

Laboratório de Sistemas Digitais

Aula Teórico-Prática 9

Ano Letivo 2023/24

Modelação, simulação e síntese de
Máquinas de Estados Finitos

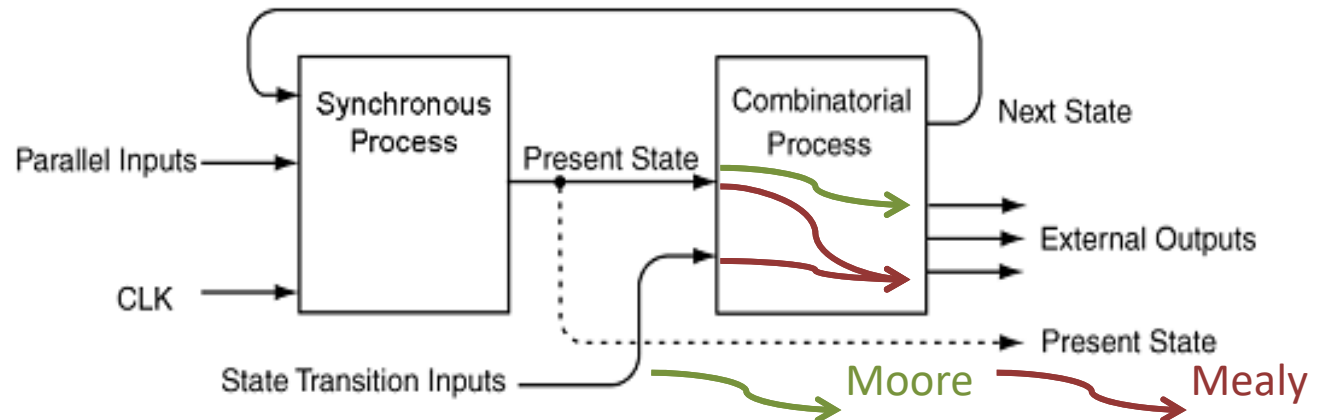
Modelo de Mealy
MEFs comunicantes



Conteúdo

- Abordagens de modelação de Máquinas de Estados Finitos (MEFs) / Finite State Machines (FSMs) baseadas em VHDL
 - Modelo de *Mealy*
- Flexibilidade na especificação das transições
 - Utilização de operadores relacionais
- MEFs comunicantes
 - Exemplo

Método '2 processos': MEF de Mealy



Gestão das saídas (processo combinacional)

- *Moore* (dependem apenas do estado)
 - Valores atribuídos directamente nos **when** de um **case**
- *Mealy* (dependem do estado e das entradas)
 - **if...then...else** (dependentes das entradas) dentro dos **when** de um **case**
- Sempre (em *Mealy* como em *Moore*)
 - Garantir a atribuição (processo combinacional – sem *latches*!)

Exemplo (*Mealy*) – Detetor de Sequências (1101)

```

library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.all;

entity Seq1101Detector is
    port(reset : in  std_logic;
          clk   : in  std_logic;
          xIn   : in  std_logic;
          zOut  : out std_logic);
end Seq1101Detector;

architecture Behav of Seq1101Detector is
    type state is (A, B, C, D);
    signal PS, NS : state;
begin
    sync_proc: process(clk)
    begin
        if (rising_edge(clk)) then
            if (reset = '1') then
                PS <= A;
            else
                PS <= NS;
            end if;
        end if;
    end process;
end architecture;

```

Exemplo:

```
xIn  : 0110100101101101011010111010
zOut: 0000100000001001000010000010
```

```

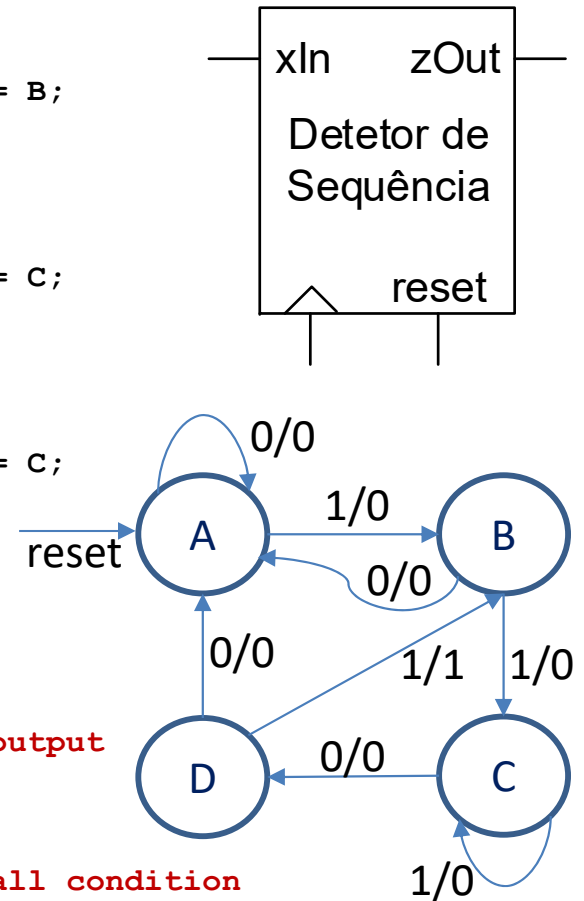
comb_proc : process(PS, xIn)
begin
    zOut <= '0'; -- Frequent output value, could appear
    -- in all "when" statements, but would require more code
    case PS is
    when A =>
        if (xIn = '1') then NS <= B;
        else NS <= A;
        end if;
    when B =>
        if (xIn = '1') then NS <= C;
        else NS <= A;
        end if;
    when C =>
        if (xIn = '1') then NS <= C;
        else NS <= D;
        end if;
    when D =>
        if (xIn = '1') then
            NS <= B;
            zOut <= '1'; -- Mealy output
        else NS <= A;
        end if;
    when others => -- Catch all condition
        NS <= A;
    end case;
end process;
end Behav;

```

```

graph TD
    reset((reset)) --> A((A))
    A -- "0/0" --> A
    A -- "1/0" --> B((B))
    B -- "0/0" --> A
    B -- "1/1" --> C((C))
    C -- "0/0" --> D((D))
    C -- "1/0" --> C
    D -- "0/0" --> A
    D -- "1/1" --> B

```



Output do Estado Interno

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

entity Seq1101 is
    port(reset : in std_logic;
          clk   : in std_logic;
          xIn   : in std_logic;
          stout : out std_logic_vector(3 downto 0);
          zOut  : out std_logic);
end Seq1101;
```

```
architecture Behav of Seq1101 is
    type state is (A, B, C, D);
    signal PS, NS : state;
```

```
begin
    if (rising_edge(clk)) then
        if (reset = '1') then
            PS <= A;
        else
            PS <= NS;
        end if;
    end if;
end process;
```

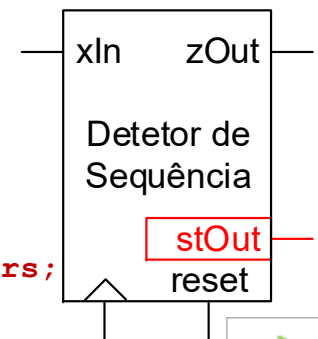
```
comb_proc : process(PS, xIn)
begin
    zOut <= '0'; -- Most frequent output value
```

```
case PS is
when A =>
    if (xIn = '1') then NS <= B;
    else NS <= A;
    end if;
    . . .
    . . .
when D =>
    if (xIn = '1') then
        NS <= B;
        zOut <= '1'; -- Mealy output
    else NS <= A;
    end if;
when others => -- Catch all condition
    NS <= A;
end case;
end process;
```

```
with PS select
    stout <= "0001" when A,
           "0010" when B,
           "0100" when C,
           "1000" when D,
           "0000" when others;
```

```
end Behav;
```

Atribuição concorrente
com `sync_proc` e
`comb_proc`



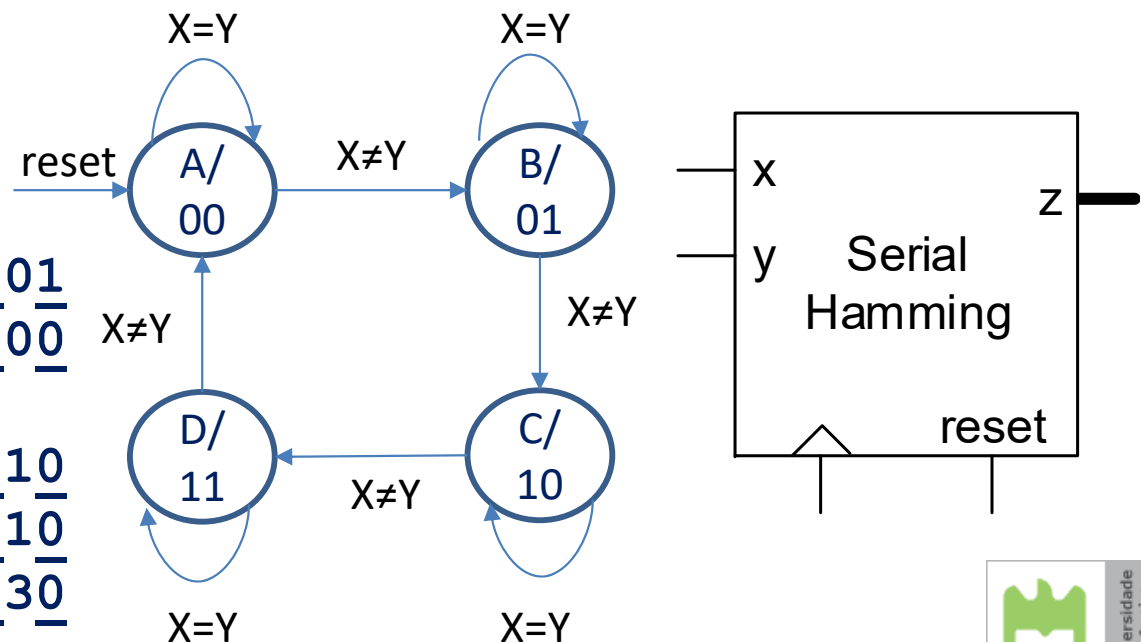
Especificação Flexível das Transições

- Em VHDL é possível especificar as condições de transição de estado de diversas formas
 - Códigos binários ou valores simbólicos
 - Expressões booleanas ou relacionais
- Exemplo
 - Distância de *Hamming* módulo 4 de duas entradas série

Exemplo:

x: 0001100110110110111101
y: 0011000100110100100000

z (0) : 0011000011111100010110
z (1) : 0000111111111100001110
z : 0011222233333300012330



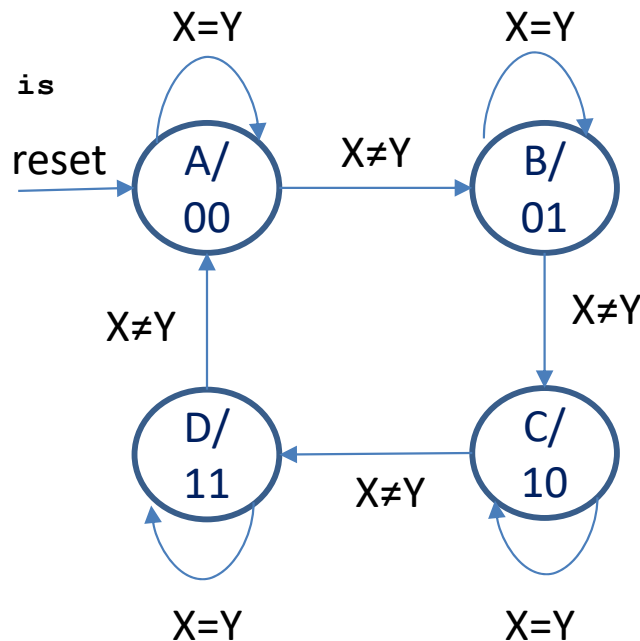
Exemplo – Distância de *Hamming*

Módulo 4

```
-- Computes modulo 4 (0...3) Hamming distance
-- between two serial inputs
library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;

entity serialHamming is
  port(clk    : in std_logic;
       reset  : in std_logic;
       x,y    : in std_logic;
       z      : out std_logic_vector(1 downto 0));
end serialHamming;
```

```
architecture behav of serialHamming is
  type state is (A, B, C, D);
  signal PS, NS : state;
begin
  if (rising_edge(clk)) then
    if (reset = '1') then
      PS <= A;
    else
      PS <= NS;
    end if;
  end if;
end process;
```

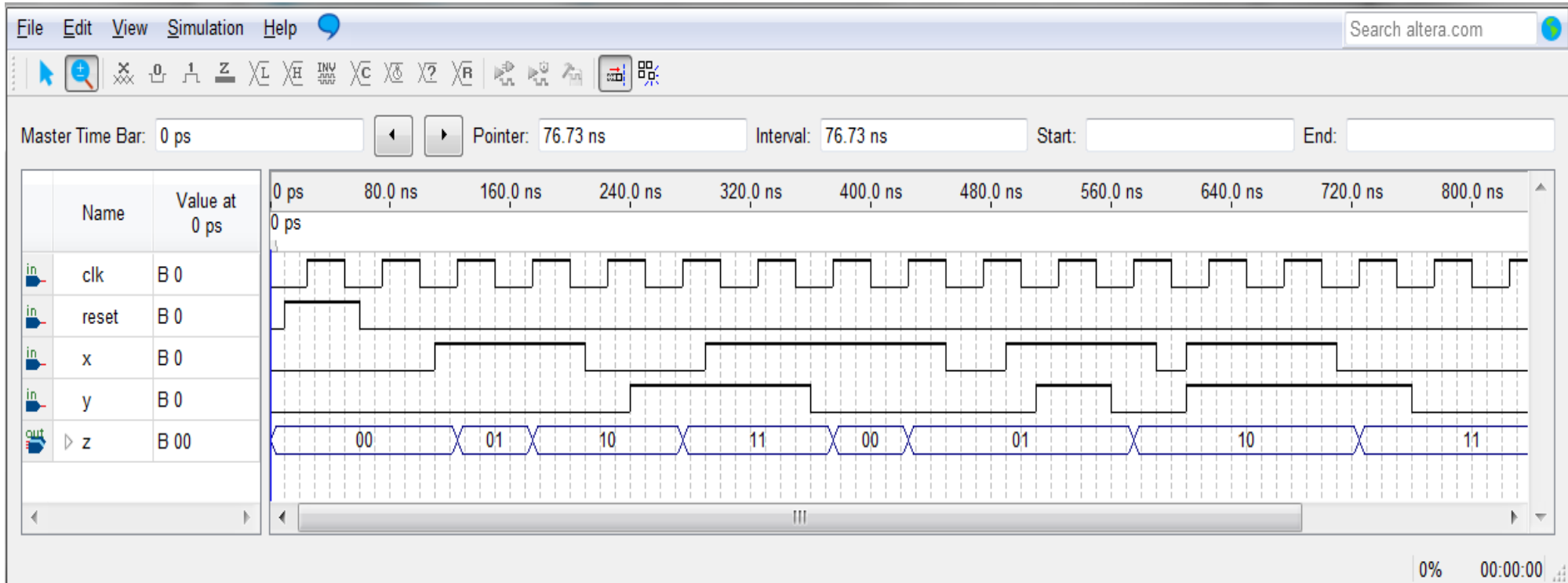


```
comb_proc : process(PS, x, y)
begin
  NS <= PS; -- Otherwise assume
            -- NS equal to PS

  case PS is
    when A =>
      z <= "00";
      if (x /= y) then NS <= B;
      end if;
    when B =>
      z <= "01";
      if (x /= y) then NS <= C;
      end if;
    when C =>
      z <= "10";
      if (x /= y) then NS <= D;
      end if;
    when D =>
      z <= "11";
      if (x /= y) then NS <= A;
      end if;
    when others =>
      z <= "00";
      NS <= A;
    end case;
  end process;
end behav;
```

Simulação - Distância de *Hamming*

Módulo 4

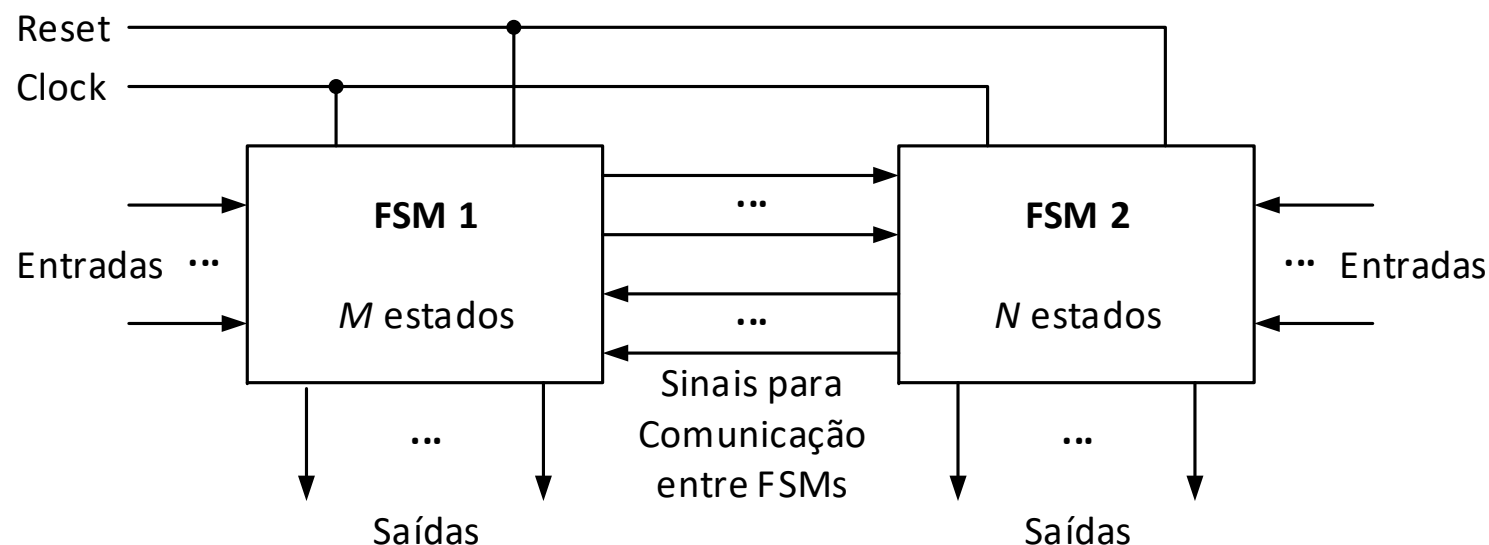


Simulação com *testbench*:

- Gerada a partir do ficheiro VWF
- Gerada diretamente em VHDL de acordo com o *template* para componentes sequenciais

Máquinas de Estado Finitos Comunicantes

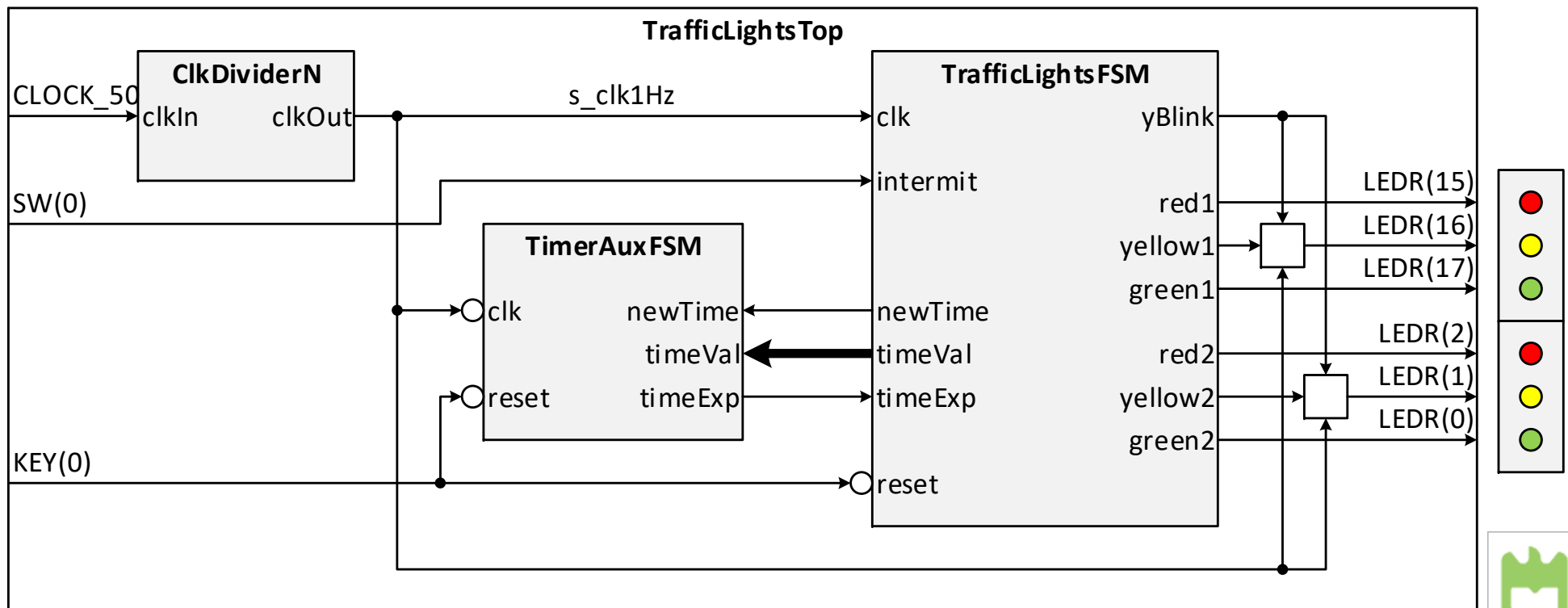
- Partição da funcionalidade do sistema em duas ou mais máquinas paralelas ou sequenciais
 - Decomposição visa facilitar o desenvolvimento e a validação
 - Partilha dos sinais de inicialização e sincronização
 - Frequentemente operam em diferentes flancos do mesmo sinal de *clock*
 - Sinais de entrada e de saída
 - Específicos de cada sub-máquina
 - Partilhados pelas sub-máquinas
 - Comunicação entre sub-máquinas



Exemplo de MEFs Comunicantes

Semáforo de Obras

- Duas MEFs comunicantes
 - Sequenciação dos estados dos semáforos - *TrafficLightsFSM*
 - Temporização dos estados dos semáforos – *TimerAuxFSM*
 - Frequência de operação - 1 Hz



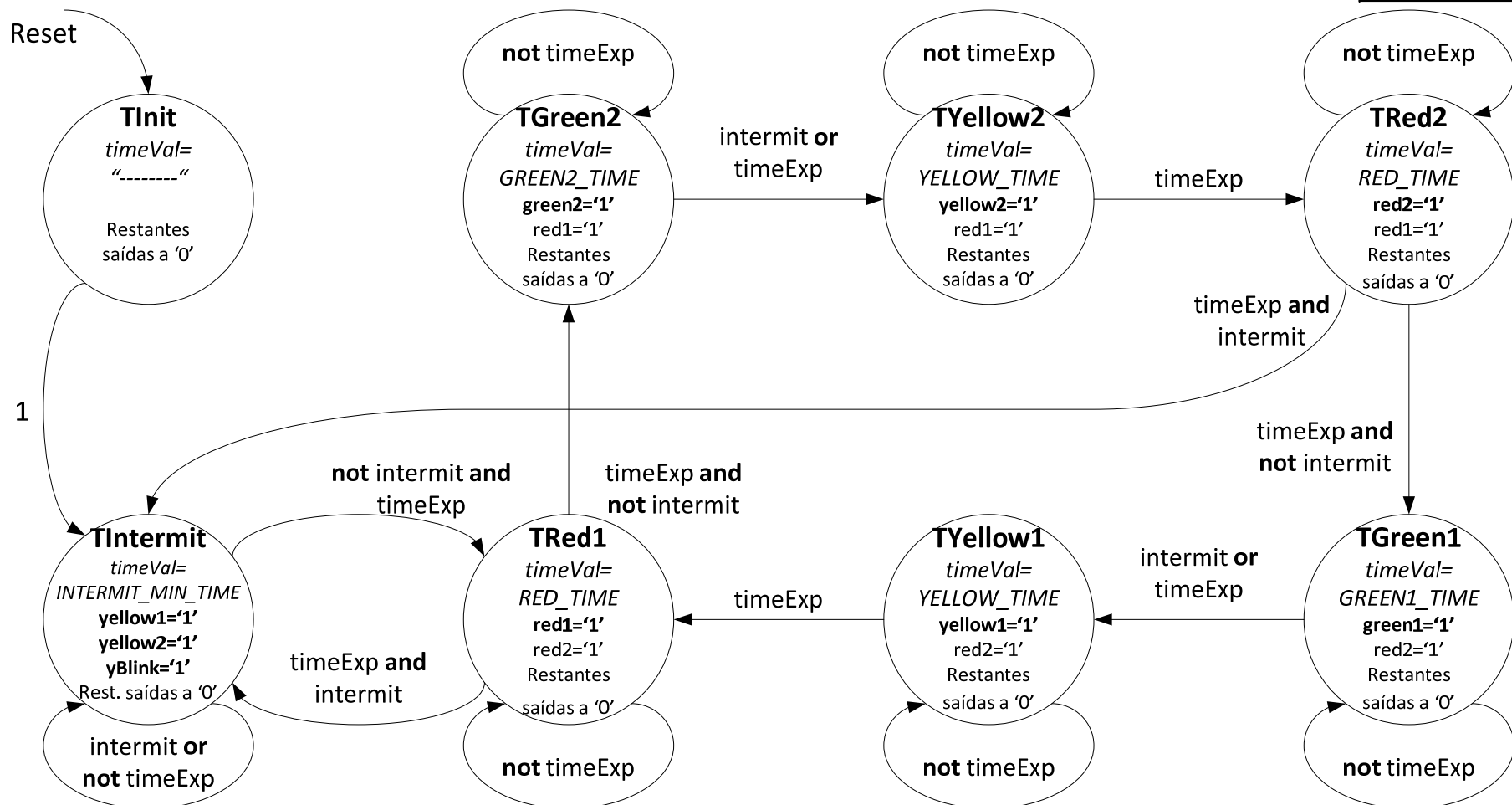
Controlador do Semáforo

TrafficLightsFSM

- Alguns portos**

- **intermit** – entrada de ativação do amarelo intermitente
- **newTime, timeVal** – pedido (à *TimerAuxFSM*) de uma nova temporização
- **timeExp** – temporização terminada (expirada) (notificação da *TrafficLightsFSM*)
- **yBlink** – saída de controlo do amarelo intermitente

TrafficLightsFSM	
clk	yBlink
intermit	red1
	yellow1
	green1
newTime	
timeVal	red2
timeExp	yellow2
	green2
reset	



TrafficLightsFSM – Ent. + Arquitetura

(decl. do estado e proc. síncrono)

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

entity TrafficLightsFSM is
    port(reset      : in  std_logic;
         clk        : in  std_logic;
         intermit   : in  std_logic;
         newTime    : out std_logic;
         timeVal    : out std_logic_vector(7 downto 0);
         timeExp    : in  std_logic;
         yBlink     : out std_logic;
         red1       : out std_logic;
         yellow1    : out std_logic;
         green1     : out std_logic;
         red2       : out std_logic;
         yellow2    : out std_logic;
         green2     : out std_logic);
end TrafficLightsFSM;
```



architecture Behavioral of TrafficLightsFSM is

-- Constantes para definição das temporizações

```
constant RED_TIME      : std_logic_vector(7 downto 0) := "00000100"; -- 4 s
constant YELLOW_TIME   : std_logic_vector(7 downto 0) := "00000011"; -- 3 s
constant GREEN1_TIME   : std_logic_vector(7 downto 0) := "00001110"; -- 14 s
constant GREEN2_TIME   : std_logic_vector(7 downto 0) := "00001100"; -- 12 s
constant INTERMIT_MIN_TIME : std_logic_vector(7 downto 0) := "00000110"; -- 6 s
```

```
type TState is (TInit, TIntermit, TRed1, TYellow1,
               TGreen1, TRed2, TYellow2, TGreen2);
signal s_currentState, s_nextState : Tstate := TInit;
signal s_stateChanged : std_logic := '1';

begin
    sync_proc : process(clk)
    begin
        if (rising_edge(clk)) then
            if (reset = '1') then
                s_currentState <= TInit;
                s_stateChanged <= '1';
            else
                if (s_currentState /= s_nextState) then
                    s_stateChanged <= '1';
                else
                    s_stateChanged <= '0';
                end if;
                s_currentState <= s_nextState;
            end if;
        end if;
    end process;
    newTime <= s_stateChanged;
```

valores de
inicialização pós
configuração da
FPGA

newTime é
ativado quando
existe de facto
uma transição
de estado



TrafficLightsFSM – Proc. Combinatório

```
comb_proc : process(s_currentState,
                    intermit, timeExp)
```

```
begin
```

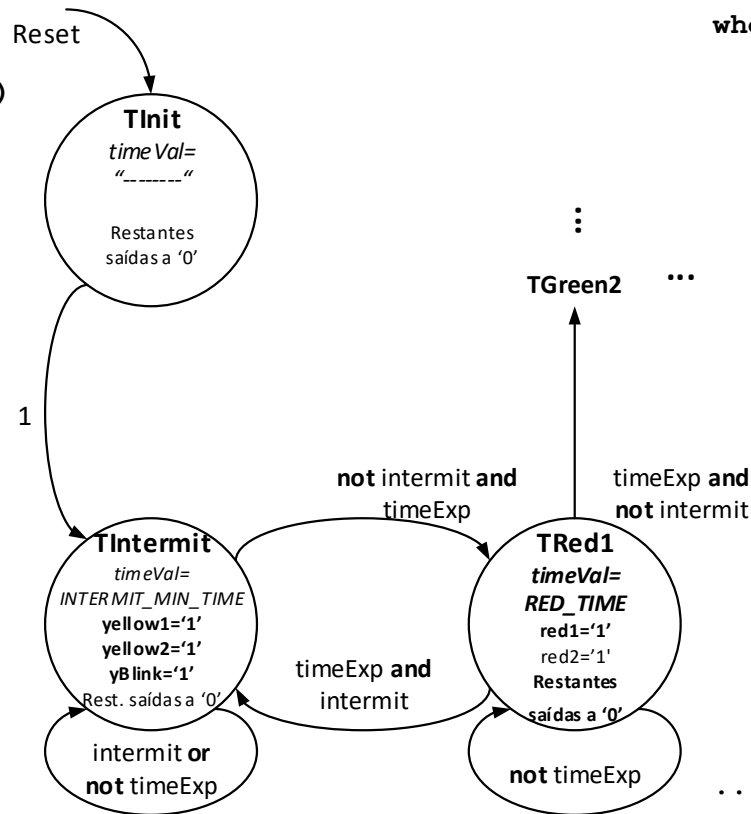
```
  case (s_currentState) is
```

```
    when TInit =>
```

```
      red1      <= '0';
      yellow1   <= '0';
      green1    <= '0';
      red2      <= '0';
      yellow2   <= '0';
      green2    <= '0';
      yBlink    <= '0';
      timeVal   <= (others => '-');
      s_nextState <= TIntermit;
```

```
    when TIntermit =>
```

```
      red1      <= '0';
      yellow1   <= '1';
      green1    <= '0';
      red2      <= '0';
      yellow2   <= '1';
      green2    <= '0';
      yBlink    <= '1';
      timeVal   <= INTERMIT_MIN_TIME; -- Indicação da temporização
      if ((intermit = '0') and (timeExp = '1')) then
        s_nextState <= TRed1;
      else
        s_nextState <= TIntermit;
      end if;
```



```
when TRed1 =>
```

```
  red1      <= '1';
  yellow1   <= '0';
  green1    <= '0';
  red2      <= '1';
  yellow2   <= '0';
  green2    <= '0';
  yBlink    <= '0';
  timeVal   <= RED_TIME;
  if (timeExp = '1') then
    if (intermit = '1') then
      s_nextState <= TIntermit;
    else
      s_nextState <= TGreen2;
    end if;
  else
    s_nextState <= TRed1;
  end if;
```

```
...
```

```
when TYellow1 =>
```

```
...
```

```
when TGreen1 =>
```

```
...
```

```
end case;
```

```
end process;
```

```
end Behavioral;
```

TrafficLightsFSM

clk	yBlink
intermit	red1
	yellow1
	green1
newTime	red2
timeVal	yellow2
timeExp	green2
reset	



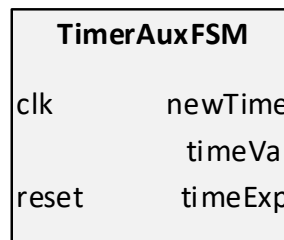
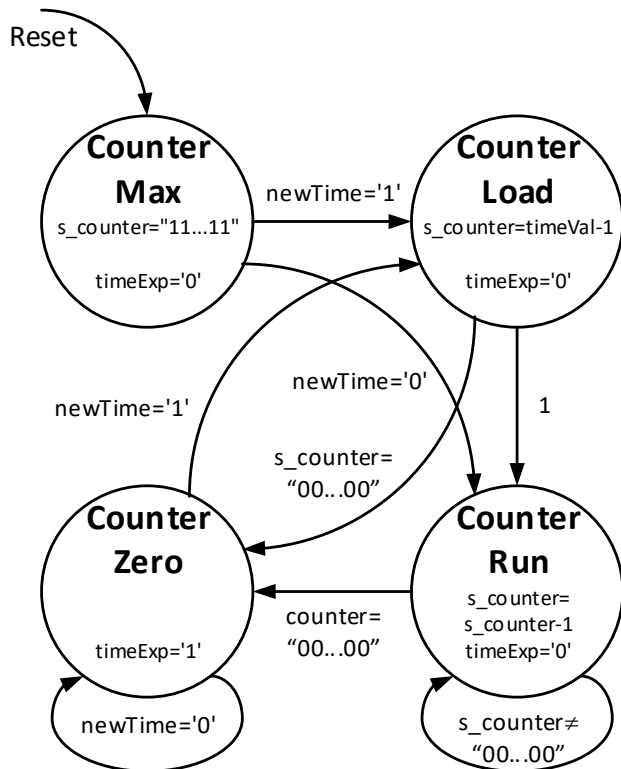
TimerAuxFSM – Código Completo

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

```
entity TimerAuxFSM is
```

```
    port(reset      : in  std_logic;
          clk       : in  std_logic;
          newTime   : in  std_logic;
          timeVal   : in  std_logic_vector(7 downto 0);
          timeExp   : out std_logic);
```

```
end TimerAuxFSM;
```



```
architecture Behavioral of TimerAuxFSM is
```

```
    signal s_counter : unsigned(7 downto 0) := (others => '1');
```

```
    signal s_cntZero : std_logic := '0';
```

```
begin
```

```
    process(clk)
```

```
    begin
```

```
        if (rising_edge(clk)) then
```

```
            if (reset = '1') then
```

```
                s_counter <= (others => '1');
```

```
                s_cntZero <= '0';
```

```
            elsif (newTime = '1') then
```

```
                s_counter <= unsigned(timeVal) - 1;
```

```
                s_cntZero <= '0';
```

```
            else
```

```
                if (s_counter = "00000000") then
```

```
                    s_cntZero <= '1';
```

```
                else
```

```
                    s_counter <= s_counter - 1;
```

```
                    s_cntZero <= '0';
```

```
                end if;
```

```
            end if;
```

```
        end if;
```

```
    end process;
```

```
    timeExp <= s_cntZero;
```

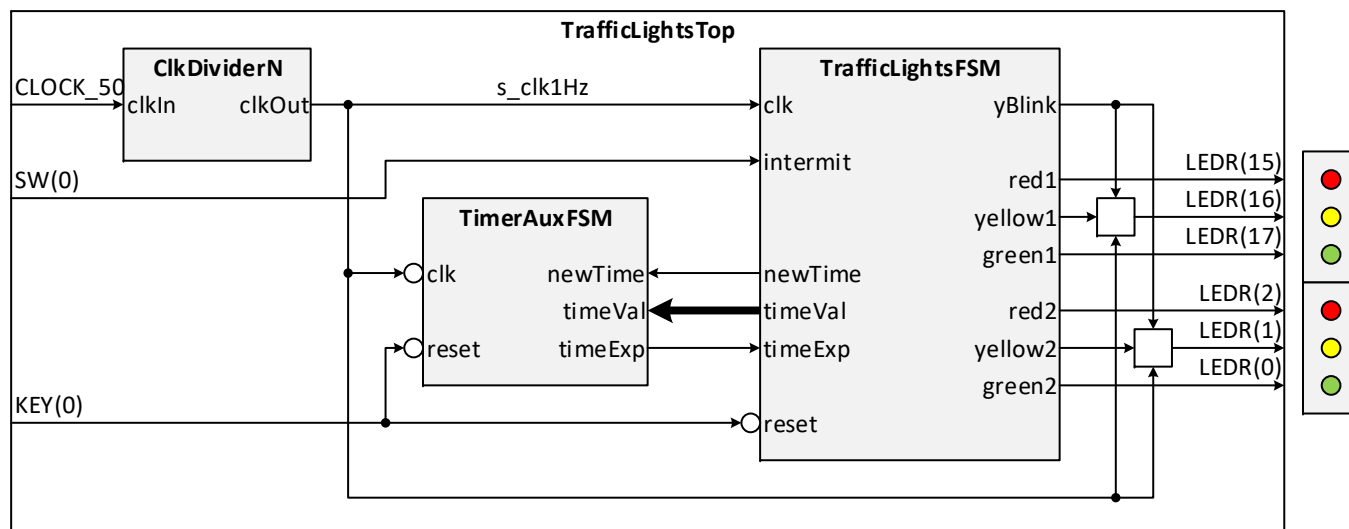
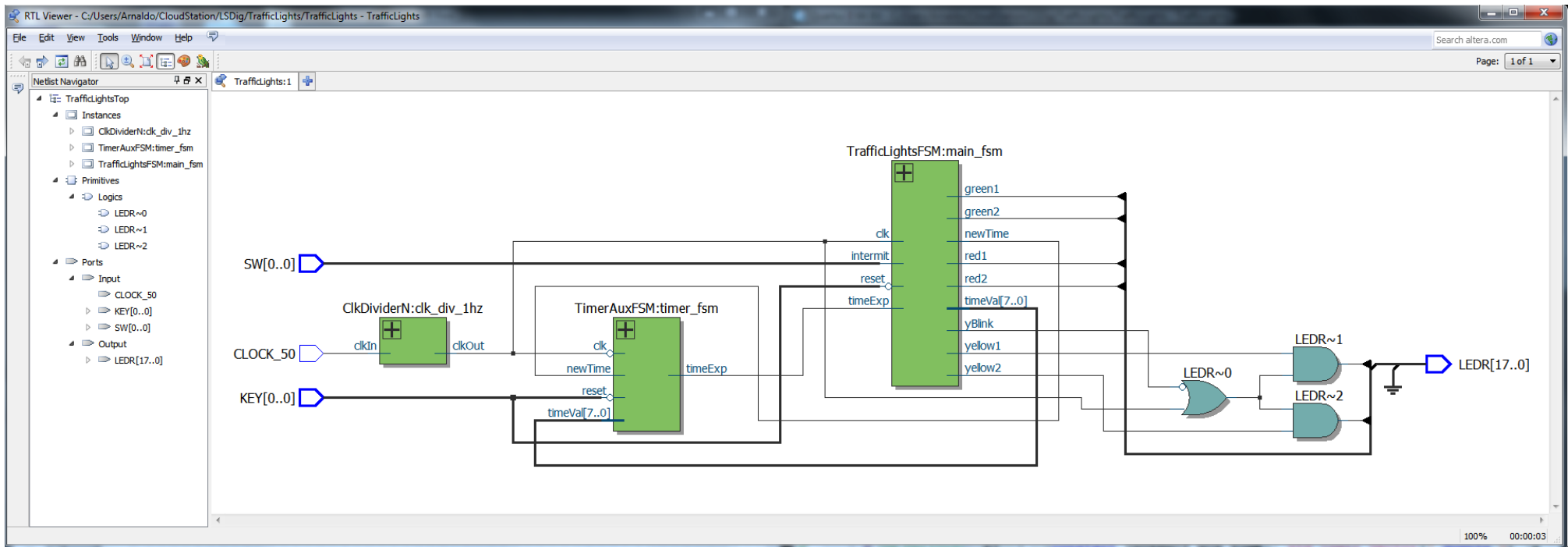
```
end Behavioral;
```

MEF modelada
com um único
processo e
baseada num
contador

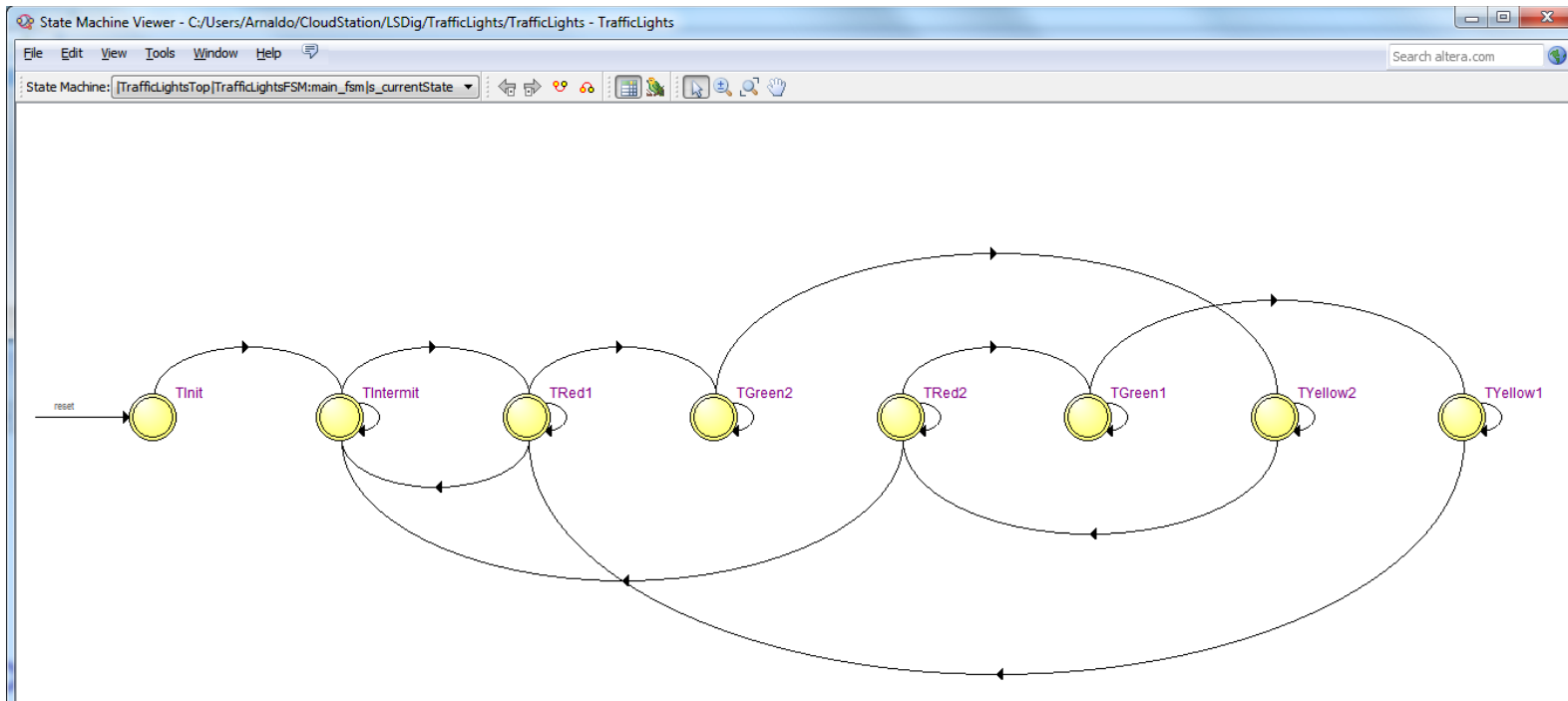
Contador decrescente de
timeVal-1
a 0 (zero)
timeExp toma o valor
'1' quando o contador
atinge o valor zero



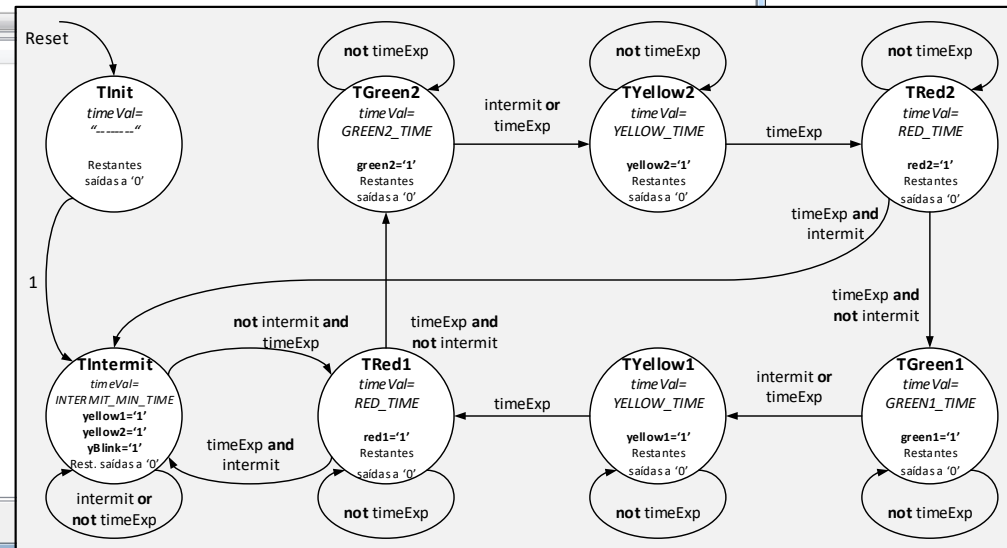
Quartus Prime RTL Netlist Viewer



Quartus Prime State Machine Viewer



Source State	Destination State	Condition
1 TGreen1	TYellow1	(!intermit).(timeExp).(!reset) + (intermit).(!reset)
2 TGreen1	TGreen1	(!intermit).(!timeExp).(!reset)
3 TGreen2	TGreen2	(!intermit).(!timeExp).(!reset)
4 TGreen2	TYellow2	(!intermit).(timeExp).(!reset) + (intermit).(!reset)
5 TInit	TIntermit	(!reset)
6 TIntermit	TRed1	(timeExp).(!intermit).(!reset)
7 TIntermit	TIntermit	(!intermit).(!timeExp).(!reset) + (intermit).(!reset)
8 TRed1	TRed1	(!timeExp).(!reset)
9 TRed1	TGreen2	(!intermit).(timeExp).(!reset)
10 TRed1	TIntermit	(intermit).(timeExp).(!reset)
11 TRed2	TRed2	(!timeExp).(!reset)
12 TRed2	TIntermit	(intermit).(timeExp).(!reset)
13 TRed2	TGreen1	(!intermit).(timeExp).(!reset)
14 TYellow1	TYellow1	(!timeExp).(!reset)
15 TYellow1	TRed1	(timeExp).(!reset)
16 TYellow2	TRed2	(timeExp).(!reset)
17 TYellow2	TYellow2	(!timeExp).(!reset)



Comentários Finais

- No final desta aula e do trabalho prático 9 de LSDig, deverá ser capaz de:
 - Conhecer os passos necessários à síntese de máquinas de estados finitos
 - Recorrer a descrições comportamentais VHDL próximas do diagrama de estados saídas
 - Modelo de *Mealy*
 - Modelo de *Moore*
 - Conceber *testbenches* para a simulação funcional das MEF
 - Desenvolver sistemas baseados em máquinas de estados finitos comunicantes
- ... bom trabalho prático 9, disponível no site da UC
 - elearning.ua.pt