TNS): -82,414 ns	Total Hold Slack (THS): 0,000 ns	Total Pulse Width Negative Slack (TPWS):	0,000 ns
Number of Failing Endpoints: 25	Number of Failing Endpoints: 0	Number of Failing Endpoints:	0
Total Number of Endpoints: 40	Total Number of Endpoints: 40	Total Number of Endpoints:	18

Timing constraints are not met.

Figura 6.5: Timing Analysis

Per ovviare a ciò per l'implementazione su FPGA è stato utilizzato un divisore di frequenza.

6.2 Implementazione su board del punto precedente

Sintetizzare ed implementare su board il componente sviluppato al punto precedente, utilizzando due bottoni per i segnali di read e reset rispettivamente e i led per la visualizzazione delle uscite della macchina istante per istante.

6.2.1 Implementazione

Nel caso in esame, per procedere all'implementazione su board, è stato necessario apportare alcune modifiche: viene infatti richiesto che la lettura sia abilitata da un segnale esterno proveniente da un bottone della board, mentre nell'implementazione precedente, l'abilitazione alla lettura era un'uscita dell'unità di controllo, che veniva posta alta o bassa in base allo stato corrente. In ogni caso, i codici di ROM, M, counter e MEM restano invariati rispetto al punto precedente, e vengono quindi semplicemente importati.

Si dimostra inoltre necessario l'utilizzo di un divisore di frequenza, componente che si importa dagli esercizi precedenti, per cui non si riporta nuovamente il codice.

Si procede quindi a mostrare le modifiche apportate all'implementazione dell'unità di controllo e di *ROM_M_M.vhdl* per la gestione dell'*EN_RD* come segnale di ingresso dalla board.

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity control_unit is
5     Port (
6         START, RST: in STD_LOGIC;
7         CLK: in STD_LOGIC;
8         EN_RD: in STD_LOGIC;
9         count: in STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
10        --      state: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
11        EN_WR, EN_COUNT: out STD_LOGIC
12    );
13 end control_unit;
14
15 architecture Behavioral of control_unit is
```

```

16  type stati is (idle, read, m_work, write);
17  signal current_state: stati;
18  signal next_state: stati;
19
20 begin
21
22 reg_stato: process(CLK, RST)
23 begin
24     if (CLK'event AND CLK = '1') then
25         if RST = '1' then
26             current_state <= idle;
27         else
28             current_state <= next_state;
29         end if;
30         end if;
31     end process;
32
33 change: process(CLK, START, count)
34 begin
35     CASE current_state is
36         WHEN idle =>
37             EN_COUNT <= '0';
38             if (START = '0') then
39                 next_state <= idle;
40             else
41                 if(EN_RD = '1') then
42                     next_state <= read;
43                 else
44                     next_state <= idle;
45                 end if;
46             end if;
47         WHEN read =>
48             EN_COUNT <= '0';
49             next_state <= M_work;
50         WHEN M_work =>
51             EN_WR <= '1';
52             next_state <= write;
53         WHEN write =>
54             EN_WR <= '0';
55             EN_COUNT <= '1';
56             if (count = "1111") then
57                 next_state <= idle;
58             else
59                 if EN_RD = '1' then
60                     next_state <= read;
61                 else

```

```

62           EN_COUNT <= '0';
63           next_state <= current_state;
64       end if;
65   end if;
66
67   end CASE;
68
69 end process;
70
71 --stato <= "00" when current_state = idle else
72 --      "01" when current_state = read else
73 --      "10" when current_state = m_work else
74 --      "11" when current_state = write; -- Associare a ogni
    ↳ stato un codice binario
75
76 end Behavioral;

```

Code 6.5: Control Unit con EN_RD come ingresso

```

1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity Rom_M_MEM is
5 generic(N: integer range 0 to 32:=16);
6 Port (
7     START, RST, READ: in std_logic;
8     CLK: in std_logic;
9     --count: out std_logic_vector(3 downto 0);
10    --stato: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
11    Y: out std_logic_vector(3 downto 0);
12    led_out: out std_logic
13 );
14 end Rom_M_MEM;
15
16 architecture structural of Rom_M_MEM is
17 --segnali intermedi:
18 signal Yc: std_logic_vector(3 downto 0):= "0000";
19 signal yROM : std_logic_vector(7 downto 0):= "00000000"; --uscita
    ↳ della ROM di 8 bit
20 signal yM: std_logic_vector(3 downto 0):="0000"; --uscita dalla
    ↳ macchina di trasform di 4 bit
21 signal ENABLE, WRITE: std_logic;
22 signal temp_clock: std_logic;
23

```

```

24 component ROM is
25   port (
26     CLK: in STD_LOGIC; --La read e' sincrona
27     address: in STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0); --l'indirizzo in
28       ↳ ingresso me lo da il contatore
29     EN_RD: in STD_LOGIC;
30     dout: out STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0)
31   );
32 end component;
33
34 component M is
35   port (
36     ingresso: in std_logic_vector(7 downto 0);
37     uscita: out std_logic_vector(3 downto 0)
38   );
39 end component;
40
41 component MEM
42   port (
43     CLK: in std_logic;
44     EN_WR: in std_logic; --abilitazione alla scrittura nella
45       ↳ locazione di memoria indicata da loc
46     ADD: in std_logic_vector(3 downto 0); --l'indirizzo
47       ↳ corrispondente all'uscita del contatore cont(mod16)
48     DATA_IN: in std_logic_vector(3 downto 0) --una riga di 4 bit
49   );
50 end component;
51
52 component cont_mod16 is
53   Port (
54     CLK: in std_logic;
55     RST: in std_logic;
56     EN_COUNT: in std_logic;
57     count: out std_logic_vector(3 downto 0)
58   );
59 end component;
60
61 component control_unit
62   Port (
63     START, RST: in STD_LOGIC;
64     CLK: in STD_LOGIC;
65     EN_RD: in STD_LOGIC;
66     count: in STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
67     --      stato: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
68     EN_WR, EN_COUNT: out STD_LOGIC
69   );
70

```

```

67 end component;

68

69 component frequency_divider is
70   Port (
71     clock_in : in STD_LOGIC;    -- Clock di ingresso
72     reset : in STD_LOGIC;      -- Segnale di reset
73     clock_out : out STD_LOGIC -- Clock di uscita, divisore di
74       → frequenza
75   );
76 end component;

77 begin

78   --collegamenti tra le componenti
79   ROM0: ROM
80     Port map(
81       CLK => temp_clock,
82       address => Yc,
83       EN_RD => READ,
84       dout => yROM
85     );
86   M0: M
87     Port map(
88       ingresso => yROM,
89       uscita => yM
90     );
91
92   MEM0: MEM
93     Port map(
94       CLK => temp_clock,
95       EN_WR => WRITE,
96       ADD => Yc,
97       DATA_IN => yM
98     );
99
100
101  cont: cont_mod16
102    port map(
103      CLK => temp_clock,
104      RST => RST,
105      EN_COUNT => ENABLE,
106      count => Yc
107    );
108
109  cu: control_unit
110    port map(
111      START => START,

```

```
112      RST => RST,
113      CLK => temp_clock,
114      count => Yc,
115      --      stato => stato,
116      EN_RD => READ,
117      EN_WR => WRITE,
118      EN_COUNT => ENABLE
119    );
120
121 fd: frequency_divider
122 Port map(
123   clock_in => CLK,    -- Clock di ingresso
124   reset => RST,       -- Segnale di reset
125   clock_out => temp_clock
126 );
127 Y <= YM;
128 --Y <= Yc;
129 led_out <= temp_clock;
130
131 end structural;
```

Code 6.6: ROM + M + MEM su board

Si nota che le uscite commentate nel codice (stato e count) sono state utilizzate ai fini del debugging, per monitorare che le uscite corrispondessero alla giusta locazione di memoria e che i cambiamenti di stato avvenissero in maniera efficiente.

Si è scelto inoltre di mostrare attraverso *led15* della board anche le variazioni del clock, per un'ulteriore conferma visiva della correttezza del sistema.

Come si deduce dal codice mostrato, è stato scelto di usare 3 bottoni per gestire il funzionamento del sistema, *BTNU* come ingresso per *START*, *BTNL* come ingresso per *EN_RD* e *BNTC* come ingresso per *reset*; per consentire ciò i collegamenti sono stati aggiunti nel file

Nexys – A7 – 50T – Master.xdc.

Si mostrano ora i risultati ottenuti sulla board, avendo dato l'abilitazione alla lettura in 3 istanti diversi.

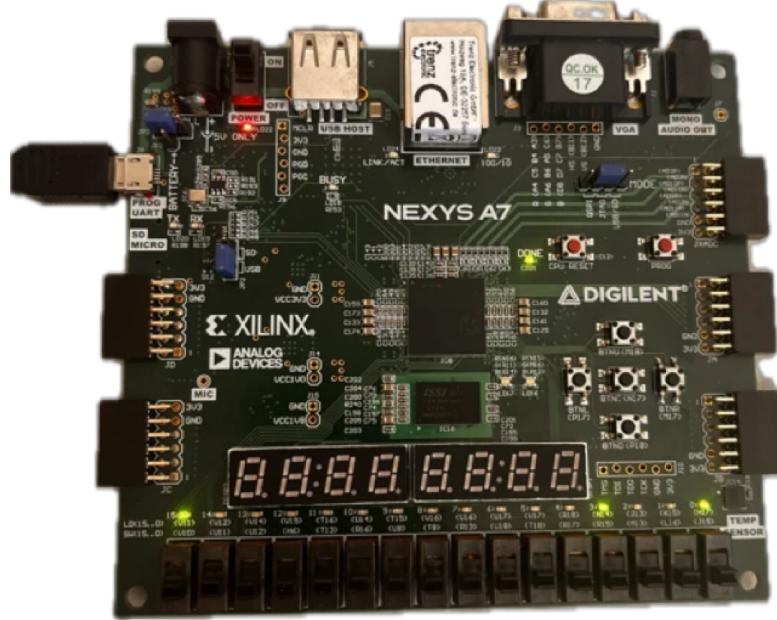


Figura 6.6: Istante 0: uscita = 1001

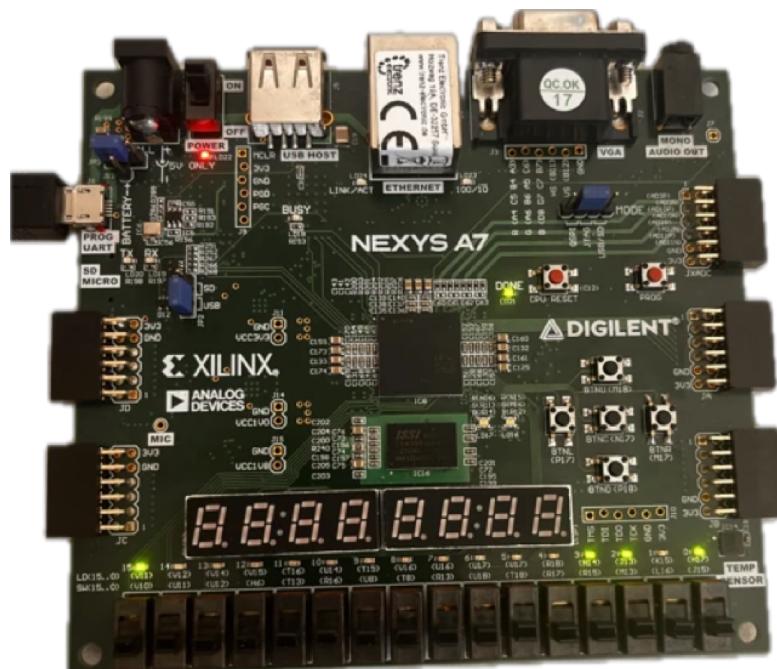


Figura 6.7: Istante 2: uscita = 1101

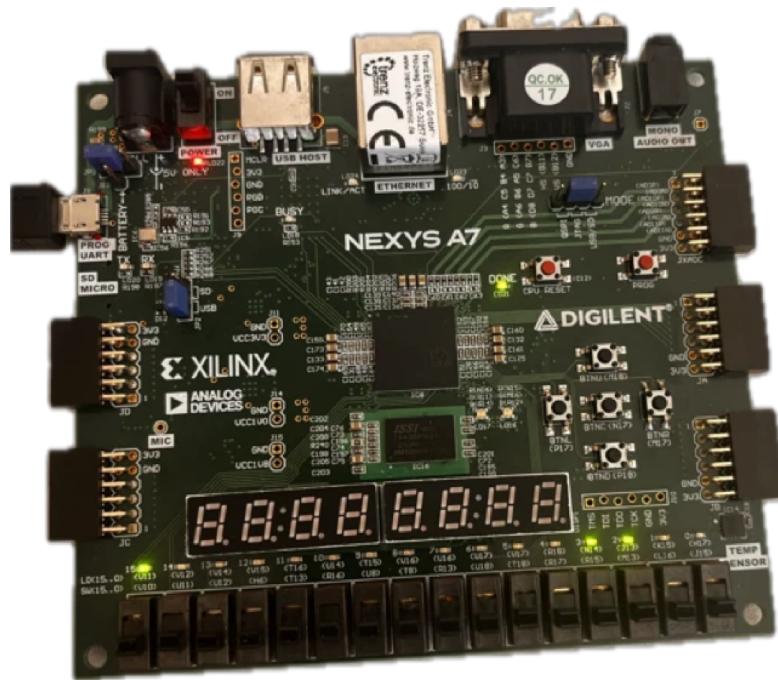


Figura 6.8: Istante 3: uscita = 1100

Capitolo 7

Esercizio 7

7.1 Moltiplicatore di Booth

Si vuole progettare, implementare in VHDL e simulare il moltiplicatore di Booth, in grado di effettuare il prodotto tra due stringhe di 8 bits ciascuna.

7.1.1 Progettazione

Prima di progettare le componenti necessarie, bisogna progettare per interezza il moltiplicatore:

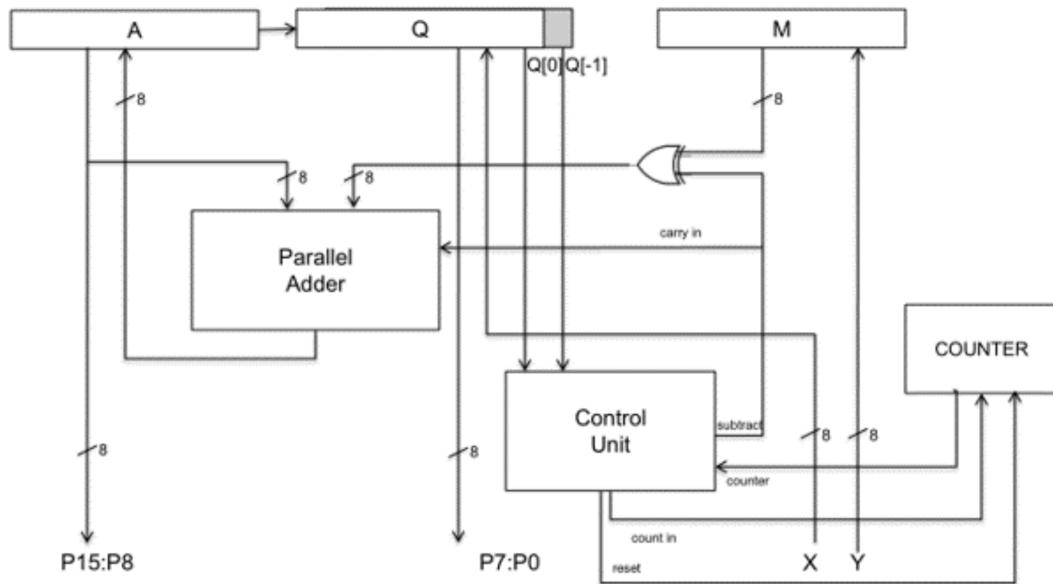


Figura 7.1: Moltiplicatore di Booth

Le componenti necessarie sono quindi:

- **Shift_register:** uno per il valore A (Accumulator), uno per il valore Q e un terzo, il quale memorizzerà il valore M (quest'ultimo non avrà necessità di fare shift);
- **Flip-Flop D:** necessario per la memorizzazione del valore Q_1 e componente strutturale il contatore;
- **Counter:** contatore che porta il conteggio dei passi effettuati;
- **Parallel Adder:** un moltiplicatore parallelo per effettuare la somma: nell'esempio si utilizza un sommatore Carry-Look-Ahead;
- **Control unit:** unità di controllo per la gestione dell'unità operativa.

Shift_Register

Lo Shift_Register utilizzato differisce da quello visto in precedenza per la presenza di due ingressi aggiuntivi che consentono l'inizializzazione del registro e l'inserimento di un'intera stringa nel registro:

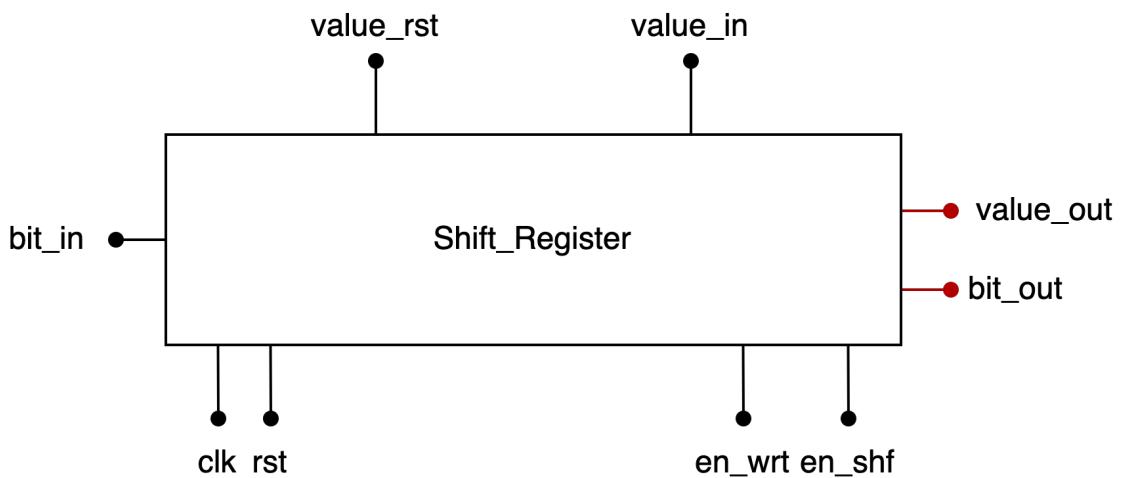


Figura 7.2: Shift_Register

Flip-Flop D

Il Flip-Flop D è lo stesso progettato nel paragrafo 5.1.1.

Si deve notare, che alcune delle porte di ingresso del Flip-Flop D rimarranno inutilizzate, poiché in tale progetto non vi è la necessità di effettuare un settaggio iniziale.

Counter

La macchina counter è un contatore modulo 3.

Analogamente ai contatori presentati nell'esercizio del cronometro, es-

so si ottiene utilizzando 3 Flip-Flop D in parallelo.

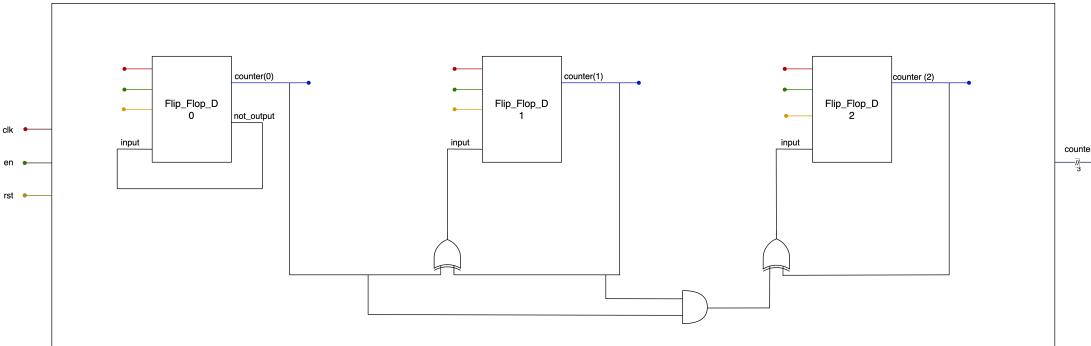


Figura 7.3: Counter mod 8

Carry-Look-Ahead

Per effettuare la somma, si necessita un sommatore parallelo.

Si vuole utilizzare il Carry-Look-Ahead (è possibile scegliere qualsiasi altro sommatore parallelo) con operandi ad 8 bits.

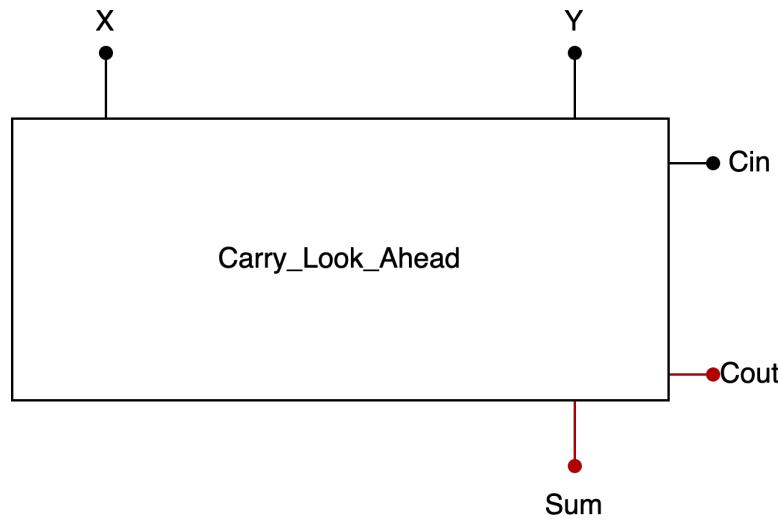


Figura 7.4: Carry Look Ahead

Si noti che all'interno di tale sommatore, viene gestita la scelta di operare un'addizione o una sottrazione.

Control Unit

Per la gestione delle operazioni, si utilizza una Control Unit.

Essa altro non è che una macchina sequenziale e quindi va progettato l'automa a stati finiti corrispondente:

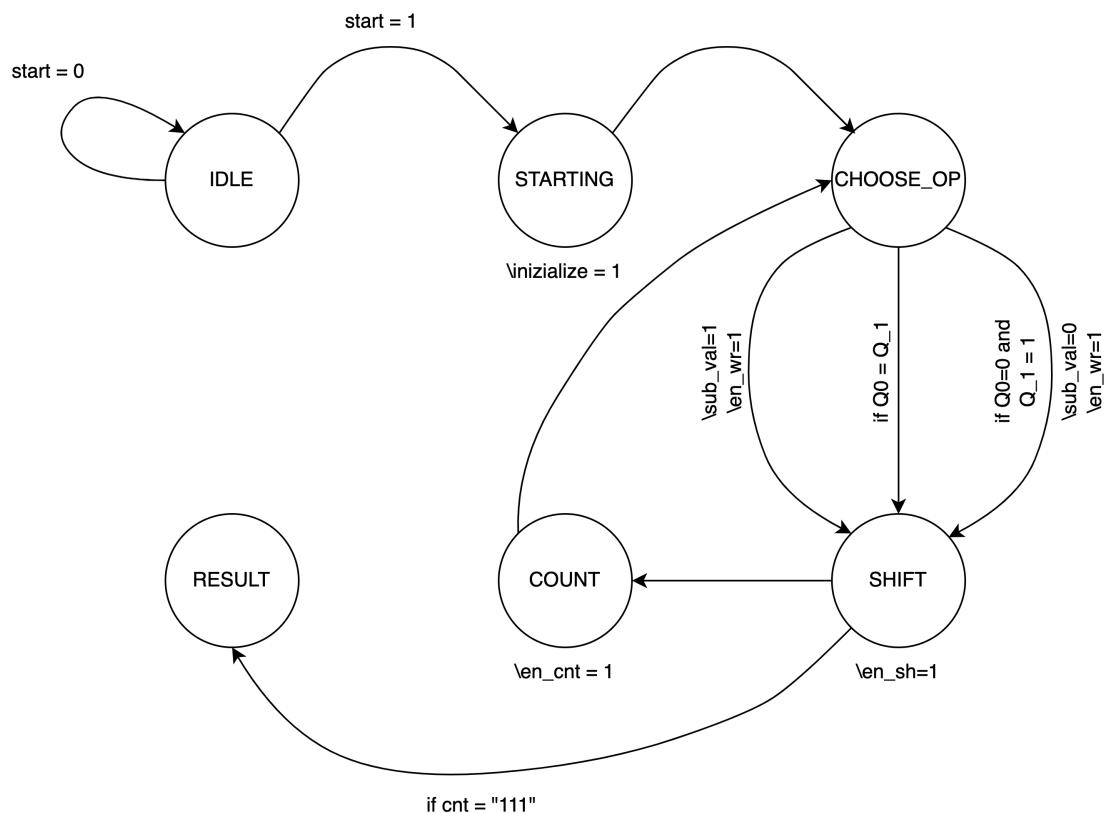


Figura 7.5: Control Unit

7.1.2 Implementazione

Shift_Register

L'implementazione dello Shift Register è la seguente:

```

1 library ieee;
2 use      ieee.std_logic_1164.all;
3
  
```

```
4  entity shift_register is
5      port
6      (
7          clk          :  in  std_logic;
8          rst          :  in  std_logic;
9
10         en_wrt       :  in  std_logic;
11         en_shf       :  in  std_logic;
12
13         value_RST    :  in  std_logic_vector(7 downto 0);
14         value_in     :  in  std_logic_vector(7 downto 0);
15
16         bit_in       :  in  std_logic;
17
18         value_out    :  out std_logic_vector(7 downto 0);
19         bit_out      :  out std_logic
20     );
21 end shift_register;
22
23 architecture behavioral of shift_register is
24     signal temp_out      :  std_logic_vector(7 downto 0);
25
26 begin
27     process(clk)
28     begin
29         if (clk'event and clk='1') then
30             if rst = '1' then
31                 temp_out      <=  value_RST;
32
33             else
34                 if en_wrt = '1' then
35                     temp_out      <=  value_in;
36                 elsif en_shf = '1' then
37                     temp_out(6 downto 0)   <= temp_out(7 downto 1);
38                     temp_out(7)           <=  bit_in;
39                 end if;
40             end if;
41         end if;
42         value_out      <=  temp_out;
43         bit_out       <=  temp_out(0);
44     end process;
45
46 end behavioral;
```

Code 7.1: shift_register.vhdl

Counter

L'implementazione dello Counter è la seguente:

```
1 library ieee;
2 use      ieee.std_logic_1164.all;
3
4 entity counter_mod_8 is
5   port
6   (
7     clk      : in std_logic;
8     en       : in std_logic;
9     rst      : in std_logic;
10    counter : out std_logic_vector(2 downto 0)
11  );
12 end entity;
13
14 architecture structural of counter_mod_8 is
15   signal temp_counter      : std_logic_vector(2 downto 0)      := 
16   <others => '0';
17   signal back              : std_logic;
18   signal resets            : std_logic_vector(4 downto 0);
19   signal counters          : std_logic_vector(2 downto 0);
20
21
22 component ffD is
23   port
24   (
25     clk      : in std_logic;
26     en       : in std_logic;
27     rst      : in std_logic;
28     preset   : in std_logic;
29     input    : in std_logic;
30     output   : out std_logic;
31     not_output : out std_logic
32   );
33 end component;
34
35 begin
36
37   resets(0)    <= rst;
38
39   counter_0 : ffD
40     port map (
```

```
41         clk,
42         en,
43         resets(0),
44         '0',
45         back,
46         temp_counter(0),
47         back
48     );
49
50     resets(1)    <=  rst;
51     counters(1)  <=  temp_counter(0) xor temp_counter(1);
52
53     counter_1 : ffD
54     port map (
55         clk,
56         en,
57         resets(1),
58         '0',
59         counters(1),
60         temp_counter(1)
61     );
62
63     resets(2)    <=  rst;
64     counters(2)  <=  (temp_counter(0) and temp_counter(1)) xor
65     ↪  temp_counter(2);
66
67     counter_2 : ffD
68     port map (
69         clk,
70         en,
71         resets(2),
72         '0',
73         counters(2),
74         temp_counter(2)
75     );
76
77     counter <= temp_counter;
78 end structural;
```

Code 7.2: counter_mod_8.vhdl

L'implementazione del Flip-Flop D è la stessa fatta in precedenza nel paragrafo 5.1.2.

Carry-Look-Ahead

L'implementazione del sommatore, con approccio comportamentale, è la seguente:

```

1 library ieee;
2 use      ieee.std_logic_1164.all;
3
4 entity carry_look_ahead is
5   port
6   (
7     X    :  in  std_logic_vector(7 downto 0);
8     Y    :  in  std_logic_vector(7 downto 0);
9     Cin  :  in  std_logic;
10
11    Sum  :  out std_logic_vector(7 downto 0);
12    Cout:  out std_logic
13  );
14 end entity;
15
16 architecture behavioral of carry_look_ahead is
17   signal G           :  std_logic_vector(7 downto 0);
18   signal P           :  std_logic_vector(7 downto 0);
19
20   signal C           :  std_logic_vector(8 downto 0);
21
22   signal multiplicand :  std_logic_vector(7 downto 0);
23
24 begin
25   process(Cin)
26   begin
27     Y_value: for k in 0 to 7 loop
28       multiplicand(k) <= Y(k) xor Cin;
29     end loop;
30   end process;
31
32   G_P: for k in 0 to 7 generate
33     G(k)      <= X(k) and multiplicand(k);
34     P(k)      <= X(k) xor multiplicand(k);
35   end generate;
36
37   C(0)      <= Cin;
38
39   C_value: for i in 1 to 8 generate

```

```
40      C(i)    <=  G(i-1) or (P(i-1) and C(i-1));
41  end generate;
42
43  sum_value: for i in 0 to 7 generate
44      Sum(i) <= P(i) xor C(i);
45  end generate;
46
47      Cout    <= C(8);
48 end behavioral;
```

Code 7.3: carry_look_ahead.vhdl

Control Unit

Lo sviluppo della Control Unit è esposto di seguito:

```
1 library ieee;
2 use     ieee.std_logic_1164.all;
3
4 entity cu is
5     port
6     (
7         clk          : in  std_logic;
8         rst          : in  std_logic;
9
10        start        : in  std_logic;
11
12        Q0           : in  std_logic;
13        Q_1          : in  std_logic;
14        cnt          : in  std_logic_vector(2 downto 0);
15
16        initialize   : out std_logic;
17
18        sub_val      : out std_logic;
19
20        en_wr        : out std_logic;
21        en_sh        : out std_logic;
22        en_cnt       : out std_logic
23    );
24 end entity;
25
26 architecture behavioral of cu is
```

```

27      type      type_state  is  (IDLE, STARTING, CHOOSE_OP, SHIFT, COUNT,
28          →  RESULT);
29
30  begin
31
32      change_state_process: process(clk, rst)
33  begin
34          if (clk'event and clk='1') then
35              if rst = '1' then
36                  current_state    <=  IDLE;
37              else
38                  current_state    <=  next_state;
39              end if;
40          end if;
41      end process;
42
43      sf_machine: process(current_state)
44  begin
45          initialize    <=  '0';
46          en_wr        <=  '0';
47          en_sh        <=  '0';
48          en_cnt       <=  '0';
49
50          case current_state is
51              when IDLE =>
52                  if start = '0' then
53                      next_state    <=  current_state;
54                  else
55                      next_state    <=  STARTING;
56                  end if;
57
58              when STARTING    =>
59                  initialize    <=  '1';
60                  next_state    <=  CHOOSE_OP;
61
62              when CHOOSE_OP =>
63                  if Q0 = Q_1 then
64                      next_state    <=  SHIFT;
65                  else
66                      if Q0 = '1' and Q_1 = '0' then
67                          sub_val      <=  '1';
68                      elsif Q0 = '0' and Q_1 = '1' then
69                          sub_val      <=  '0';
70                      end if;
71                  next_state    <=  SHIFT;
72
73          end case;
74      end process;
75
76      sub_val    <=  sub_val;
77
78      end architecture;

```

```
72         en_wr    <=  '1';
73     end if;
74
75     when SHIFT =>
76         en_sh    <=  '1';
77         if cnt = "111" then
78             next_state  <=  RESULT;
79         else
80             next_state  <=  COUNT;
81         end if;
82
83     when COUNT =>
84         en_cnt   <=  '1';
85         next_state  <=  CHOOSE_OP;
86
87     when RESULT =>
88
89         end case;
90     end process;
91 end behavioral;
```

Code 7.4: cu.vhdl

Booth

Quindi a questo punto, si può implementare strutturalmente la macchina Booth:

```
1 library ieee;
2 use      ieee.std_logic_1164.all;
3
4 entity booth is
5     port
6     (
7         clk      :  in  std_logic;
8         rst      :  in  std_logic;
9
10        start    :  in  std_logic;
11
12        X       :  in  std_logic_vector(7 downto 0);
13        Y       :  in  std_logic_vector(7 downto 0);
14
```

```

15         res      :  out std_logic_vector(15 downto 0)
16     );
17 end booth;
18
19 architecture structural of booth is
20     component shift_register is
21         port
22         (
23             clk      :  in  std_logic;
24             rst      :  in  std_logic;
25             en_wrt   :  in  std_logic;
26             en_shf   :  in  std_logic;
27             value_rst :  in  std_logic_vector(7 downto 0);
28             value_in  :  in  std_logic_vector(7 downto 0);
29             bit_in    :  in  std_logic;
30             value_out :  out std_logic_vector(7 downto 0);
31             bit_out   :  out std_logic
32         );
33     end component;
34
35     component counter_mod_8 is
36         port
37         (
38             clk      :  in  std_logic;
39             en       :  in  std_logic;
40             rst      :  in  std_logic;
41             counter :  out std_logic_vector(2 downto 0)
42         );
43     end component;
44
45     component ffD is
46         port
47         (
48             clk      :  in  std_logic;
49             en       :  in  std_logic;
50             rst      :  in  std_logic;
51             preset   :  in  std_logic;
52             input    :  in  std_logic;
53             output   :  out std_logic;
54             not_output :  out std_logic
55         );
56     end component;
57
58     component carry_look_ahead is
59         port
60         (

```

```

61      X      :  in  std_logic_vector(7 downto 0);
62      Y      :  in  std_logic_vector(7 downto 0);
63      Cin   :  in  std_logic;
64      Sum   :  out std_logic_vector(7 downto 0);
65      Cout  :  out std_logic
66  );
67 end component;
68
69 component cu is
70   port
71   (
72     clk      :  in  std_logic;
73     rst      :  in  std_logic;
74     start    :  in  std_logic;
75     Q0       :  in  std_logic;
76     Q_1      :  in  std_logic;
77     cnt      :  in  std_logic_vector(2 downto 0);
78     initialize :  out std_logic;
79     sub_val   :  out std_logic;
80     en_wr    :  out std_logic;
81     en_sh    :  out std_logic;
82     en_cnt   :  out std_logic
83   );
84 end component;
85
86 signal rst_iniz   :  std_logic;
87
88 signal en_wr_temp :  std_logic;
89 signal en_sh_temp :  std_logic;
90
91 signal A_value_in :  std_logic_vector(7 downto 0);
92 signal A_bit_in    :  std_logic;
93 signal A_value_out :  std_logic_vector(7 downto 0);
94 signal A_bit_out   :  std_logic;
95
96 signal Q_bit_in   :  std_logic;
97 signal Q_value_out :  std_logic_vector(7 downto 0);
98 signal Q_bit_out   :  std_logic;
99
100 signal Q_1_bit_in :  std_logic;
101 signal Q_1_bit_out :  std_logic;
102
103 signal M_value_out :  std_logic_vector(7 downto 0);
104
105 signal subst      :  std_logic;
106

```

```

107     signal en_cnt_temp : std_logic;
108     signal count_value : std_logic_vector(2 downto 0);
109
110     signal initialize : std_logic;
111
112 begin
113     rst_iniz      <= initialize;
114
115     A_reg: shift_register
116     port map (clk, rst_iniz, en_wr_temp, en_sh_temp, (others => '0'),
117               ↳ A_value_in, A_value_out(7), A_value_out, A_bit_out);
118
119     Q_bit_in      <= A_bit_out;
120     A_bit_in      <= A_value_out(7);
121
122     Q_reg: shift_register
123     port map (clk, rst_iniz, '0', en_sh_temp, X, (others=>'0'),
124               ↳ A_bit_out, Q_value_out, Q_bit_out);
125
126     Q_minus_one: ffd
127     port map (clk, en_sh_temp, rst_iniz, '0', Q_bit_out, Q_1_bit_out);
128
129     M: shift_register
130     port map (clk, rst_iniz, '0', '0', Y, (others => '0'), '0',
131               ↳ M_value_out);
132
133     adder: carry_look_ahead
134     port map (A_value_out, M_value_out, subst, A_value_in);
135
136     count: counter_mod_8
137     port map (clk, en_cnt_temp, rst_iniz, count_value);
138
139     control_unit: cu
140     port map (clk, rst, start, Q_bit_out, Q_1_bit_out, count_value,
141               ↳ initialize, subst, en_wr_temp, en_sh_temp, en_cnt_temp);
142
143     res <= A_value_out & Q_value_out;
144
145 end structural;

```

Code 7.5: booth.vhdl

7.1.3 Simulazione

Per effettuare la simulazione della macchina, è stato implementato il seguente test_bench:

```
1  -- Testbench created online at:
2  --
3  --   ↳ https://www.doulos.com/knowhow/perl/vhdl-testbench-creation-using-perl/
4  -- Copyright Doulos Ltd
5
6  library IEEE;
7  use IEEE.Std_logic_1164.all;
8  use IEEE.Numeric_Signed.all;
9
10 entity booth_tb is
11 end;
12
13 architecture bench of booth_tb is
14
15 component booth
16     port
17     (
18         clk      : in  std_logic;
19         rst      : in  std_logic;
20         start    : in  std_logic;
21         X        : in  std_logic_vector(7 downto 0);
22         Y        : in  std_logic_vector(7 downto 0);
23         res      : out std_logic_vector(15 downto 0)
24     );
25 end component;
26
27 signal clk: std_logic;
28 signal rst: std_logic;
29 signal start: std_logic;
30 signal X: std_logic_vector(7 downto 0);
31 signal Y: std_logic_vector(7 downto 0);
32 signal prod: std_logic_vector(15 downto 0) ;
33
34 constant clk_period : time := 10 ns;
35
36 begin
37     uut: booth port map ( clk      => clk,
38                           rst      => rst,
```

```

39                     start => start,
40                     X      => X,
41                     Y      => Y,
42                     res   => prod);
43
44 clk_process: process
45 begin
46     while true loop
47         clk <= '0';
48         wait for clk_period / 2;
49         clk <= '1';
50         wait for clk_period / 2;
51     end loop;
52 end process;
53
54 stimulus: process
55 begin
56
57     X      <= "00000010";
58     Y      <= "11110000";
59     start  <= '1';
60     -- Put test bench stimulus code here
61
62     wait;
63 end process;
64
65
66 end;

```

Code 7.6: booth_tb.vhdl

Il risultato è il seguente:

Figura 7.6: Simulazione 1: 3×-1 Figura 7.7: Simulazione 2: -13×-16

7.2 Implementazione su board del punto precedente

Sintetizzare il moltiplicatore implementato al punto 7.1 su FPGA e testarlo mediante l'utilizzo dei dispositivi di input/output (switch, bottoni, led, display) presenti sulla board di sviluppo in dotazione. La modalità di utilizzo degli stessi è a completa discrezione degli studenti.

7.2.1 Implementazione

Per l'implementazione su board si è scelto di utilizzare gli switches da 0 a 7 per il primo operando e gli switches da 8 a 15 per il secondo operando. Per lo start si è utilizzato il bottone BTNU, mentre per il reset si è utilizzato il bottone centrale BTNC. Per realizzare ciò è stato utilizzato il seguente file *Nexys-A7-50T-Master.xdc* come mostrato:

```
# Clock signal
set_property -dict { PACKAGE_PIN E3      IOSTANDARD LVCMS3 } [get_ports { clk }];
#IO_L12P_T1_MRCC_35 Sch=clk100mhz
create_clock -add -name sys_clk_pin -period 100000 -waveform {0 5}
[get_ports {clk}];

##Switches
set_property -dict { PACKAGE_PIN J15      IOSTANDARD LVCMS3 }
[get_ports { X[0] }]; #IO_L24N_T3_RS0_15 Sch=sw[0]
set_property -dict { PACKAGE_PIN L16      IOSTANDARD LVCMS3 }
[get_ports { X[1] }]; #IO_L3N_T0_DQS_EMCCCLK_14 Sch=sw[1]
set_property -dict { PACKAGE_PIN M13      IOSTANDARD LVCMS3 }
[get_ports { X[2] }]; #IO_L6N_T0_D08_VREF_14 Sch=sw[2]
set_property -dict { PACKAGE_PIN R15      IOSTANDARD LVCMS3 }
[get_ports { X[3] }]; #IO_L13N_T2_MRCC_14 Sch=sw[3]
```

```
set_property -dict { PACKAGE_PIN R17      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { X[4] }]; #IO_L12N_T1_MRCC_14 Sch=sw[4]
set_property -dict { PACKAGE_PIN T18      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { X[5] }]; #IO_L7N_T1_D10_14 Sch=sw[5]
set_property -dict { PACKAGE_PIN U18      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { X[6] }]; #IO_L17N_T2_A13_D29_14 Sch=sw[6]
set_property -dict { PACKAGE_PIN R13      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { X[7] }]; #IO_L5N_T0_D07_14 Sch=sw[7]
set_property -dict { PACKAGE_PIN T8       IOSTANDARD LVCMOS18 }
[get_ports { Y[0] }]; #IO_L24N_T3_34 Sch=sw[8]
set_property -dict { PACKAGE_PIN U8       IOSTANDARD LVCMOS18 }
[get_ports { Y[1] }]; #IO_25_34 Sch=sw[9]
set_property -dict { PACKAGE_PIN R16      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { Y[2] }]; #IO_L15P_T2_DQS_RDWR_B_14 Sch=sw[10]
set_property -dict { PACKAGE_PIN T13      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { Y[3] }]; #IO_L23P_T3_A03_D19_14 Sch=sw[11]
set_property -dict { PACKAGE_PIN H6       IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { Y[4] }]; #IO_L24P_T3_35 Sch=sw[12]
set_property -dict { PACKAGE_PIN U12      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { Y[5] }]; #IO_L20P_T3_A08_D24_14 Sch=sw[13]
set_property -dict { PACKAGE_PIN U11      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { Y[6] }]; #IO_L19N_T3_A09_D25_VREF_14 Sch=sw[14]
set_property -dict { PACKAGE_PIN V10      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { Y[7] }]; #IO_L21P_T3_DQS_14 Sch=sw[15]

## LEDs
set_property -dict { PACKAGE_PIN H17      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { res[0] }]; #IO_L18P_T2_A24_15 Sch=led[0]
set_property -dict { PACKAGE_PIN K15      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { res[1] }]; #IO_L24P_T3_RS1_15 Sch=led[1]
set_property -dict { PACKAGE_PIN J13      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { res[2] }]; #IO_L17N_T2_A25_15 Sch=led[2]
set_property -dict { PACKAGE_PIN N14      IOSTANDARD LVCMOS33 }
```

```

[get_ports { res[3] }]; #IO_L8P_T1_D11_14 Sch=led[3]
set_property -dict { PACKAGE_PIN R18     IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { res[4] }]; #IO_L7P_T1_D09_14 Sch=led[4]
set_property -dict { PACKAGE_PIN V17     IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { res[5] }]; #IO_L18N_T2_A11_D27_14 Sch=led[5]
set_property -dict { PACKAGE_PIN U17     IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { res[6] }]; #IO_L17P_T2_A14_D30_14 Sch=led[6]
set_property -dict { PACKAGE_PIN U16     IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { res[7] }]; #IO_L18P_T2_A12_D28_14 Sch=led[7]
set_property -dict { PACKAGE_PIN V16     IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { res[8] }]; #IO_L16N_T2_A15_D31_14 Sch=led[8]
set_property -dict { PACKAGE_PIN T15     IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { res[9] }]; #IO_L14N_T2_SRCC_14 Sch=led[9]
set_property -dict { PACKAGE_PIN U14     IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { res[10] }]; #IO_L22P_T3_A05_D21_14 Sch=led[10]
set_property -dict { PACKAGE_PIN T16     IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { res[11] }]; #IO_L15N_T2_DQS_DOUT_CSO_B_14 Sch=led[11]
set_property -dict { PACKAGE_PIN V15     IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { res[12] }]; #IO_L16P_T2_CSI_B_14 Sch=led[12]
set_property -dict { PACKAGE_PIN V14     IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { res[13] }]; #IO_L22N_T3_A04_D20_14 Sch=led[13]
set_property -dict { PACKAGE_PIN V12     IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { res[14] }]; #IO_L20N_T3_A07_D23_14 Sch=led[14]
set_property -dict { PACKAGE_PIN V11     IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { res[15] }]; #IO_L21N_T3_DQS_A06_D22_14 Sch=led[15]

##Buttons
#set_property -dict { PACKAGE_PIN C12     IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { reset }]; #IO_L3P_T0_DQS_AD1P_15 Sch=cpu_resetn
set_property -dict { PACKAGE_PIN N17     IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { rst }]; #IO_L9P_T1_DQS_14 Sch=btnc
set_property -dict { PACKAGE_PIN M18     IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { start }]; #IO_L4N_T0_D05_14 Sch=btnu

```

```
#set_property -dict { PACKAGE_PIN P17      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { load_i }]; #IO_L12P_T1_MRCC_14 Sch=btnl
#set_property -dict { PACKAGE_PIN M17      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { load_M }]; #IO_L10N_T1_D15_14 Sch=btmr
#set_property -dict { PACKAGE_PIN P18      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { BTND }]; #IO_L9N_T1_DQS_D13_14 Sch=btnd
```

Da cui si osserva come sono state collegate le componenti utilizzate.

In seguito si mostrano alcune immagini del funzionamento del moltiplicatore sulla board.

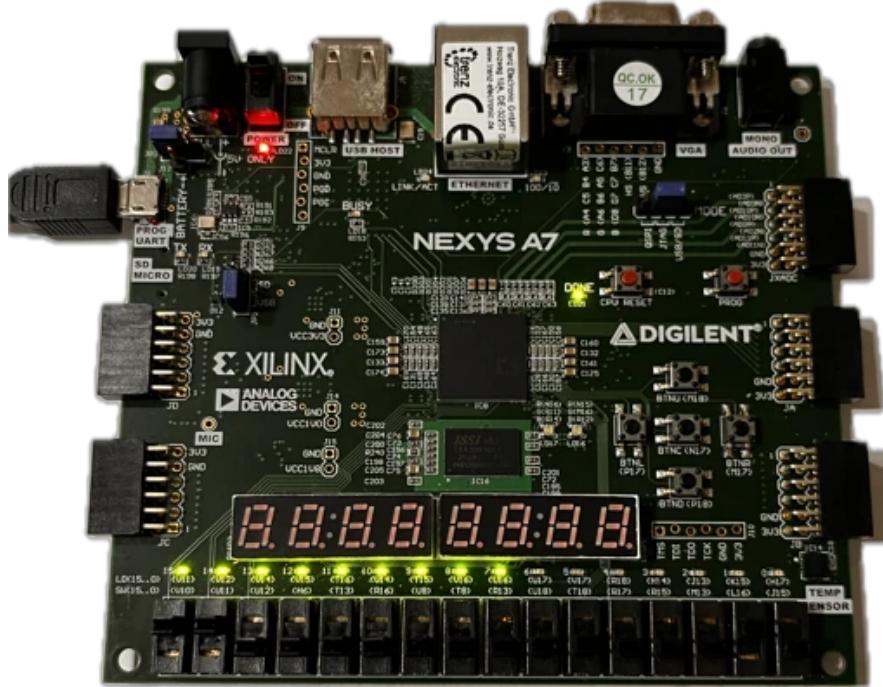


Figura 7.8: Test 1

Nell'immagine rappresentante il Test 1 si è svolta la seguente moltiplicazione:

$$11000000 * 00000010 = 111111110000000$$

che convertita in decimale risulta

$$-64 * 2 = -128$$

avendo utilizzato la notazione in complemento a 2.

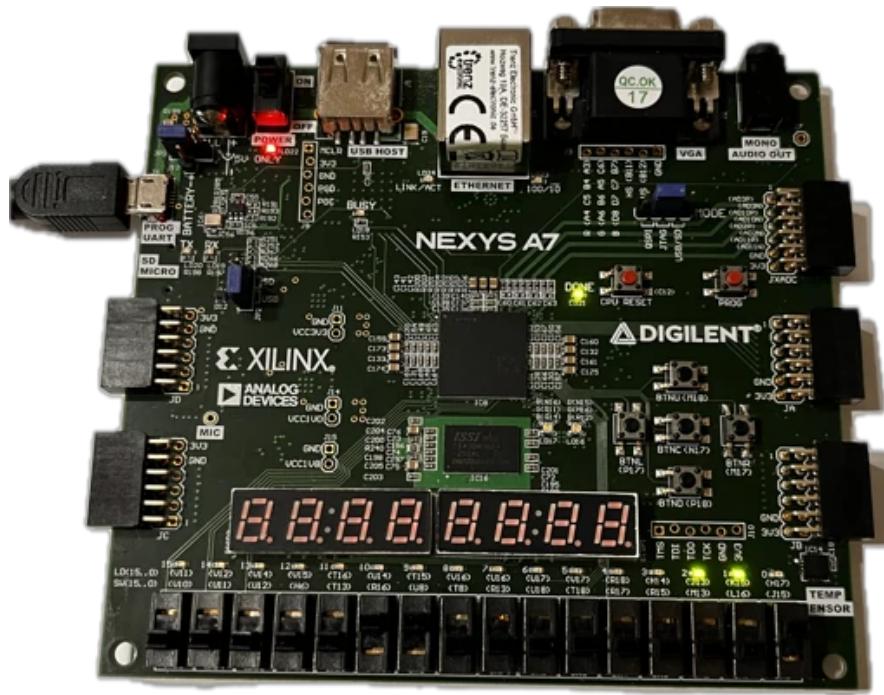


Figura 7.9: Test 2

In Test 2 invece si è svolta la seguente moltiplicazione

$$000000110 * 00000001 = 0000000000000000110$$

che convertita in decimale risulta

$$3 * 1 = 3$$

Capitolo 8

Esercizio 8

8.1 Comunicazione con handshaking

Progettare, implementare in VHDL e testare mediante simulazione un sistema composto da 2 nodi, A e B, che comunicano mediante un protocollo di handshaking. Il nodo A e il nodo B possiedono entrambi una memoria interna in cui sono memorizzate N stringhe di M bit, denominate $X(i)$ e $Y(i)$ rispettivamente ($i=0,..,N-1$). Il nodo A trasmette a B ciascuna stringa $X(i)$ utilizzando un protocollo di handshaking; B, ricevuta la stringa $X(i)$, calcola $S(i)=X(i)+Y(i)$ e immagazzina la somma in opportune locazioni della propria memoria interna. Per il progetto è possibile considerare una implementazione di tipo comportamentale per effettuare la somma, mentre è necessario prevedere esplicitamente un componente contatore sia nel sistema A sia nel sistema B per scandire la trasmissione/ricezione delle stringhe e per terminare

la comunicazione.

8.1.1 Progettazione

Il sistema in esame è composto da due nodi (A e B), che comunicano mediante un protocollo di handshaking per lo scambio di dati e il coordinamento delle operazioni. Entrambi i nodi dispongono di una memoria interna in cui sono memorizzate N stringhe binarie di lunghezza M bit.

Il Nodo A è responsabile della trasmissione delle stringhe $X(i)$ verso il Nodo B tramite handshaking, che garantisce che i dati siano trasmessi in modo sicuro e sincronizzato. Una volta ricevuta una stringa, il Nodo B esegue una somma binaria con la corrispondente stringa $Y(i)$ memorizzata nella propria memoria interna, calcolando $S(i) = X(i) + Y(i)$. Il risultato della somma $S(i)$ viene quindi caricato nella memoria del Nodo B. Per la progettazione si inizia studiando gli schemi a blocchi dei due nodi, che vengono mostrati nelle successive figure:

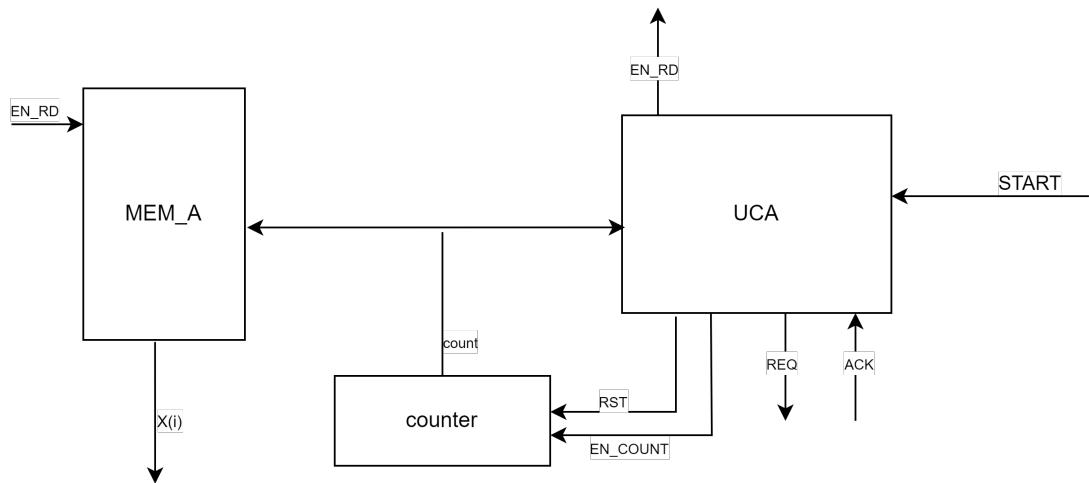


Figura 8.1: Schema a blocchi nodo A

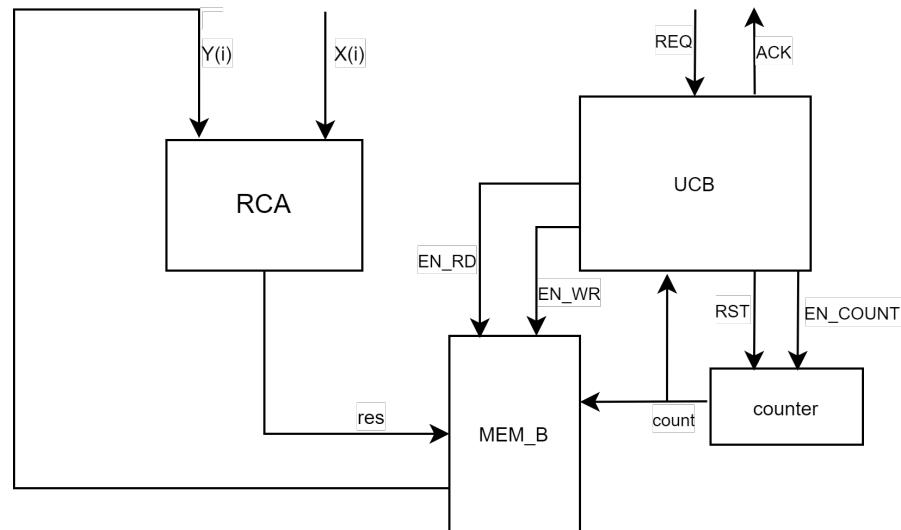


Figura 8.2: Schema a blocchi nodo B

I due sistemi sono dotati ciascuno della propria unità di controllo il cui funzionamento è rappresentato dagli automi mostrati:

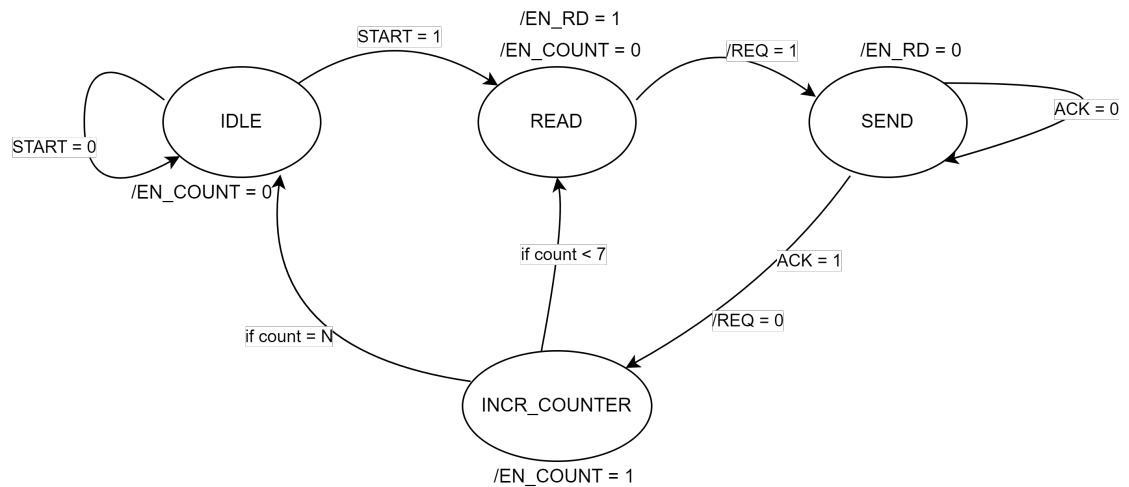


Figura 8.3: Automa del nodo A

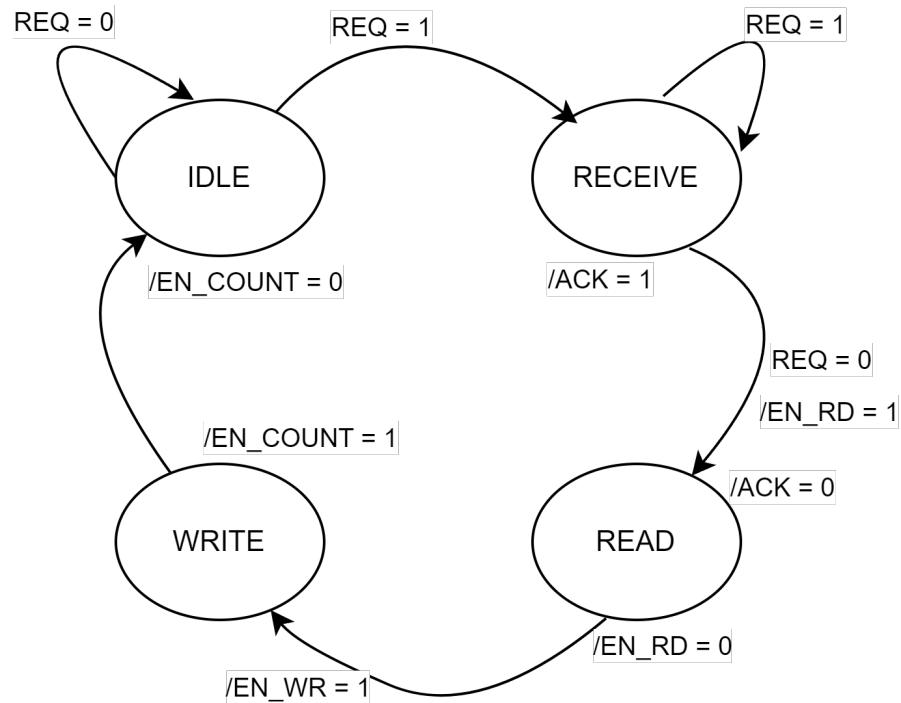


Figura 8.4: Automa del nodo B

8.1.2 Implementazione

Per l'implementazione di tale sistema si inizia definendo il nodo A. Come detto, esso si compone di una ROM e un contatore, che insieme

costituiscono l'unità operativa, e una unità di controllo per la gestione.

Si mostrano i codici relativi all'implementazione del nodo A:

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3 use IEEE.NUMERIC_STD.ALL;
4
5 entity MEM_A is
6     generic(N: integer range 0 to 32:= 16);
7     port(
8         CLK: in STD_LOGIC; --La read e' sincrona
9         address: in STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0); --l'indirizzo in
10        ↳ ingresso me lo da il contatore
11        EN_RD: in STD_LOGIC;
12        dout: out STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0)
13    );
14 end entity MEM_A;
15
16
17 architecture Behavioral of MEM_A is
18
19 type MEMORY is array(N-1 downto 0) of STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0);
20    ↳ --memoria da N locazioni che contengono 8 bit
21 constant ROM_N: MEMORY := (
22     "01000001", -- in locazione 15
23     "01000001",
24     "01000010",
25     "01000011",
26     "00010100",
27     "01000101",
28     "00000110",
29     "01000111",
30     "00001000",
31     "00001001",
32     "01001010",
33     "00001000",
34     "00001100",
35     "00001101",
36     "10001010",
37     "00001001" --in locazione 0
38 );
39
40
41 begin
```

```
40 lettura: process(EN_RD, address, CLK)
41 begin
42     if (CLK'event AND CLK = '1') then
43         if (EN_RD = '1') then
44             dout<= ROM_N(TO_INTEGER(unsigned(address))); --lettura dalla
45             --rom
46         end if;
47     end if;
48 end process;
49
50
51 end architecture Behavioral;
```

Code 8.1: MEM_A.vhdl

```
1
2 library IEEE;
3 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
4
5 use IEEE.NUMERIC_STD.ALL;
6
7 entity counter_modN is
8 generic (N: integer range 0 to 32:= 16);
9     Port ( clock : in STD_LOGIC;
10            reset : in STD_LOGIC;
11            enable : in STD_LOGIC;
12            counter : out STD_LOGIC_VECTOR (3 downto 0));
13 end counter_modN;
14
15 architecture Behavioral of counter_modN is
16
17 signal c : std_logic_vector (3 downto 0) := (others => '0');
18 begin
19 counter <= c;
20
21 counter_process: process(clock)
22 begin
23
24     if(rising_edge(clock)) then
25         if reset = '1' then
26             c <= (others => '0');
27         elsif enable = '1' then
28             c <= std_logic_vector(unsigned(c) + 1);
```

```
29      end if;
30      end if;
31 end process;
32
33 end Behavioral;
```

Code 8.2: counter.vhdl

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity unita_operativa_A is
5     Port (
6         CLK, RST: in STD_LOGIC;
7         EN_RD, EN_COUNT: in STD_LOGIC;
8         count: out STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
9         X: out STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0)
10    );
11 end unita_operativa_A;
12
13 architecture structural of unita_operativa_A is
14
15 component counter_modN
16 generic (N: integer range 0 to 32:= 16);
17     Port ( clock : in STD_LOGIC;
18             reset : in STD_LOGIC;
19                     enable : in STD_LOGIC;
20             counter : out STD_LOGIC_VECTOR (3 downto 0));
21 end component;
22
23 component MEM_A
24 generic(N: integer range 0 to 32:= 16);
25     port(
26         CLK: in STD_LOGIC; --La read e' sincrona
27         address: in STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0); --l'indirizzo in
28             ↳ ingresso me lo da il contatore
29         EN_RD: in STD_LOGIC;
30         dout: out STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0)
31    );
32 end component;
33
34 signal temp_c: STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
35 begin
```

```

36 counter: counter_modN
37     port map(
38         clock => CLK,
39         reset => RST,
40         enable => EN_COUNT,
41         counter => temp_c
42     );
43
44 mem: MEM_A
45     port map(
46         CLK => CLK,
47         address => temp_c,
48         EN_RD => EN_RD,
49         dout => X
50     );
51 count <= temp_c;
52 end structural;

```

Code 8.3: unità operativa di A in vhdl

```

1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity UCA is
5     Port (
6         START, CLK, RST: in STD_LOGIC;
7         ACK: in STD_LOGIC;
8         count: in STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
9         REQ: out STD_LOGIC;
10        EN_COUNT, EN_RD: out STD_LOGIC
11        --stato: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0)
12    );
13 end UCA;
14
15 architecture Behavioral of UCA is
16
17 type stati is (IDLE, READ, SEND, INCR_COUNTER);
18 signal current_state: stati;
19 signal next_state: stati;
20
21 begin
22 reg_stato: process(CLK, RST)
23 begin
24 if (CLK'event AND CLK = '1') then

```

```

25      if (RST = '1') then
26          current_state <= IDLE;
27      else
28          current_state <= next_state;
29          end if;
30      end if;
31  end process;
32
33 change_stat0: process(START, current_state, ACK, count)
34 begin
35     EN_RD <= '0';
36     EN_COUNT <= '0';
37     REQ <= '0';
38     CASE current_state is
39         when IDLE =>
40             if (START = '1') then
41                 EN_RD <= '1';
42                 next_state <= READ;
43             else
44                 next_state <= current_state;
45             end if;
46         when READ =>
47             EN_RD <= '0';
48             EN_COUNT <= '0';
49             next_state <= SEND;
50         when SEND =>
51             REQ <= '1';
52             if (ACK = '0') then
53                 next_state <= current_state;
54             else
55                 REQ <= '0';
56                 next_state <= INCR_COUNTER;
57             end if;
58         when INCR_COUNTER =>
59             EN_COUNT <= '1';
60             if (count = "1111") then
61                 next_state <= IDLE;
62             else
63                 EN_RD <= '1';
64                 next_state <= READ;
65             end if;
66
67         end CASE;
68     end process;
69
70 --stat0 <= "00" when current_state = IDLE else

```

```

71      --      "01" when current_state = READ else
72      --      "10" when current_state = SEND else
73      --      "11" when current_state = INCR_COUNTER;
74
75
76 end Behavioral;

```

Code 8.4: unità di controllo di A in vhdl

```

1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity nodo_A is
5   Port (
6     START: in STD_LOGIC;
7     CLK, RST: in STD_LOGIC;
8     X: out STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0);
9     ACK: in STD_LOGIC;
10    REQ: out STD_LOGIC
11    --      count: out std_logic_vector(3 downto 0);
12    --      stato: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0)
13    );
14 end nodo_A;
15
16 architecture structural of nodo_A is
17
18 component unita_operativa_A
19   Port (
20     CLK, RST: in STD_LOGIC;
21     EN_RD, EN_COUNT: in STD_LOGIC;
22     count: out STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
23     X: out STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0)
24   );
25 end component;
26
27 component UCA
28   Port (
29     START, CLK, RST: in STD_LOGIC;
30     ACK: in STD_LOGIC;
31     count: in STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
32     REQ: out STD_LOGIC;
33     EN_COUNT, EN_RD: out STD_LOGIC
34     --      stato: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0)

```

```
35      );
36 end component;
37
38 signal en_rd_temp, en_count_temp: STD_LOGIC;
39 signal temp_count : STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
40
41 begin
42 uo: unita_operativa_A
43     port map(
44         CLK => CLK,
45         RST => RST,
46         EN_RD => en_rd_temp,
47         EN_COUNT => en_count_temp,
48         count => temp_count,
49         X => X
50     );
51
52 uc: UCA
53     port map(
54         START => START,
55         CLK => CLK,
56         RST => RST,
57         ACK => ACK,
58         count => temp_count,
59         REQ => REQ,
60         EN_COUNT => en_count_temp,
61         EN_RD => en_rd_temp
62     --     stato => stato
63     );
64 --count <= temp_count;
65 end structural;
```

Code 8.5: nodo A in vhdl

Per quanto riguarda il nodo B, come si vede dallo schema a blocchi, esso è composto da una memoria a cui si accede sia per la lettura che per la scrittura, un contatore e un addizionatore (implementato come Ripple Carry Adder in maniera strutturale a partire da full adder). Il componente *counter* è comune sia al nodo A che al nodo B, quindi non se ne riporterà nuovamente il codice.

```

1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3 use IEEE.NUMERIC_STD.ALL;
4
5 entity MEM_B is
6     generic(N: integer range 0 to 32:= 16);
7     port(
8         CLK: in STD_LOGIC; --La read e' sincrona
9         address: in STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
10        value_in: in STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0);
11        EN_RD: in STD_LOGIC;
12        EN_WR: in STD_LOGIC;
13        dout: out STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0)
14    );
15 end entity MEM_B;
16
17 architecture Behavioral of MEM_B is
18
19 type MEMORY is array(N-1 downto 0) of STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0);
-- memoria da N locazioni che contengono 8 bit
20 signal MEM_N: MEMORY := (
21     15 => "00001000", -- in locazione 15
22     14 => "01000001",
23     13 => "01000010",
24     12 => "01000011",
25     11 => "00010100",
26     10 => "01000101",
27     9  => "00000110",
28     8  => "00000000",
29     7  => "00001000",
30     6  => "00000100",
31     5  => "01001010",
32     4  => "00001000",
33     3  => "00001100",
34     2  => "00000001",
35     1  => "00000000",
36     0  => "00000001" -- in locazione 0
37 );
38
39
40 begin
41
42 lettura: process(EN_RD, address, CLK, value_in)
43 begin
44     if (CLK'event AND CLK = '1') then

```

```
45      if (EN_RD = '1') then
46          dout<= MEM_N(TO_INTEGER(unsigned(address))); --lettura dalla
47          ↳ rom
48      end if;
49      if (EN_WR = '1') then
50          MEM_N(TO_INTEGER(unsigned(address))) <= value_in;
51      end if;
52  end if;
53
54
55
56 end architecture Behavioral;
```

Code 8.6: MEM_B.vhdl

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity full_adder is
5     Port (
6         x, y, cin: in std_logic;
7         cout: out std_logic;
8         s: out std_logic
9
10    );
11 end full_adder;
12
13 architecture dataflow of full_adder is
14
15 begin
16     cout <= (x AND y) OR (cin AND (x XOR y));
17     s <= (x XOR y XOR cin);
18
19 end dataflow;
```

Code 8.7: full_adder.vhdl

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity RCA is
```

```

5 generic (N: integer range 1 to 32:= 8);
6   Port (
7     X, Y: in std_logic_vector(N-1 downto 0);
8     cin: in std_logic;
9     cout: out std_logic;
10    sum: out std_logic_vector(N-1 downto 0)
11  );
12 end RCA;
13
14 architecture structural of RCA is
15 signal temp_s: std_logic_vector(N-1 downto 0);
16 signal temp_c: std_logic_vector(N-1 downto 0);
17
18 component full_adder is
19   port(
20     x, y, cin: in std_logic;
21     cout: out std_logic;
22     s: out std_logic
23   );
24 end component;
25
26 begin
27 fa0: full_adder
28   port map(
29     x => X(0),
30     y => Y(0),
31     cin => cin,
32     cout => temp_c(0),
33     s => temp_s(0)
34   );
35
36 faltoN_1: for i in 1 to N-1 generate
37   fa: full_adder
38     port map(
39       x => X(i),
40       y => Y(i),
41       cin => temp_c(i-1),
42       cout => temp_c(i),
43       s => temp_s(i)
44     );
45 end generate;
46
47 sum <= temp_s;
48 cout <= temp_c(N-1);
49

```

50 **end structural;**

Code 8.8: Ripple Carry Adder (approccio strutturale) in vhdl

Tali componenti insieme vanno a costituire l'unità operativa.

```

1  library IEEE;
2  use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4  entity unita_operativa_B is
5    Port (
6      CLK, RST: in STD_LOGIC;
7      EN_RD, EN_WR, EN_COUNT: in STD_LOGIC;
8      X: in STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0);
9      Y: out std_logic_vector(7 downto 0);
10     count: out STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
11     result: out STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0)
12   );
13 end unita_operativa_B;
14
15 architecture structural of unita_operativa_B is
16
17 component RCA
18   generic (N: integer range 1 to 32:= 8);
19   Port (
20     X, Y: in std_logic_vector(N-1 downto 0);
21     cin: in std_logic;
22     cout: out std_logic;
23     sum: out std_logic_vector(N-1 downto 0)
24   );
25 end component;
26
27 component MEM_B
28   generic(N: integer range 0 to 32:= 16);
29   port(
30     CLK: in STD_LOGIC; --La read e' sincrona
31     address: in STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
32     value_in: in STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0);
33     EN_RD: in STD_LOGIC;
34     EN_WR: in STD_LOGIC;
35     dout: out STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0)
36   );
37 end component;
38

```

```

39 component counter_modN
40 generic (N: integer range 0 to 32:= 16);
41   Port ( clock : in STD_LOGIC;
42         reset : in STD_LOGIC;
43         enable : in STD_LOGIC;
44         counter : out STD_LOGIC_VECTOR (3 downto 0));
45 end component;
46
47 signal temp_count: STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
48 signal temp_sum: STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0);
49 signal operando: STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0);
50 signal riporto: STD_LOGIC;
51
52 begin
53
54 mem: MEM_B
55 port map(
56   CLK => CLK,
57   address => temp_count,
58   value_in => temp_sum,
59   EN_RD => EN_RD,
60   EN_WR => EN_WR,
61   dout => operando
62 );
63
64 adder: RCA
65 port map(
66   X => X,
67   Y => operando,
68   cin => '0',
69   cout => riporto,
70   sum => temp_sum
71 );
72
73 cont: counter_modN
74 port map(
75   clock => CLK,
76   reset => RST,
77   enable => EN_COUNT,
78   counter => temp_count
79 );
80 count <= temp_count;
81 res: process(CLK, EN_WR)
82 begin
83 if (CLK'event AND CLK = '1') then
84   if (EN_WR = '1') then

```

```
85      result <= temp_sum;
86      end if;
87  end if;
88 end process;
89 Y <= operando;
90 end structural;
```

Code 8.9: unità operativa di B in vhdl

Il nodo B è caratterizzato da una sua unità di controllo:

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity UCB is
5   Port (
6     CLK, RST: in STD_LOGIC;
7     REQ: in STD_LOGIC;
8     count: in STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
9     ACK: out STD_LOGIC;
10    EN_COUNT, EN_RD, EN_WR: out STD_LOGIC
11    --      stato: out STD_LOGIC_VECTOR(2 downto 0)
12  );
13 end UCB;
14
15 architecture Behavioral of UCB is
16
17 type stati is (IDLE, RECEIVE, READ, WRITE);
18 signal current_state: stati;
19 signal next_state: stati;
20
21 begin
22
23 reg_stato: process(CLK, RST)
24 begin
25   if (CLK'event AND CLK = '1') then
26     if (RST = '1') then
27       current_state <= IDLE;
28     else
29       current_state <= next_state;
30     end if;
31   end if;
32 end process;
33
34 change: process(current_state, REQ)
```

```

35 begin
36     CASE current_state is
37         when IDLE =>
38             EN_COUNT <= '0';
39             EN_WR <= '0';
40             ACK <= '0';
41             if REQ = '0' then
42                 next_state <= current_state;
43             else
44                 next_state <= RECEIVE;
45             end if;
46         when RECEIVE =>
47             ACK <= '1';
48             EN_RD <= '1';
49             if REQ = '1' then
50                 next_state <= current_state;
51             else
52                 next_state <= READ;
53             end if;
54         when READ =>
55             ACK <= '0';
56             EN_RD <= '0';
57             next_state <= WRITE;
58         when WRITE =>
59             EN_WR <= '1';
60             EN_COUNT <= '1';
61             next_state <= IDLE;
62     end CASE;
63 end process;
64
65 --stato <= "000" when current_state = IDLE else
66 --      "001" when current_state = RECEIVE else
67 --      "010" when current_state = READ else
68 --      "011" when current_state = WRITE;
69
70
71 end Behavioral;

```

Code 8.10: unità di controllo di B in vhdl

Unità operativa e di controllo costituiscono il nodo nel suo complesso.

```

1 library IEEE;

```

```

2  use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4  entity nodo_B is
5      Port (
6          CLK, RST: in STD_LOGIC;
7          X: in STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0);
8          REQ: in STD_LOGIC;
9          ACK: out STD_LOGIC;
10         --      stato: out STD_LOGIC_VECTOR(2 downto 0);
11         --      count: out std_logic_vector(3 downto 0);
12         Y: out std_logic_vector(7 downto 0);
13         result: out STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0)
14     );
15 end nodo_B;
16
17 architecture structural of nodo_B is
18
19 component unita_operativa_B
20     Port (
21         CLK, RST: in STD_LOGIC;
22         EN_RD, EN_WR, EN_COUNT: in STD_LOGIC;
23         X: in STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0);
24         Y: out std_logic_vector(7 downto 0);
25         count: out STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
26         result: out STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0)
27     );
28 end component;
29
30 component UCB
31     Port (
32         CLK, RST: in STD_LOGIC;
33         REQ: in STD_LOGIC;
34         count: in STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
35         ACK: out STD_LOGIC;
36         EN_COUNT, EN_RD, EN_WR: out STD_LOGIC
37         --      stato: out STD_LOGIC_VECTOR(2 downto 0)
38     );
39 end component;
40
41 signal temp_en_rd, temp_en_wr, temp_en_count: STD_LOGIC;
42 signal temp_count: STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
43
44 begin
45
46     uo: unita_operativa_B
47         port map (

```

```

48     CLK => CLK,
49     RST => RST,
50     EN_RD => temp_en_rd,
51     EN_WR => temp_en_wr,
52     EN_COUNT => temp_en_count,
53     X => X,
54     Y => Y,
55     count => temp_count,
56     result => result
57 );
58
59 UC: UCB
60 port map(
61     CLK => CLK,
62     RST => RST,
63     REQ => REQ,
64     count => temp_count,
65     ACK => ACK,
66     EN_COUNT => temp_en_count,
67     EN_RD => temp_en_rd,
68     EN_WR => temp_en_wr
69     -- stato => stato
70 );
71 --count <= temp_count;
72
73 end structural;
```

Code 8.11: nodo B in vhdl

Il sistema complessivo, è realizzato collegando opportunamente il nodo A e il nodo B, come mostrato in seguito.

```

1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity AplusB is
5   Port (
6     CLK_A, CLK_B, RST: in STD_LOGIC;
7     START: in STD_LOGIC;
8     X: out std_logic_vector(7 downto 0);
9     Y: out std_logic_vector(7 downto 0);
10    result: out STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0)
11    -- count_A: out std_logic_vector(3 downto 0);
12    -- count_B: out std_logic_vector(3 downto 0);
```

```

13      --      stato_A: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
14      --      stato_B: out STD_LOGIC_VECTOR(2 downto 0)
15  );
16 end AplusB;
17
18 architecture structural of AplusB is
19
20 component nodo_A
21 Port (
22     START: in STD_LOGIC;
23     CLK, RST: in STD_LOGIC;
24     X: out STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0);
25     ACK: in STD_LOGIC;
26     REQ: out STD_LOGIC
27     --      count: out std_logic_vector(3 downto 0);
28     --      stato: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0)
29 );
30 end component;
31
32 component nodo_B
33 Port (
34     CLK, RST: in STD_LOGIC;
35     X: in STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0);
36     REQ: in STD_LOGIC;
37     ACK: out STD_LOGIC;
38     --      stato: out STD_LOGIC_VECTOR(2 downto 0);
39     --      count: out std_logic_vector(3 downto 0);
40     Y: out std_logic_vector(7 downto 0);
41     result: out STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0)
42 );
43 end component;
44
45 signal temp_X: STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0);
46 signal temp_ACK, temp_REQ: STD_LOGIC;
47 --signal temp_count_A, temp_count_B: STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
48 begin
49
50 A: nodo_A
51 port map(
52     START => START,
53     CLK => CLK_A,
54     RST => RST,
55     X => temp_X,
56     ACK => temp_ACK,
57     REQ => temp_REQ
58     --      count => count_A,

```

```
59      --      stato => stato_A
60      );
61
62 B: nodo_B
63     port map(
64         CLK => CLK_B,
65         RST => RST,
66         X => temp_X,
67         REQ => temp_REQ,
68         ACK => temp_ACK,
69         --      stato => stato_B,
70         --      count => count_B,
71         Y => Y,
72         result => result
73     );
74 X <= temp_X;
75 -- count_B <= temp_count_B;
76 end structural;
```

Code 8.12: Sistema complessivo (A più B) in vhdl

Il codice commentato nelle implementazioni mostrate è stato utilizzato ed è utilizzabile in fase di debugging, per verificare che l'handshaking funzioni correttamente, e che tutte le stringhe inviate siano ricevute, sommate e memorizzate in modo coerente.

8.1.3 Simulazione

Per la simulazione è necessario utilizzare un testbench.

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3 use IEEE.NUMERIC_STD.ALL;
4
5 entity tb_AplusB is
6     -- Nessuna porta, e' un testbench
7 end tb_AplusB;
8
9 architecture Behavioral of tb_AplusB is
```

```

10   -- Componente instanziato
11   component AplusB
12     Port (
13       CLK_A, CLK_B, RST: in STD_LOGIC;
14       START: in STD_LOGIC;
15       X: out STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0);
16       Y: out STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0);
17       result: out STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0)
18     );
19   end component;
20
21   -- Segnali interni del testbench
22   signal CLK_A, CLK_B, RST, START: STD_LOGIC := '0';
23   signal X, Y, result: STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0);
24
25   -- Parametri per clock
26   constant CLK_PERIOD_A: time := 10 ns; -- Periodo del clock A
27   constant CLK_PERIOD_B: time := 10 ns; -- Periodo del clock B
28 begin
29   -- Instanza del DUT (Device Under Test)
30   DUT: AplusB
31     Port map(
32       CLK_A => CLK_A,
33       CLK_B => CLK_B,
34       RST => RST,
35       START => START,
36       X => X,
37       Y => Y,
38       result => result
39     );
40
41   -- Generazione del clock A
42   process
43   begin
44     CLK_A <= '0';
45     wait for CLK_PERIOD_A / 2;
46     CLK_A <= '1';
47     wait for CLK_PERIOD_A / 2;
48   end process;
49
50   -- Generazione del clock B
51   process
52   begin
53     CLK_B <= '0';
54     wait for CLK_PERIOD_B / 2;
55     CLK_B <= '1';

```

```
56      wait for CLK_PERIOD_B / 2;
57  end process;

58
59  -- Processo di stimolo
60  process
61  begin
62      -- Reset iniziale
63      RST <= '1';
64      START <= '0';
65      wait for 50 ns; -- Attesa per stabilizzare il reset
66      RST <= '0';
67      wait for 50 ns;

68
69      -- Avvio della somma
70      START <= '1';
71      wait for 20 ns;
72      START <= '0'; -- Disattiva il segnale START

73
74      -- Attendi un po' per consentire al protocollo di completarsi
75      wait for 200 ns;

76
77      -- Termina la simulazione
78      wait;
79  end process;

80
81 end Behavioral;
```

Code 8.13: testbench

Eseguendo la simulazione sull'ambiente di sviluppo Vivado si ottiene la seguente forma d'onda:

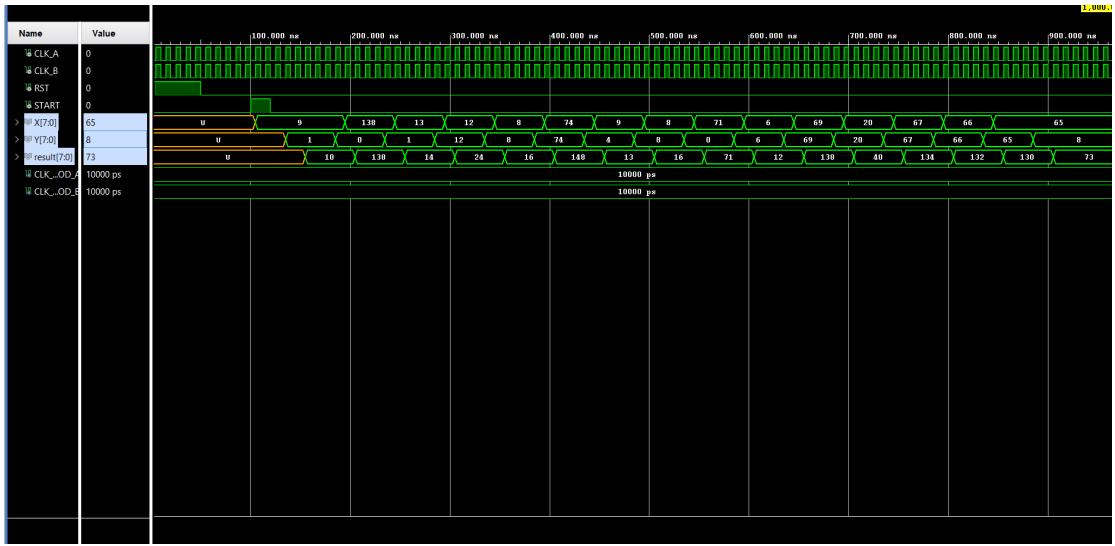


Figura 8.5: Waveform del sistema

Per la conferma del risultato si analizzano le prime locazioni delle memorie di A e B. Si inizia dalla locazione '0':

$$X(0) = 00001001 \text{ che in decimale corrisponde a } 9;$$

$$Y(0) = 00000001 \text{ che in decimale corrisponde a } 1;$$

$$X(0) + Y(0) = 9 + 1 = 10.$$

In locazione '1': $X(0) = 10001010$ che in decimale corrisponde a 138;

$$Y(0) = 00000000 \text{ che in decimale corrisponde a } 0;$$

$$X(0) + Y(0) = 138 + 0 = 138.$$

In locazione '2': $X(0) = 00001101$ che in decimale corrisponde a 13;

$$Y(0) = 00000001 \text{ che in decimale corrisponde a } 1;$$

$$X(0) + Y(0) = 13 + 1 = 14.$$

I risultati possono essere considerati coerenti.

Capitolo 9

Esercizio 9

Partendo dall'implementazione del processore, operante secondo il modello IJVM, si vuole

- analizzare l'architettura mediante simulazione e fornire e approfondire lo studio per due funzioni;
- modificare un codice operativo, documentando le modifiche effettuate.

9.1 Il processore Mic-1

Il processore Mic-1 è un utile esempio didattico con due scopi principali:

1. mostrare come sia possibile realizzare una microarchitettura che implementi un semplice set di istruzioni, usando elementi logici di base;

2. mostrare come la realizzazione di un sistema, apparentemente complesso si riduca in realtà alla progettazione di un'unità operativa e di unità di controllo.

Il set di istruzioni implementato dal Mic-1 è un sottoinsieme di quello della *Java Virtual Machine*, denominato *IJVM*, in quanto opera unicamente su interi.

La particolarità di tale processore è quella di non disporre di registri generali, basando la sua architettura sullo *stack*: infatti le varie istruzioni e logiche non hanno operandi esplicativi, ma sono prelevati secondo la struttura *last-in-first-out*.

L'implementazione di tale processore è detta in *logica microprogrammata*: ciascuna istruzione *IJVM* è implementata come una sequenza di microistruzioni, dette microprocedure; tali sequenze compongono il microprogramma, che è tipicamente memorizzato in una ROM interna al processore.

9.1.1 Unità operativa

L'unità operativa del processore è composta da ALU, i suoi ingressi e le sue uscite.

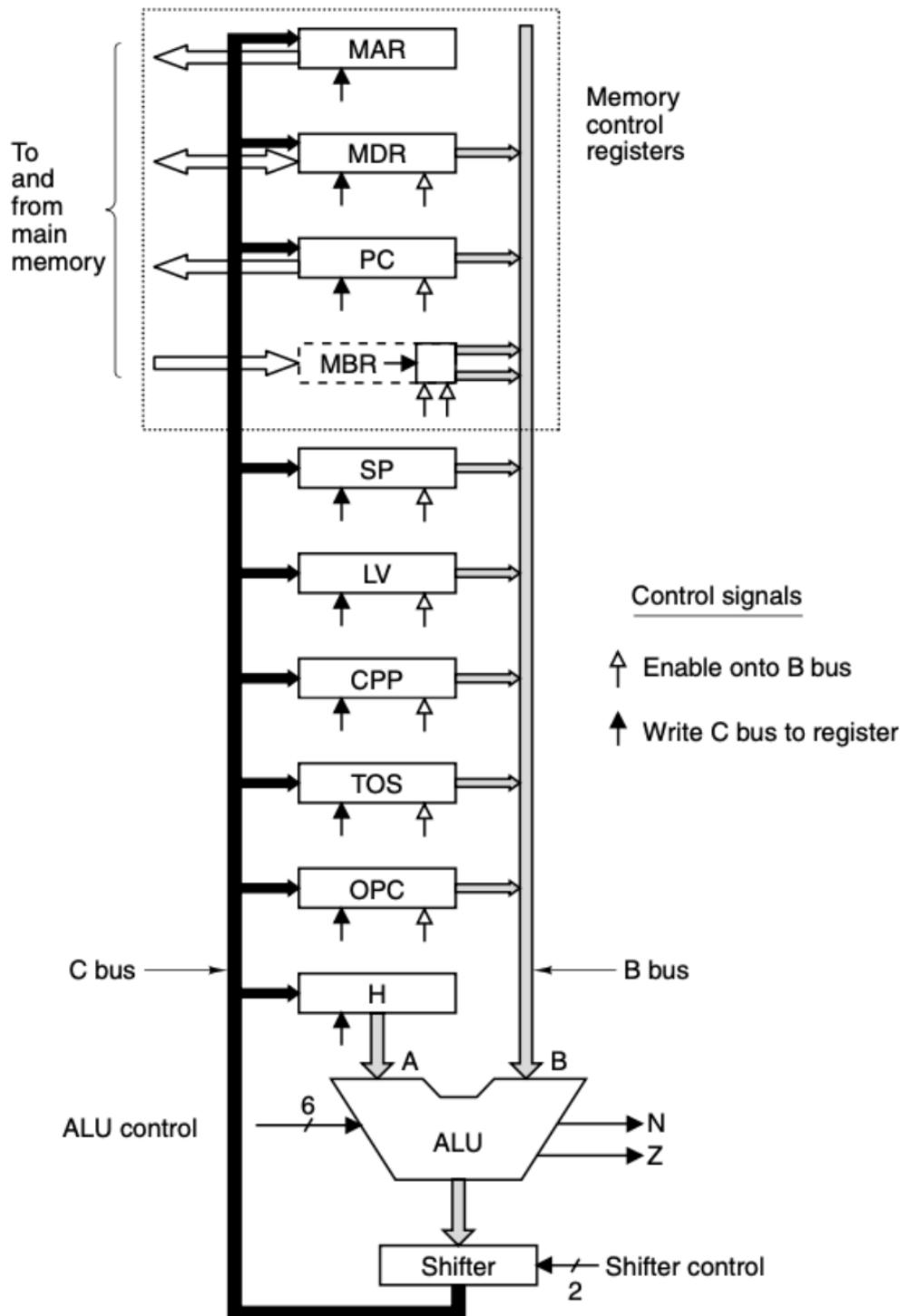


Figura 9.1: Unità operativa del Mic-1

Ogni registro ha dimensione di 32 bit e non è accessibile dal program-

matore, ma solo dal microprogramma.

Vi sono due bus, B e C, collegati rispettivamente al secondo ingresso e all'uscita dell'ALU; il primo ingresso dell'ALU è invece collegato esclusivamente al registro H (*holding*).

Alcuni registri sono cablati in modo da poter essere usati solo per uno scopo specifico:

- registri dell'interfaccia con la memoria
 - MAR: memory address register;
 - MDR: memory data register;
 - PC: program counter;
 - MBR: memory byte register;
- registro che mantiene il primo operando dell'ALU
 - H: holding.

9.1.2 Microistruzioni

Per controllare l'unità operativa del processore, sono necessari 29 segnali:

- 9 segnali per controllare la scrittura dei dati dal bus C ai registri;
- 9 segnali per controllare quale registro è collegato al bus B e va in ingresso all'ALU;

- 8 segnali per controllare l'ALU;
- 2 segnali per abilitare lettura/scrittura sull'interfaccia MAR/MDR;
- 1 segnale per abilitare il fetch sull'interfaccia PC/MBR

9.1.3 Unità di Controllo

L'unità di controllo del Mic-1 si comporta come un *sequencer*, producendo in ciascun ciclo:

1. lo stato dei segnali di controllo
2. l'indirizzo della prossima microistruzione da eseguire

Di seguito il diagramma completo del Mic-1:

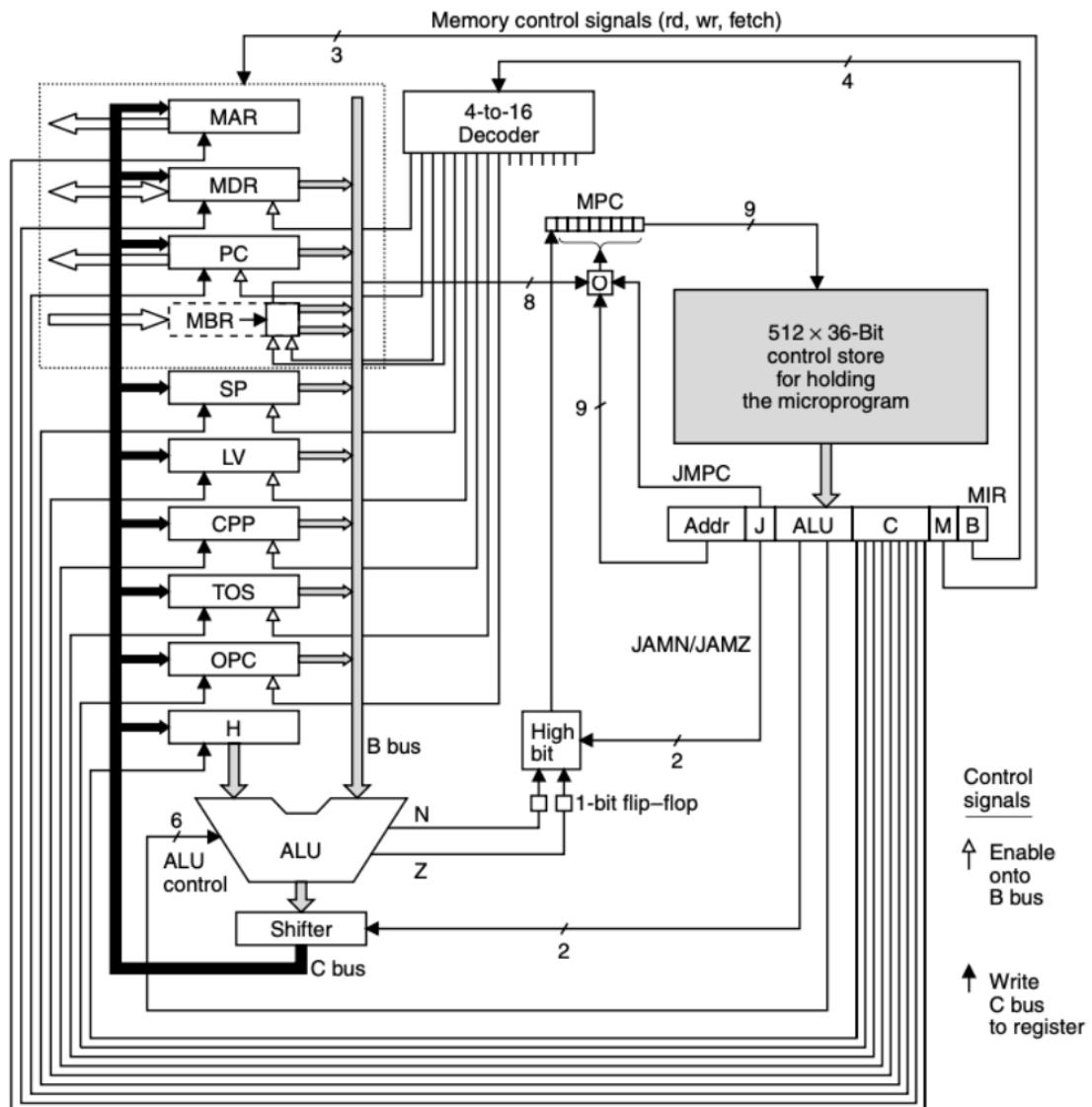


Figura 9.2: Diagramma completo del Mic-1

9.2 La microistruzione **ISUB**

La microistruzione **ISUB** altro non è che la sottrazione di due operandi.

Per implementare l'instruzione, viene utilizzato linguaggio MAL, *MicroAssembly Language*, il quale viene convertito dal *microassemblatore*.

L’istruzione è definita come segue

```
1     isub = 0x5C:
2         MAR = SP = SP - 1; rd
3         H = TOS
4         MDR = TOS = MDR - H; wr; goto main
```

Code 9.1: ISUB

L’indirizzo 0x5C indica l’indirizzo in memoria della prima istruzioni da eseguire. Le restanti sono scritte nei registri successivi.

In tale istruzione si ha come prima istruzione quella di decrementare l’ SP, ovvero lo *stack pointer*, poiché nella fase iniziale punta alla testa dello stack, che può essere richiamata tramite TOS, *Top of Stack*. Inoltre l’indirizzo viene salvato nel MAR, *Memory Address Register* e viene chiamata la funzione di read, rd.

Nella seconda operazione si preleva la testa dello stack tramite TOS e lo si memorizza nel registro H.

Recuperati gli operandi, si effettua l’operazione tra il dato MDR, *Memory Data Register*, e H; si memorizza il risultato con l’istruzione wr nel MDR.

Per caricare l’istruzione nella memoria RAM del processore, si modifica il file `program.ajvm` e lo si compila:

```
1      .main
2      .var
3      a
4      .endvar
5      BIPUSH 0xE
6      BIPUSH 0xA
7      ISUB
8      ISTORE a
9      HALT
10     .endmethod
```

Code 9.2: ISUB - program.ajvm

dove tramite BIPUSH si caricano gli operandi nello stack, ISUB effettua l'operazione e ISTORE memorizza il risultato nella variabile.

9.2.1 Simulazione

Per eseguire la compilazione e quindi modificare il control_store e la ram, si eseguono i seguenti comandi:

```
antonio@antonio-Standard-PC-Q35-ICH9-2009:~/esercitazione_mic/amic-1$ cmake --build build --target create_control_store
Built target create_control_store
antonio@antonio-Standard-PC-Q35-ICH9-2009:~/esercitazione_mic/amic-1$ cmake --build build --target create_ram
Built target assemble_program
Built target create_ram
antonio@antonio-Standard-PC-Q35-ICH9-2009:~/esercitazione_mic/amic-1$
```

Figura 9.3: Compilazione Control Store e RAM

Un modo per verificare che la compilazione è andata a buon fine, si può controllare come è modificata la RAM:

```
64  -- RAM content
65  signal mem : dp_ar_ram_type := (
66  --BEGIN_WORDS_ENTRY
67 128 => "00000000000000000000000000000000",
68 0 => "0000001000000000000000100000000",
69 1 => "00001010001000000011100010000",
70 2 => "101001100000010011011001011100",
71 3 => "00000000000000000000000000000000",
72 others => (others => '0')
73 --END_WORDS_ENTRY
74 );
75
```

Figura 9.4: Istruzione caricata nella RAM

Si nota infatti che in corrispondenza della istruzione 1 si ha una stringa di 32 bit che altro non è la concatenazione del primo dato, l'indirizzo dell'istruzione BIPUSH, il secondo dato e di nuovo l'indirizzo dell'istruzione BIPUSH. Nell'istruzione 2 si ha l'indirizzo dell'operazione ISUB e quella di ISTORE.

Si può a questo punto effettuare il testbench (ovviamente è stato modificato opportunamente il file `processor_tb.vhd`):

```

antonio@antonio-Standard-PC-Q35-ICH9-2009:~/esercitazione_mic/amic-0$ cmake --build build --target check
Built target index
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/amic-0/src/main/vhdl/common_defs.vhd
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/amic-0/src/main/vhdl/control_store.vhd
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/amic-0/src/main/vhdl/control_unit.vhd
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/amic-0/src/main/vhdl/alu.vhd
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/amic-0/src/main/vhdl/datapath.vhd
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/amic-0/src/main/vhdl/processor.vhd
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/amic-0/src/main/vhdl/dp_ar_ran.vhd
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/amic-0/src/test/vhdl/processor_tb.vhd
elaborate processor_tb
Built target src.test.vhdl.processor_tb
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/amic-0/src/test/vhdl/alu_tb.vhd
elaborate alu_tb
Built target src.test.vhdl.alu_tb
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/amic-0/src/test/vhdl/control_unit_tb.vhd
elaborate control_unit_tb
Built target src.test.vhdl.control_unit_tb
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/amic-0/src/test/vhdl/datapath_tb.vhd
elaborate datapath_tb
Built target src.test.vhdl.datapath_tb
Test project /home/antonio/esercitazione_mic/amic-0/build
Start 1: src.test.vhdl.alu_tb ..... Passed 0.01 sec
1/4 Test #1: src.test.vhdl.alu_tb ..... Passed 0.01 sec
Start 2: src.test.vhdl.control_unit_tb ..... Passed 0.01 sec
2/4 Test #2: src.test.vhdl.control_unit_tb ..... Passed 0.01 sec
Start 3: src.test.vhdl.datapath_tb ..... Passed 0.02 sec
3/4 Test #3: src.test.vhdl.datapath_tb ..... Passed 0.02 sec
Start 4: src.test.vhdl.processor_tb ..... Passed 0.05 sec
4/4 Test #4: src.test.vhdl.processor_tb ..... Passed 0.05 sec
100% tests passed, 0 tests failed out of 4
Total Test time (real) = 0.10 sec
Built target check

```

Figura 9.5: Testbench ISUB

e questa è la seguente onda risultante

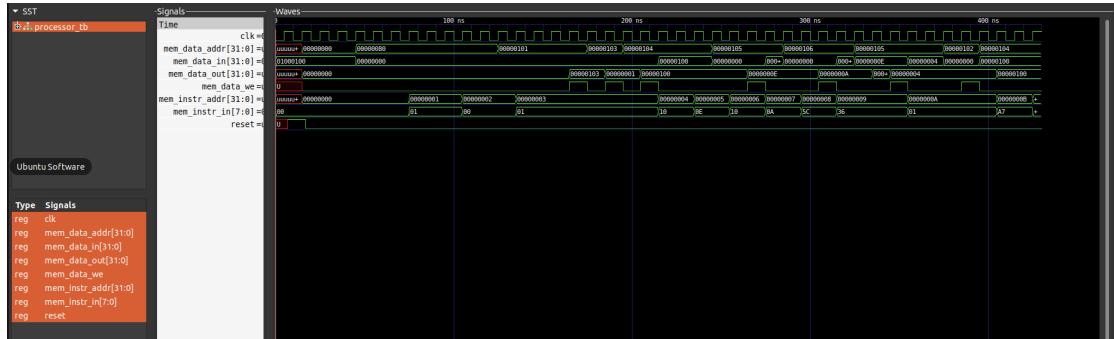


Figura 9.6: Onda ISUB

9.3 La microistruzione IOR

La microistruzione IOR effettua l'operazione di *OR* tra i due operandi caricati in memoria.

È definita come segue:

```
1     ior = 0xB6:  
2         MAR = SP = SP - 1; rd  
3         H = TOS  
4         MDR = TOS = MDR OR H; wr; goto main
```

Code 9.3: IOR

L'address assegnato all'istruzione è 0xB6; viene poi poi memorizzato l'indirizzo del penultimo elemento dello stack, con la funzione `rd`, analogamente al precedente esempio.

Nel registro `H` viene memorizzato `TOS`.

A questo punto è possibile effettuare l'operazione di `OR` tra `MDR` e `H` e con il comando `wr` viene riscritto il registro `MDR` con il risultato.

Si modifica il file `program.ajvm` e lo si compila:

```
1     .main  
2     .var  
3     a  
4     .endvar  
5     BIPUSH 0x0  
6     BIPUSH 0x1  
7     IOR  
8     ISTORE a  
9     HALT  
10    .endmethod
```

Code 9.4: IOR - program.ajvm

dove tramite BIPUSH si caricano gli operandi nello stack, IOR effettua l'operazione e ISTORE memorizza lo stato nella variabile.

9.3.1 Simulazione

Per eseguire la compilazione si eseguono gli stessi comandi in figura 9.3.

Controllando la RAM si puo vedere

```
64  -- RAM content
65  signal mem : dp_ar_ram_type := (
66  --BEGIN_WORDS_ENTRY
67  128 => "0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000",
68  0 => "0000000100000000000000001000000000000000000000000000000000000000",
69  1 => "0000000100010000000000000000000010000000000000000000000000000000",
70  2 => "10100111000000010011011010110110",
71  3 => "0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000",
72  others => (others => '0')    I
73  --END_WORDS_ENTRY
74  );
75
```

Figura 9.7: Istruzione caricata nella RAM

dove la differenza rispetto alla precedente immagine della RAM sta nella riga 1, per quanto riguarda gli operandi (ora sono sono 0 e 1), e nella riga 2 per quanto riguarda l'indirizzo della funzione che in questo caso è la IOR.

Si può dunque compilare modificando opportunamente il testbench:

```

antonantonio@Standard-PC-Q35-ICH9-2009: /esercitazione_mic/amc-0$ cmake --build build --target check
Built target index
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/amc-0/src/math/vhdl/common_defs.vhd
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/amc-0/src/math/vhdl/control_store.vhd
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/amc-0/src/math/vhdl/ctrl_unit.vhd
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/amc-0/src/math/vhdl/alu.vhd
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/amc-0/src/math/vhdl/datapath.vhd
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/amc-0/src/math/vhdl/processor.vhd
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/amc-0/src/math/vhdl/processor_tb.vhd
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/amc-0/src/test/vhdl/processor_tb.vhd
elaborate processor_tb
Build target src.test.vhdl.processor_tb
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/amc-0/src/test/vhdl/alu_tb.vhd
elaborate alu_tb
Built target src.test.vhdl.alu_tb
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/amc-0/src/test/vhdl/control_unit_tb.vhd
elaborate control_unit_tb
Built target src.test.vhdl.control_unit_tb
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/amc-0/src/test/vhdl/datapath_tb.vhd
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/amc-0/src/test/vhdl/processor_tb.vhd
build target src.test.vhdl.datapath_tb
Test project /home/antonio/esercitazione_mic/amc-0/build
  Start 1: src.test.vhdl.alu_tb
    1/4 Test #1: src.test.vhdl.alu_tb ..... Passed  0.01 sec
    Start 2: src.test.vhdl.control_unit_tb
    2/4 Test #2: src.test.vhdl.control_unit_tb ..... Passed  0.02 sec
    Start 3: src.test.vhdl.datapath_tb
    3/4 Test #3: src.test.vhdl.datapath_tb ..... Passed  0.02 sec
    Start 4: src.test.vhdl.processor_tb
    4/4 Test #4: src.test.vhdl.processor_tb ..... Passed  0.04 sec

000 tests passed, 0 tests failed out of 4

Total Test time (real) =  0.08 sec
Built target check
antonantonio@Standard-PC-Q35-ICH9-2009: /esercitazione_mic/amc-0$
```

Figura 9.8: Testbench OR

e questa è la seguente onda risultante

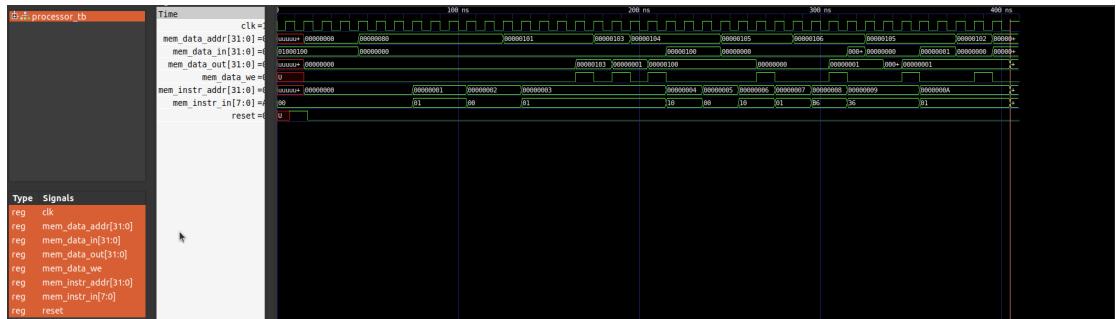


Figura 9.9: Onda IOR

9.4 Implementazione della microistruzione

IXOR

Si vuole ora implementare la funzione `IXOR`.

Per far ciò andremo a modificare una funzione già presente nel file `a.jvm.map`, in modo da non andar ad intaccare il codice della build dell'intero sistema.

L'unica accortezza da fare è quella di scegliere una funzione che abbia lo stesso numero di istruzioni di quella che si vuole implementare, op-

pure se avesse un numero inferiore di istruzioni, di controllare se dopo l'ultima istruzione c'è abbastanza spazio libero (lo si può controllare nel file `control_store.vhd`).

In questo caso si sceglie di andar a modificare la funzione `swap` (il nome della funzione non va assolutamente cambiato).

Per semplificare l'implementazione si va a lavorare sull'equazione logica della XOR.

Infatti si può scrivere come segue:

$$\begin{aligned} A \oplus B &= (A \cdot \overline{B}) + (\overline{A} \cdot B) = \\ &= (A + B) + (\overline{A} \cdot \overline{B}) = \\ &= (A + B) \cdot \overline{(A \cdot B)} = \end{aligned}$$

La funzione risulta semplificata e l'implementazione sarà la seguente:

```
1     swap = 0x5F:  
2         MAR = SP = SP - 1; rd  
3         H = TOS  
4         OPC = MDR OR H  
5         H = H AND MDR  
6         H = NOT H  
7         MDR = TOS = OPC AND H; wr; goto main
```

Code 9.5: IXOR

L'indirizzo in cui è salvata la prima istruzione è 0x5F.

Prima di tutto si effettua una `rd` del penultimo valore con decrementando SP e ponendolo in MAR; si salva poi in OPC (Registro temporaneo) il risultato della OR tra MDR e H.

Fatto ciò, si memorizza in H, il risultato della AND tra H e MDR, il quale viene negato nell’istruzione successiva.

Nell’ultima istruzione si effettua l’operazione finale di AND tra OPC e H e lo si memorizza in MDR che punta alla testa dello stack. Si modifica il file `program.ajvm` e lo si compila:

```
1     .main
2     .var
3     a
4     .endvar
5     BIPUSH 0x0
6     BIPUSH 0x1
7     SWAP
8     ISTORE a
9     HALT
10    .endmethod
```

Code 9.6: IOR - program.ajvm

dove tramite `BIPUSH` si caricano gli operandi nello stack, `SWAP` effettua l’operazione di `XOR` e `ISTORE` memorizza lo stato nella variabile.

Per eseguire la compilazione si eseguono nuovamente gli stessi comandi in figura 9.3.

La RAM è la seguente:

```

64    -- RAM content
65    signal mem : dp_ar_ram_type := (
66      --BEGIN_WORDS_ENTRY
67      128 => "000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000",
68      0 => "000000010000000000000000000000001000000000",
69      1 => "0000000100010000000000000000000010000",
70      2 => "101001110000000010011011001011111",
71      3 => "000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000",
72      others => (others => '0')
73      --END_WORDS_ENTRY
74    );
75
76 begin  -- architecture behavioral
77

```

Figura 9.10: Istruzione caricata nella RAM

dove si può vedere che nella riga 1 vengono caricati gli operandi con la BIPUSH e nella riga 2 viene caricato l'indirizzo della funzione che in questo caso è la SWAP (che effettua la XOR).

Si può dunque compilare modificando opportunamente il testbench:

```

make: Entering directory '/home/antonio/_local/share/flash/files/esercitazione_mic/_amic-0/build'
  CMakeFiles/CMakeCache.txt
-- The CMakeCache.txt file in directory /home/antonio/_local/share/flash/files/esercitazione_mic/_amic-0/build/CMakeCache.txt is different than the directory /home/antonio/esercitazione_mic/_amic-0/build where CMakeCache.txt was created. This may result in binaries being created in the wrong place. If you are not sure, reedit the CMakeCache.txt

-- Analyzing sources
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/_amic-0/src/main/vhd/common.defs.vhd
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/_amic-0/src/main/vhd/control_store.vhd
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/_amic-0/src/main/vhd/alu.vhd
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/_amic-0/src/main/vhd/alu_hd.vhd
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/_amic-0/src/main/vhd/datapath.vhd
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/_amic-0/src/main/vhd/processor.vhd
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/_amic-0/src/test/vhd/alu_tb.vhd
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/_amic-0/src/test/vhd/processor_tb.vhd
elaborate processor_tb
Multi target src: test.vhd:processor_tb
Multi target src: test.vhd:alu_tb
elaborate alu_tb
Multi target test.vhd:alu_tb
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/_amic-0/src/test/vhd/control_unit_tb.vhd
elaborate control_unit_tb
Multi target test.vhd:control_unit_tb
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/_amic-0/src/test/vhd/datapath_tb.vhd
analyze /home/antonio/esercitazione_mic/_amic-0/src/test/vhd/processor_tb.vhd
Multi target src: test.vhd:datapath_tb
test project /home/antonio/_local/share/flash/files/esercitazione_mic/_amic-0/build
#4 Test #1: src: test.vhd:alu ..... Passed 0.00 sec
#4 Test #2: src: test.vhd:control_unit_tb ..... Passed 0.01 Sec
Start #3: src: test.vhd:datapath_tb ..... Passed 0.01 sec
Start #4: src: test.vhd:processor_tb ..... Passed 0.01 sec
#4 Test #4: src: test.vhd:processor_tb ..... Passed 0.00 sec

0000 tests passed, 0 tests failed out of 4

Total Test time (real) = 0.11 sec
Multi target check

```

Figura 9.11: Testbench XOR

e questa è la seguente onda risultante

CAPITOLO 9. ESERCIZIO 9

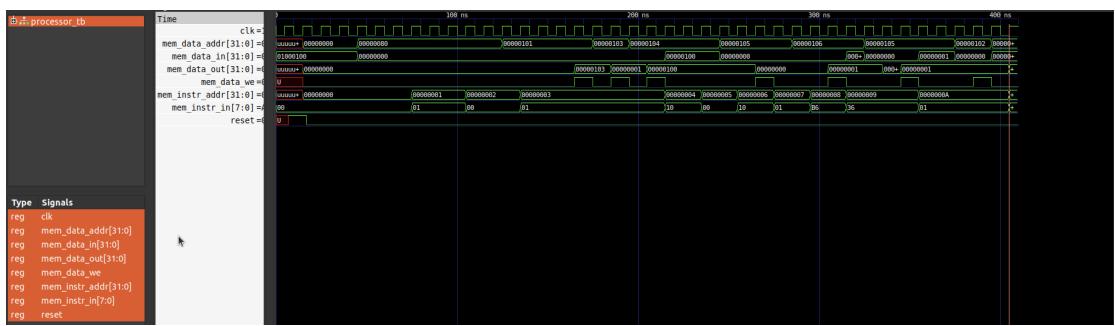


Figura 9.12: Onda XOR

Capitolo 10

Esercizio 10

Partendo dall'implementazione fornita dalla Digilent di un dispositivo UART-RS232 (componente RS232RefComp.vhd), si vuole progettare, implementare e simulare in VHDL un sistema composto da 2 unità A e B che condividono lo stesso segnale di clock e comunicano tra loro mediante interfaccia seriale.

Il sistema A contiene una ROM di 8 locazioni da 1 byte ciascuno, un contatore `CONT_A` per scandire le locazioni della ROM e una `UART_A`, mentre il sistema B contiene una memoria `MEM` di 8 locazioni da 1 byte ciascuno, un contatore `CONT_B` per scandire le locazioni della `MEM` e una `UART_B`. Quando un segnale `WR` viene asserito nell'unità A, viene prelevato un byte dalla ROM e inviato all'unità B, che dovrà riceverlo e salvarlo in `MEM`.

10.1 Progettazione

Per la progettazione di tale sistema, si utilizza un approccio strutturale.

10.1.1 UART-RS232

Il primo componente è la UART-RS232, fornita da Diligent, che permetterà la comunicazione tra le due entità.

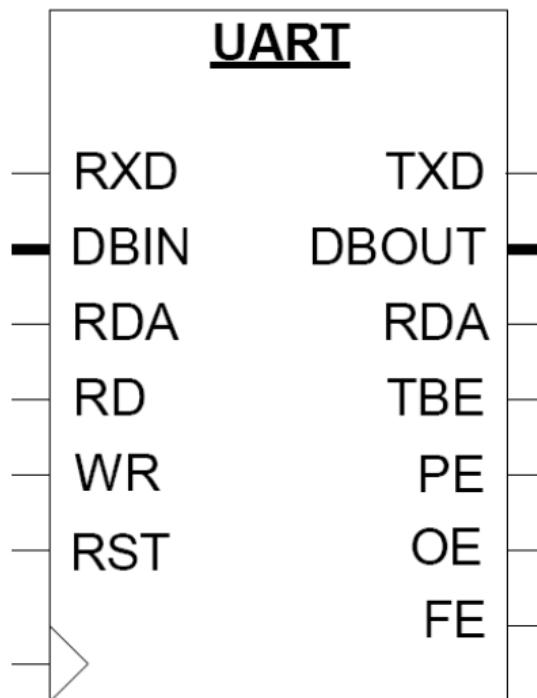


Figura 10.1: UART-RS232

Tale componente comprende sia l'unità destinata alla trasmissione che alla recezione. Può essere visto in questo modo:

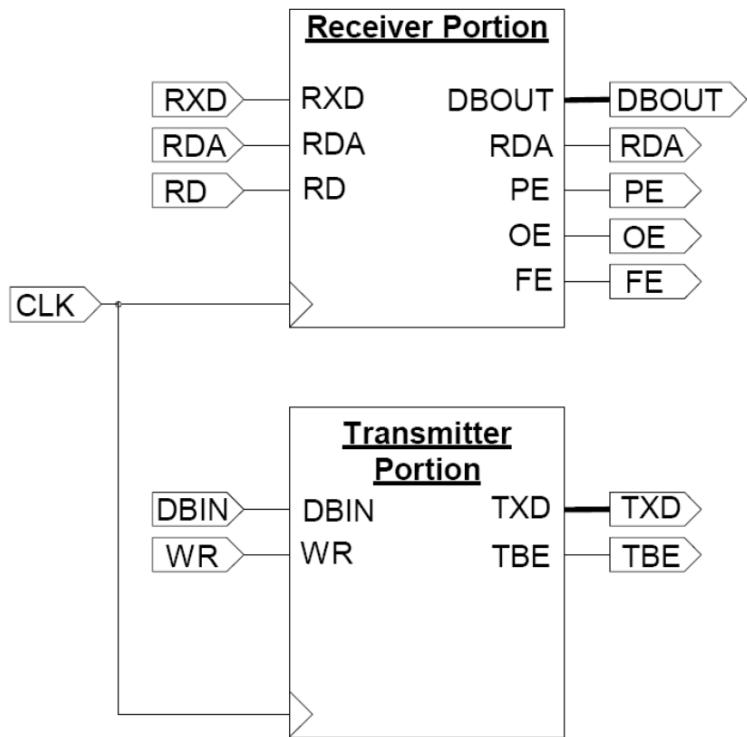


Figura 10.2: Componente di trasmissione e di recezione dell'UART-RS232

Circuito di recezione

Il circuito di recezione dell'UART accetta dati seriali in input e li converte in parallelo.

Questa porzione include un controller per i dati seriali, due conatori usati per la sincronizzazione, uno shift register e un controller per i bit di errore.

Lo shift register è utilizzato per i dati in ingresso dalla porta RXD; quando il ciclo di lettura è finito, lo shift register è pronto ad acquisire il byte di dati. Affinché i dati vengano trasferiti dalla porta RXD, entranti ad una certa frequenza, è necessario un controller per sincronizzazione nella fase di acquisizione dei dati.

La macchina quindi è descritta con il seguente automa a stati finiti:

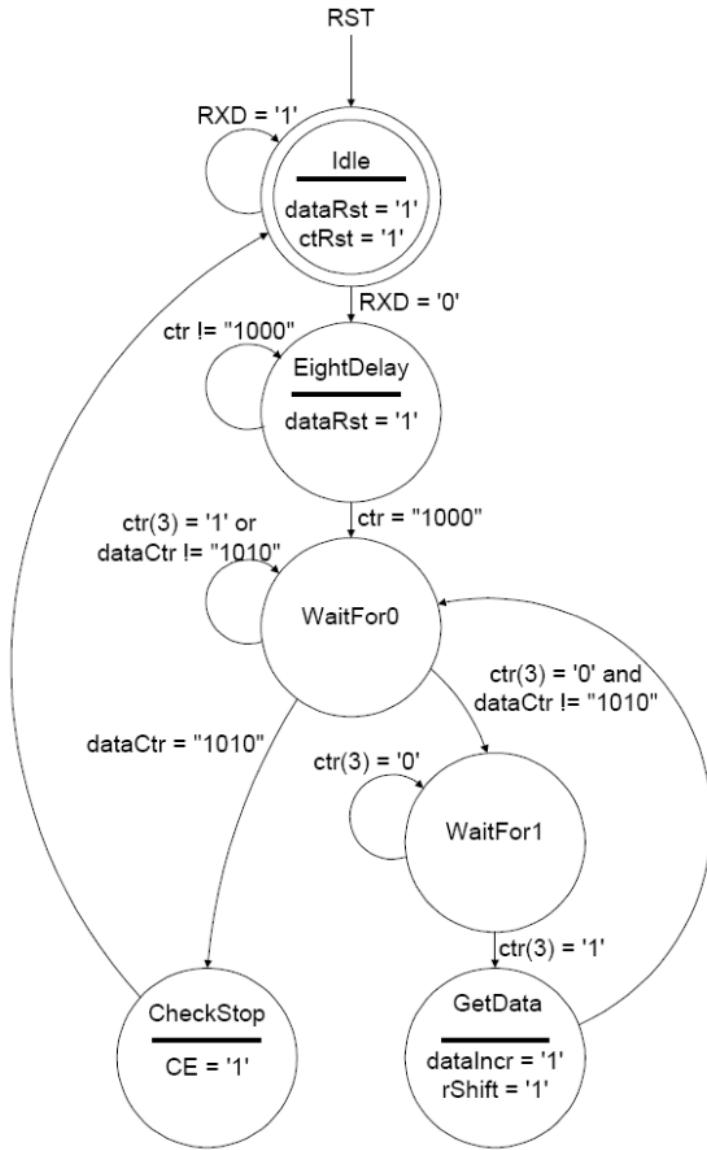


Figura 10.3: Automa a stati finiti della componente ricevitore

Quando è in *idle*, RXD è tenuto altro, quindi si rimane nello stato *idle* finchè la porta RXD diventi bassa. Una volta diventato basso, si entra nello stato *EightDelay*: tale stato è usato per assicurarsi che la porta RXD è letta al centro di ogni bit trasmesso.

Il contatore, *ctr*, incrementa la frequenza di campionamento di 16 vol-

te, e una volta arrivato ad 8, vi è un cambio di stato.

Si raggiunge lo stato *WaitFor0* seguito da *WaitFor1*, e si basano sull'ultimo bit del valore *ctr*.

Questi stati precedono lo stato *GetData*, che fa lo shift del registro con in ingresso il bit proveniente da RXD. Inoltre viene abilitato il contatore che tiene traccia del numero dei bit trasmessi.

I due stati di wait permettono che la macchina sia rallentata abbastanza in modo da leggere correttamente il bit in ingresso.

Una volta che il contatore dei dati è uguale a 10 (8 bit di dati, 1 bit di parità e un bit di stop), si entra nello stato *CheckStop*, che abilita il controller per il calcolo degli errori.

Dopo tale stato si ritorna in *idle*.

Il ricevitore è quindi strutturato come segue

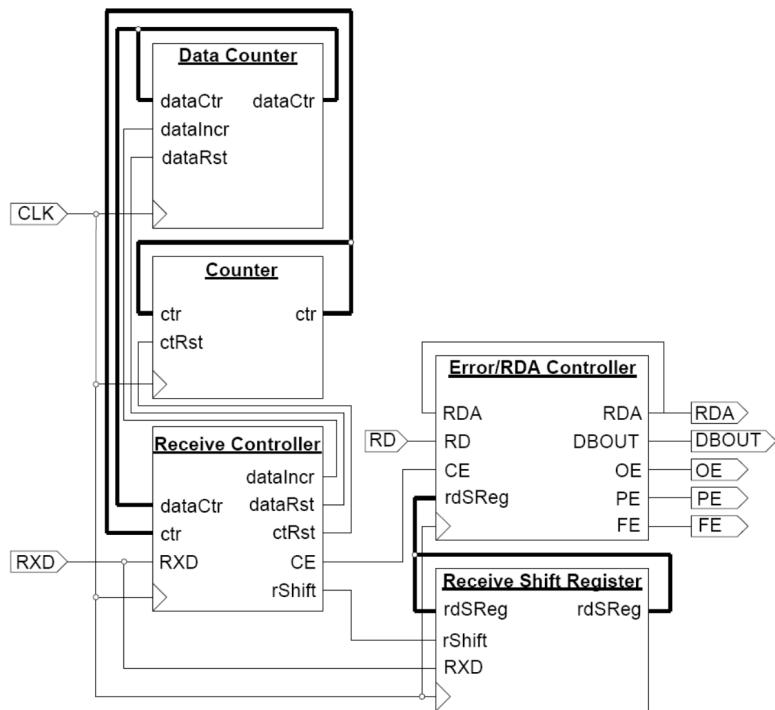


Figura 10.4: Struttura ricevitore

Circuito di trasmissione

Il circuito di trasmissione dell'UART accetta un byte di dati in ingresso nella porta DBIN, e trasmette i bit in serie tramite la porta TXD. Per effettuare la trasmissione del byte di dati, il trasmettitore contiene un controller per il trasferimento, due contatori per la sincronizzazione e uno shift register per la trasmissione.

Il controller utilizza i due contatori di sincronizzazione per controllare la frequenza in cui i bit devono essere trasmessi sulla porta TXD: un per la ritardare la trasmissione tra i vari bit e un per il conteggio dei bit trasmessi.

L'automa a stati finiti è il seguente:

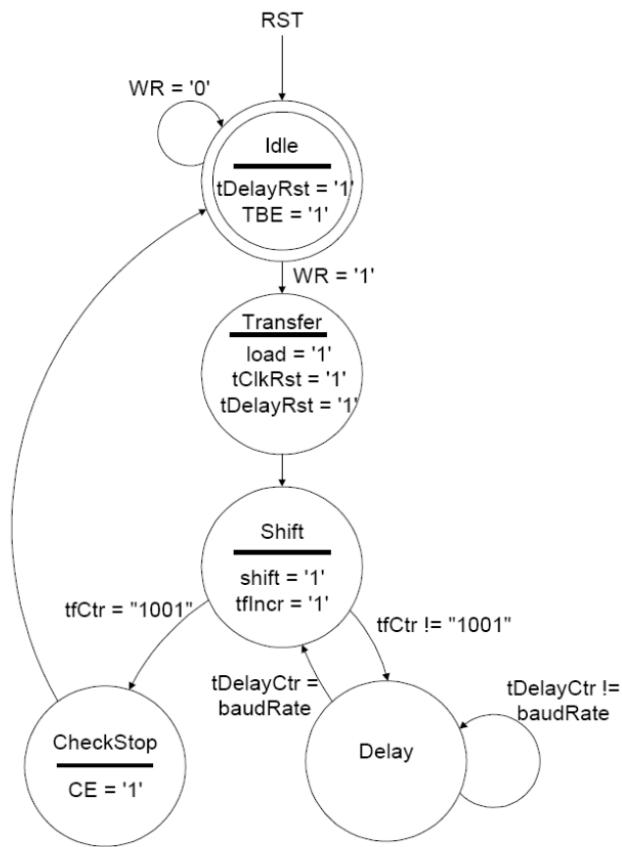


Figura 10.5: Automa a stati finiti trasmettitore

Si rimane nello stato *idle* finché WR non è alto. Quando ciò accade, l'UART scrive qualsiasi dato sia presente nella porta DBIN e il prossimo stato è il *Transfer* che prepara lo shift register a raccogliere i dati da trasmettere. Quando *load* è alto, lo shift register memorizza il bit di start, byte in DBIN, il bit di parità e il bit di stop. I due segnali di reset, *tClkRst* e *tDelayRst*, sono anch'essi alti per il reset dei contatori di sincronizzazione. Viene caricato quindi il nuovo stato, *Shift*.

Lo stato di *Shift*, porta il segnale di shift alto ordinato, facendo uno shift a destra nel omonimo registro. Il segnale *tfIncr* è anch'esso alto

affiché s'incrementi il contatore dei dati. Se il suo valore non è uguale ad nove, non tutti gli shift del registro sono stati ancora effetturati, così si passa nello stato di *Delay*. Se tutti gli shift sono stati effettuati, si passa allo stato di *WaitWrite*.

Lo stato di *Delay* è necessario affinchè i dati vengano trasmessi con la giusta frequenza.

Una volta nello stato di *WaitWrite*, la trasmissione è completa. Questo stato è necessario per assicurarsi che la porta WR che è stata tenuta in alto per avviare il processo di trasferimento non sia stata cambiata. Senza questo stato se la porta WR venisse tenuta in alto per troppo tempo, potrebbe esserci una trasmissione spazzatura.

La struttura di tale componente è la seguente:

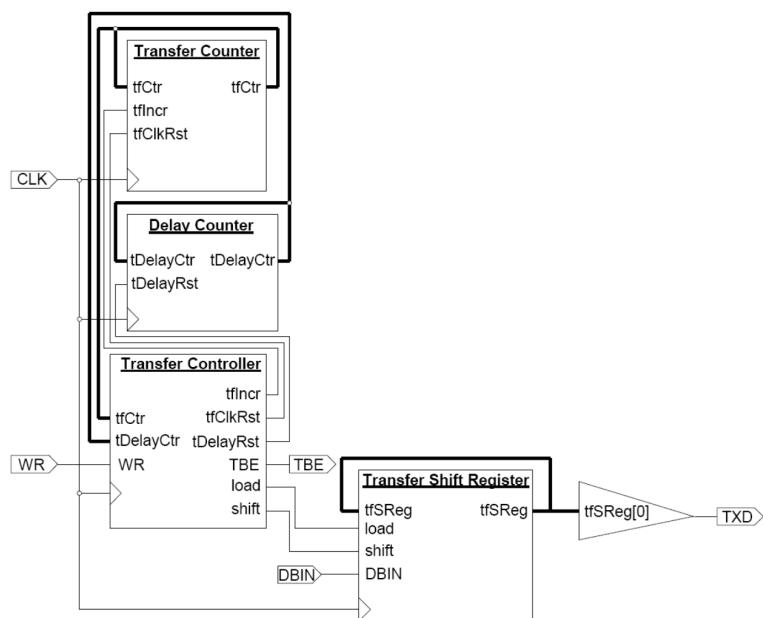


Figura 10.6: Struttura trasmettitore

10.1.2 Contatore mod-8

Il secondo componente, necessario per entrambe le unità, è il contatore modulo 8.

Si utilizza tale contatore per navigare la memoria ROM dell'unità A e per scegliere in quale indirizzo salvare il byte ricevuto nella memoria MEM.

La sua struttura è la seguente:

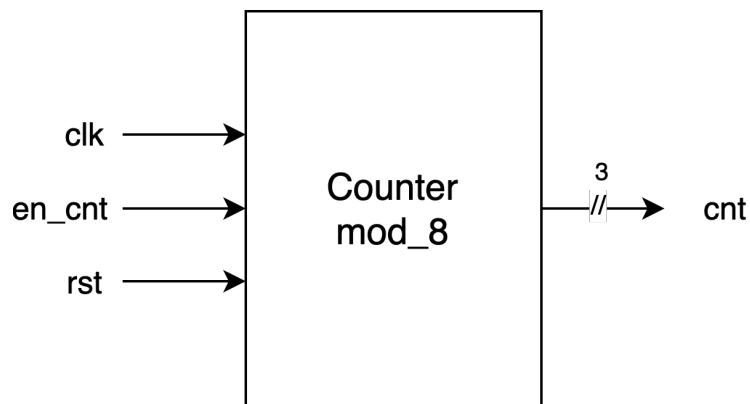


Figura 10.7: Contatore modulo 8

10.1.3 ROM

Il terzo componente è la ROM, memoria contenente i byte da trasferire dall'unità A all'unità B.

È formata da 8 locazioni di memoria ognuna contenente 8 bit ed è così strutturata:

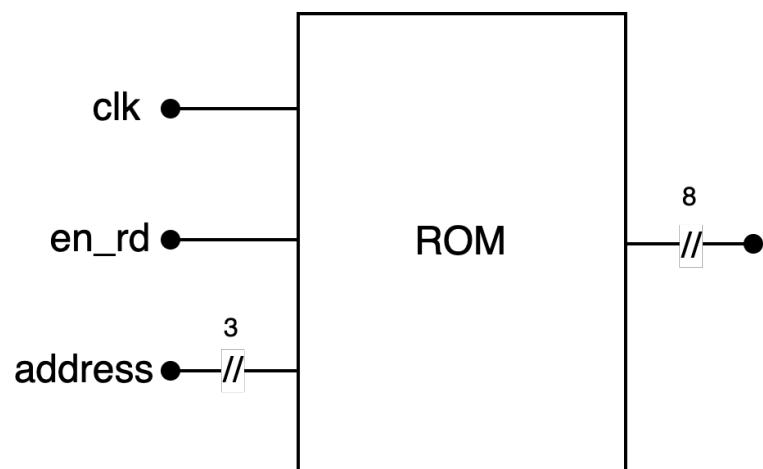


Figura 10.8: ROM unità A

10.1.4 MEM

Il quarto componente è la memoria MEM, sulla quale l'unità B scriverà i dati ricevuti.

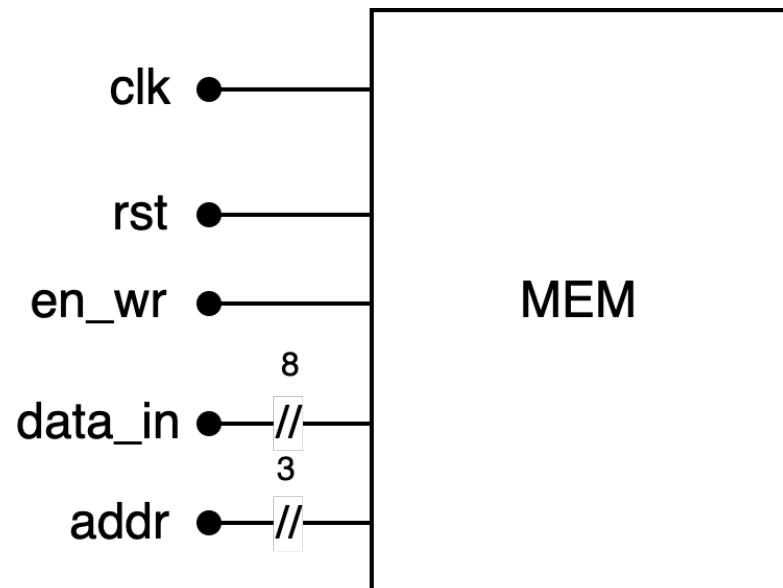


Figura 10.9: MEM unità B

Da notare che MEM non ha uscite.

10.1.5 Unità di controllo A

Si vuole implementare ora l'unità di controllo di A.

Per far ciò bisogna dunque progettare l'automa a stati finiti:

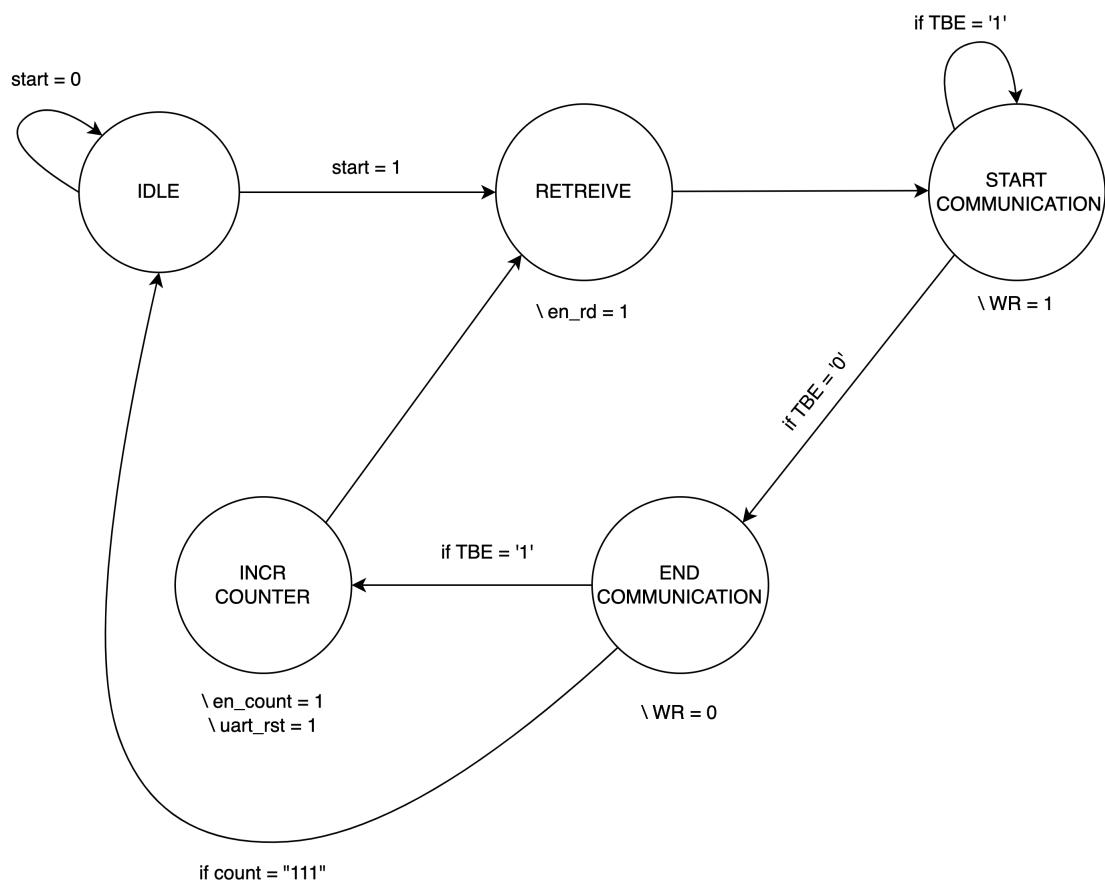


Figura 10.10: Unità di controllo A

Dapprima ci troviamo nello stato IDLE che altro non è lo stato iniziale.

Ogni qual volta vi è il `reset` alto si torna in questo stato (è utilizzato un reset sincrono). Qualora `start` diventasse alto, si passa allo stato RETREIVE.

Nello stato RETREIVE si abilita la lettura nella memoria ROM del byte da inviare, che viene posto in ingresso alla porta DBIN del tra-

smettitore. Al successivo fronte di salita del clock, l'abilitazione di lettura si abbassa e si arriva nello stato START_COMMUNICATION.

START_COMMUNICATION alza la porta WR del trasmettitore, e finchè TBE rimane alto, non si cambia stato. Una volta che tale segnale si abbassa, si passa allo stato di END_COMMUNICATION.

Nello stato di END COMMUNICATION si abbassa WR e si aspetta che TBE si abbassi. Una volta basso si hanno due strade: nel caso in cui il valore del contatore sia "111", allora si torna nello stato di IDLE; nel caso opposto si entra nello stato INCR_COUNTER.

Nello stato INCR_COUNTER si incrementa il contatore, in modo da puntare all'indirizzo successivo della ROM, e si restta il trasmettitore.

Al colpo di clok successivo si torna nello stato RETREIVE.

10.1.6 Unità di controllo B

Si passa ora all'implementazione dell'unità di controllo di B.

L'automa è il seguente:

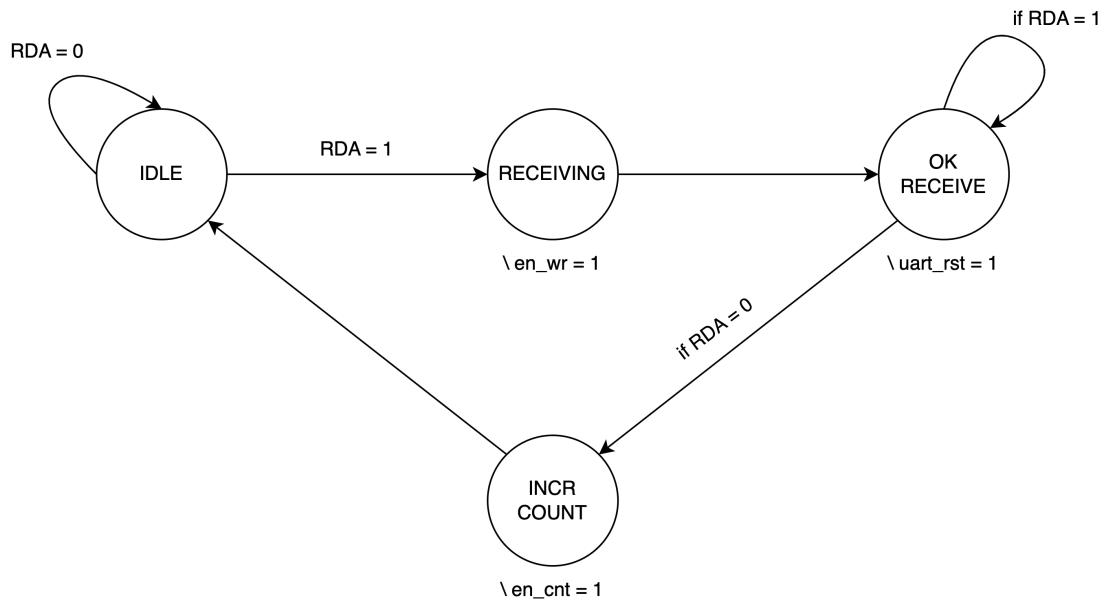


Figura 10.11: Unità di controllo B

10.1.7 Unità A

Si può ora progettare strutturalmente, e con alcuni dei componenti appena presentati, l'unità A.

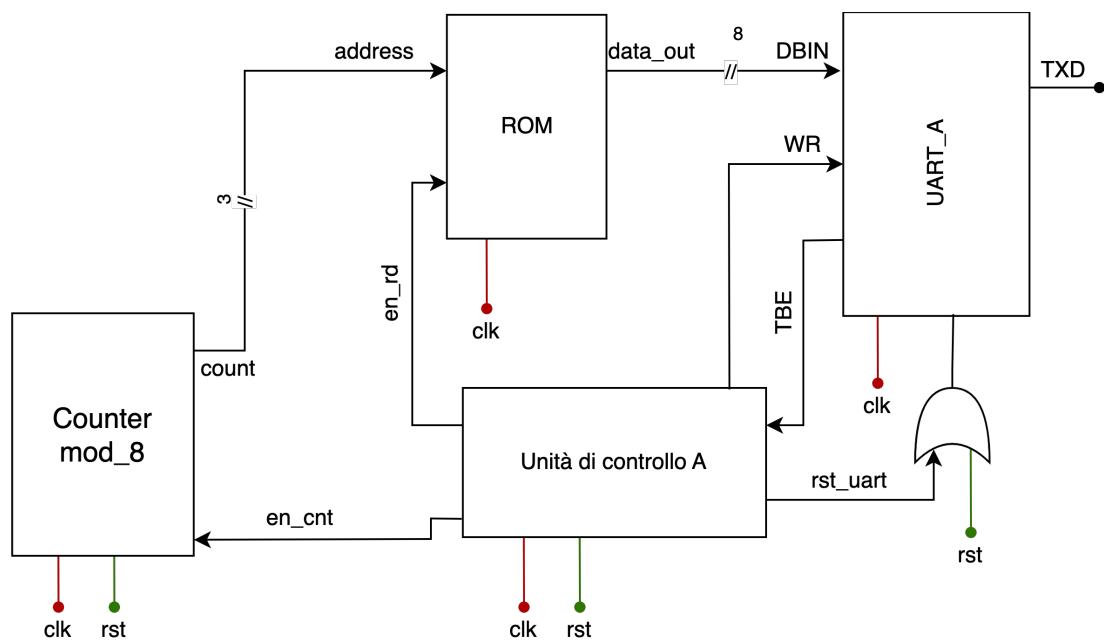


Figura 10.12: Unità A

10.1.8 Unità B

Analogamente si procede con l'unità B.

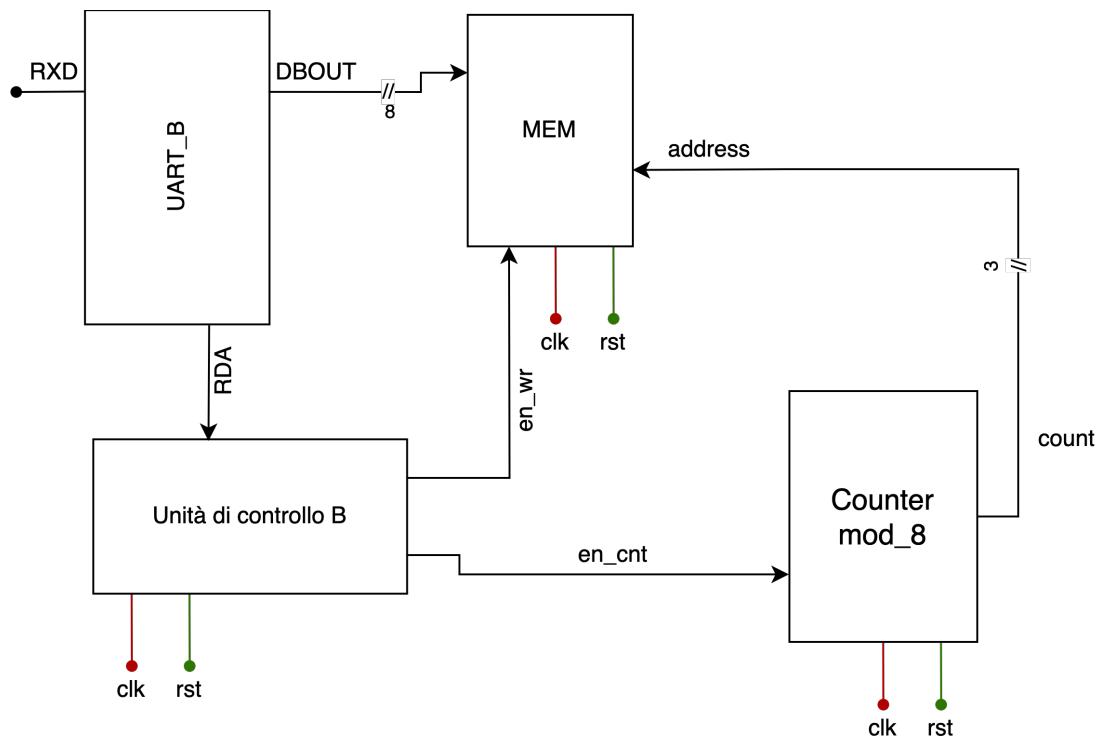


Figura 10.13: Unità B

Il sistema completo quindi prevede che il bus di trasmissione vada dalla porta TXD alla porta RXD.

10.2 Implementazione

Si può quindi procedere con l'implementazione in VHDL.

(Il codice del RS232RefComp.vhd è recuperabile nella cartella del docente o su la repository github di tale progetto.)

10.2.1 Contatore modulo 8

Implementazione comportamentale del contatore modulo 8.

```
1 library ieee;
2 use      ieee.std_logic_1164.all;
3 use      ieee.std_logic_arith.ALL;
4 use      IEEE.std_logic_unsigned.ALL;
5
6 entity counter_mod_8 is
7     port
8     (
9         clk      :  in  std_logic;
10        rst      :  in  std_logic;
11        en_cnt   :  in  std_logic;
12
13        cnt      :  out std_logic_vector(2 downto 0)
14    );
15 end counter_mod_8;
16
17 architecture behavioral of counter_mod_8 is
18     signal temp_cnt :  std_logic_vector(2 downto 0)      :=  "000";
19 begin
20     process(clk)
21     begin
22         if clk'event and clk = '1' then
23             if rst = '1' then
24                 temp_cnt <=  "000";
25             else
26                 if en_cnt = '1' then
27                     temp_cnt <=  temp_cnt + 1;
28                 end if;
29             end if;
30         end if;
31
32         cnt <=  temp_cnt;
33     end process;
34 end behavioral;
```

Code 10.1: counter_mod₈.vhdl

10.2.2 ROM

Implementazione comportamentale della ROM, con la dichiarazione dei valori contenuti.

```

1 library ieee;
2 use ieee.std_logic_1164.all;
3 use ieee.std_logic_unsigned;
4 use ieee.numeric_std.all;
5
6 entity ROM is
7     port
8     (
9         clk      :  in  std_logic;
10        en_rd   :  in  std_logic;
11
12        address :  in  std_logic_vector(2 downto 0);
13
14        d_out    :  out std_logic_vector(7 downto 0)
15    );
16 end entity;
17
18 architecture behavioral of ROM is
19 type Memory is array(7 downto 0) of std_logic_vector(7 downto 0);
20
21 constant ROM_M: Memory := (
22     "01010101",
23     "00000111",
24     "11111111",
25     "01000110",
26     "11110000",
27     "10001001",
28     "00000000",
29     "11001001"      -- location 000
30 );
31
32 begin
33     read_proc: process(clk, en_rd, address)
34     begin
35         if clk'event and clk='1' then
36             if en_rd = '1' then
37                 d_out    <=  ROM_M(to_integer(unsigned(address)));
38             end if;
39         end if;
40     end process;
41 end behavioral;

```

Code 10.2: ROM.vhdl

10.2.3 Mem

Implementazione comportamentale della memoria Mem.

```

1 library ieee;
2 use ieee.std_logic_1164.all;
3 use ieee.std_logic_unsigned;
4 use ieee.numeric_std.all;
5
6 entity Mem is
7     port
8     (
9         clk      : in std_logic;
10        rst      : in std_logic;
11        en_wr    : in std_logic;
12
13        addr     : in std_logic_vector(2 downto 0);
14        data_in  : in std_logic_vector(7 downto 0)
15
16    );
17 end entity;
18
19 architecture behavioral of Mem is
20     type mem_type is array(0 to 7) of std_logic_vector(7 downto 0);
21     signal MEM_STORE      : mem_type;
22 begin
23     process(clk, addr)
24     begin
25         if clk'event and clk='1' then
26             if rst = '1' then
27                 for i in 0 to 7 loop
28                     MEM_STORE(i) <= (others=>'0');
29                 end loop;
30             else
31                 if en_wr = '1' then
32                     MEM_STORE(to_integer(unsigned(addr))) <=
33                         data_in;
34                 end if;
35             end if;
36         end process;
37
38 end behavioral;
```

Code 10.3: Mem.vhdl

10.2.4 Unità di controllo di A

Implementazione dell'unità di controllo di A.

```
1 library ieee;
2 use ieee.std_logic_1164.all;
3
4 entity ControlUnit_A is
5     port
6     (
7         clk      : in std_logic;
8         start    : in std_logic;
9         rst      : in std_logic;
10
11        TBE      : in std_logic;
12        count   : in std_logic_vector(2 downto 0);
13
14        WR       : out std_logic;
15        uart_rst: out std_logic;
16        en_rd   : out std_logic;
17        en_cnt  : out std_logic
18
19    );
20 end ControlUnit_A;
21
22 architecture behavioral of ControlUnit_A is
23     type state_type is (IDLE, RETREIVE, START_COMMUNICATION,
24     ← END_COMMUNICATION, INCR_COUNT);
25     signal current_state  : state_type := IDLE;
26     signal next_state     : state_type := IDLE;
27
28 begin
29     clk_proc: process(clk)
30     begin
31         if clk'event and clk='1' then
32             if rst = '1' then
33                 current_state  <= IDLE;
34             else
35                 current_state  <= next_state;
36             end if;
37         end if;
38     end process;
39
40     process(current_state)
41     begin
42         case current_state is
43             when IDLE =>
44                 if TBE = '1' then
45                     next_state  := START_COMMUNICATION;
46                 else
47                     next_state  := IDLE;
48                 end if;
49             when START_COMMUNICATION =>
50                 if TBE = '1' then
51                     next_state  := INCR_COUNT;
52                 else
53                     next_state  := IDLE;
54                 end if;
55             when INCR_COUNT =>
56                 if TBE = '1' then
57                     next_state  := END_COMMUNICATION;
58                 else
59                     next_state  := IDLE;
60                 end if;
61             when END_COMMUNICATION =>
62                 if TBE = '1' then
63                     next_state  := RETREIVE;
64                 else
65                     next_state  := IDLE;
66                 end if;
67             when RETREIVE =>
68                 if TBE = '1' then
69                     next_state  := IDLE;
70                 else
71                     next_state  := IDLE;
72                 end if;
73         end case;
74     end process;
75
76     process(uart_rst)
77     begin
78         if uart_rst = '1' then
79             current_state  := IDLE;
80         end if;
81     end process;
82
83     process(en_rd)
84     begin
85         if en_rd = '1' then
86             current_state  := IDLE;
87         end if;
88     end process;
89
90     process(en_cnt)
91     begin
92         if en_cnt = '1' then
93             current_state  := IDLE;
94         end if;
95     end process;
96
97     process(WR)
98     begin
99         if WR = '1' then
100            current_state  := IDLE;
101        end if;
102    end process;
103
104    process(count)
105    begin
106        if count = "000" then
107            current_state  := IDLE;
108        end if;
109    end process;
110
111    process(uart_rst)
112    begin
113        if uart_rst = '1' then
114            current_state  := IDLE;
115        end if;
116    end process;
117
118    process(en_rd)
119    begin
120        if en_rd = '1' then
121            current_state  := IDLE;
122        end if;
123    end process;
124
125    process(en_cnt)
126    begin
127        if en_cnt = '1' then
128            current_state  := IDLE;
129        end if;
130    end process;
131
132    process(WR)
133    begin
134        if WR = '1' then
135            current_state  := IDLE;
136        end if;
137    end process;
138
139    process(count)
140    begin
141        if count = "000" then
142            current_state  := IDLE;
143        end if;
144    end process;
145
146    process(uart_rst)
147    begin
148        if uart_rst = '1' then
149            current_state  := IDLE;
150        end if;
151    end process;
152
153    process(en_rd)
154    begin
155        if en_rd = '1' then
156            current_state  := IDLE;
157        end if;
158    end process;
159
160    process(en_cnt)
161    begin
162        if en_cnt = '1' then
163            current_state  := IDLE;
164        end if;
165    end process;
166
167    process(WR)
168    begin
169        if WR = '1' then
170            current_state  := IDLE;
171        end if;
172    end process;
173
174    process(count)
175    begin
176        if count = "000" then
177            current_state  := IDLE;
178        end if;
179    end process;
180
181    process(uart_rst)
182    begin
183        if uart_rst = '1' then
184            current_state  := IDLE;
185        end if;
186    end process;
187
188    process(en_rd)
189    begin
190        if en_rd = '1' then
191            current_state  := IDLE;
192        end if;
193    end process;
194
195    process(en_cnt)
196    begin
197        if en_cnt = '1' then
198            current_state  := IDLE;
199        end if;
200    end process;
201
202    process(WR)
203    begin
204        if WR = '1' then
205            current_state  := IDLE;
206        end if;
207    end process;
208
209    process(count)
210    begin
211        if count = "000" then
212            current_state  := IDLE;
213        end if;
214    end process;
215
216    process(uart_rst)
217    begin
218        if uart_rst = '1' then
219            current_state  := IDLE;
220        end if;
221    end process;
222
223    process(en_rd)
224    begin
225        if en_rd = '1' then
226            current_state  := IDLE;
227        end if;
228    end process;
229
230    process(en_cnt)
231    begin
232        if en_cnt = '1' then
233            current_state  := IDLE;
234        end if;
235    end process;
236
237    process(WR)
238    begin
239        if WR = '1' then
240            current_state  := IDLE;
241        end if;
242    end process;
243
244    process(count)
245    begin
246        if count = "000" then
247            current_state  := IDLE;
248        end if;
249    end process;
250
251    process(uart_rst)
252    begin
253        if uart_rst = '1' then
254            current_state  := IDLE;
255        end if;
256    end process;
257
258    process(en_rd)
259    begin
260        if en_rd = '1' then
261            current_state  := IDLE;
262        end if;
263    end process;
264
265    process(en_cnt)
266    begin
267        if en_cnt = '1' then
268            current_state  := IDLE;
269        end if;
270    end process;
271
272    process(WR)
273    begin
274        if WR = '1' then
275            current_state  := IDLE;
276        end if;
277    end process;
278
279    process(count)
280    begin
281        if count = "000" then
282            current_state  := IDLE;
283        end if;
284    end process;
285
286    process(uart_rst)
287    begin
288        if uart_rst = '1' then
289            current_state  := IDLE;
290        end if;
291    end process;
292
293    process(en_rd)
294    begin
295        if en_rd = '1' then
296            current_state  := IDLE;
297        end if;
298    end process;
299
300    process(en_cnt)
301    begin
302        if en_cnt = '1' then
303            current_state  := IDLE;
304        end if;
305    end process;
306
307    process(WR)
308    begin
309        if WR = '1' then
310            current_state  := IDLE;
311        end if;
312    end process;
313
314    process(count)
315    begin
316        if count = "000" then
317            current_state  := IDLE;
318        end if;
319    end process;
320
321    process(uart_rst)
322    begin
323        if uart_rst = '1' then
324            current_state  := IDLE;
325        end if;
326    end process;
327
328    process(en_rd)
329    begin
330        if en_rd = '1' then
331            current_state  := IDLE;
332        end if;
333    end process;
334
335    process(en_cnt)
336    begin
337        if en_cnt = '1' then
338            current_state  := IDLE;
339        end if;
340    end process;
341
342    process(WR)
343    begin
344        if WR = '1' then
345            current_state  := IDLE;
346        end if;
347    end process;
348
349    process(count)
350    begin
351        if count = "000" then
352            current_state  := IDLE;
353        end if;
354    end process;
355
356    process(uart_rst)
357    begin
358        if uart_rst = '1' then
359            current_state  := IDLE;
360        end if;
361    end process;
362
363    process(en_rd)
364    begin
365        if en_rd = '1' then
366            current_state  := IDLE;
367        end if;
368    end process;
369
370    process(en_cnt)
371    begin
372        if en_cnt = '1' then
373            current_state  := IDLE;
374        end if;
375    end process;
376
377    process(WR)
378    begin
379        if WR = '1' then
380            current_state  := IDLE;
381        end if;
382    end process;
383
384    process(count)
385    begin
386        if count = "000" then
387            current_state  := IDLE;
388        end if;
389    end process;
390
391    process(uart_rst)
392    begin
393        if uart_rst = '1' then
394            current_state  := IDLE;
395        end if;
396    end process;
397
398    process(en_rd)
399    begin
400        if en_rd = '1' then
401            current_state  := IDLE;
402        end if;
403    end process;
404
405    process(en_cnt)
406    begin
407        if en_cnt = '1' then
408            current_state  := IDLE;
409        end if;
410    end process;
411
412    process(WR)
413    begin
414        if WR = '1' then
415            current_state  := IDLE;
416        end if;
417    end process;
418
419    process(count)
420    begin
421        if count = "000" then
422            current_state  := IDLE;
423        end if;
424    end process;
425
426    process(uart_rst)
427    begin
428        if uart_rst = '1' then
429            current_state  := IDLE;
430        end if;
431    end process;
432
433    process(en_rd)
434    begin
435        if en_rd = '1' then
436            current_state  := IDLE;
437        end if;
438    end process;
439
440    process(en_cnt)
441    begin
442        if en_cnt = '1' then
443            current_state  := IDLE;
444        end if;
445    end process;
446
447    process(WR)
448    begin
449        if WR = '1' then
450            current_state  := IDLE;
451        end if;
452    end process;
453
454    process(count)
455    begin
456        if count = "000" then
457            current_state  := IDLE;
458        end if;
459    end process;
460
461    process(uart_rst)
462    begin
463        if uart_rst = '1' then
464            current_state  := IDLE;
465        end if;
466    end process;
467
468    process(en_rd)
469    begin
470        if en_rd = '1' then
471            current_state  := IDLE;
472        end if;
473    end process;
474
475    process(en_cnt)
476    begin
477        if en_cnt = '1' then
478            current_state  := IDLE;
479        end if;
480    end process;
481
482    process(WR)
483    begin
484        if WR = '1' then
485            current_state  := IDLE;
486        end if;
487    end process;
488
489    process(count)
490    begin
491        if count = "000" then
492            current_state  := IDLE;
493        end if;
494    end process;
495
496    process(uart_rst)
497    begin
498        if uart_rst = '1' then
499            current_state  := IDLE;
500        end if;
501    end process;
502
503    process(en_rd)
504    begin
505        if en_rd = '1' then
506            current_state  := IDLE;
507        end if;
508    end process;
509
510    process(en_cnt)
511    begin
512        if en_cnt = '1' then
513            current_state  := IDLE;
514        end if;
515    end process;
516
517    process(WR)
518    begin
519        if WR = '1' then
520            current_state  := IDLE;
521        end if;
522    end process;
523
524    process(count)
525    begin
526        if count = "000" then
527            current_state  := IDLE;
528        end if;
529    end process;
530
531    process(uart_rst)
532    begin
533        if uart_rst = '1' then
534            current_state  := IDLE;
535        end if;
536    end process;
537
538    process(en_rd)
539    begin
540        if en_rd = '1' then
541            current_state  := IDLE;
542        end if;
543    end process;
544
545    process(en_cnt)
546    begin
547        if en_cnt = '1' then
548            current_state  := IDLE;
549        end if;
550    end process;
551
552    process(WR)
553    begin
554        if WR = '1' then
555            current_state  := IDLE;
556        end if;
557    end process;
558
559    process(count)
560    begin
561        if count = "000" then
562            current_state  := IDLE;
563        end if;
564    end process;
565
566    process(uart_rst)
567    begin
568        if uart_rst = '1' then
569            current_state  := IDLE;
570        end if;
571    end process;
572
573    process(en_rd)
574    begin
575        if en_rd = '1' then
576            current_state  := IDLE;
577        end if;
578    end process;
579
580    process(en_cnt)
581    begin
582        if en_cnt = '1' then
583            current_state  := IDLE;
584        end if;
585    end process;
586
587    process(WR)
588    begin
589        if WR = '1' then
590            current_state  := IDLE;
591        end if;
592    end process;
593
594    process(count)
595    begin
596        if count = "000" then
597            current_state  := IDLE;
598        end if;
599    end process;
600
601    process(uart_rst)
602    begin
603        if uart_rst = '1' then
604            current_state  := IDLE;
605        end if;
606    end process;
607
608    process(en_rd)
609    begin
610        if en_rd = '1' then
611            current_state  := IDLE;
612        end if;
613    end process;
614
615    process(en_cnt)
616    begin
617        if en_cnt = '1' then
618            current_state  := IDLE;
619        end if;
620    end process;
621
622    process(WR)
623    begin
624        if WR = '1' then
625            current_state  := IDLE;
626        end if;
627    end process;
628
629    process(count)
630    begin
631        if count = "000" then
632            current_state  := IDLE;
633        end if;
634    end process;
635
636    process(uart_rst)
637    begin
638        if uart_rst = '1' then
639            current_state  := IDLE;
640        end if;
641    end process;
642
643    process(en_rd)
644    begin
645        if en_rd = '1' then
646            current_state  := IDLE;
647        end if;
648    end process;
649
650    process(en_cnt)
651    begin
652        if en_cnt = '1' then
653            current_state  := IDLE;
654        end if;
655    end process;
656
657    process(WR)
658    begin
659        if WR = '1' then
660            current_state  := IDLE;
661        end if;
662    end process;
663
664    process(count)
665    begin
666        if count = "000" then
667            current_state  := IDLE;
668        end if;
669    end process;
670
671    process(uart_rst)
672    begin
673        if uart_rst = '1' then
674            current_state  := IDLE;
675        end if;
676    end process;
677
678    process(en_rd)
679    begin
680        if en_rd = '1' then
681            current_state  := IDLE;
682        end if;
683    end process;
684
685    process(en_cnt)
686    begin
687        if en_cnt = '1' then
688            current_state  := IDLE;
689        end if;
690    end process;
691
692    process(WR)
693    begin
694        if WR = '1' then
695            current_state  := IDLE;
696        end if;
697    end process;
698
699    process(count)
700    begin
701        if count = "000" then
702            current_state  := IDLE;
703        end if;
704    end process;
705
706    process(uart_rst)
707    begin
708        if uart_rst = '1' then
709            current_state  := IDLE;
710        end if;
711    end process;
712
713    process(en_rd)
714    begin
715        if en_rd = '1' then
716            current_state  := IDLE;
717        end if;
718    end process;
719
720    process(en_cnt)
721    begin
722        if en_cnt = '1' then
723            current_state  := IDLE;
724        end if;
725    end process;
726
727    process(WR)
728    begin
729        if WR = '1' then
730            current_state  := IDLE;
731        end if;
732    end process;
733
734    process(count)
735    begin
736        if count = "000" then
737            current_state  := IDLE;
738        end if;
739    end process;
740
741    process(uart_rst)
742    begin
743        if uart_rst = '1' then
744            current_state  := IDLE;
745        end if;
746    end process;
747
748    process(en_rd)
749    begin
750        if en_rd = '1' then
751            current_state  := IDLE;
752        end if;
753    end process;
754
755    process(en_cnt)
756    begin
757        if en_cnt = '1' then
758            current_state  := IDLE;
759        end if;
760    end process;
761
762    process(WR)
763    begin
764        if WR = '1' then
765            current_state  := IDLE;
766        end if;
767    end process;
768
769    process(count)
770    begin
771        if count = "000" then
772            current_state  := IDLE;
773        end if;
774    end process;
775
776    process(uart_rst)
777    begin
778        if uart_rst = '1' then
779            current_state  := IDLE;
780        end if;
781    end process;
782
783    process(en_rd)
784    begin
785        if en_rd = '1' then
786            current_state  := IDLE;
787        end if;
788    end process;
789
790    process(en_cnt)
791    begin
792        if en_cnt = '1' then
793            current_state  := IDLE;
794        end if;
795    end process;
796
797    process(WR)
798    begin
799        if WR = '1' then
800            current_state  := IDLE;
801        end if;
802    end process;
803
804    process(count)
805    begin
806        if count = "000" then
807            current_state  := IDLE;
808        end if;
809    end process;
810
811    process(uart_rst)
812    begin
813        if uart_rst = '1' then
814            current_state  := IDLE;
815        end if;
816    end process;
817
818    process(en_rd)
819    begin
820        if en_rd = '1' then
821            current_state  := IDLE;
822        end if;
823    end process;
824
825    process(en_cnt)
826    begin
827        if en_cnt = '1' then
828            current_state  := IDLE;
829        end if;
830    end process;
831
832    process(WR)
833    begin
834        if WR = '1' then
835            current_state  := IDLE;
836        end if;
837    end process;
838
839    process(count)
840    begin
841        if count = "000" then
842            current_state  := IDLE;
843        end if;
844    end process;
845
846    process(uart_rst)
847    begin
848        if uart_rst = '1' then
849            current_state  := IDLE;
850        end if;
851    end process;
852
853    process(en_rd)
854    begin
855        if en_rd = '1' then
856            current_state  := IDLE;
857        end if;
858    end process;
859
860    process(en_cnt)
861    begin
862        if en_cnt = '1' then
863            current_state  := IDLE;
864        end if;
865    end process;
866
867    process(WR)
868    begin
869        if WR = '1' then
870            current_state  := IDLE;
871        end if;
872    end process;
873
874    process(count)
875    begin
876        if count = "000" then
877            current_state  := IDLE;
878        end if;
879    end process;
880
881    process(uart_rst)
882    begin
883        if uart_rst = '1' then
884            current_state  := IDLE;
885        end if;
886    end process;
887
888    process(en_rd)
889    begin
890        if en_rd = '1' then
891            current_state  := IDLE;
892        end if;
893    end process;
894
895    process(en_cnt)
896    begin
897        if en_cnt = '1' then
898            current_state  := IDLE;
899        end if;
900    end process;
901
902    process(WR)
903    begin
904        if WR = '1' then
905            current_state  := IDLE;
906        end if;
907    end process;
908
909    process(count)
910    begin
911        if count = "000" then
912            current_state  := IDLE;
913        end if;
914    end process;
915
916    process(uart_rst)
917    begin
918        if uart_rst = '1' then
919            current_state  := IDLE;
920        end if;
921    end process;
922
923    process(en_rd)
924    begin
925        if en_rd = '1' then
926            current_state  := IDLE;
927        end if;
928    end process;
929
930    process(en_cnt)
931    begin
932        if en_cnt = '1' then
933            current_state  := IDLE;
934        end if;
935    end process;
936
937    process(WR)
938    begin
939        if WR = '1' then
940            current_state  := IDLE;
941        end if;
942    end process;
943
944    process(count)
945    begin
946        if count = "000" then
947            current_state  := IDLE;
948        end if;
949    end process;
950
951    process(uart_rst)
952    begin
953        if uart_rst = '1' then
954            current_state  := IDLE;
955        end if;
956    end process;
957
958    process(en_rd)
959    begin
960        if en_rd = '1' then
961            current_state  := IDLE;
962        end if;
963    end process;
964
965    process(en_cnt)
966    begin
967        if en_cnt = '1' then
968            current_state  := IDLE;
969        end if;
970    end process;
971
972    process(WR)
973    begin
974        if WR = '1' then
975            current_state  := IDLE;
976        end if;
977    end process;
978
979    process(count)
980    begin
981        if count = "000" then
982            current_state  := IDLE;
983        end if;
984    end process;
985
986    process(uart_rst)
987    begin
988        if uart_rst = '1' then
989            current_state  := IDLE;
990        end if;
991    end process;
992
993    process(en_rd)
994    begin
995        if en_rd = '1' then
996            current_state  := IDLE;
997        end if;
998    end process;
999
1000   process(en_cnt)
1001  begin
1002      if en_cnt = '1' then
1003          current_state  := IDLE;
1004      end if;
1005  end process;
1006
1007  process(WR)
1008  begin
1009      if WR = '1' then
1010          current_state  := IDLE;
1011      end if;
1012  end process;
1013
1014  process(count)
1015  begin
1016      if count = "000" then
1017          current_state  := IDLE;
1018      end if;
1019  end process;
1020
1021  process(uart_rst)
1022  begin
1023      if uart_rst = '1' then
1024          current_state  := IDLE;
1025      end if;
1026  end process;
1027
1028  process(en_rd)
1029  begin
1030      if en_rd = '1' then
1031          current_state  := IDLE;
1032      end if;
1033  end process;
1034
1035  process(en_cnt)
1036  begin
1037      if en_cnt = '1' then
1038          current_state  := IDLE;
1039      end if;
1040  end process;
1041
1042  process(WR)
1043  begin
1044      if WR = '1' then
1045          current_state  := IDLE;
1046      end if;
1047  end process;
1048
1049  process(count)
1050  begin
1051      if count = "000" then
1052          current_state  := IDLE;
1053      end if;
1054  end process;
1055
1056  process(uart_rst)
1057  begin
1058      if uart_rst = '1' then
1059          current_state  := IDLE;
1060      end if;
1061  end process;
1062
1063  process(en_rd)
1064  begin
1065      if en_rd = '1' then
1066          current_state  := IDLE;
1067      end if;
1068  end process;
1069
1070  process(en_cnt)
1071  begin
1072      if en_cnt = '1' then
1073          current_state  := IDLE;
1074      end if;
1075  end process;
1076
1077  process(WR)
1078  begin
1079      if WR = '1' then
1080          current_state  := IDLE;
1081      end if;
1082  end process;
1083
1084  process(count)
1085  begin
1086      if count = "000" then
1087          current_state  := IDLE;
1088      end if;
1089  end process;
1090
1091  process(uart_rst)
1092  begin
1093      if uart_rst = '1' then
1094          current_state  := IDLE;
1095      end if;
1096  end process;
1097
1098  process(en_rd)
1099  begin
1100      if en_rd = '1' then
1101          current_state  := IDLE;
1102      end if;
1103  end process;
1104
1105  process(en_cnt)
1106  begin
1107      if en_cnt = '1' then
1108          current_state  := IDLE;
1109      end if;
1110  end process;
1111
1112  process(WR)
1113  begin
1114      if WR = '1' then
1115          current_state  := IDLE;
1116      end if;
1117  end process;
1118
1119  process(count)
1120  begin
1121      if count = "000" then
1122          current_state  := IDLE;
1123      end if;
1124  end process;
1125
1126  process(uart_rst)
1127  begin
1128      if uart_rst = '1' then
1129          current_state  := IDLE;
1130      end if;
1131  end process;
1132
1133  process(en_rd)
1134  begin
1135      if en_rd = '1' then
1136          current_state  := IDLE;
1137      end if;
1138  end process;
1139
1140  process(en_cnt)
1141  begin
1142      if en_cnt = '1' then
1143          current_state  := IDLE;
1144      end if;
1145  end process;
1146
1147  process(WR)
1148  begin
1149      if WR = '1' then
1150          current_state  := IDLE;
1151      end if;
1152  end process;
1153
1154  process(count)
1155  begin
1156      if count = "000" then
1157          current_state  := IDLE;
1158      end if;
1159  end process;
1160
1161  process(uart_rst)
1162  begin
1163      if uart_rst = '1' then
1164          current_state  := IDLE;
1165      end if;
1166  end process;
1167
1168  process(en_rd)
1169  begin
1170      if en_rd = '1' then
1171          current_state  := IDLE;
1172      end if;
1173  end process;
1174
1175  process(en_cnt)
1176  begin
1177      if en_cnt = '1' then
1178          current_state  := IDLE;
1179      end if;
1180  end process;
1181
1182  process(WR)
1183  begin
1184      if WR = '1' then
1185          current_state  := IDLE;
1186      end if;
1187  end process;
1188
1189  process(count)
1190  begin
1191      if count = "000" then
1192          current_state  := IDLE;
1193      end if;
1194  end process;
1195
1196  process(uart_rst)
1197  begin
1198      if uart_rst = '1' then
1199          current_state  := IDLE;
1200      end if;
1201  end process;
1202
1203  process(en_rd)
1204  begin
1205      if en_rd = '1' then
1206          current_state  := IDLE;
1207      end if;
1208  end process;
1209
1210  process(en_cnt)
1211  begin
1212      if en_cnt = '1' then
1213          current_state  := IDLE;
1214      end if;
1215  end process;
1216
1217  process(WR)
1218  begin
1219      if WR = '1' then
1220          current_state  := IDLE;
1221      end if;
1222  end process;
1223
1224  process(count)
1225  begin
1226      if count = "000" then
1227          current_state  := IDLE;
1228      end if;
1229  end process;
1230
1231  process(uart_rst)
1232  begin
1233      if uart_rst = '1' then
1234          current_state  := IDLE;
1235      end if;
1236  end process;
1237
1238  process(en_rd)
1239  begin
1240      if en_rd = '1' then
1241          current_state  := IDLE;
1242      end if;
1243  end process;
1244
1245  process(en_cnt)
1246  begin
1247      if en_cnt = '1' then
1248          current_state  := IDLE;
1249      end if;
1250  end process;
1251
1252  process(WR)
1253  begin
1254      if WR = '1' then
1255          current_state  := IDLE;
1256      end if;
1257  end process;
1258
1259  process(count)
1260  begin
1261      if count = "000" then
1262          current_state  := IDLE;
1263      end if;
1264  end process;
1265
1266  process(uart_rst)
1267  begin
1268      if uart_rst = '1' then
1269          current_state  := IDLE;
1270      end if;
1271  end process;
1272
1273  process(en_rd)
1274  begin
1275      if en_rd = '1' then
1276          current_state  := IDLE;
1277      end if;
1278  end process;
1279
1280  process(en_cnt)
1281  begin
1282      if en_cnt = '1' then
1283          current_state  := IDLE;
1284      end if;
1285  end process;
1286
1287  process(WR)
1288  begin
1289      if WR = '1' then
1290          current_state  := IDLE;
1291      end if;
1292  end process;
1293
1294  process(count)
1295  begin
1296      if count = "000" then
1297          current_state  := IDLE;
1298      end if;
1299  end process;
1300
1301  process(uart_rst)
1302  begin
1303      if uart_rst = '1' then
1304          current_state  := IDLE;
1305      end if;
1306  end process;
1307
1308  process(en_rd)
1309  begin
1310      if en_rd = '1' then
1311          current_state  := IDLE;
1312      end if;
1313  end process;
1314
1315  process(en_cnt)
1316  begin
1317      if en_cnt = '1' then
1318          current_state  := IDLE;
1319      end if;
1320  end process;
1321
1322  process(WR)
1323  begin
```

```

37      end process;

38
39      fs_machine: process(current_state, start)
40      begin
41          uart_rst      <=  '0';
42          en_cnt       <=  '0';
43          en_rd        <=  '0';
44
45          case current_state is
46              when IDLE =>
47                  if start = '0' then
48                      next_state  <=  current_state;
49                  elsif start = '1' then
50                      next_state  <=  RETREIVE;
51                  end if;
52
53              when RETREIVE =>
54                  en_rd       <=  '1';
55                  next_state  <=  START_COMMUNICATION;
56
57              when START_COMMUNICATION =>
58                  WR          <=  '1';
59                  if TBE = '1' then
60                      next_state  <=  current_state;
61                  else
62                      next_state  <=  END_COMMUNICATION;
63                  end if;
64
65              when END_COMMUNICATION =>
66                  WR          <=  '0';
67                  if TBE = '1' then
68                      next_state  <=  INCR_COUNT;
69                      if count = "111" then
70                          next_state  <=  IDLE;
71                      end if;
72                  end if;
73
74              when INCR_COUNT =>
75                  en_cnt      <=  '1';
76                  uart_rst<=  '1';
77                  next_state  <=  RETREIVE;
78          end case;
79      end process;
80  end behavioral;

```

Code 10.4: ControlUnit_A.vhdl

10.2.5 Unità di controllo di B

Implementazione dell'unità di controllo di B.

```

1  library ieee;
2  use ieee.std_logic_1164.all;
3
4  entity ControlUnit_B is
5      port
6      (
7          clk      :  in  std_logic;
8          rst      :  in  std_logic;
9
10         RDA      :  in  std_logic;
11
12         RD       :  out std_logic;
13         uart_rst:  out std_logic;
14         en_wr   :  out std_logic;
15         en_cnt  :  out std_logic
16
17     );
18 end ControlUnit_B;
19
20
21 architecture behavioral of ControlUnit_B is
22     type state_type is (IDLE, RECEIVING, OK_RECEIVE, INCR_COUNT);
23     signal current_state  :  state_type  :=  IDLE;
24     signal next_state     :  state_type  :=  IDLE;
25 begin
26     clk_proc: process(clk, rst)
27     begin
28         if clk'event and clk='1' then
29             if rst = '1' then
30                 current_state  <=  IDLE;
31             else
32                 current_state  <=  next_state;
33             end if;
34         end if;
35     end process;
36
37     fs_machine: process(current_state, RDA)
38     begin

```

```
38      RD      <=  '0';
39      en_wr   <=  '0';
40      en_cnt  <=  '0';
41      uart_rst<=  '0';

42
43      case current_state is
44          when IDLE =>
45              if RDA = '0' then
46                  next_state  <=  current_state;
47              elsif RDA = '1' then
48                  next_state  <= RECEIVING;
49              end if;
50
51          when RECEIVING =>
52              en_wr      <=  '1';
53              next_state  <= OK_RECEIVE;
54
55          when OK_RECEIVE =>
56              uart_rst    <=  '1';
57              if RDA = '1' then
58                  next_state  <=  current_state;
59              elsif RDA = '0' then
60                  next_state  <=  INCR_COUNT;
61              end if;
62
63          when INCR_COUNT =>
64              en_cnt    <=  '1';
65              next_state  <= IDLE;
66          end case;
67      end process;
68  end behavioral;
```

Code 10.5: ControlUnit_B.vhdl

10.2.6 Unità A

Implementazione strutturale dell'entità A.

```
1 library ieee;
2 use ieee.std_logic_1164.all;
3
4 entity unit_A is
```

```

5      port
6      (
7          clk      :  in      std_logic;
8          rst      :  in      std_logic;
9
10         start    :  in      std_logic;
11
12         TXD      :  out     std_logic
13     );
14 end unit_A;
15
16 architecture structural of unit_A is
17     component ControlUnit_A is
18         port
19         (
20             clk      :  in      std_logic;
21             start    :  in      std_logic;
22             rst      :  in      std_logic;
23             TBE      :  in      std_logic;
24             count    :  in      std_logic_vector(2 downto 0);
25             WR       :  out     std_logic;
26             uart_rst:  out     std_logic;
27             en_rd   :  out     std_logic;
28             en_cnt  :  out     std_logic
29
30         );
31     end component;
32
33     component counter_mod_8 is
34         port
35         (
36             clk      :  in      std_logic;
37             rst      :  in      std_logic;
38             en_cnt  :  in      std_logic;
39             cnt     :  out     std_logic_vector(2 downto 0)
40         );
41     end component;
42
43     component Rs232RefComp is
44         Port (
45             TXD      :  out     std_logic          := '1';
46             RXD      :  in
47             ↗      std_logic;
48             CLK      :  in
49             ↗      std_logic;
50             ↗      clock
51         );
52     end component;
53
54 end architecture;
55
56 --Master

```

```

48      DBIN       : in std_logic_vector (7 downto 0); --Data
        ↳ Bus in
49      DBOUT      : out std_logic_vector (7 downto 0);          --Data
        ↳ Bus out
50      RDA        : inout std_logic;
        ↳ Data Available(1 quando il dato è disponibile nel
        ↳ registro rdReg)
51      TBE        : inout std_logic := '1';                      --Transfer Bus
        ↳ Empty(1 quando il dato da inviare è stato caricato
        ↳ nello shift register)
52      RD         : in std_logic;                                --Read
        ↳ Strobe(se 1 significa "leggi" --> fa abbassare RDA)
53      WR         : in std_logic;                                --Write
        ↳ Strobe(se 1 significa "scrivi" --> fa abbassare TBE)
54      PE         : out std_logic;                               --Parity
        ↳ Error Flag
55      FE         : out std_logic;                               --Frame
        ↳ Error Flag
56      OE         : out std_logic;                               --Overwrite
        ↳ Error Flag
57      RST        : in std_logic := '0';                      --Master Reset
        ↳
58 );
59 end component;
60
61 component ROM is
62   port
63   (
64     clk      : in std_logic;
65     en_rd   : in std_logic;
66     address : in std_logic_vector(2 downto 0);
67     d_out    : out std_logic_vector(7 downto 0)
68   );
69 end component;
70
71 signal address_temp : std_logic_vector(2 downto 0);
72 signal wr_temp     : std_logic;
73 signal rst_uart_temp : std_logic;
74 signal en_rd_temp  : std_logic;

```

```
75      signal en_cnt_temp      : std_logic;
76      signal data_temp       : std_logic_vector(7 downto 0);
77      signal TBE_temp        : std_logic;
78
79      signal rst_temp         : std_logic;
80
81 begin
82     Count_A: counter_mod_8
83     port map (clk, rst, en_cnt_temp, address_temp);
84
85     memory_A: ROM
86     port map (clk, en_rd_temp, address_temp, data_temp);
87
88     rst_temp    <= rst or rst_uart_temp;
89
90     uart_A: Rs232RefComp
91     port map
92     (
93         TXD      => TXD,
94         CLK      => clk,
95         RXD      => '1',
96         DBIN     => data_temp,
97         RD       => '1',
98         WR       => wr_temp,
99         TBE      => TBE_temp,
100        RST      => rst_temp
101    );
102
103    cu_A: ControlUnit_A
104    port map (clk, start, rst, TBE_temp, address_temp, wr_temp,
105              ↳rst_uart_temp, en_rd_temp, en_cnt_temp);
105 end structural;
```

Code 10.6: unit_A.vhdl

10.2.7 Unità B

Implementazione strutturale dell'entità B.

```
1 library ieee;
2 use ieee.std_logic_1164.all;
3
```

```

4 entity unit_B is
5     port
6     (
7         clk      :  in      std_logic;
8         rst      :  in      std_logic;
9
10        RXD      :  in      std_logic
11    );
12 end unit_B;
13
14 architecture structural of unit_B is
15     component ControlUnit_B is
16         port
17         (
18             clk      :  in  std_logic;
19             rst      :  in  std_logic;
20             RDA      :  in  std_logic;
21             RD       :  out std_logic;
22             uart_rst:  out std_logic;
23             en_wr   :  out std_logic;
24             en_cnt  :  out std_logic
25
26         );
27     end component;
28
29     component counter_mod_8 is
30         port
31         (
32             clk      :  in  std_logic;
33             rst      :  in  std_logic;
34             en_cnt  :  in  std_logic;
35             cnt      :  out std_logic_vector(2 downto 0)
36         );
37     end component;
38
39     component Rs232RefComp is
40         Port (
41             TXD      :  out std_logic          := '1';
42             RXD      :  in
43                 std_logic;
44             CLK      :  in
45                 std_logic;
46                 Clock
47             DBIN     :  in  std_logic_vector(7 downto 0); --Data
48                 Bus_in
49         );
50     end component;
51
52 end architecture;

```

```

45      DBOUT : out std_logic_vector (7 downto 0);           --Data
        ↳ Bus out
46      RDA       : inout
        ↳ std_logic;
        ↳ Data Available(1 quando il dato è disponibile nel
        ↳ registro rdReg)
47      TBE       : inout std_logic          := '1';           --Transfer Bus
        ↳ Empty(1 quando il dato da inviare è stato caricato
        ↳ nello shift register)
48      RD        : in
        ↳ std_logic;           --Read
        ↳ Strobe(se 1 significa "leggi" --> fa abbassare RDA)
49      WR        : in
        ↳ std_logic;           --Write
        ↳ Strobe(se 1 significa "scrivi" --> fa abbassare TBE)
50      PE        : out
        ↳ std_logic;           --Parity
        ↳ Error Flag
51      FE        : out
        ↳ std_logic;           --Frame
        ↳ Error Flag
52      OE        : out
        ↳ std_logic;           --Overwrite
        ↳ Error Flag
53      RST       : in std_logic          := '0'           --Master Reset
        ↳
54    );
55  end component;
56
57  component Mem is
58    port
59    (
60      clk      : in std_logic;
61      rst      : in std_logic;
62      en_wr   : in std_logic;
63
64      addr     : in std_logic_vector(2 downto 0);
65      data_in : in std_logic_vector(7 downto 0)
66
67    );
68  end component;
69
70  signal address_temp   : std_logic_vector(2 downto 0);
71  signal rd_temp       : std_logic;
72  signal rst_uart_temp : std_logic;

```

```
73      signal en_wr_temp      : std_logic;
74      signal en_cnt_temp     : std_logic;
75      signal RDA_temp        : std_logic;
76      signal data            : std_logic_vector(7 downto 0);
77      signal rst_temp         : std_logic;

78
79 begin
80     Count_B: counter_mod_8
81     port map (clk, rst, en_cnt_temp, address_temp);

82
83     memory_B: mem
84     port map (clk, rst, en_wr_temp, address_temp, data);

85
86     rst_temp      <= rst or rst_uart_temp;

87
88     uart_B: Rs232RefComp
89     port map
90     (
91         RXD      => RXD,
92         CLK      => clk,
93         RDA      => RDA_temp,
94         RD       => '0',
95         WR       => '0',
96         DBIN     => (others => '0'),
97         DBOUT    => data,
98         RST      => rst_temp
99     );
100
101    cu_B: ControlUnit_B
102    port map (clk, rst, RDA_temp, rd_temp, rst_uart_temp, en_wr_temp,
103              en_cnt_temp);
103 end structural;
```

Code 10.7: unit_B.vhdl

10.2.8 System

Il sistema completo di entrambe le unità è quindi:

```
1 library ieee;
2 use ieee.std_logic_1164.all;
3
```

```
4  entity System is
5    port
6    (
7      clk      :  in  std_logic;
8      rst      :  in  std_logic;
9
10     start    :  in  std_logic
11
12  );
13 end System;
14
15 architecture structural of System is
16   component unit_A is
17     port
18     (
19       clk      :  in  std_logic;
20       rst      :  in  std_logic;
21       start    :  in  std_logic;
22       TXD      :  out std_logic
23     );
24   end component;
25
26   component unit_B is
27     port
28     (
29       clk      :  in  std_logic;
30       rst      :  in  std_logic;
31       RXD      :  in  std_logic
32     );
33   end component;
34
35   signal channel  :  std_logic;
36
37 begin
38   A: unit_A
39     port map(clk, rst, start, channel);
40
41   B: unit_B
42     port map(clk, rst, channel);
43 end structural;
```

Code 10.8: system.vhdl

10.3 Simulazione

Per la simulazione si implemeta il seguente testbench:

```

1  -- Testbench created online at:
2  --
3  ↳ https://www.doulos.com/knowhow/perl/vhdl-testbench-creation-using-perl/
4  -- Copyright Doulos Ltd
5
6  library IEEE;
7  use IEEE.Std_logic_1164.all;
8  use IEEE.Numeric_Std.all;
9
10 entity System_tb is
11 end;
12
13 architecture bench of System_tb is
14
15 component System
16 port
17 (
18     clk      : in  std_logic;
19     rst      : in  std_logic;
20     start    : in  std_logic
21 );
22 end component;
23
24 signal clk: std_logic;
25 signal rst: std_logic;
26 signal start: std_logic ;
27
28 begin
29
30     uut: System port map ( clk      => clk,
31                           rst      => rst,
32                           start    => start );
33
34     clock_process: process
35     begin
36         clk <= '0';
37         while True loop
38             wait for 20 ns; -- Periodo del clock (adattare a seconda delle
39             ↳ esigenze) +
40             clk <= not clk;

```

```

39      end loop;
40  end process;
41
42  stimulus: process
43  begin
44    start    <=  '1';
45
46    wait;
47
48  end process;
49
50  process
51  begin
52    wait until rising_edge(clk);
53    report "Clock is high at time: " & time'image(now);
54  end process;
55
56
57
58
59 end;

```

Code 10.9: system_tb.vhdl

L'onda generata mostra la memoria di B, contenente i valori ricevuti da A

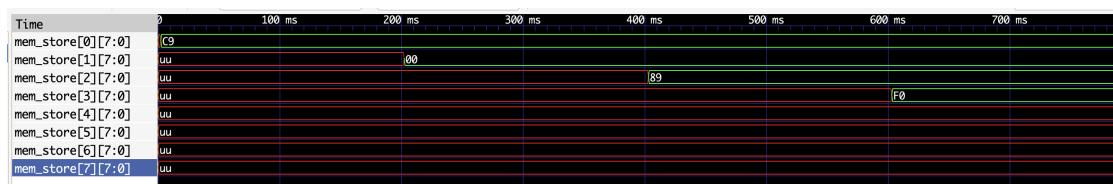


Figura 10.14: Onda del sistema - Mem di B

Capitolo 11

Esercizio 11

11.1 Switch Multistadio

Progettare ed implementare in VHDL uno switch multistadio secondo il modello omega network. Lo switch deve consentire lo scambio di messaggi di 2 bit ciascuno da un nodo sorgente a un nodo destinazione in una rete con 4 nodi, implementando uno schema a priorità fissa fra i nodi (es. nodo 1 più prioritario, con priorità decrescenti fino al nodo 4).

11.1.1 Progettazione

In un sistema di elaborazione distribuito, in cui più dispositivi devono comunicare tramite messaggi è fondamentale un sistema di interconnessione che sia efficiente, scalabile e modulare.

Un'architettura di interconnessione particolarmente interessante è la

Omega Network.

Un Omega Network $N \times N$ consiste di $\log_2 N$ stadi identici che sfruttano un'interconnessione tra nodi.

Un'Omega Network $N \times N$ è composta da $\log_2 N$ stadi, ciascuno formato da $N/2$ switch 2×2 . Ogni switch riceve due ingressi e produce due uscite, decidendo la rotta dei messaggi in base al bit corrente dell'indirizzo di destinazione. Questo approccio permette di instradare ogni messaggio in modo deterministico attraverso la rete. Gli switch sono connessi in modo tale che ciascuna uscita di uno stadio alimenti l'ingresso dello stadio successivo. Per instradare un messaggio da un nodo sorgente S a un nodo destinazione D, l'indirizzo binario di D viene analizzato bit per bit: in base a tale indirizzo si seleziona il path. Nel caso in esame, si vuole realizzare uno switch multistadio secondo il modello omega network che permetta lo scambio di messaggi di due bit da un nodo sorgente a un nodo destinazione in una rete con 4 nodi. Si è scelto di rispettare la priorità suggerita dalla traccia, ovvero il nodo 1 sarà il più prioritario, e le priorità saranno decrescenti fino al nodo 4. Per realizzare tale sistema, come prima cosa è stato realizzato un blocco switch elementare, ovvero un elemento con due ingressi e due uscite, composto da un Multiplexer la cui uscita è posta in ingresso a un Demultiplexer:

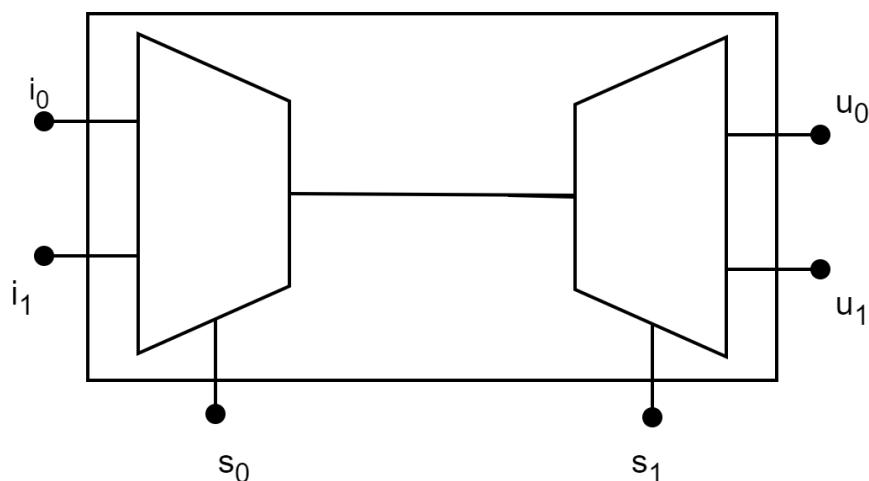


Figura 11.1: Schema switch elementare

A partire da questi, si realizza la "rete", come mostrato:

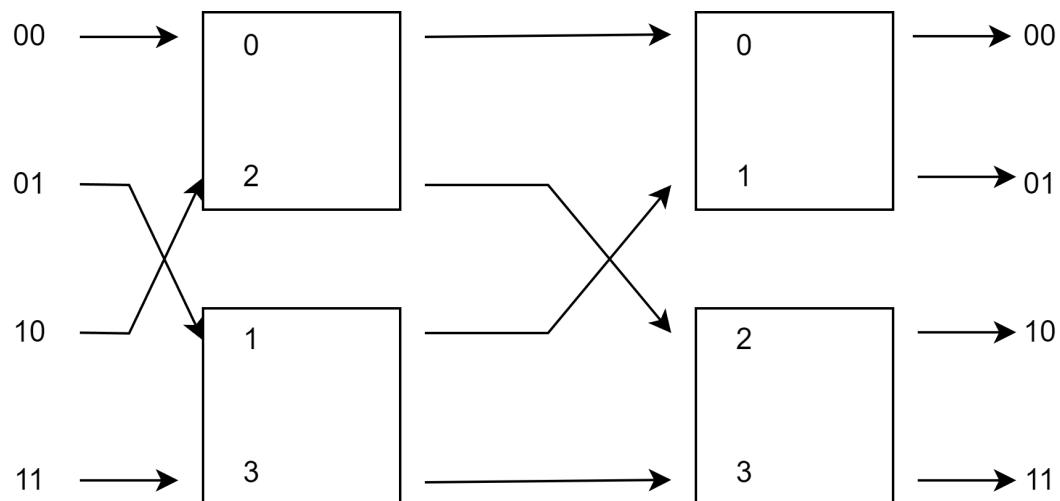


Figura 11.2: Omega Network

Il sistema di instradamento complessivamente sarà fatto in questo modo:

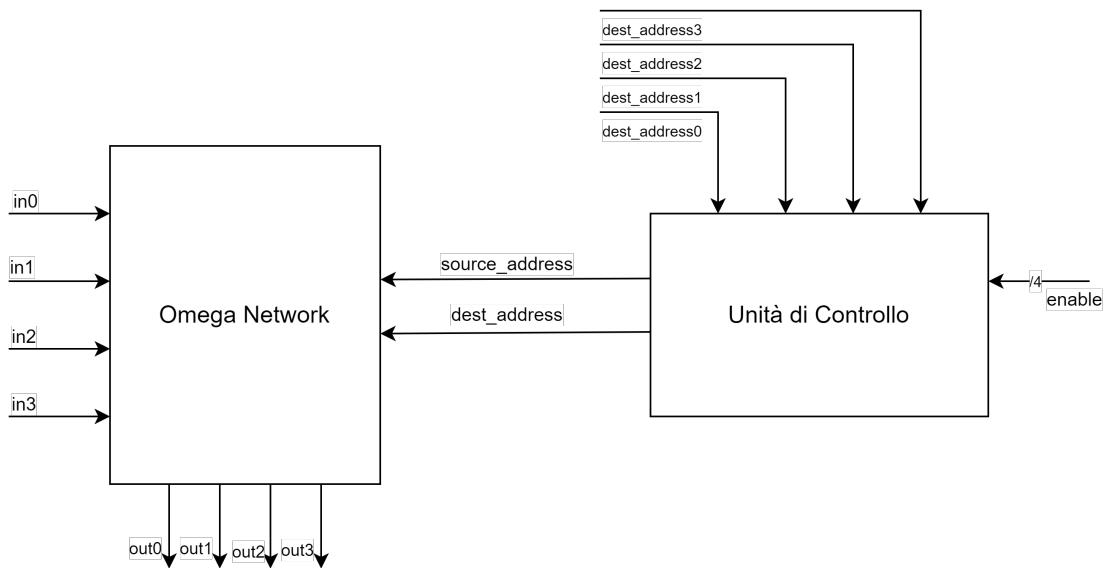


Figura 11.3: Omega Network

11.1.2 Implementazione

Per l'implementazione si parte dal codice dello switch elementare, che come detto si compone di un MUX 2:1 e un DEMUX 1:2, componenti già implementati in diversi esercizi precedenti.

```

1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity switch is
5     Port (
6         i0: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
7         i1: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
8         source_add: in STD_LOGIC;
9         dest_add: in STD_LOGIC;
10        u0: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
11        u1: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0)
12    );
13 end switch;
14
15 architecture structural of switch is
16 component mux2_1
17     Port (

```

```
18      i0: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
19      i1: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
20      s: in STD_LOGIC;
21      u: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0)
22  );
23 end component;
24
25 component demux1_2
26   Port (
27     i: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
28     s: in STD_LOGIC;
29     u0: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
30     u1: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0)
31   );
32 end component;
33 signal u_mux: STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
34 begin
35   mux: mux2_1
36     port map(
37       i0 => i0,
38       i1 => i1,
39       s => source_add,
40       u => u_mux
41     );
42
43   demux: demux1_2
44     port map(
45       i => u_mux,
46       s => dest_add,
47       u0 => u0,
48       u1 => u1
49     );
50
51 end structural;
```

Code 11.1: switch elementare in vhdl

A partire da questi elementi è stata creata le rete:

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity omega_network is
5   Port (
6     in0: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
```

```

7      in1: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
8      in2: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
9      in3: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
10     source_add: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
11     dest_add: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
12     out0: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
13     out1: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
14     out2: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
15     out3: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0)
16
17   );
18 end omega_network;
19
20 architecture Behavioral of omega_network is
21 component switch
22   Port (
23     i0: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
24     i1: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
25     source_add: in STD_LOGIC;
26     dest_add: in STD_LOGIC;
27     u0: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
28     u1: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0)
29   );
30 end component;
31 signal interm_0, interm_1, interm_2, interm_3 : STD_LOGIC_VECTOR(1
32   <→ downto 0);
33 begin
34 --primo stadio
35 sw0: switch
36   port map(
37     i0 => in0,
38     i1 => in2,
39     source_add => source_add(0),
40     dest_add => dest_add(0),
41     u0 => interm_0,
42     u1 => interm_1
43   );
44
45   sw1: switch
46   port map(
47     i0 => in1,
48     i1 => in3,
49     source_add => source_add(0),
50     dest_add => dest_add(0),
51     u0 => interm_2,
52     u1 => interm_3

```

```
52      );
53      --secondo stadio
54 sw2: switch
55     port map(
56       i0 => interm_0,
57       i1 => interm_2,
58       source_add => source_add(1),
59       dest_add => dest_add(1),
60       u0 => out0,
61       u1 => out1
62     );
63
64 sw3: switch
65     port map(
66       i0 => interm_1,
67       i1 => interm_3,
68       source_add => source_add(1),
69       dest_add => dest_add(1),
70       u0 => out2,
71       u1 => out3
72     );
73
74
75 end Behavioral;
```

Code 11.2: rete omega network in vhdl

Per la gestione delle priorità e la determinazione dell'indirizzo di partenza e destinazione, è stata realizzata un'unità di controllo. La priorità è gestita con una logica di selezione: il primo bit di enable ad essere attivo (da sinistra verso destra) assegna la sorgente attiva. La selezione (temp_sel) è calcolata in base a questa priorità e rappresenta l'indirizzo binario della sorgente attiva. L'indirizzo di destinazione corrispondente è poi scelto tra quelli disponibili in base al valore di temp_sel.

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
```

```
3
4 entity control_unit is
5 Port (
6     enable : in STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0); --segnali di ingresso
7         → per la gestione della priorità'
8     dest_address0: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
9     dest_address1: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
10    dest_address2: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
11    dest_address3: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
12    source_address : out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
13    dest_address   : out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0)
14 );
15
16 end control_unit;
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
```

```
entity control_unit is
  Port (
    enable : in STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0); --segnali di ingresso
        → per la gestione della priorità'
    dest_address0: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
    dest_address1: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
    dest_address2: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
    dest_address3: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
    source_address : out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
    dest_address   : out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0)
  );
end control_unit;

architecture Behavioral of control_unit is

signal temp_en: STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
signal temp_sel: STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
begin
--gestione priorita'
  temp_en(0) <= enable(0);
  temp_en(1) <= (NOT enable(0)) AND enable(1);
  temp_en(2) <= (NOT enable(0)) AND (NOT enable(1)) AND enable(2);
  temp_en(3) <= (NOT enable(0)) AND (NOT enable(1)) AND (NOT
    → enable(2)) AND enable(3);

  temp_sel(1) <= ((NOT temp_en(0)) AND (NOT temp_en(1)) AND
    → temp_en(2) AND (NOT temp_en(3)))
      OR ((NOT temp_en(0)) AND (NOT temp_en(1)) AND
        → (NOT temp_en(2)) AND temp_en(3)); --MSB
  temp_sel(0) <= (temp_en(0) AND (NOT temp_en(1)) AND (NOT
    → temp_en(2)) AND (NOT temp_en(3)))
      OR ((NOT temp_en(0)) AND temp_en(1) AND (NOT
        → temp_en(2)) AND (NOT temp_en(3))); --LSB

  source_address <= temp_sel;

  dest_address <= dest_address0 when temp_sel = "00" else
    dest_address1 when temp_sel = "01" else
    dest_address2 when temp_sel = "10" else
    dest_address3 when temp_sel = "11";
end Behavioral;
```

Code 11.3: unità per la gestione delle priorità in vhdl

Il sistema nel suo complesso è stato realizzato a livello structural, tramite opportuni collegamenti tra i componenti.

```

1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity switch_mult is
5     Port (
6         en: in STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
7         in0, in1, in2, in3: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
8         destination_in0: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
9         destination_in1: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
10        destination_in2: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
11        destination_in3: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
12        out0, out1, out2, out3: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0)
13    );
14 end switch_mult;
15
16 architecture structural of switch_mult is
17
18 component omega_network
19 Port (
20     in0: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
21     in1: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
22     in2: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
23     in3: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
24     source_add: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
25     dest_add: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
26     out0: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
27     out1: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
28     out2: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
29     out3: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0)
30 );
31 end component;
32
33 component control_unit
34 Port (
35     enable : in STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0); -- segnali di ingresso
36     ↪ per la gestione della priorita'
37     dest_address0: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
38     dest_address1: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);

```

```
39      dest_address2: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
40      dest_address3: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
41      source_address : out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
42      dest_address   : out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0)
43    );
44  end component;
45
46 signal temp_source_add, temp_dest_add: STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
47
48 begin
49
50 cu: control_unit
51   port map(
52     enable => en,
53     dest_address0 => destination_in0,
54     dest_address1 => destination_in1,
55     dest_address2 => destination_in2,
56     dest_address3 => destination_in3,
57     source_address => temp_source_add,
58     dest_address   => temp_dest_add
59   );
60
61 ou: omega_network
62   port map(
63     in0 => in0,
64     in1 => in1,
65     in2 => in2,
66     in3 => in3,
67     source_add => temp_source_add,
68     dest_add => temp_dest_add,
69     out0 => out0,
70     out1 => out1,
71     out2 => out2,
72     out3 => out3
73   );
74
75 end structural;
```

Code 11.4: sistema complessivo in vhdl

11.1.3 Simulazione

Per la simulazione è stato realizzato un testbench in cui sono mostrati diversi casi di test:

```

1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity switch_mult_tb is
5 -- Nessun porto, il testbench non ha interfaccia esterna
6 end switch_mult_tb;
7
8 architecture Behavioral of switch_mult_tb is
9
10 component switch_mult is
11     Port (
12         en: in STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
13         in0, in1, in2, in3: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
14         destination_in0: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
15         destination_in1: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
16         destination_in2: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
17         destination_in3: in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
18         out0, out1, out2, out3: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0)
19     );
20 end component;
21
22 signal en: STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0) := "0000";
23 signal in0, in1, in2, in3: STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0) :=
24     <others => '0';
25 signal destination_in0, destination_in1, destination_in2,
26     destination_in3: STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0) := (others =>
27     '0');
28 signal out0, out1, out2, out3: STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
29
30 begin
31
32     DUT: switch_mult
33         port map (
34             en => en,
35             in0 => in0,
36             in1 => in1,
37             in2 => in2,
38             in3 => in3,
39             destination_in0 => destination_in0,
```

```
37      destination_in1 => destination_in1,
38      destination_in2 => destination_in2,
39      destination_in3 => destination_in3,
40      out0 => out0,
41      out1 => out1,
42      out2 => out2,
43      out3 => out3
44  );
45
46  -- Test process
47  test_proc: process
48  begin
49    en <= "0010";
50    in0 <= "00";
51    in1 <= "01";
52    in2 <= "10";
53    in3 <= "11";
54    destination_in0 <= "00";
55    destination_in1 <= "01";
56    destination_in2 <= "10";
57    destination_in3 <= "11";
58    wait for 10 ns;
59
60
61    en <= "0000";
62    wait for 10 ns;
63
64    en <= "0011";
65    wait for 10 ns;
66
67    en <= "0100";
68    wait for 10 ns;
69
70    en <= "0010";
71    wait for 10 ns;
72
73    en <= "1000";
74    wait for 10 ns;
75
76    en <= "1111";
77    wait for 10 ns;
78
79    -- Stop the simulation
80    wait;
81  end process;
82
```

83 **end Behavioral;**

Code 11.5: testbench.vhd

L'esecuzione di tale testbench realizza la seguente waveform:

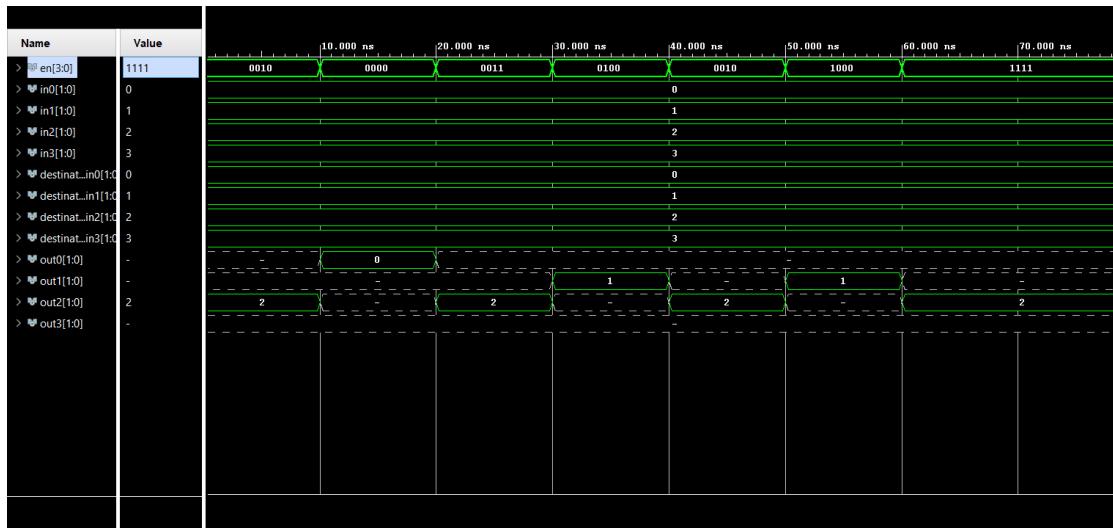


Figura 11.4: Waveform di switch multistadio

Capitolo 12

Esercizio 12

12.1 Prova di esame del 19 dicembre 2024

12.1.1 Traccia

Un sistema è composto da 2 nodi, A e B. A include una ROM (progettata come macchina sequenziale con READ sincrono) di 8 locazioni da 4 bit, mentre B include un sommatore parallelo in grado di effettuare la somma di 2 stringhe di 4 bit ciascuna e un registro R di 4 bit. Il sistema opera come segue: all'arrivo di un segnale di start, A inizia a prelevare gli elementi ROM[i] dalla propria memoria e li invia, uno alla volta, a B mediante handshaking. B somma progressivamente le stringhe ricevute utilizzando il sommatore e alla fine inserisce il risultato nel registro R.

12.1.2 Progettazione

Il progetto di questo sistema si compone di due nodi fondamentali: il nodo A e il nodo B che comunicano tramite handshaking.

Il nodo A si compone di una memoria di sola lettura (ROM), un contatore e un'unità di controllo che gestisce l'interazione;

il nodo B si compone di un sommatore *Carry Look Ahead*, di un registro e di una unità di controllo per le rispettive operazioni.

Di seguito viene mostrata lo schema a blocchi del sistema, con la suddivisione in due nodi distinti.

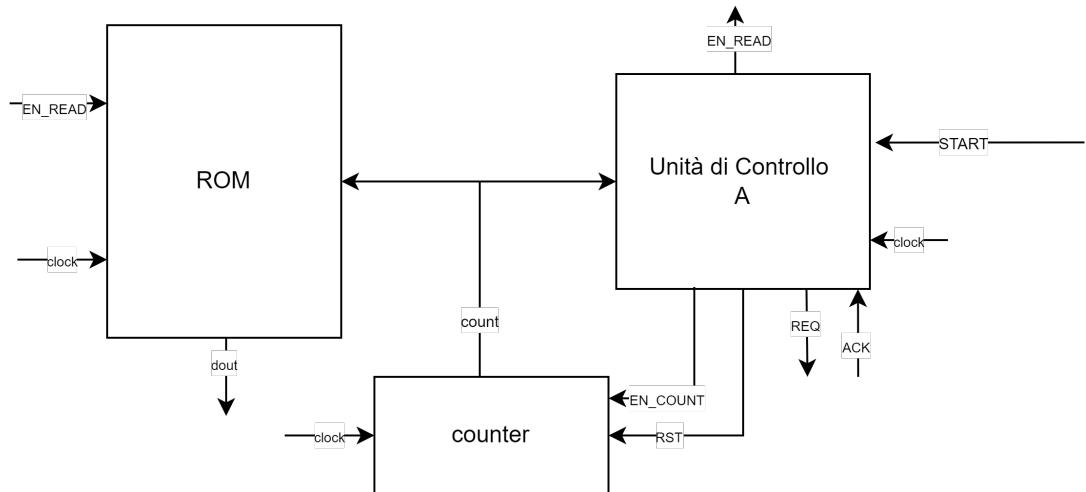


Figura 12.1: Schema a blocchi: nodo A

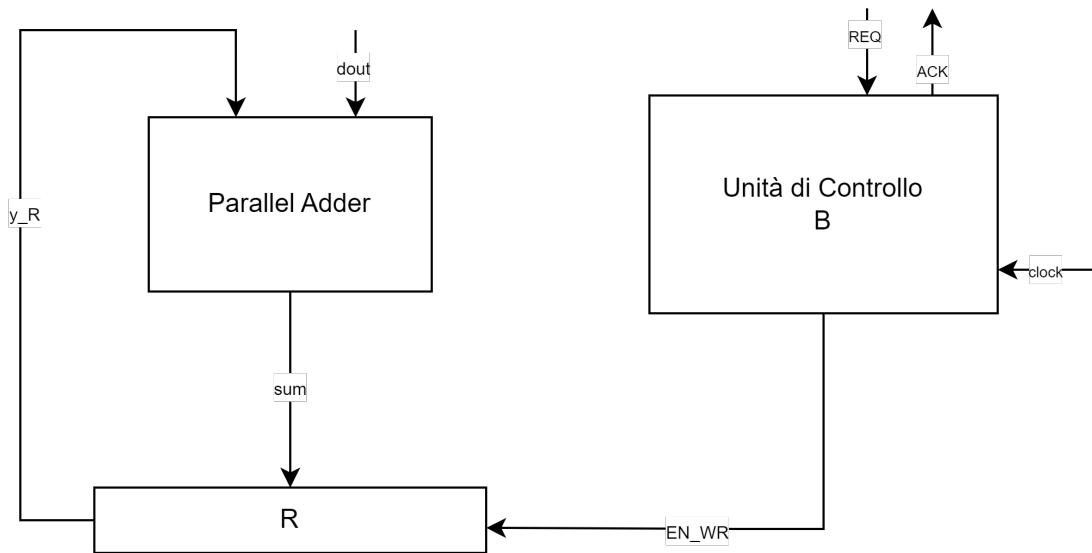


Figura 12.2: Schema a blocchi: nodo B

Nella fase di progettazione, si creano anche gli automi relativi alle unità di controllo dei due nodi, qui mostrati:

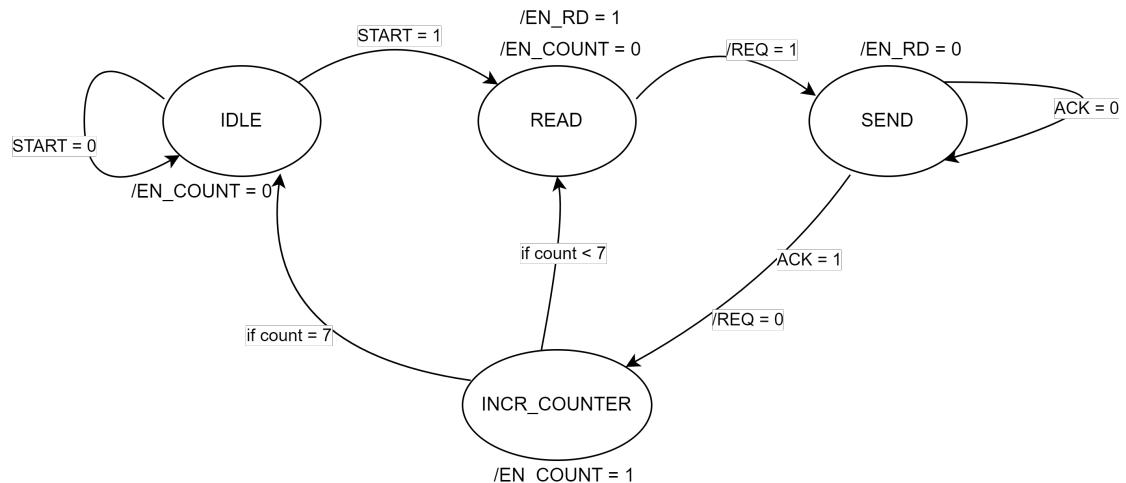


Figura 12.3: Automa unità di controllo: nodo A

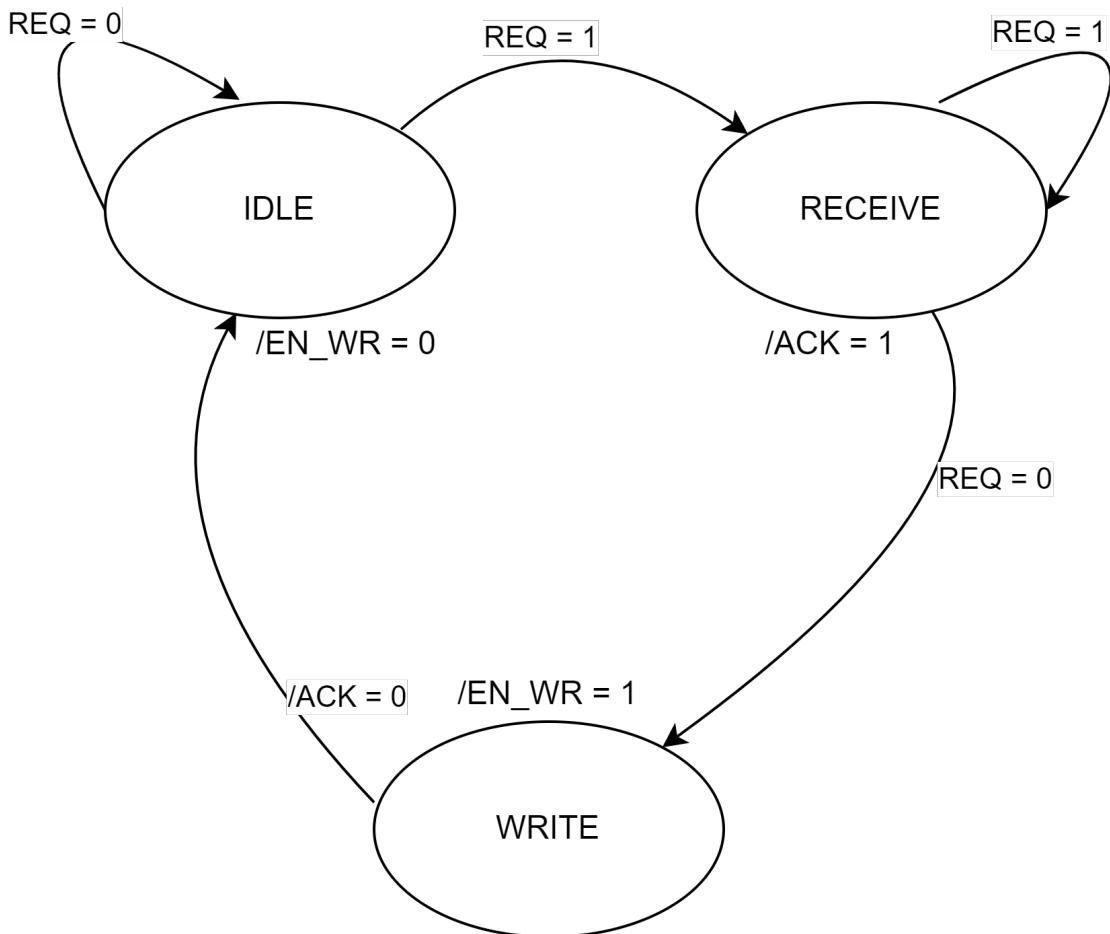


Figura 12.4: Automa unità di controllo: nodo B

12.1.3 Implementazione

Per l'implementazione si parte dal nodo A:

partendo dall'unità operativa, essa è composta da una ROM e da un contatore. Si mostrano i rispettivi codici.

```

1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3 use IEEE.NUMERIC_STD.ALL;
4
5 entity ROM is
6   Port (
7     address: in std_logic_vector(2 downto 0);
8     CLK, EN_RD: in std_logic;
  
```

```
9         dout: out std_logic_vector(3 downto 0)
10    );
11 end ROM;
12
13 architecture Behavioral of ROM is
14 type MEMO is array(0 to 7) of std_logic_vector(3 downto 0);
15
16 constant ROM: MEMO :=(
17     "0000",
18     "1100",
19     "0010",
20     "1010",
21     "0001",
22     "1111",
23     "0101",
24     "0011"
25 );
26
27 begin
28 main: process(CLK)
29 begin
30     if (CLK'event AND CLK = '1') then
31         if (EN_RD = '1') then
32             dout <= ROM(TO_INTEGER(unsigned(address)));
33         end if;
34     end if;
35 end process;
36
37 end Behavioral;
```

Code 12.1: ROM.vhdl

```
1
2 library IEEE;
3 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
4
5 use IEEE.NUMERIC_STD.ALL;
6
7 entity counter_mod8 is
8     Port ( clock : in STD_LOGIC;
9             reset : in STD_LOGIC;
10            enable : in STD_LOGIC;
11            counter : out STD_LOGIC_VECTOR (2 downto 0));
12 end counter_mod8;
```

```
13
14 architecture Behavioral of counter_mod8 is
15
16 signal c : std_logic_vector (2 downto 0) := (others => '0');
17 begin
18 counter <= c;
19
20 counter_process: process(clock)
21 begin
22
23 if(rising_edge(clock)) then
24     if reset = '1' then
25         c <= (others => '0');
26     elsif enable = '1' then
27         c <= std_logic_vector(unsigned(c) + 1);
28     end if;
29     end if;
30 end process;
31
32 end Behavioral;
```

Code 12.2: Contatore modulo 8.vhdl

Tali componenti vengono collegati tra loro nell'*unità operativa*:

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity unita_operativa is
5     Port (
6         CLK, RST, EN_COUNT: in STD_LOGIC;
7         READ: in STD_LOGIC;
8         count: out STD_LOGIC_VECTOR(2 downto 0);
9         dout: out STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0)
10
11     );
12 end unita_operativa;
13
14 architecture Behavioral of unita_operativa is
15
16 component counter_mod8
17     Port (
18         clock : in STD_LOGIC;
19         reset : in STD_LOGIC;
```

```
20           enable : in STD_LOGIC;
21           counter : out STD_LOGIC_VECTOR (2 downto 0));
22 end component;
23
24 component ROM
25   Port (
26     address: in std_logic_vector(2 downto 0);
27     CLK, EN_RD: in std_logic;
28     dout: out std_logic_vector(3 downto 0)
29   );
30 end component;
31
32 signal temp_count: STD_LOGIC_VECTOR(2 downto 0);
33
34 begin
35
36   counter: counter_mod8
37     port map(
38       clock => CLK,
39       reset => RST,
40       enable => EN_COUNT,
41       counter => temp_count
42     );
43
44   mem: ROM
45     port map(
46       address => temp_count,
47       CLK => CLK,
48       EN_RD => READ,
49       dout => dout
50     );
51
52   count <= temp_count;
53 end Behavioral;
```

Code 12.3: CUnità operativa di A in vhdl

Per la gestione delle abilitazioni, si utilizza un'unità di controllo, come si vede dallo schema a blocchi nel paragrafo precedente:

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity UCA is
```

```

5   Port (
6     START: in STD_LOGIC;
7     CLK, RST: in STD_LOGIC;
8     ACK: in STD_LOGIC;
9     count: in STD_LOGIC_VECTOR(2 downto 0);
10    REQ: out STD_LOGIC;
11    state: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
12    EN_RD, EN_COUNT: out STD_LOGIC
13
14  );
15 end UCA;
16
17 architecture Behavioral of UCA is
18 type stati is (IDLE, READ, SEND, INCR_COUNT);
19
20 signal current_state: stati;
21 signal next_state: stati;
22
23 begin
24
25 reg_stat0: process(CLK, RST)
26 begin
27   if (CLK'event AND CLK = '1') then
28     if (RST = '1') then
29       current_state <= IDLE;
30     else
31       current_state <= next_state;
32     end if;
33   end if;
34
35 end process;
36
37 change: process(current_state, START, ACK, count)
38 begin
39   EN_RD <= '0';
40   EN_COUNT <= '0';
41   REQ <= '0';
42   CASE current_state is
43     when IDLE =>
44       EN_COUNT <= '0';
45       if (START = '1') then
46         EN_RD <= '1';
47         next_state <= READ;
48       else
49         next_state <= current_state;
50       end if;

```

```

51      when READ =>
52          EN_COUNT <= '0';
53          EN_RD <= '0';
54
55          next_state <= SEND;
56
57      when SEND =>
58          REQ <= '1';
59          if (ACK = '0') then
60              next_state <= current_state;
61          else
62              REQ <= '0';
63
64          next_state <= INCR_COUNT;
65      end if;
66
67      when INCR_COUNT =>
68          EN_COUNT <= '1';
69          if count = "111" then
70              next_state <= IDLE;
71          else
72              EN_RD <= '1';
73              next_state <= READ;
74          end if;
75      end CASE;
76  end process;
77  state <= "00" when current_state = IDLE else
78      "01" when current_state = READ else
79      "10" when current_state = SEND else
80      "11" when current_state = INCR_COUNT;
81 end Behavioral;

```

Code 12.4: Control Unit di A.vhdl

Il nodo A nel suo complesso sarà implementato in questo modo:

```

1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity A is
5     Port (
6         CLK, RST: in STD_LOGIC;
7         START, ACK: in STD_LOGIC;
8         REQ: out STD_LOGIC;
9         state: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);

```

```

10      count: out STD_LOGIC_VECTOR(2 downto 0);
11      dout: out STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0)
12  );
13 end A;
14
15 architecture structural of A is
16
17     component unita_operativa
18         Port (
19             CLK, RST, EN_COUNT: in STD_LOGIC;
20             READ: in STD_LOGIC;
21             count: out STD_LOGIC_VECTOR(2 downto 0);
22             dout: out STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0)
23         );
24     end component;
25
26     component UCA
27         Port (
28             START: in STD_LOGIC;
29             CLK, RST: in STD_LOGIC;
30             ACK: in STD_LOGIC;
31             count: in STD_LOGIC_VECTOR(2 downto 0);
32             REQ: out STD_LOGIC;
33             state: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
34             EN_RD, EN_COUNT: out STD_LOGIC
35         );
36     end component;
37
38     signal temp_count: STD_LOGIC_VECTOR(2 downto 0);
39     signal temp_RD, temp_enable: STD_LOGIC;
40 begin
41     uo: unita_operativa
42         port map(
43             CLK => CLK,
44             RST => RST,
45             EN_COUNT => temp_enable,
46             READ => temp_RD,
47             count => temp_count,
48             dout => dout
49         );
50
51     uc: UCA
52         port map(
53             START => START,
54             CLK => CLK,
55             RST => RST,

```

```

56      ACK => ACK,
57      count => temp_count,
58      REQ => REQ,
59      state => state,
60      EN_RD => temp_RD,
61      EN_COUNT => temp_enable
62  );
63
64 count <= temp_count;
65
66 end structural;

```

Code 12.5: nodo A.vhdl

Si procede ora con l'implementazione del nodo B, le cui componenti sono un registro R per lo storage del risultato e un Carry Look Ahead:

```

1  library IEEE;
2  use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3  --registro parallelo-parallelo che mantiene il valore del
→ moltiplicando Y
4  entity registro4 is
5      port( A: in std_logic_vector(3 downto 0);
6          clk, res, load: in std_logic;
7          B: out std_logic_vector(3 downto 0));
8  end registro4;
9
10 architecture behavioural of registro4 is
11     signal temp_b: std_logic_vector(3 downto 0);
12     begin
13
14     R_PP: process(clk, load)
15         begin
16             if(clk'event and clk='1') then
17                 if(res='1') then
18                     temp_b<= (others=>'0');
19                 else
20                     if(load='1') then
21                         temp_b<=A;
22                     end if;
23                 end if;
24             end if;

```

```
25      end process;
26      B<=temp_b;
27  end behavioural;
```

Code 12.6: register.vhdl

Il sommatore è stato realizzato con un approccio strutturale, a partire da full adder:

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity full_adder is
5     Port (
6         x, y, cin: in std_logic;
7         cout: out std_logic;
8         s: out std_logic
9
10    );
11 end full_adder;
12
13 architecture dataflow of full_adder is
14
15 begin
16     cout <= (x AND y) OR (cin AND (x XOR y));
17     s <= (x XOR y XOR cin);
18
19 end dataflow;
```

Code 12.7: full_adder.vhdl

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity CarryLookAhead is
5     generic (N: integer range 1 to 32:= 4);
6     Port (
7         X, Y: in std_logic_vector(N-1 downto 0);
8         cin: in std_logic;
9         cout: out std_logic;
10        sum : out std_logic_vector(N-1 downto 0)
```

```

11  );
12 end CarryLookAhead;
13
14 architecture Behavioral of CarryLookAhead is
15 signal c: std_logic_vector(N-1 downto 0);
16 signal temp_sum: std_logic_vector(N-1 downto 0);
17
18 component full_adder is
19 Port (
20     x, y, cin: in std_logic;
21     cout: out std_logic;
22     s: out std_logic
23
24 );
25 end component;
26
27 begin
28 c(0) <= cin;
29
30 cin1toN_1: for i in 1 to N-1 generate
31     c(i) <= (X(i-1) and Y(i-1)) OR (c(i-1) and (X(i-1) XOR Y(i-1)));
32 end generate;
33
34 fa0: full_adder
35     port map(
36         x => X(0),
37         y => Y(0),
38         cin => c(0),
39         cout => open,
40         s => temp_sum(0)
41     );
42
43 faltoN_2: for i in 1 to N-2 generate
44     fa: full_adder
45         port map(
46             x => X(i),
47             y => Y(i),
48             cin => c(i),
49             cout => open,
50             s => temp_sum(i)
51         );
52 end generate;
53
54 faN_1: full_adder
55     port map(
56         x => X(N-1),

```

```
57      Y => Y(N-1),
58      cin => c(N-1),
59      cout => cout,
60      s => temp_sum(N-1)
61      );
62
63
64 sum <= temp_sum;
65
66
67 end Behavioral;
```

Code 12.8: CarryLookAhead.vhdl

Si mostra ora il codice dell'unità operativa:

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity unita_operativaB is
5   Port (
6     CLK, RST: in STD_LOGIC;
7     selA: in STD_LOGIC;
8     din: in STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
9     load_A: in STD_LOGIC;
10    result: out STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0)
11
12  );
13 end unita_operativaB;
14
15 architecture Behavioral of unita_operativaB is
16
17 component CarryLookAhead
18   generic (N: integer range 1 to 32:= 4);
19   Port (
20     X, Y: in std_logic_vector(N-1 downto 0);
21     cin: in std_logic;
22     cout: out std_logic;
23     sum : out std_logic_vector(N-1 downto 0)
24  );
25 end component;
26
27 component registro4
28   port (
```

```

29      A: in std_logic_vector(3 downto 0);
30      clk, res, load: in std_logic;
31      B: out std_logic_vector(3 downto 0));
32  end component;
33
34  component mux2_1
35  port( x0, x1: in std_logic_vector(3 downto 0);
36          s: in std_logic;
37          y: out std_logic_vector(3 downto 0)
38      );
39  end component;
40
41  signal A_in, u_carry: STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
42  signal op2: STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
43  signal riporto: STD_LOGIC;
44
45  begin
46
47  reg: registro4
48    port map(
49        A => A_in,
50        clk => CLK,
51        res => RST,
52        load => load_A,
53        B => op2
54    );
55
56 CLA: CarryLookAhead
57   port map(
58       X => op2,
59       Y => din,
60       cin => '0',
61       cout => riporto,
62       sum => u_carry
63   );
64
65 mux: mux2_1
66   port map(
67       x0 => (others => '0'),
68       x1 => u_carry,
69       s => selA,
70       y => A_in
71   );
72
73 res: process(CLK, load_A)
74   begin

```

```

75  if (CLK'event AND CLK = '1') then
76      if (load_A = '1') then
77          result <= u_carry;
78      end if;
79  end if;
80 end process;
81
82 end Behavioral;

```

Code 12.9: unità operativa di B in vhdl

Come già visto, per la gestione delle abilitazioni e del funzionamento si utilizza un unità di controllo, modellata sulla base degli automi progettati nel paragrafo precedente.

```

1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity UCB is
5     Port (
6         CLK, RST: in STD_LOGIC;
7         REQ: in STD_LOGIC;
8         state: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
9         ACK: out STD_LOGIC;
10        selA, EN_WRITE: out STD_LOGIC:= '0'
11    );
12 end UCB;
13
14 architecture Behavioral of UCB is
15 type stati is (IDLE, RECEIVE, SUM, WRITE);
16
17 signal current_state: stati;
18 signal next_state: stati;
19
20 begin
21
22 reg_stato: process(CLK, RST)
23 begin
24     if (CLK'event AND CLK = '1') then
25         if (RST = '1') then
26             current_state <= IDLE;
27         else
28             current_state <= next_state;

```

```
29      end if;
30  end if;
31 end process;
32
33 change: process(current_state, REQ)
34 begin
35     EN_WRITE <= '0';
36     ACK <= '0';
37 CASE current_state is
38     when IDLE =>
39         if REQ = '0' then
40             next_state <= current_state;
41         else
42             next_state <= RECEIVE;
43         end if;
44     when RECEIVE =>
45         ACK <= '1';
46         if REQ = '1' then
47             next_state <= current_state;
48         else
49             selA <= '1';
50             next_state <= SUM;
51
52         end if;
53     when SUM =>
54         ACK <= '0';
55         EN_WRITE <= '1';
56         next_state <= WRITE;
57     when WRITE =>
58
59         EN_WRITE <= '0';
60         next_state <= IDLE;
61
62 end CASE;
63
64 end process;
65 state <= "00" when current_state = IDLE else
66     "01" when current_state = RECEIVE else
67     "10" when current_state = SUM else
68     "11" when current_state = WRITE;
69
70 end Behavioral;
```

Code 12.10: Control Unit di A.vhdl

Il nodo B nel suo complesso viene implementato in questo modo:

```

1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity B is
5     Port (
6         CLK, RST: in STD_LOGIC;
7         REQ: in STD_LOGIC;
8         din: in STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
9         ACK: out STD_LOGIC;
10        state: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
11        result: out STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0)
12    );
13 end B;
14
15 architecture structural of B is
16 component unita_operativaB
17 Port (
18     CLK, RST: in STD_LOGIC;
19     selA: in STD_LOGIC;
20     din: in STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
21     load_A: in STD_LOGIC;
22     result: out STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0)
23 );
24 end component;
25
26 component UCB
27 Port (
28     CLK, RST: in STD_LOGIC;
29     REQ: in STD_LOGIC;
30     state: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
31     EN_WRITE, ACK, selA: out STD_LOGIC
32 );
33 end component;
34 signal temp_load, temp_en_sum, temp_sel: STD_LOGIC;
35 begin
36
37 uo: unita_operativaB
38     port map(
39         CLK => CLK,
40         RST => RST,
41         selA => temp_sel,
42         din => din,

```

```

44         load_A => temp_load,
45         result => result
46     );
47
48 uc: UCB
49     port map(
50         CLK => CLK,
51         RST => RST,
52         REQ => REQ,
53         state => state,
54         EN_WRITE => temp_load,
55         ACK => ACK,
56         selA => temp_sel
57     );
58
59
60 end structural;

```

Code 12.11: nodo B.vhdl

Il sistema compolessivo composto dai due nodi creato in precedenza si implementa come segue:

```

1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4
5 entity AplusB is
6     Port (
7         CLK_A, CLK_B, RST: in STD_LOGIC;
8         START: in STD_LOGIC;
9         stateA, stateB: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
10        count: out STD_LOGIC_VECTOR(2 downto 0);
11        result: out STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0)
12    );
13 end AplusB;
14
15 architecture Behavioral of AplusB is
16 component A
17     Port (
18         CLK, RST: in STD_LOGIC;
19         START, ACK: in STD_LOGIC;
20         REQ: out STD_LOGIC;
21         state: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);

```

```
22         count: out STD_LOGIC_VECTOR(2 downto 0);
23         dout: out STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0)
24     );
25 end component;
26
27 component B
28 Port (
29     CLK, RST: in STD_LOGIC;
30     REQ: in STD_LOGIC;
31     din: in STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
32     ACK: out STD_LOGIC;
33     state: out STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
34     result: out STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0)
35 );
36 end component;
37
38 signal temp_ACK, temp_REQ: STD_LOGIC;
39 signal uA: STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0);
40 begin
41
42 A0: A
43     port map(
44         CLK => CLK_A,
45         RST => RST,
46         START => START,
47         ACK => temp_ACK,
48         REQ => temp_REQ,
49         state => stateA,
50         count => count,
51         dout => uA
52     );
53
54 B0: B
55     port map(
56         CLK => CLK_B,
57         RST => RST,
58         REQ => temp_REQ,
59         din => uA,
60         ACK => temp_ACK,
61         state => stateB,
62         result => result
63     );
64
65 end Behavioral;
```

Code 12.12: AplusB.vhd

Si osserva anche lo schematico complessivo generato dall'ambiente Vivado:

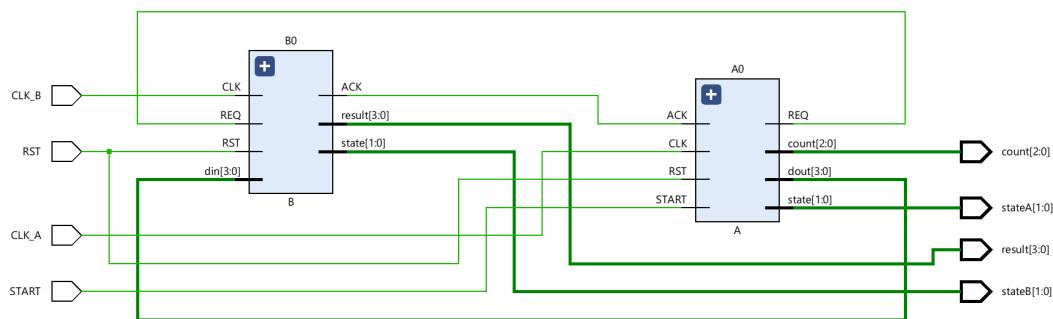


Figura 12.5: Schema a blocchi: nodo B

12.1.4 Simulazione

Per procedere alla simulazione, è necessario un testbench:

```

1 LIBRARY ieee;
2 USE ieee.std_logic_1164.ALL;
3 USE ieee.numeric_std.ALL;
4
5 ENTITY tb_AplusB IS
6 END tb_AplusB;
7
8 ARCHITECTURE behavior OF tb_AplusB IS
9
10 COMPONENT AplusB
11 PORT (
12     CLK_A : IN STD_LOGIC;
13     CLK_B : IN STD_LOGIC;
14     RST : IN STD_LOGIC;
15     START : IN STD_LOGIC;
16     stateA : OUT STD_LOGIC_VECTOR(1 DOWNTO 0);
17     stateB : OUT STD_LOGIC_VECTOR(1 DOWNTO 0);

```

```

18      count : OUT STD_LOGIC_VECTOR(2 DOWNTO 0);
19      result : OUT STD_LOGIC_VECTOR(3 DOWNTO 0)
20  );
21  END COMPONENT;
22
23  -- Signals to connect to UUT
24  SIGNAL CLK_A : STD_LOGIC := '0';
25  SIGNAL CLK_B : STD_LOGIC := '0';
26  SIGNAL RST : STD_LOGIC := '0';
27  SIGNAL START : STD_LOGIC := '0';
28  SIGNAL stateA : STD_LOGIC_VECTOR(1 DOWNTO 0);
29  SIGNAL stateB : STD_LOGIC_VECTOR(1 DOWNTO 0);
30  SIGNAL count : STD_LOGIC_VECTOR(2 DOWNTO 0);
31  SIGNAL result : STD_LOGIC_VECTOR(3 DOWNTO 0);
32
33  -- Clock periods
34  CONSTANT CLK_A_PERIOD : TIME := 10 ns;
35  CONSTANT CLK_B_PERIOD : TIME := 12 ns;
36
37 BEGIN
38
39  uut: AplusB PORT MAP (
40    CLK_A => CLK_A,
41    CLK_B => CLK_B,
42    RST => RST,
43    START => START,
44    stateA => stateA,
45    stateB => stateB,
46    count => count,
47    result => result
48  );
49
50  -- Clock process for CLK_A
51  CLK_A_process : PROCESS
52  BEGIN
53    CLK_A <= '0';
54    WAIT FOR CLK_A_PERIOD/2;
55    CLK_A <= '1';
56    WAIT FOR CLK_A_PERIOD/2;
57  END PROCESS;
58
59  -- Clock process for CLK_B
60  CLK_B_process : PROCESS
61  BEGIN
62    CLK_B <= '0';
63    WAIT FOR CLK_B_PERIOD/2;

```

```

64      CLK_B <= '1';
65      WAIT FOR CLK_B_PERIOD/2;
66  END PROCESS;

67
68  -- Stimulus process
69  stim_proc: PROCESS
70  BEGIN
71      -- Reset the system
72      RST <= '1';
73      WAIT FOR 20 ns;
74      RST <= '0';

75
76      -- Start the operation
77      START <= '1';
78      WAIT FOR 50 ns;
79      START <= '0';

80
81      -- Wait and observe results
82      WAIT FOR 200 ns;

83
84      -- Stop simulation
85      WAIT;
86  END PROCESS;

87
88 END;

```

Code 12.13: testbench.vhdl

E eseguendo tale simulazione si ottiene la seguente waveform:

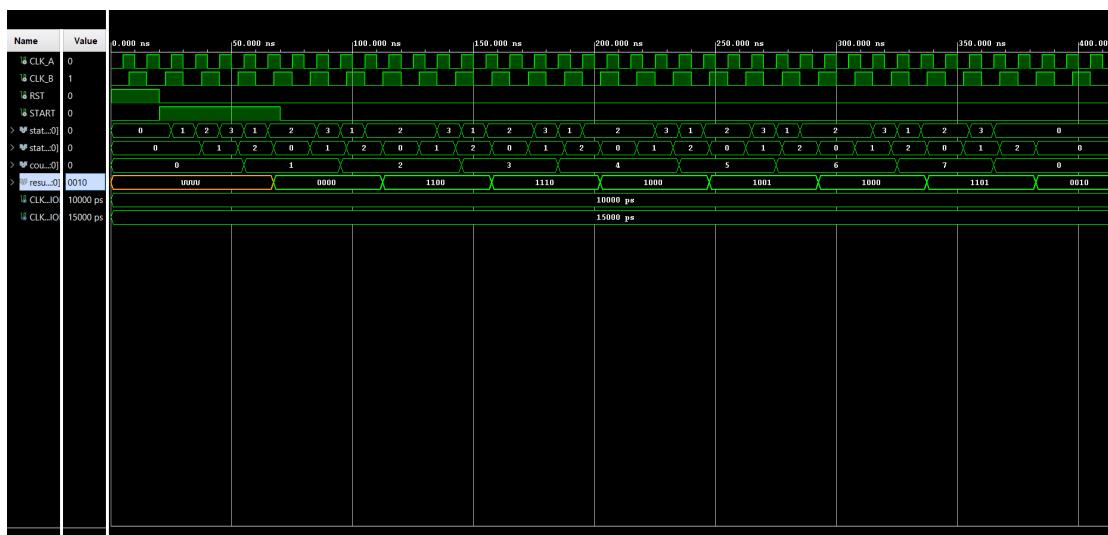


Figura 12.6: Waveform con clock_A minore di clock_B

Per valutare la correttezza della simulazione si ricordano gli elementi di ROM:

$$\text{ROM}[0] = 0000$$

$$\text{ROM}[1] = 1100$$

$$\text{ROM}[2] = 0010$$

$$\text{ROM}[3] = 1010$$

$$\text{ROM}[4] = 0001$$

$$\text{ROM}[5] = 1111$$

$$\text{ROM}[6] = 0101$$

$$\text{ROM}[7] = 0011$$

Inizializzando il registro R a 0 e poi sommando progressivamente i valori a due a due si ottiene:

$$0000 + 0000 = 0000$$

$$0000 + 1100 = 1100$$

$$1100 + 0010 = 1110$$

$$1110 + 1010 = 1000$$

$$1000 + 0001 = 1001$$

$$1001 + 1111 = 1000$$

$$1000 + 0101 = 1101$$

$$\mathbf{1101 + 0011 = 0010}$$

Quindi alla fine sul registro sarà memorizzata la stringa 0010, che corrisponde alla somma di tutti gli elementi della ROM presente in A. Il caso mostrato è stato analizzato con il clock di B pari a 15 ns, mentre quello di A pari a 10 ns.

Si vuole mostrare il caso opposto, con il clock di A pari a 15 ns e quello di B pari a 10 ns.

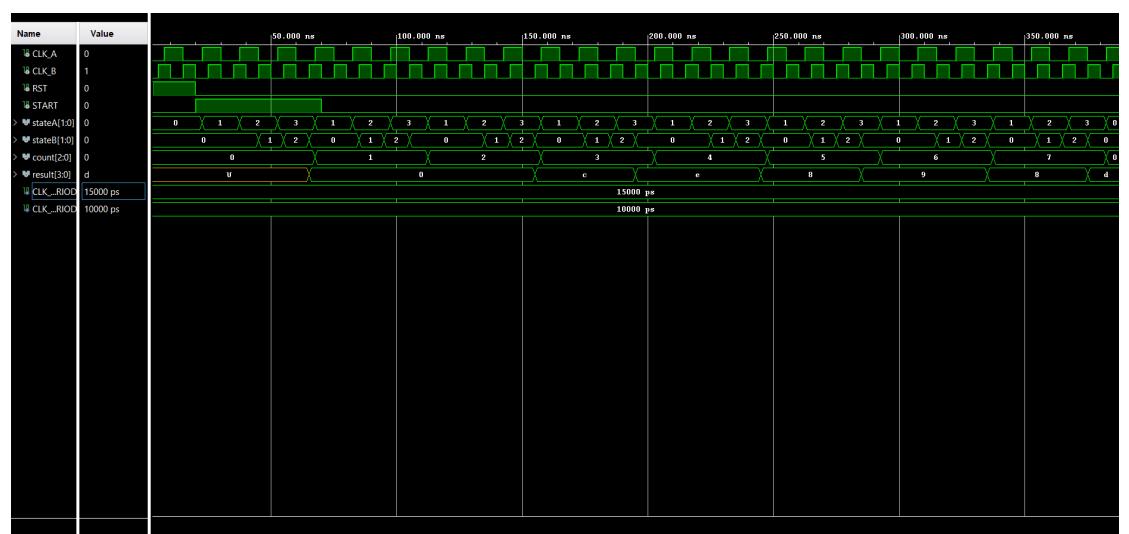


Figura 12.7: Waveform con clock_B minore di clock_A

Si noti dall'evoluzione degli stati che lo stato B resta in IDLE fino quando non rileva REQ alto.

Capitolo 13

Esercizio 13

13.1 Controllo di una Mano Stampata in 3D tramite FPGA e VHDL: Studio e Implementazione

Questo progetto ha come obiettivo la progettazione e realizzazione di una mano robotica stampata in 3D, controllata attraverso sei servomotori gestiti da una scheda Nexys A7-50T. La mano robotica sarà in grado di simulare movimenti umani fondamentali, come la flessione e l'estensione delle dita, utilizzando un controllo digitale sviluppato in VHDL e implementato tramite il software Vivado.

La mano robotica sarà composta da:

- Una struttura stampata in 3D, progettata per simulare l'anatomia di una mano umana;

- Cinque servomotori, ognuno dei quali controlla il movimento di un dito;
- La scheda Nexys A7-50T, dotata di FPGA, che fungerà da controller principale, generando i segnali di comando (PWM) necessari per pilotare i servomotori.

Il modello scelto per la realizzazione del progetto è il seguente:



Figura 13.1: Modello realizzato

Per consentire un corretto funzionamento dei servomotori, è stato inoltre progettato un contenitore per impedire movimenti indesiderati; il progetto è stato realizzato utilizzando il software Tinkercad.

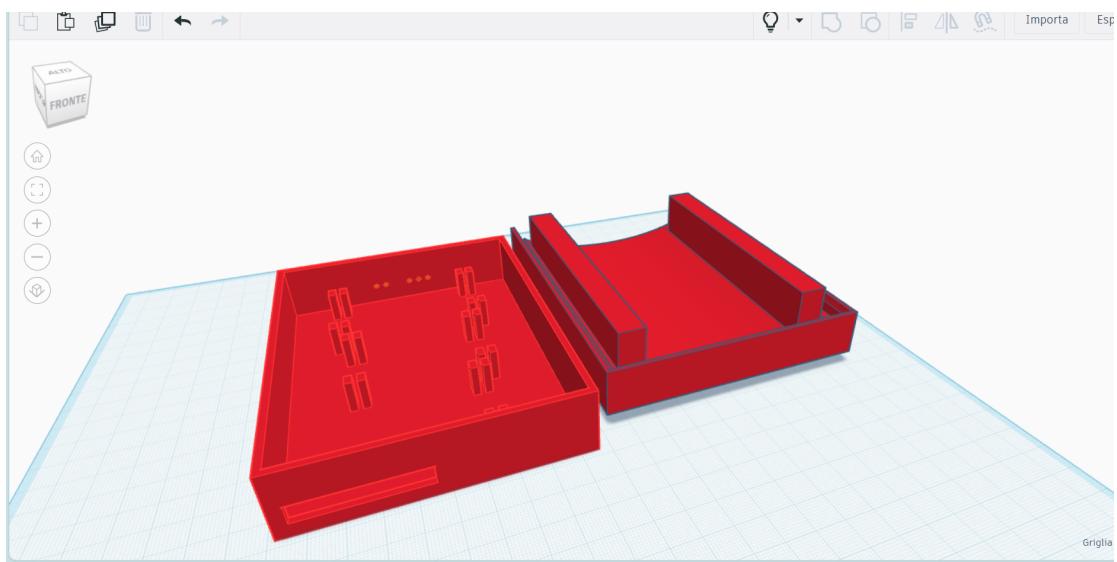


Figura 13.2: Progetto contenitore servomotori su Tinkercad

13.1.1 Funzionamento

La mano robotica progettata è controllata tramite una combinazione di switch e pulsanti, che permettono di selezionare quale dito muovere e di determinarne l’azione (chiusura o apertura). Ogni dito è associato a un interruttore specifico che, quando attivato, consente di selezionarlo per il movimento. In particolare, sono stati usati gli switch presenti sulla board da 0 a 4: lo switch 0 è utilizzato per il pollice, 1 per l’indice e così via fino allo switch 4 che è collegato al mignolo. Ovviamente, più switch possono essere attivi contemporaneamente, così da permettere il movimento anche di più dita insieme. Una volta selezionato il dito (o le dita) due pulsanti dedicati permettono di controllarne il movimento: il pulsante a destra (BTNR) comanda la chiusura del dito, simulando la flessione, mentre il bottone a sinistra (BTNL) ne consente l’apertura, simulando l’estensione.

13.1.2 Implementazione

Per l'implementazione, si mostrano di seguito i codici realizzati.

Per iniziare viene presentata l'implementazione del divisore di frequenza.

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity freq_div is
5     Port (
6         clk      : in STD_LOGIC;
7         reset    : in STD_LOGIC;
8         clk_out: out STD_LOGIC
9     );
10 end freq_div;
11
12 architecture Behavioral of freq_div is
13     signal temporal: STD_LOGIC;
14     signal counter : integer range 0 to 780 := 0;
15 begin
16     freq_divider: process (reset, clk) begin
17         if (reset = '1') then
18             temporal <= '0';
19             counter <= 0;
20         elsif rising_edge(clk) then
21             if (counter = 780) then
22                 temporal <= NOT(temporal);
23                 counter <= 0;
24             else
25                 counter <= counter + 1;
26             end if;
27         end if;
28     end process;
29
30     clk_out <= temporal;
31 end Behavioral;
```

Code 13.1: Divisore di frequenza

Tale modulo implementa un divisore di frequenza progettato per ridurre la frequenza del segnale di clock in ingresso, generando un segnale di clock in uscita a frequenza più bassa. Utilizza un contatore (counter) che incrementa a ogni fronte di salita del clock principale (clk). Quando il contatore raggiunge il valore massimo preimpostato (780 in questo caso), il segnale temporale (temporal) viene invertito, e il contatore viene azzerato. Questo processo crea un'onda quadra con una frequenza pari a quella del clock in ingresso divisa per il doppio del valore del contatore più uno (in questo caso, circa $780 + 1 = 781$). Il segnale di clock ridotto (clk_out) è quindi una versione più lenta e stabile del clock in ingresso.

Per il controllo dei servomotori, poichè quelli relativi ad anulare e mignolo sono specchiati rispetto agli altri, si è resa necessaria una gestione separata, complementare rispetto a quella di pollice, indice e medio:

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3 use IEEE.NUMERIC_STD.ALL;
4
5 entity servo_1st is
6     PORT (
7         clk      : in STD_LOGIC;
8         reset   : in STD_LOGIC;
9         close   : in STD_LOGIC;
10        open_f  : in STD_LOGIC;
11        servo0  : out STD_LOGIC;
12        servo1  : out STD_LOGIC;
13        servo2  : out STD_LOGIC
14    );
15 end servo_1st;
16
```

```

17 architecture Behavioral of servo_1st is
18     signal pos: STD_LOGIC_VECTOR(6 downto 0):= (others => '0');
19     -- Counter, from 0 to 1279.
20     signal cnt : unsigned(10 downto 0);
21     -- Temporal signal used to generate the PWM pulse.
22     signal pwmi: unsigned(7 downto 0);
23 begin
24     -- Minimum value should be 0.5ms.
25     pwmi <= unsigned('0' & pos) + 32;
26     -- Counter process, from 0 to 1279.
27     counter: process (reset, clk) begin
28         if (reset = '1') then
29             cnt <= (others => '0');
30
31         elsif rising_edge(clk) then
32             if close = '1' then
33                 pos <= "11111100";
34             elsif open_f = '1' then
35                 pos <= (others => '0');
36             end if;
37             if (cnt = 1279) then
38                 cnt <= (others => '0');
39             else
40                 cnt <= cnt + 1;
41             end if;
42
43         end if;
44     end process;
45
46     servo0 <= '1' when (cnt < pwmi) else '0';
47     servo1 <= '1' when (cnt < pwmi) else '0';
48     servo2 <= '1' when (cnt < pwmi) else '0';
49 end Behavioral;

```

Code 13.2: Controllo dei servomotori relativi a pollice, indice e medio

```

1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3 use IEEE.NUMERIC_STD.ALL;
4
5 entity servo_1st is
6     PORT (
7         clk      : in STD_LOGIC;
8         reset   : in STD_LOGIC;

```

```

9      close: in STD_LOGIC;
10     open_f: in STD_LOGIC;
11     servo0 : out STD_LOGIC;
12     servol : out STD_LOGIC;
13     servo2 : out STD_LOGIC
14   );
15 end servo_1st;
16
17 architecture Behavioral of servo_1st is
18   signal pos: STD_LOGIC_VECTOR(6 downto 0):= (others => '0');
19   -- Counter, from 0 to 1279.
20   signal cnt : unsigned(10 downto 0);
21   -- Temporal signal used to generate the PWM pulse.
22   signal pwmi: unsigned(7 downto 0);
23 begin
24   -- Minimum value should be 0.5ms.
25   pwmi <= unsigned('0' & pos) + 32;
26   -- Counter process, from 0 to 1279.
27   counter: process (reset, clk) begin
28     if (reset = '1') then
29       cnt <= (others => '0');
30
31     elsif rising_edge(clk) then
32       if close = '1' then
33         pos <= "1111100";
34       elsif open_f = '1' then
35         pos <= (others => '0');
36       end if;
37       if (cnt = 1279) then
38         cnt <= (others => '0');
39       else
40         cnt <= cnt + 1;
41       end if;
42
43     end if;
44   end process;
45
46   servo0 <= '1' when (cnt < pwmi) else '0';
47   servol <= '1' when (cnt < pwmi) else '0';
48   servo2 <= '1' when (cnt < pwmi) else '0';
49 end Behavioral;

```

Code 13.3: Controllo dei servomotori relativi ad anulare e mignolo

Il progetto complessivo è quindi composto dai componenti visti in

precedenza. In ingresso si trovano i segnali per stabilire il dito che si muoverà oltre che due segnali per stabilire se il movimento sarà di flessione o di estensione; in uscita, si trovano i segnali per il controllo dei servomotori.

```
1 library IEEE;
2 use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3
4 entity hand_control is
5     PORT(
6         clk : IN STD_LOGIC;
7         reset: IN STD_LOGIC;
8         dito: in STD_LOGIC_VECTOR(4 downto 0); --sceglie quale dito
9             -- abilitare
10        close: IN STD_LOGIC;
11        open_f: in STD_LOGIC;
12        servo0: OUT STD_LOGIC;
13        servol: out STD_LOGIC;
14        servo2: OUT STD_LOGIC;
15        servo3: out STD_LOGIC;
16        servo4: out STD_LOGIC
17    );
18 end hand_control;
19
20
21 architecture Behavioral of hand_control is
22     COMPONENT freq_div
23         PORT(
24             clk      : in STD_LOGIC;
25             reset   : in STD_LOGIC;
26             clk_out: out STD_LOGIC
27         );
28     END COMPONENT;
29
30     COMPONENT servo_1st
31         PORT (
32             clk      : in STD_LOGIC;
33             reset   : in STD_LOGIC;
34             close: in STD_LOGIC;
35             open_f: in STD_LOGIC;
36             servo0 : out STD_LOGIC;
37             servol : out STD_LOGIC;
38             servo2 : out STD_LOGIC
39         );
40
```

```

38      END COMPONENT;
39
40  COMPONENT servo_2nd
41    PORT (
42      clk    : in STD_LOGIC;
43      reset : in STD_LOGIC;
44      close: in STD_LOGIC;
45      open_f: in STD_LOGIC;
46      servo3 : out STD_LOGIC;
47      servo4: out STD_LOGIC
48    );
49  end COMPONENT;
50
51  signal clk_out : STD_LOGIC := '0';
52  signal servo0_temp, servol_temp, servo2_temp, servo3_temp,
53      → servo4_temp: STD_LOGIC;
54
55 begin
56   fd_map: freq_div PORT MAP(
57     clk, reset, clk_out
58   );
59
60   servo_pwm_map: servo_1st PORT MAP(
61     clk_out, reset, close, open_f, servo0_temp, servol_temp,
62     → servo2_temp
63   );
64
65   servo_pwm_2_map: servo_2nd
66     Port map(clk_out, reset, close, open_f, servo3_temp,
67     → servo4_temp
68   );
69
70   servo: process(dito)
71   begin
72     if dito(0) = '1' then
73       servo0 <= servo0_temp;
74     end if;
75     if dito(1) = '1' then
76       servol <= servol_temp;
77     end if;
78     if dito(2) = '1' then
79       servo2 <= servo2_temp;
80     end if;
81     if dito(3) = '1' then
82       servo3 <= servo3_temp;
83     end if;

```

```

81      if dito(4) = '1' then
82          servo4 <= servo4_temp;
83      end if;
84  end process;
85 end Behavioral;
```

Code 13.4: Implementazione del controllo della mano

Per il collegamento del programma alla board è stato realizzato un file di tipo xdc.

```

# Clock signal
set_property -dict { PACKAGE_PIN E3      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { clk }]; #IO_L12P_T1_MRCC_35 Sch=clk100mhz
create_clock -add -name sys_clk_pin -period 100000 -waveform {0 5}
[get_ports {clk}];

set_property CLOCK_DEDICATED_ROUTE FALSE [get_nets {dito_IBUF[0]}]
set_property CLOCK_DEDICATED_ROUTE FALSE [get_nets {dito_IBUF[1]}]
set_property CLOCK_DEDICATED_ROUTE FALSE [get_nets {dito_IBUF[2]}]
set_property CLOCK_DEDICATED_ROUTE FALSE [get_nets {dito_IBUF[3]}]
set_property CLOCK_DEDICATED_ROUTE FALSE [get_nets dito_IBUF[4]]

#Switches
set_property -dict { PACKAGE_PIN J15      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { dito[0] }]; #IO_L24N_T3_RS0_15 Sch=sw[0]
set_property -dict { PACKAGE_PIN L16      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { dito[1] }]; #IO_L3N_T0_DQS_EMCCCLK_14 Sch=sw[1]
set_property -dict { PACKAGE_PIN M13      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { dito[2] }]; #IO_L6N_T0_D08_VREF_14 Sch=sw[2]
set_property -dict { PACKAGE_PIN R15      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { dito[3] }]; #IO_L13N_T2_MRCC_14 Sch=sw[3]
set_property -dict { PACKAGE_PIN R17      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { dito[4] }]; #IO_L12N_T1_MRCC_14 Sch=sw[4]

##Buttons
set_property -dict { PACKAGE_PIN N17      IOSTANDARD LVCMOS33 }
[get_ports { reset }]; #IO_L9P_T1_DQS_14 Sch=btnc
set_property -dict { PACKAGE_PIN P17      IOSTANDARD LVCMOS33 }
```

CAPITOLO 13. ESERCIZIO 13

```
[get_ports { close }]; #IO_L12P_T1_MRCC_14 Sch=btnl  
set_property -dict { PACKAGE_PIN M17      IOSTANDARD LVCMOS33 }  
[get_ports { open_f }]; #IO_L10N_T1_D15_14 Sch=btnr  
##Pmod Header JA  
set_property -dict { PACKAGE_PIN C17      IOSTANDARD LVCMOS33 }  
[get_ports { servol }]; #IO_L20N_T3_A19_15 Sch=ja[1]  
##Pmod Header JB  
set_property -dict { PACKAGE_PIN D14      IOSTANDARD LVCMOS33 }  
[get_ports { servo2 }]; #IO_L1P_T0_AD0P_15 Sch=jb[1]  
##Pmod Header JC  
set_property -dict { PACKAGE_PIN K1      IOSTANDARD LVCMOS33 }  
[get_ports { servo3 }]; #IO_L23N_T3_35 Sch=jc[1]  
##Pmod Header JD  
set_property -dict { PACKAGE_PIN H4      IOSTANDARD LVCMOS33 }  
[get_ports { servo4 }]; #IO_L21N_T3_DQS_35 Sch=jd[1]  
##Pmod Header JXADC  
set_property -dict { PACKAGE_PIN A15      IOSTANDARD LVCMOS33 }  
[get_ports { servo0 }]; #IO_L8P_T1_AD10P_15 Sch=xa_p[2]
```

Bibliografia

- [1] Carlo Brandoles. *Introduzione al linguaggio VHDL - Aspetti teorici ed esempi di progettazione.* Politecnico di Milano.
- [2] Rocco di Torrepidula Franca e Somma Alessadra. *Architettura dei Sistemi di Elaborazione - Appunti tratti dalle lezioni del prof N. Mazzocca.*
- [3] Alberto Morriconi. amic-0. [https://github.com/albmoriconi/amic-0.](https://github.com/albmoriconi/amic-0)
- [4] Shira. Prosthetic hand. [https://www.thingiverse.com/thing:1489003.](https://www.thingiverse.com/thing:1489003)