

CIRCUITOS SEQUENCIAIS

**Latch, Flip-Flops e
Modelagem RTL**

Fundamentos de Sistemas Digitais

**Este conjunto de slide
contempla 5 aulas:**

1 – Flip-flops e registradores – 4 a 26 (sala de aula)

2 – Registradores e simulação – 27 a 39 (ex1 e ex2, em laboratório)

3 – Projeto RTL – 40 a 52 (exercícios de interpretação, ex3 e ex4, em laboratório)

4 – Projeto RTL – 53 a 61 (ex5, ex6 e ex7, em laboratório)

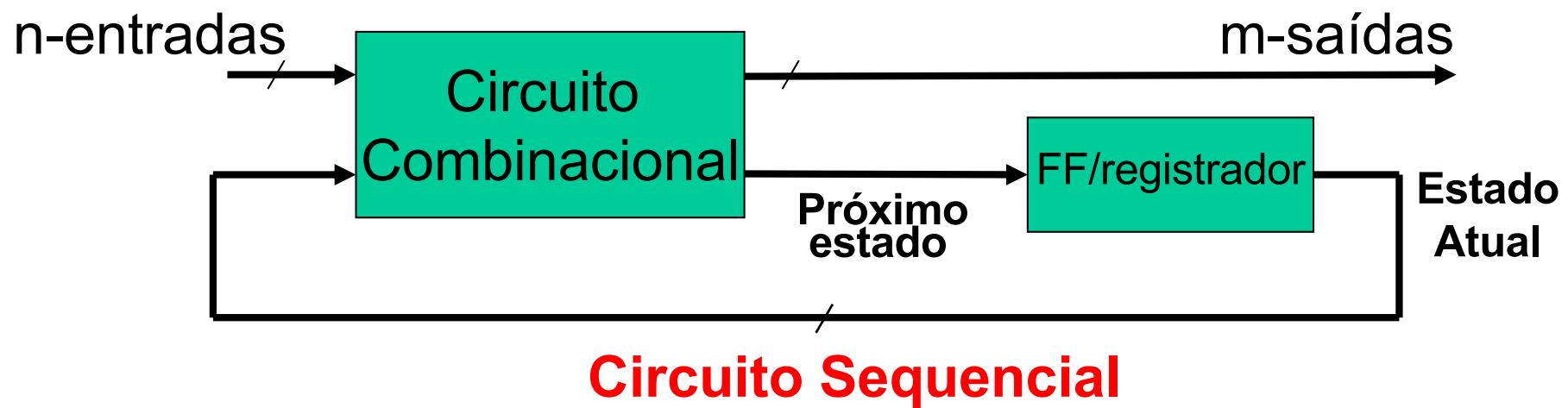
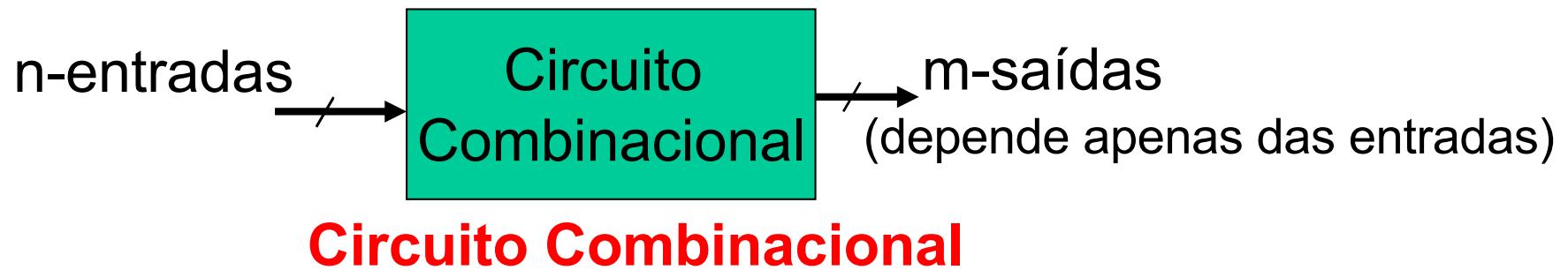
5 – Projeto RTL – 52 a 65 – projeto RTL guiado – ex8

Latches

e

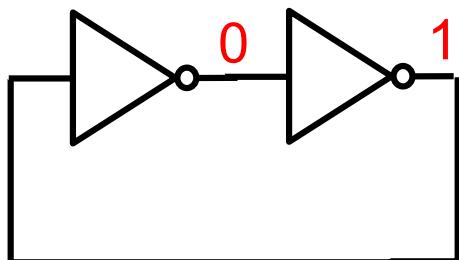
Flip-flops MS

Circuitos Combinacionais versus Sequenciais

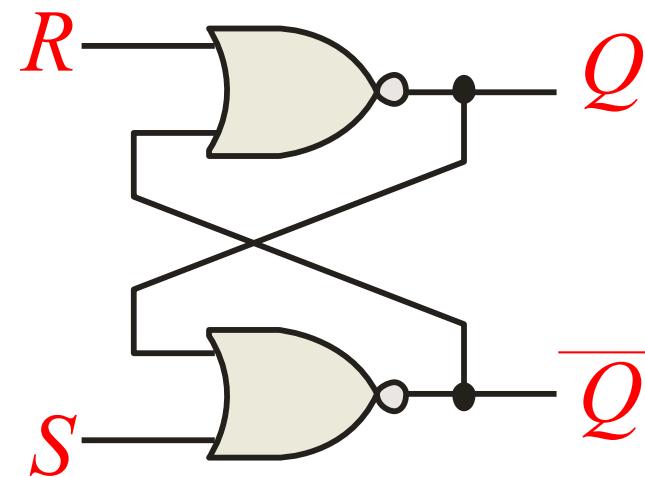
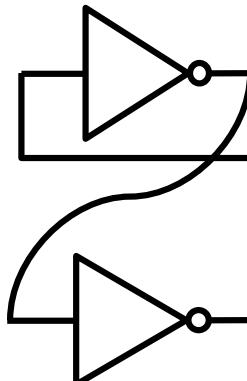


LATCH

- Um **latch** é um dispositivo de armazenamento de dados
- É a forma básica de memória
- A **latch S-R (Set-Reset)** é o tipo mais básico
 - Pode ser construído a partir de portas NOR ou NAND
 - Com portas **NOR**, a latch responde a entradas **altas**
 - Com portas **NAND**, a latch responde a entradas **baixa**



Dois inversores
armazenam 1 bit



R	S	Q	Q-bar
0	0	1	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	0	1

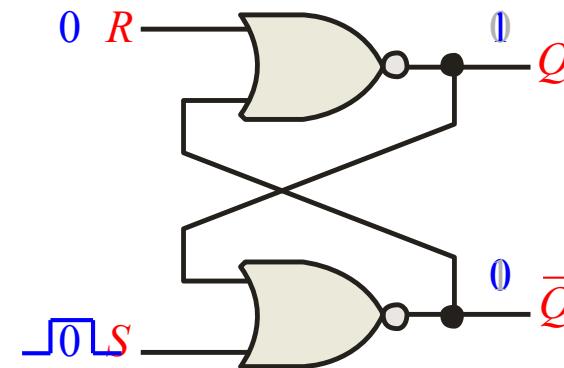
Notar: uma NOR com uma dada entrada em '0' comporta-se como um inverSOR. 5

LATCH - NOR

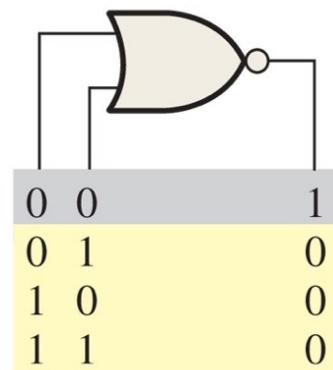
- O **latch** com NOR está em uma condição estável (dado armazenado) quando ambas as entradas estão no nível lógico ZERO

Assumir inicialmente **S** e **R** em '0'.

Para configurar $Q = 1$, um sinal ALTO é aplicado à entrada S enquanto o R permanece BAIXO.



Para RESET, um sinal ALTO é aplicado à entrada R enquanto o S permanece BAIXO.



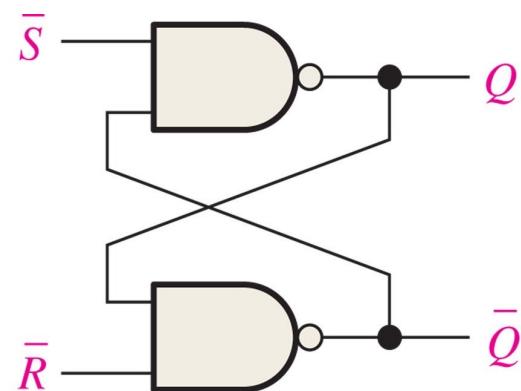
Notar: uma NOR com uma dada entrada em '0' comporta-se como um inversor.

LATCH - NAND

TABLE 7-1

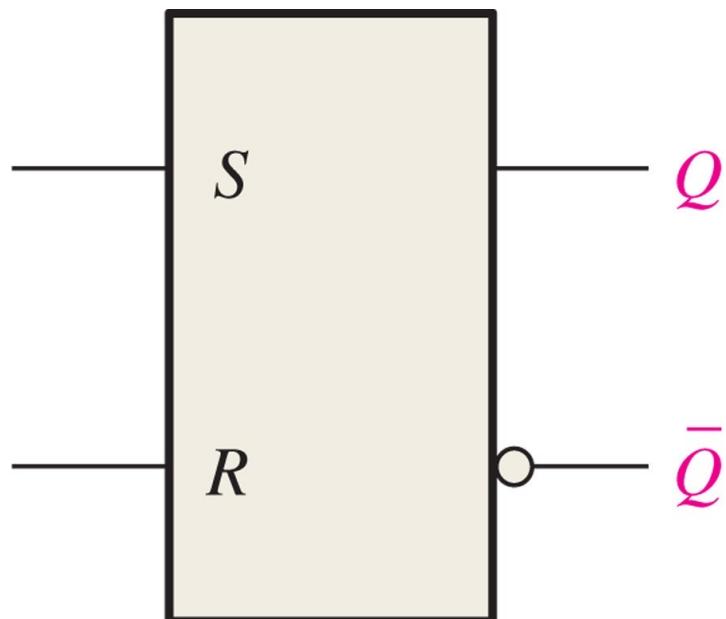
Truth table for an active-LOW input \bar{S} - \bar{R} latch.

Inputs		Outputs		Comments
\bar{S}	\bar{R}	Q	\bar{Q}	
1	1	NC	NC	No change. Latch remains in present state.
0	1	1	0	Latch SET.
1	0	0	1	Latch RESET.
0	0	1	1	Invalid condition

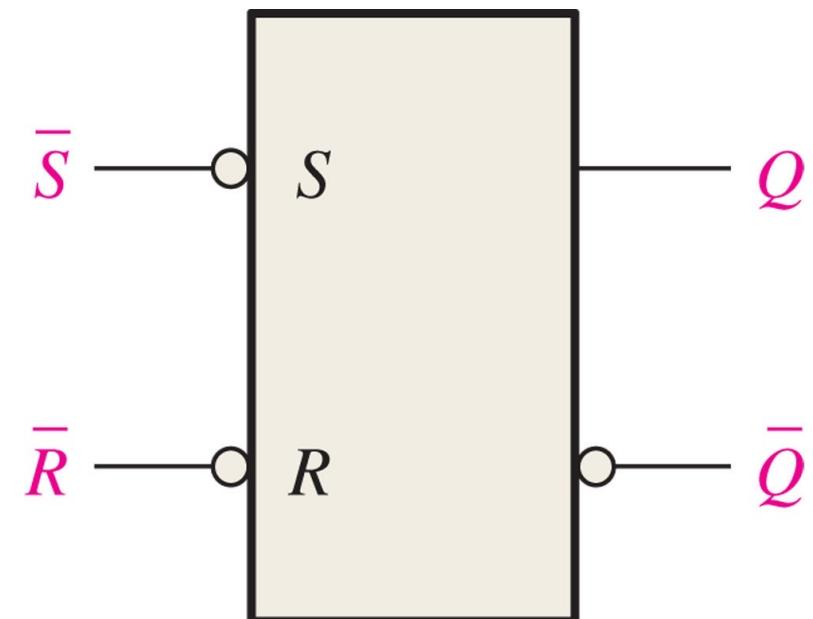


(b) Active-LOW input \bar{S} - \bar{R} latch

Símbolos lógicos para as latches



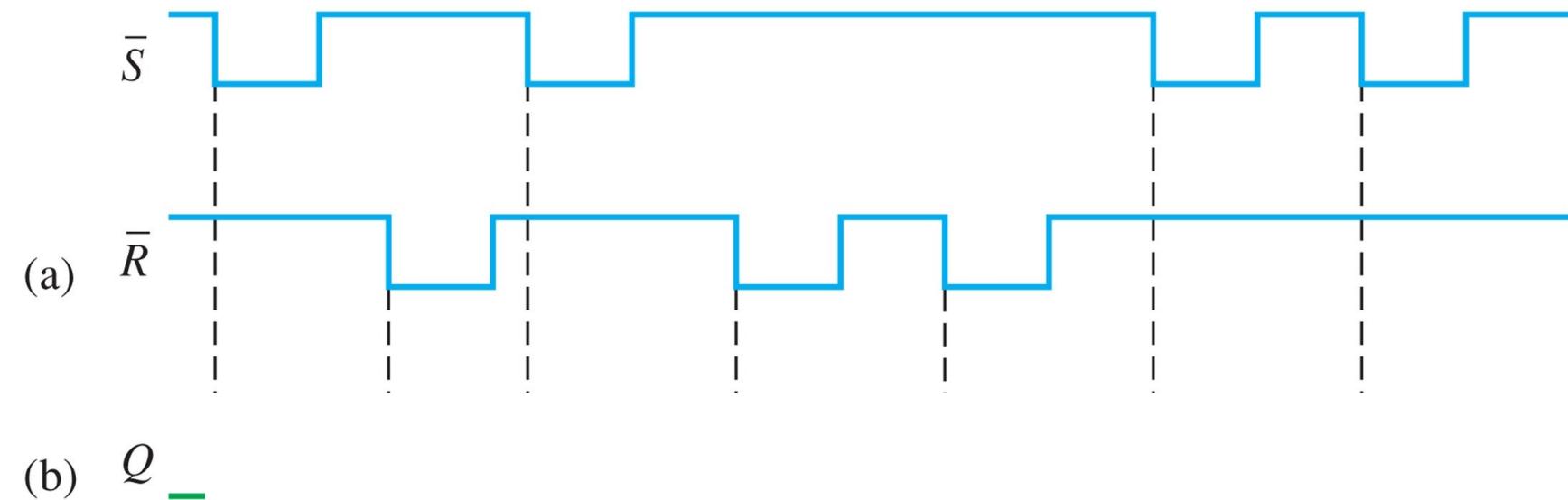
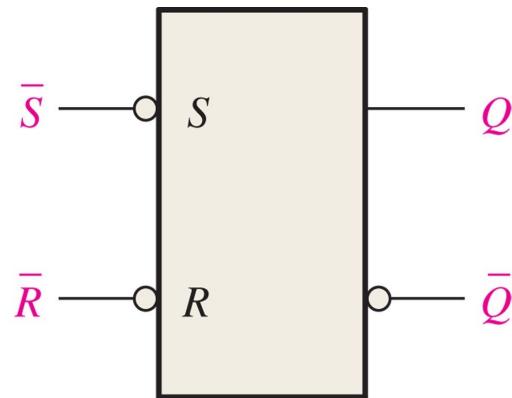
(a) Active-HIGH input
S-R latch



(b) Active-LOW input
 \bar{S} -R latch

FIGURE 7-4

Comportamento da latch



Latch D – tabela verdade

A tabela de verdade para a latch D é apresentada abaixo

- se EN=1, a saída é igual à entrada D
- se EN=0 não há alteração na saída, e o dado está armazenado

Inputs		Outputs		Comments
D	EN	Q	\bar{Q}	
0	1	0	1	RESET
1	1	1	0	SET
X	0	Q_0	\bar{Q}_0	No change

Note: Q_0 is the prior output level before the indicated input conditions were established.

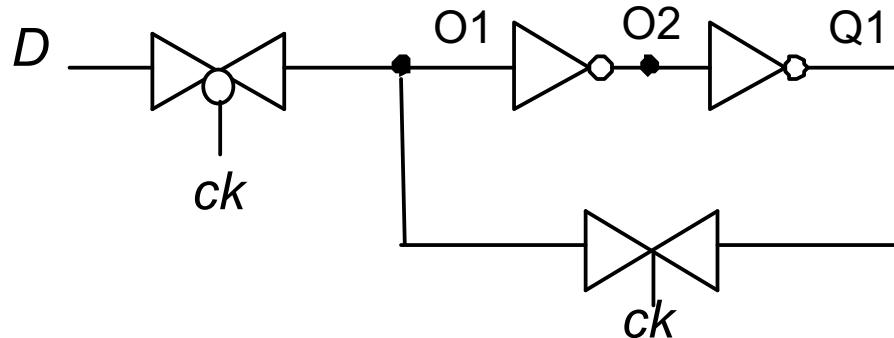
EN: usaremos **clock (clk ou ck)**

Se $ck=1$ a latch esta “**transparente**”

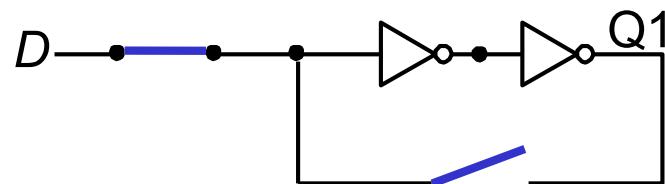
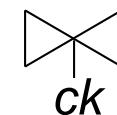
Lach é sensível ao **nível** do ck

Latch D –implementação com chaves

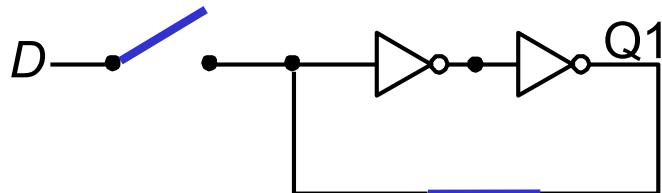
Latch D → bit de memória para memórias caches, por exemplo



2 Inversores em série controlados por chaves



$CK=0 \rightarrow$ saída igual à entrada



$CK=1 \rightarrow$ mantém armazenado o último D lido

Flip-flop D Mestre-Escravo (MS)

- Um flip-flop MS difere de uma latch na forma como ele muda de estados
- Um flip-flop é um dispositivo no qual apenas a **borda** do relógio determina quando um novo bit é armazenado
- A sensibilidade à borda pode ser positiva ou negativa

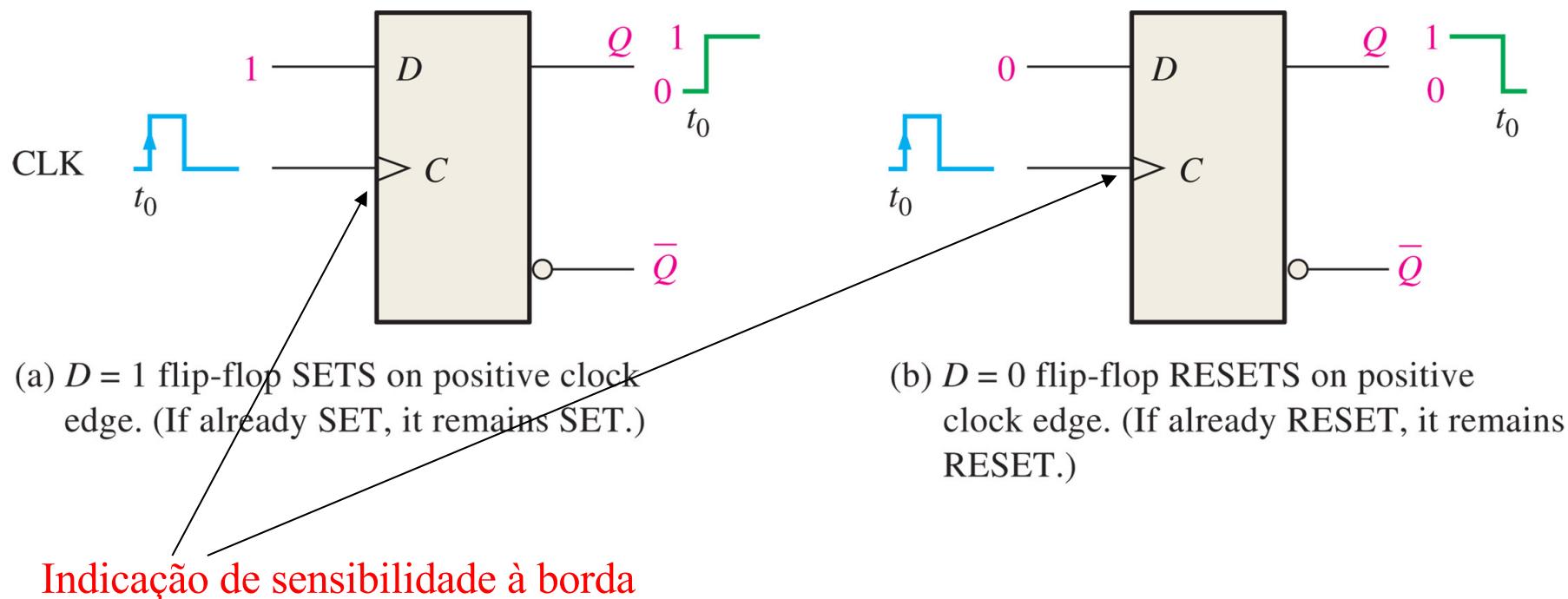


FIGURE 7-14 Operation of a positive edge-triggered D flip-flop.

FFD-MS: Comportamento

TABLE 7-2

Truth table for a positive edge-triggered D flip-flop.

Inputs		Outputs		Comments
D	CLK	Q	\bar{Q}	
0	↑	0	1	RESET
1	↑	1	0	SET

↑ = clock transition LOW to HIGH

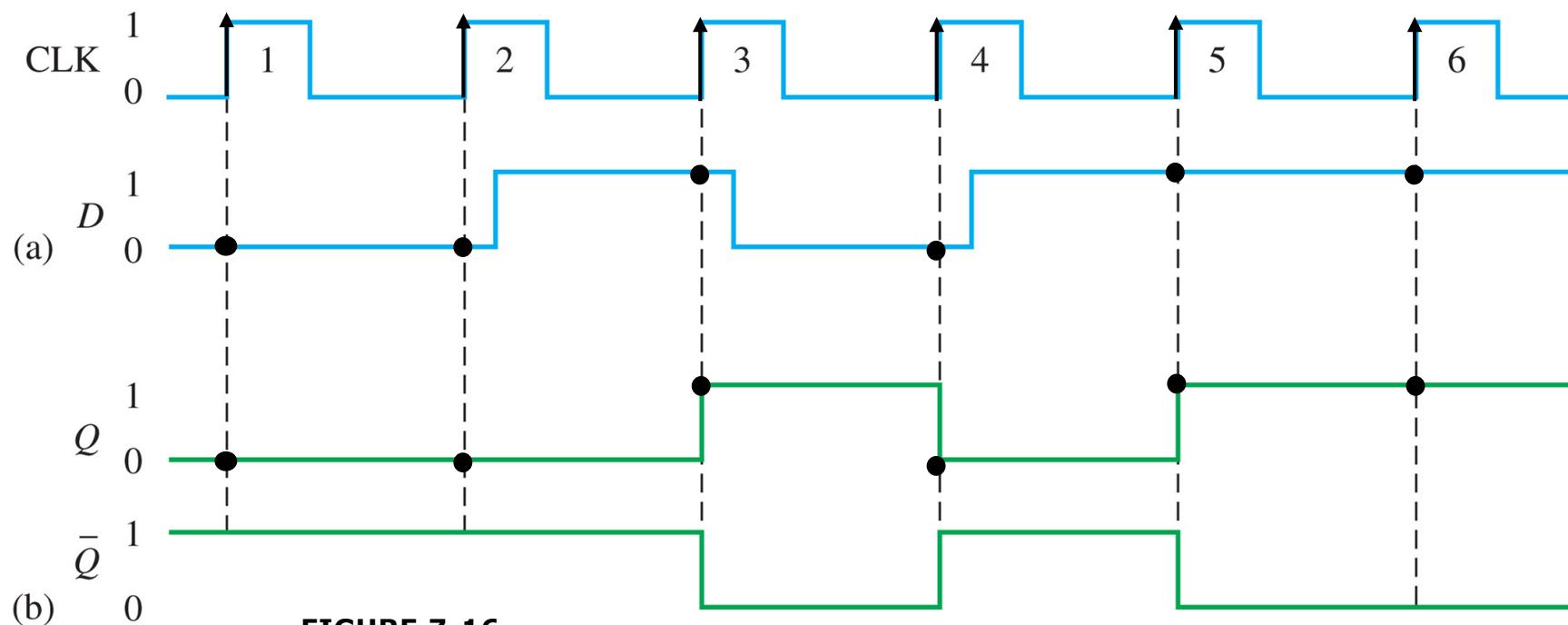
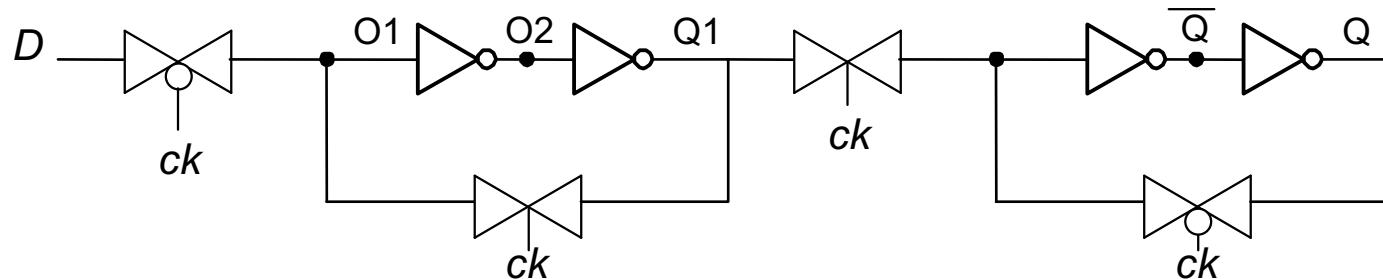


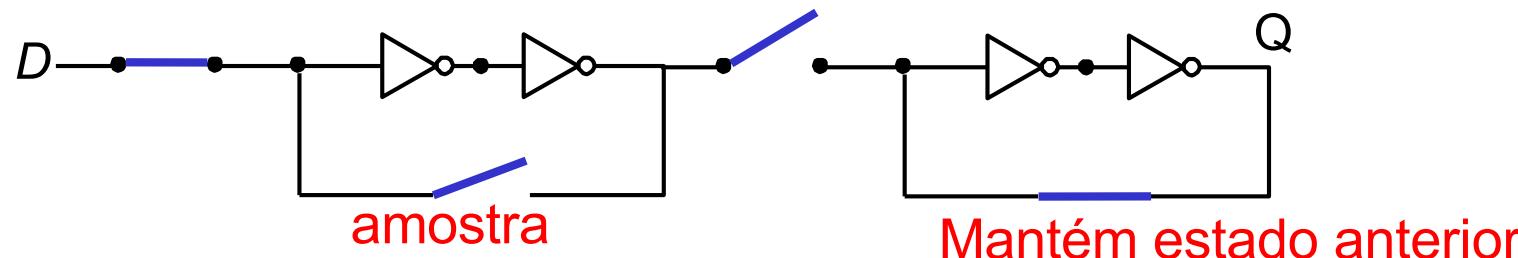
FIGURE 7-16

FFD – Mestre Escravo (implementação com chaves)

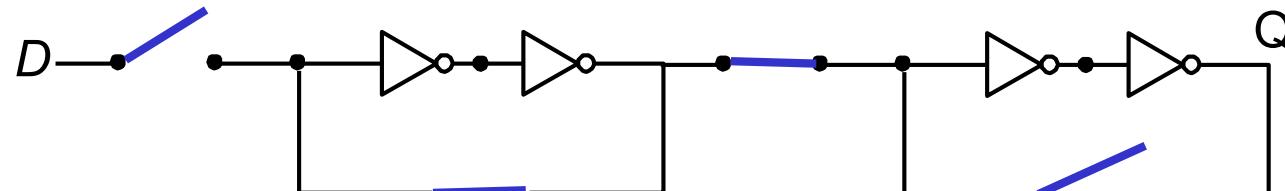
- Implementação utilizando chaves



$CK=0 \rightarrow$ Mestre amostra e escravo mantém o estado anterior



CK sobe \rightarrow Informação transferida para a saída



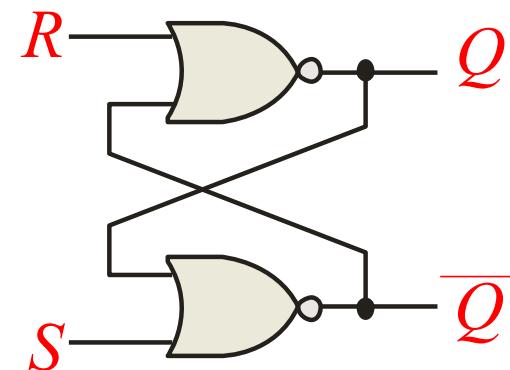
Transfere novo dado para saída e mantém o dado armazenado

LATCH S-R EM SV

```
module sr_latch (
    input logic S, R,
    output logic Q, nQ
);

    always_comb begin
        Q = ~(R | nQ);
        nQ = ~(S | Q);
    end

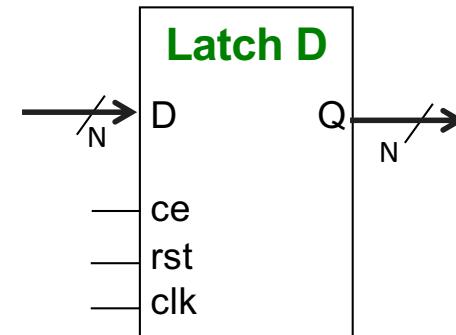
endmodule
```



LATCH D EM SV

```
module latch #(parameter int N = 16)
( input logic clk,
  input logic rst,
  input logic ce,
  input logic [N-1:0] D,
  output logic [N-1:0] Q
);
```

```
  always_latch begin
    if (rst)
      Q = '0;
    else if (clk && ce)
      Q = D;
  end
endmodule
```



O comando **always_latch** é usado para descrever um elemento de memória que lê a entrada enquanto uma condição de controle (como o clock) está ativa.

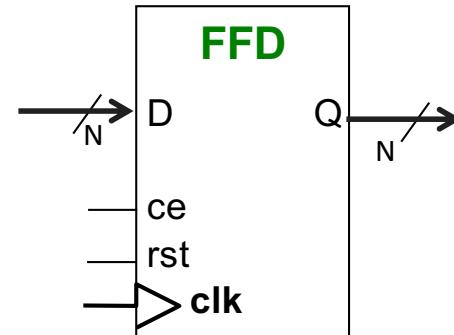
FLIP-FLOP D MESTRE-ESCRAVO EM SV

```
module ffd_ms #(parameter int N = 16)
( input logic clk,
  input logic rst,
  input logic ce,
  input logic [N-1:0] D,
  output logic [N-1:0] Q
);
```

```
  always_ff @ (posedge clk or posedge rst) begin
```

```
    if (rst)
      Q <= '0;
    else if (ce)
      Q <= D;
  end
```

```
endmodule
```



Define a **sensibilidade do bloco**:

- **posedge rst** → reage na **borda de subida** do sinal de reset (ou seja, assim que rst se torna 1). Isso define um **reset assíncrono**: o bloco será executado imediatamente quando rst subir, independentemente do clock.
- **posedge clk** → reage na **borda de subida** do sinal de clock.

@: **event control**. Executa o bloco sempre que ocorrer **um evento** nos sinais listados na “lista de sensibilidade”.

FLIP-FLOP D MESTRE-ESCRAVO EM SV

```
module ffd_ms #(parameter int N = 16)
( input logic clk,
  input logic rst,
  input logic ce,
  input logic [N-1:0] D,
  output logic [N-1:0] Q
);

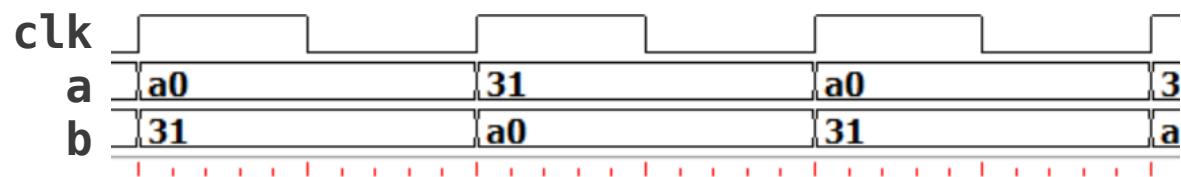
  always_ff @(posedge clk or posedge rst) begin
    if (rst)
      Q <= '0;
    else if (ce)
      Q <= D;
  end
endmodule
```

- A atribuição `=` é denominada **bloqueante**, é usada dentro de blocos `always_comb`, executa e atualiza o lado esquerdo de atribuição **imediatamente**.
- Atribuição `<=` é denominada **não-bloqueante** é usada em lógica sequencial (dentro de `always_ff`). Todas as `<=` são executadas simultaneamente ao ocorrer o evento de “gatilho”.

Explicando bloqueante e não bloqueante

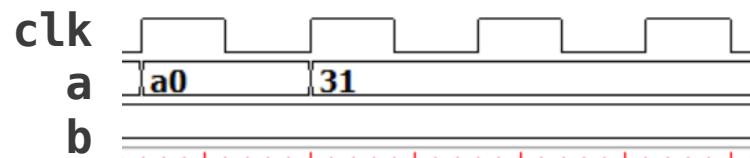
```
always_ff @(posedge clk) begin
    a <= b;
    b <= a;
end
endmodule
```

Na borda de subida a e b trocam de valor de forma determinística



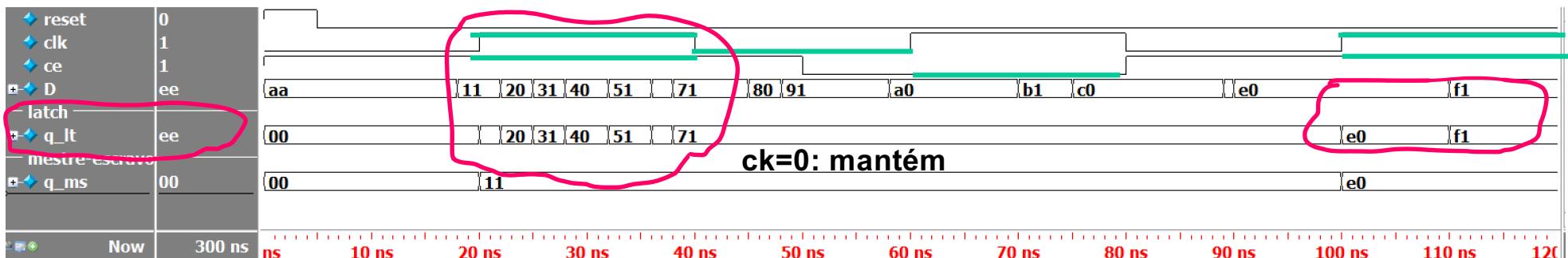
```
always_ff @(posedge clk) begin
    a = b;
    b = a;
end
endmodule
```

Bloqueante ($a = b$; $b = a$), a recebe b, e depois b recebe a, fazendo ambos iguais — não uma troca

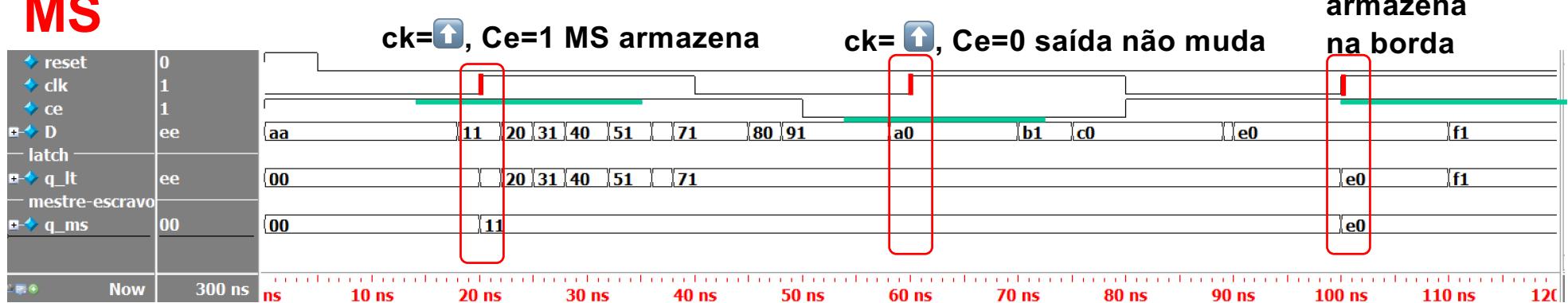


LATCH e MS – diferença de comportamento

LATCH



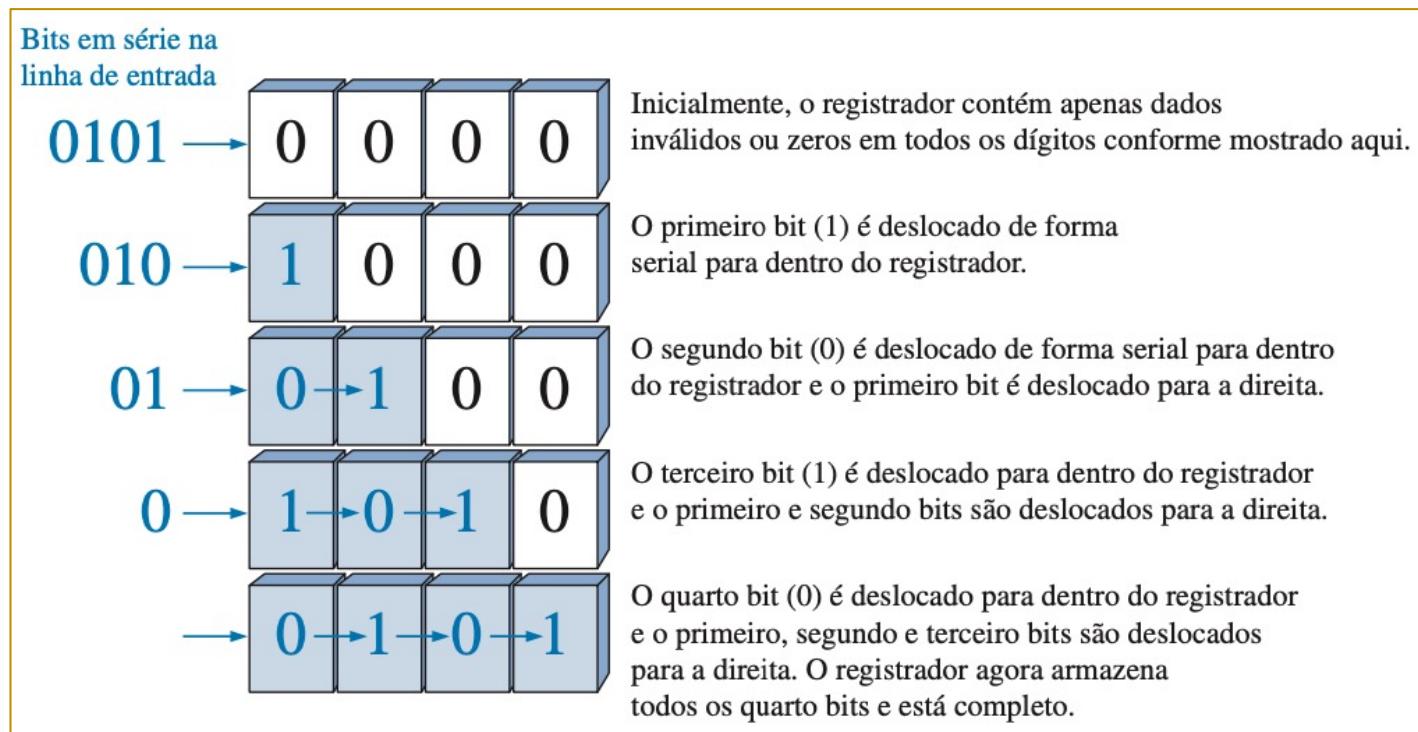
MS



REGISTRADOR

Um **registraror** é formado pela combinação de vários **flip-flops** de forma que um grupo de bits possa ser armazenado.

- ✓ Exemplo de **registraror com entrada serial** de 4 bits que é construído a partir de quatro **flip-flops**:



REGISTRADOR

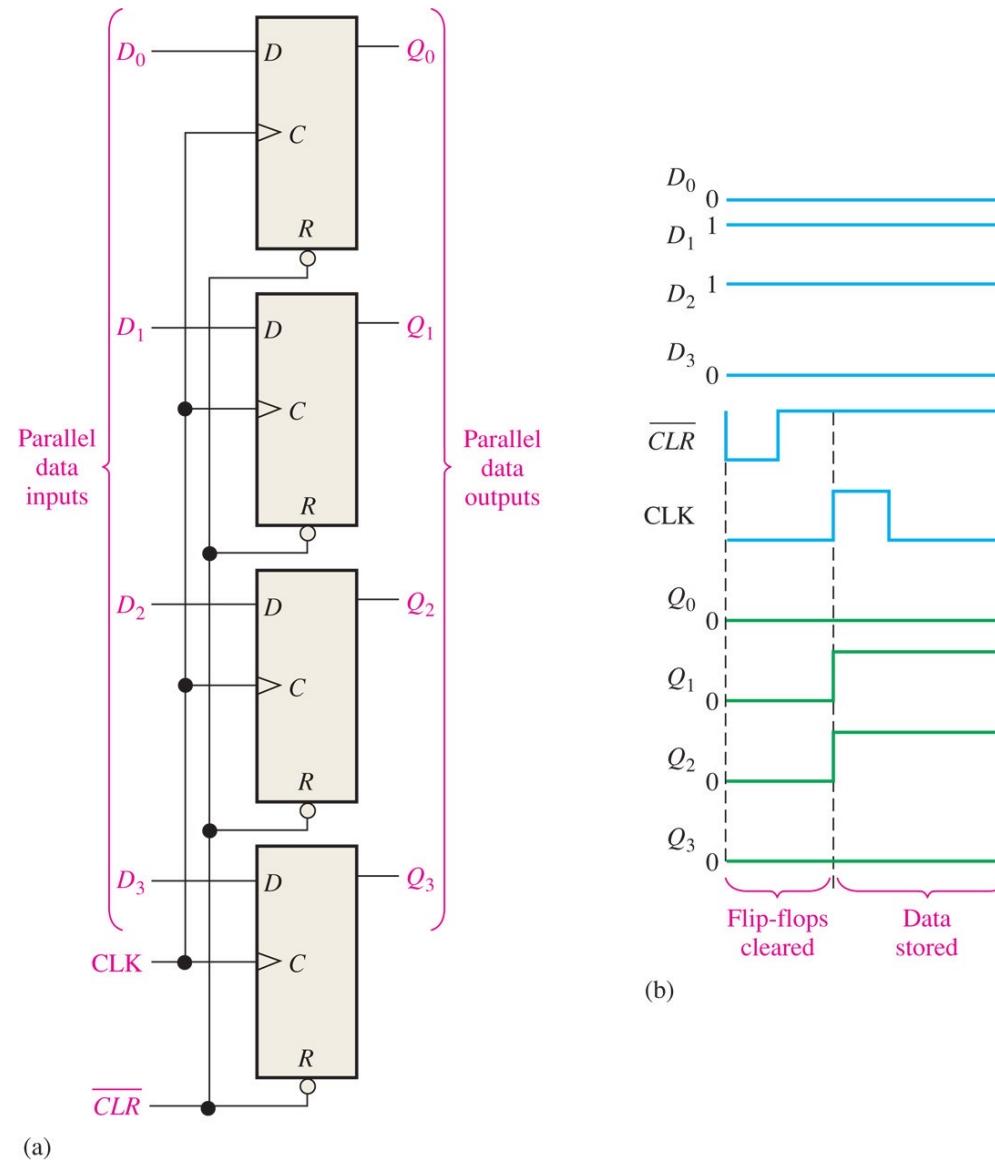


FIGURE 7-35 Example of flip-flops used in a basic register for parallel data storage.

REGISTRADOR

- registradores são sinais declarados em *always_ff* com sinal de sincronismo (exemplo: *clock*)
- para efeito de síntese e simulação, é aconselhável introduzir um reset assíncrono
- ce: *enable*

```
always_ff @(posedge clock or posedge reset)
begin
    if (reset)
        reg <= '0; // zera reg
    else if (ce)
        reg <= barramento_A;
end
```

@: **event control.** Execute o bloco sempre que ocorrer **um evento** nos sinais listados na sensibilidade.

REGISTRADOR

- Registrador com largura de palavra parametrizável

```
module regnbit #(parameter int N = 16)
  (input logic ck,
   input logic rst,
   input logic ce,
   input logic [N-1:0] D,
   output logic [N-1:0] Q
);
```

Parameter N
define o
número de bits
do registrador

```
always_ff @(posedge ck or posedge rst) begin
  if (rst)
    Q <= '0; // zera
  else if (ce)
    Q <= D;
end
endmodule
```

Uso:

```
regnbit #(.N(8)) rx (.ck(ck), .rst(rst),
                      .ce(ce), .D(D), .Q(Q));
```

```

module tb;
    logic ck = 0;
    logic reset, ce;
    logic [7:0] D, Q1;

    regnbit #(.N(8)) rx (.ck(ck), .rst(reset), .ce(ce), .D(D), .Q(Q1));

    always #5 ck = ~ck;

    initial begin
        reset = 1;
        #4 reset = 0;
    end

    initial begin // Enable sempre ativo
        ce = 1;
    end

    // Estímulo com valores e tempos aleatórios entre 8'h00 e 8'hAA
    initial begin
        int unsigned i;
        for (i = 0; i < 20; i++) begin
            D = $urandom_range(8'h00, 8'hAA);
            #($urandom_range(5, 20)); // intervalos random entre 5 ns e 20 ns
        end
        $finish;
    end

endmodule

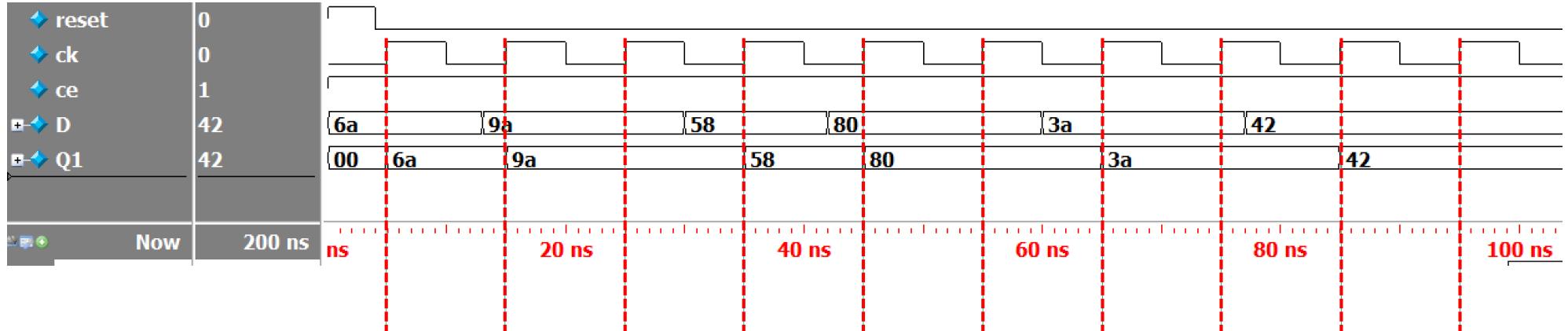
```

Simulando o Registrador

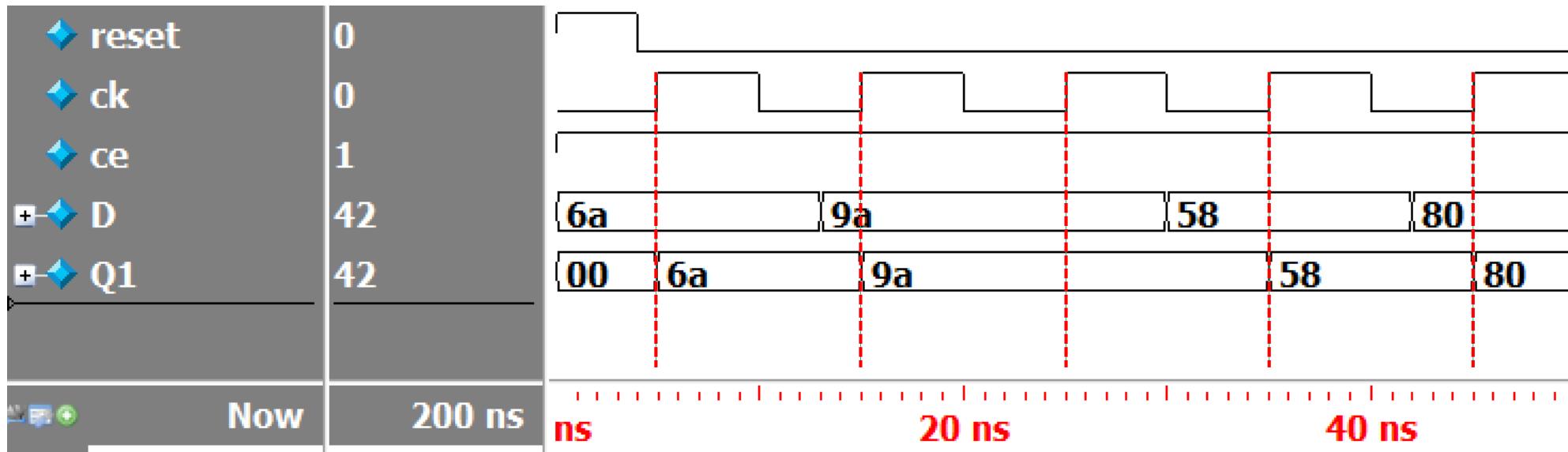
=

--

Simulando o Registrador



- sensibilidade à borda de subida do clock
- tempo de *setup* respeitado



REGISTRADOR DE DESLOCAMENTO

Exemplo de registrador de deslocamento:

```
module shift_reg #(parameter int N = 16)
  ( input logic ck, rst,
    input logic [N-1:0] in,
    output logic [N-1:0] out
  );

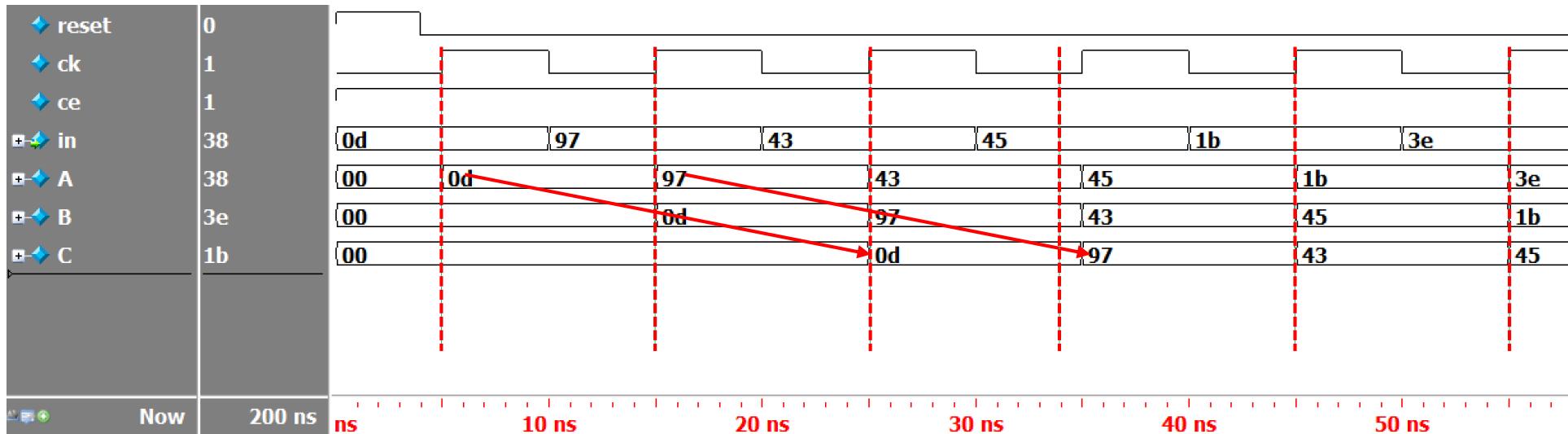
  logic [N-1:0] A, B, C;

  assign out = C;

  always_ff @ (posedge ck or posedge rst) begin
    if (rst) begin
      A <= '0;
      B <= '0;
      C <= '0;
    end
    else begin
      A <= in;
      B <= A;
      C <= B;
    end
  end
end
```

- 1) Desenhe este circuito acima utilizando flip-flops
- 2) A ordem das atribuições (A,B,C) é importante ? O que ocorreria se fosse uma linguagem de programação tipo C?

REGISTRADOR DE DESLOCAMENTO



```
always_ff @(posedge ck or posedge rst) begin
    if (rst) begin
        A <= '0;
        B <= '0;
        C <= '0;
    end
    else begin
        A <= in;
        B <= A;
        C <= B;
    end
end
```

REGISTRADOR DE DESLOCAMENTO

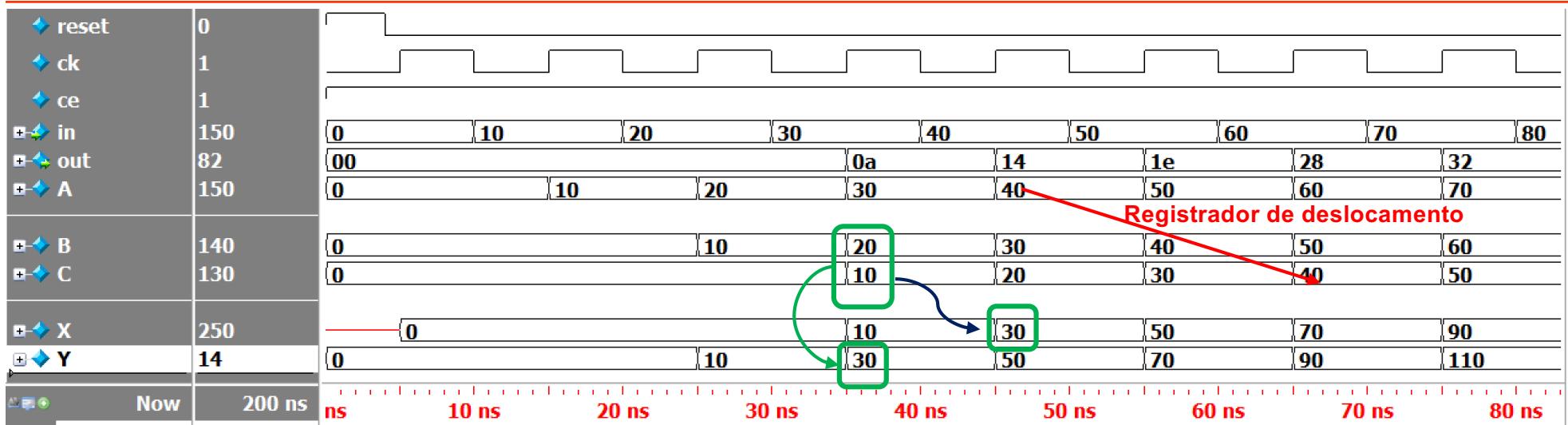
- Atribuição dentro/fora de *always_ff*

```
always_ff @(posedge ck or posedge rst) begin
    if (rst) begin
        A <= '0;
        B <= '0;
        C <= '0;
    end
    else begin
        A <= in;
        B <= A;
        C <= B;
        X <= B + C;
    end
end
assign Y = B + C;
```

Qual a diferença de comportamento nas atribuições à X e a Y?

- sinais atribuídos em *always_ff* são sempre flip-flops/registradores (não bloqueante)
- Sinais com lógica combinacional (*assign*) representam o valor atual (bloqueante)

REGISTRADOR DE DESLOCAMENTO – SIMULAÇÃO



Y: soma atual

X: soma registrada – ciclo seguinte

```

always_ff @(posedge ck or posedge rst) begin
    if (rst) begin
        A <= '0;
        B <= '0;
        C <= '0;
    end
    else begin
        A <= in;
        B <= A;
        C <= B;
        X <= B + C;
    end
end
assign Y = B + C;

```

REGISTRADOR – formas de entrada de dados

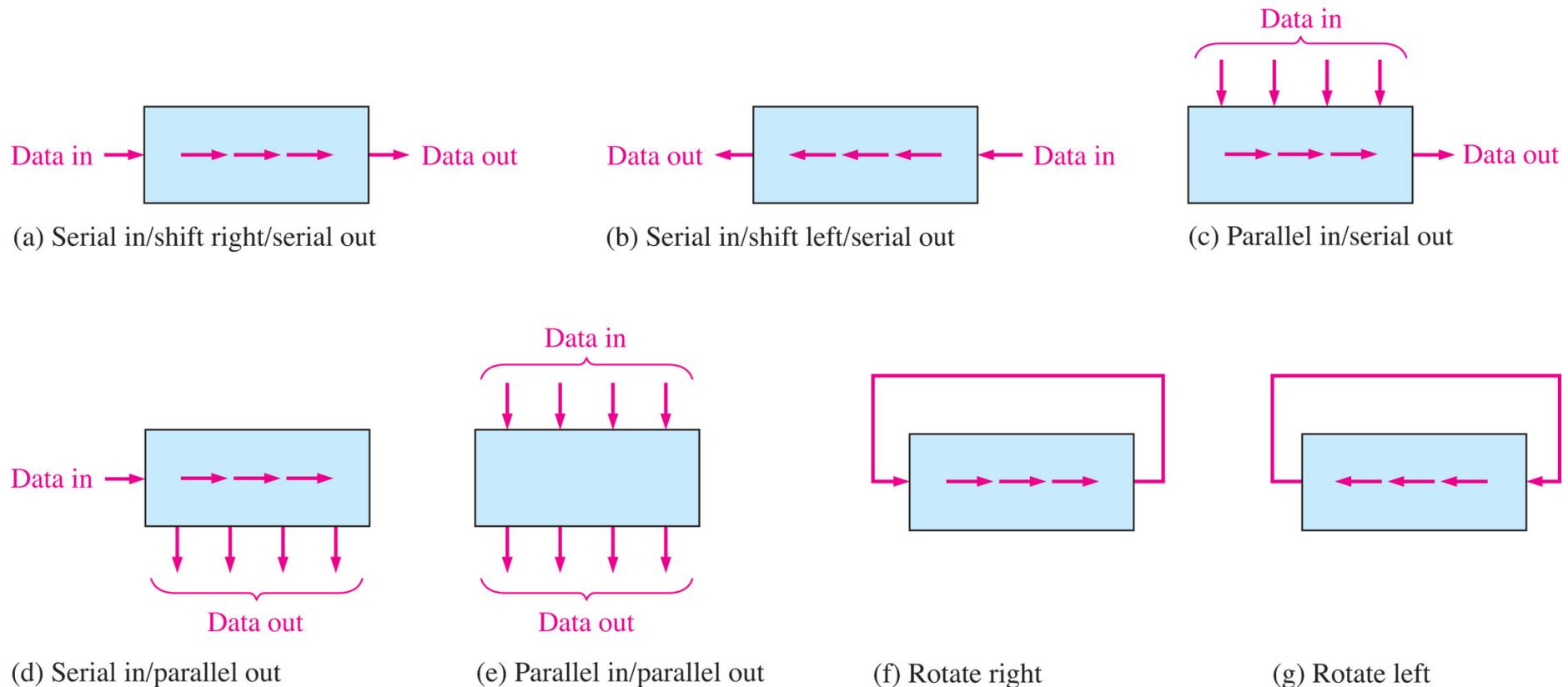


FIGURE 8-2 Basic data movement in shift registers. (Four bits are used for illustration. The bits move in the direction of the arrows.)

REGISTRADOR – carga serial

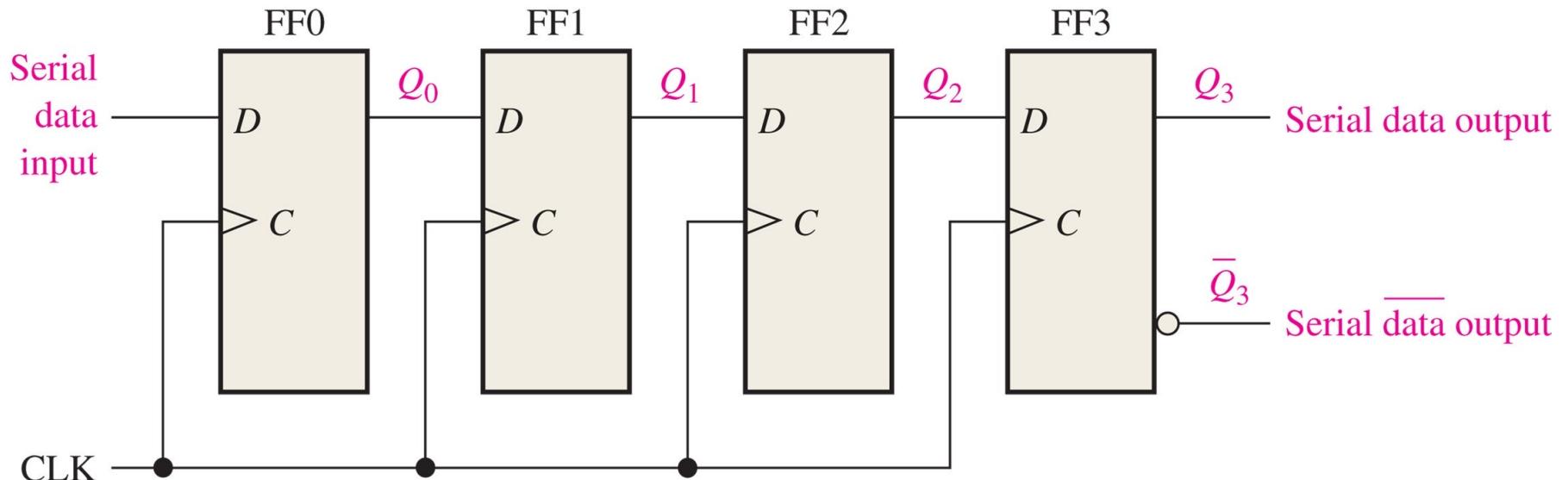


TABLE 8-1

Shifting a 4-bit code into the shift register in Figure 8–3.
Data bits are indicated by a beige screen.

CLK	FF0 (Q_0)	FF1 (Q_1)	FF2 (Q_2)	FF3 (Q_3)
Initial	0	0	0	0
1	0	0	0	0
2	1	0	0	0
3	0	1	0	0
4	1	0	1	0

REGISTRADOR – carga serial

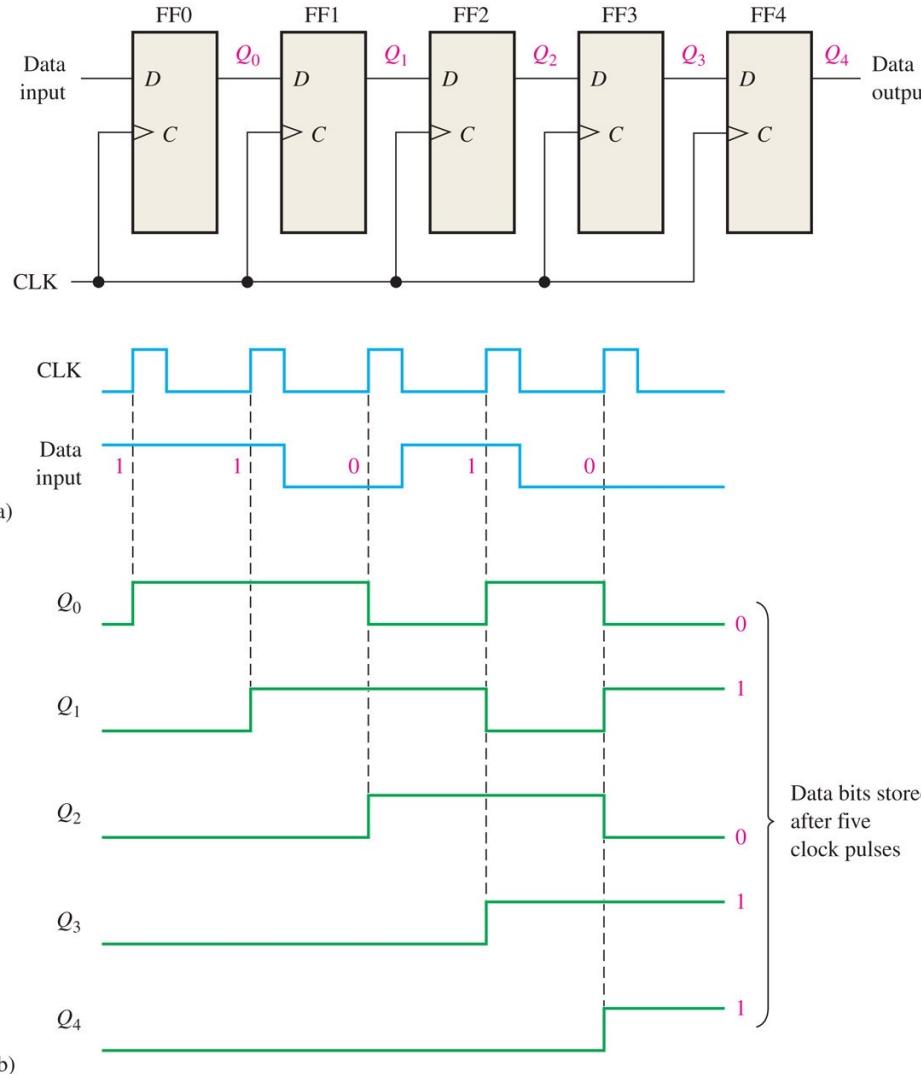
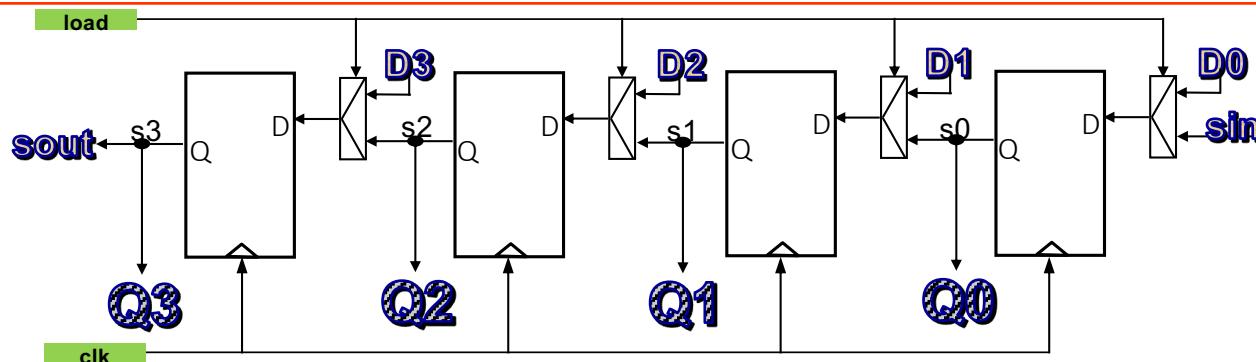


FIGURE 8-4

REGISTRADOR CARGA PARALELA E SERIAL

PARA
4 BITS



```
module serial_in #(parameter int N = 8)
( input logic clk, reset, load, sin,
  input logic [N-1:0] d,
  output logic [N-1:0] q,           saída paralela
  output logic sout                saída serial
);

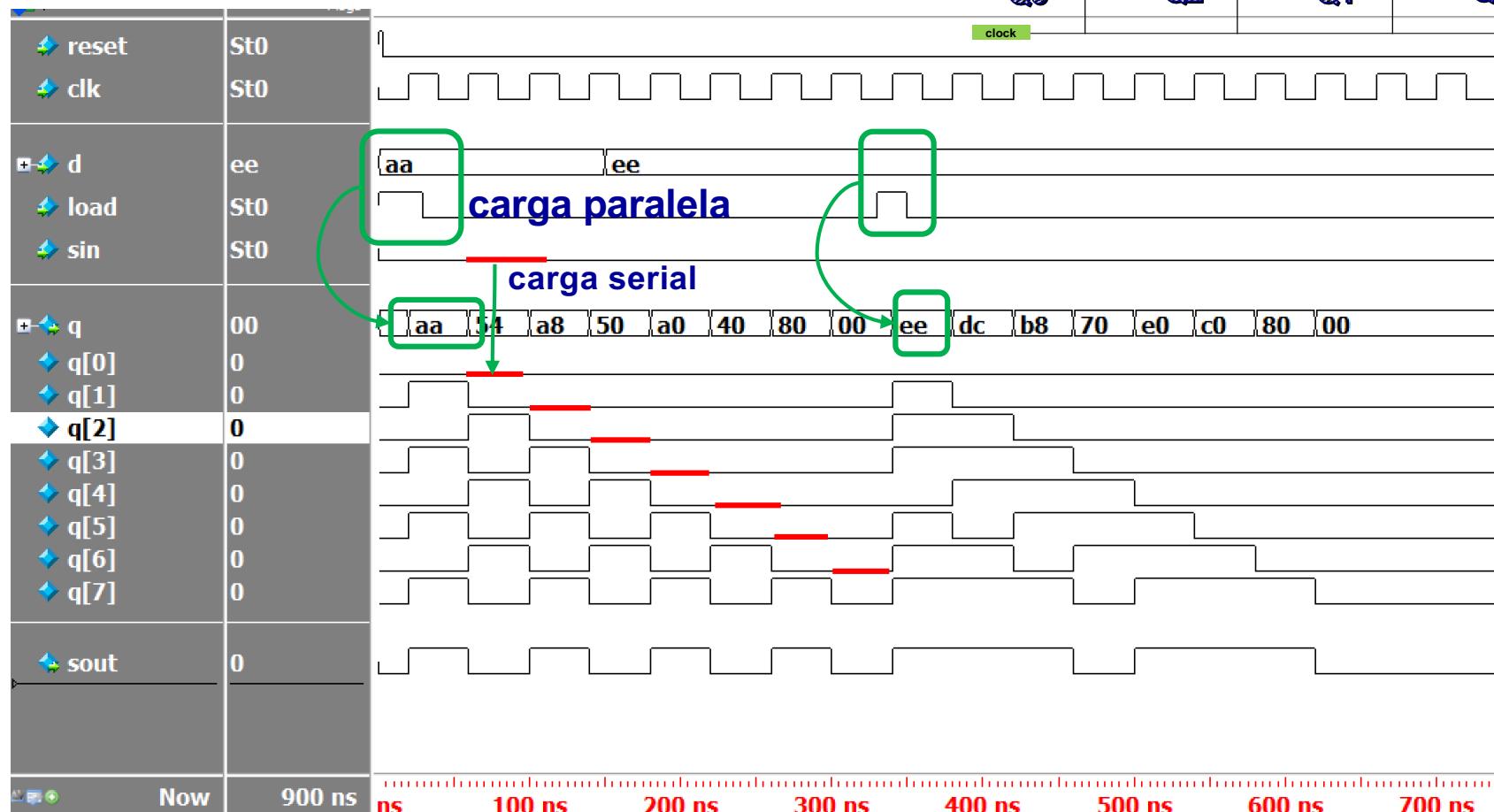
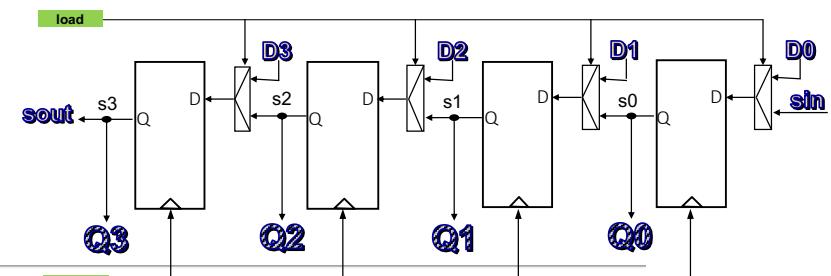
  always_ff @(posedge clk or posedge reset) begin
    if (reset)
      q <= '0;                      controle de carga paralela ou serial
    else
      q <= load ? d : {q[N-2:0], sin}; // multiplexador
  end

  assign sout = q[N-1]; // MSB

endmodule
```

REGISTRADOR CARGA PARALELA E SERIAL

**Deslocamento à esquerda multiplica por 2
AA → (1) 54 → A8 → (1)50 →A0**



AA **54** **A8**
1010 1010 **0101 0100** **1010 1000**

CONTADOR– 2^n estados

```
module contup (
    input logic clock,reset, Load, Enable,
    input logic [5:0] DATABUS,
    output logic [5:0] Upcount
);

    always_ff @(posedge clock or posedge reset) begin
        if (reset)
            Upcount <= '0;
        else if (Enable) begin
            Upcount <= Load ? DATABUS : Upcount + 1;
        end
    end
endmodule
```

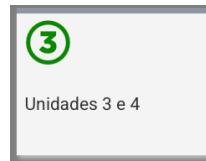
(1) Determine o comportamento deste contador, fazendo um diagrama de tempos.

(2) Como modificar o contador para realizar contagem crescente/decrescente?

```
else if (Enable)
    Upcount <= Load ? DATABUS :
        UpDown ? Upcount + 1 :
        Upcount - 1;
```

Exercício de Simulação 1

- Baixe do Moodle o arquivo **sequenciais_sv.zip** →
 - Em “material de apoio” → “Material de apoio a SV” → **sequenciais_sv.zip**
- Abra o arquivo **ex1.sv** e o analise
 - Quais os módulos de hardware que estão sendo modelados nesta descrição?
- Simule este arquivo executando **vsim -do sim.do**
 - Explique a diferença observado entre as saídas ‘q_ms’ e ‘q_lt’.
 - Qual sinal é sensível ao nível?
 - Qual sinal é sensível à borda?

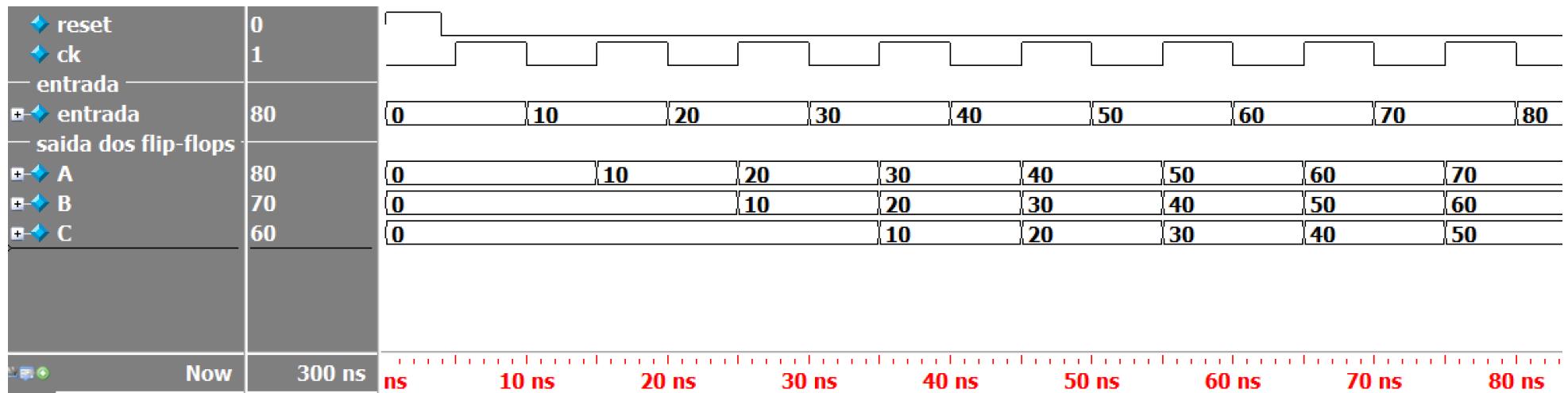


[Material de Apoio Simulação SystemVerilog \(SV\)](#)
[Material de Apoio para Simulação de Flip-Flops e RTL](#) ←
[Material de Apoio para Simulação de FSMs](#)
[Material de Apoio para a Simulação da NanoCPU](#)

```
sequenciais_sv/
└── ex1
    ├── ex1.sv
    └── sim.do
└── ex2
    ├── ex2.sv
    └── sim.do
└── ex3
    ├── ex3.sv
    └── sim.do
└── ex4
    ├── ex4_tb.sv
    ├── ex4.sv
    └── sim.do
└── ex5
    ├── ex5_tb.sv
    ├── ex5.sv
    ├── sim.do
    └── wave.do
└── ex6
    ├── ex6_tb.sv
    ├── ex6.sv
    ├── sim.do
    └── wave.do
└── ex7
    ├── ex7_tb.sv
    ├── ex7.sv
    ├── sim.do
    └── wave.do
└── ex8
    ├── ex8_tb.sv
    ├── ex8.sv
    ├── sim.do
    └── wave.do
```

Exercício de Simulação 2

- Abra o arquivo **ex2.sv** e o analise
 - Qual o módulo de hardware que está sendo modelados nesta descrição?
- Simule este arquivo executando *do sim.do*
 - Explique o comportamento observado nos registradores A/B/C
 - Porque, apesar de estarem em série, o valor da entrada não é transferido para a saída C?



Exercício de Simulação 2b

- No arquivo **ex2.sv** faça as seguintes modificações *shift_reg*
 - Acrescente os sinais, X e Y, de mesma largura dos registradores
 - Acrescente as atribuições dentro e fora do *always_ff*:

```
    always_ff @ (posedge ck or posedge rst) begin
        if (rst) begin
            A <= '0;
            B <= '0;
            C <= '0;
        end
        else begin
            A <= in;
            B <= A;
            C <= B;
            X <= B + C;
        end
    end
    assign Y = B + C;
```

- Simule o arquivo modificado com as novas somas
 - Explique o comportamento observado nos sinais X e Y

Ver resposta na lâmina 29

Projeto RTL

PROJETO RTL

- Nos projetos de sistemas digitais, a descrição da operação de um circuito síncrono digital recebe o nome de **RTL** (do inglês *Register Transfer Level*)
- Em um projeto RTL, o **comportamento** do circuito é descrito em termos do fluxo de sinais, ou transferência de dados entre os registradores presentes no hardware e as operações lógicas conduzidas com estes sinais
- A abstração RTL é usada em linguagens de descrição de hardware como **SystemVerilog**
- Ferramentas de **simulação lógica** utilizam a descrição RTL para verificar sua funcionalidade
- A descrição RTL é usualmente convertida para a descrição no nível de portas lógicas por uma ferramenta de **síntese lógica**. O resultado da síntese representa a descrição física do circuito

Descrição RTL. Considere o circuito descrito pelo código SystemVerilog abaixo utilizando portas lógicas, multiplexadores, registradores e contadores. Desenhar o circuito equivalente e indicar no desenho os sinais que são do tipo entrada e saída, e o número de fios em cada sinal

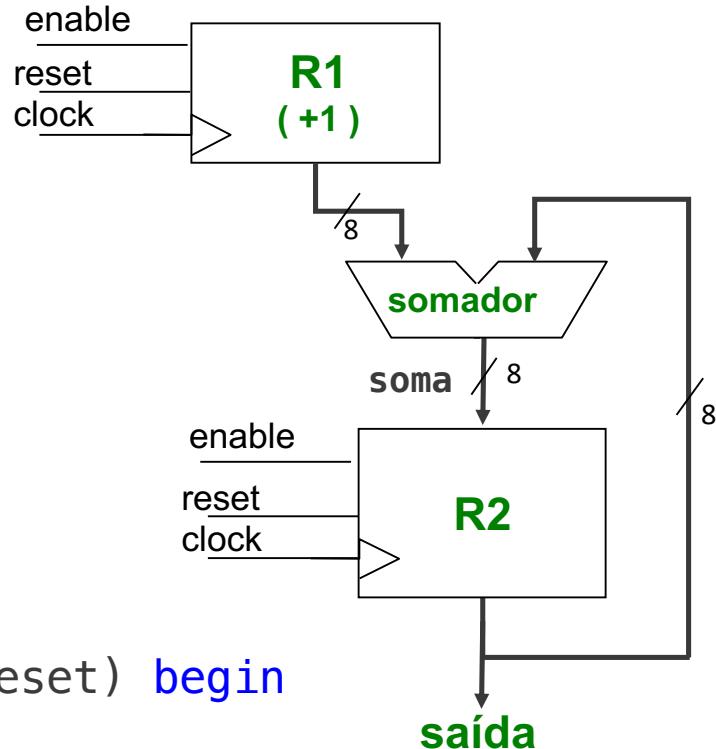
```
module acumulador (
    input logic clock,
    input logic reset,
    input logic enable,
    output logic [7:0] saida
);

logic [7:0] R1, R2;
logic [7:0] soma;

assign soma = R1 + R2;
assign saida = R2;

always_ff @(posedge clock or posedge reset) begin
    if (reset)
        R1 <= 8'b0;
        R2 <= 8'b0;
    else if (enable)
        R1 <= R1 + 1;
        R2 <= soma;
end

endmodule
```



Descrição RTL. Considere o circuito descrito pelo código SystemVerilog abaixo, que é composto por três registradores de 8 bits, um multiplexador 2x1 e um somador de 8 bits. O circuito possui cinco entradas: dois sinais de 8 bits, chamados **A** e **B**; um sinal de seleção do multiplexador, chamado **sel**; e os sinais de **clock** e **reset**. Como saídas, o circuito gera o valor do registrador REGC, denominado **C**, e a saída do somador, chamada de **saída**.

```
module rtl (
    input logic clock, reset, sel,
    input logic [7:0] A, B,
    output logic [7:0] saida,
    output logic [7:0] C
);
    logic [7:0] REGA, REGB, REGC;
    logic [7:0] op2;

    assign op2 = (sel == 1'b0) ? REGA : B;

    assign saida = REGB + op2;

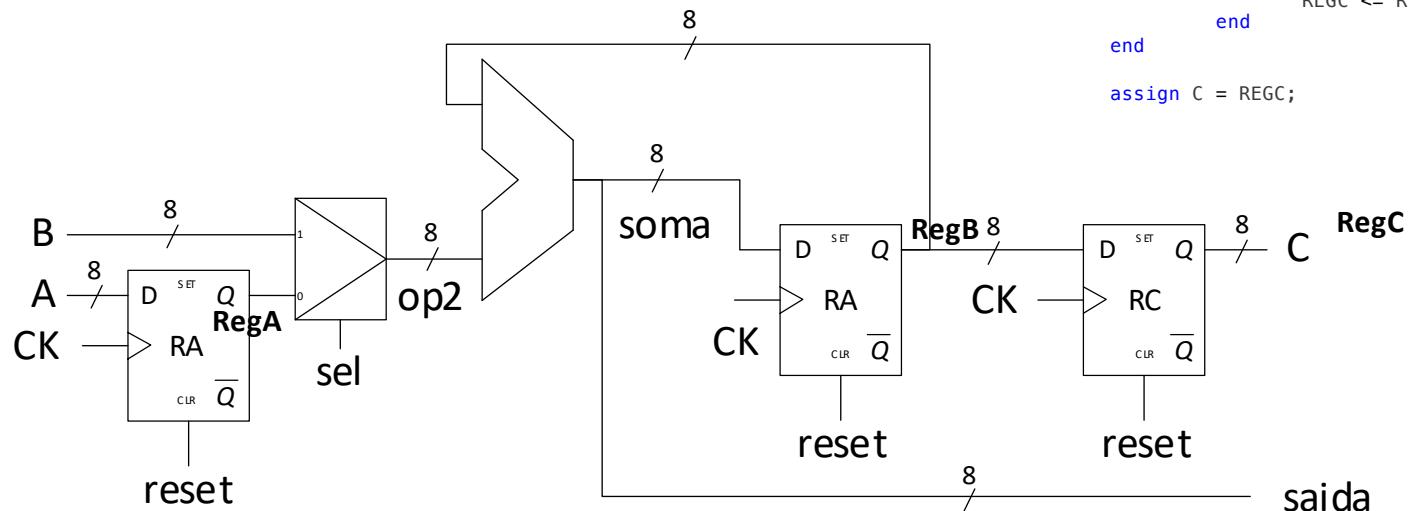
    always_ff @(posedge clock or posedge reset) begin
        if (reset) begin
            REGA <= 8'b0;
            REGB <= 8'b0;
            REGC <= 8'b0;
        end else begin
            REGA <= A;
            REGB <= saida;
            REGC <= REGB;
        end
    end

    assign C = REGC;

endmodule
```

Descrição RTL. Considere o circuito descrito pelo código SystemVerilog abaixo, que é composto por três registradores de 8 bits, um multiplexador 2x1 e um somador de 8 bits. O circuito possui cinco entradas: dois sinais de 8 bits, chamados **A** e **B**; um sinal de seleção do multiplexador, chamado **sel**; e os sinais de **clock** e **reset**. Como saídas, o circuito gera o valor do registrador REGC, denominado **C**, e a saída do somador, chamada de **saída**.

Solução



```

assign op2 = (sel == 1'b0) ? REGA : B;

assign saida = REGB + op2;

always_ff @(posedge clock or posedge reset) begin
    if (reset) begin
        REGA <= 8'b0;
        REGB <= 8'b0;
        REGC <= 8'b0;
    end else begin
        REGA <= A;
        REGB <= saida;
        REGC <= REGB;
    end
end

assign C = REGC;

```

Descrição RTL. Considere o circuito descrito pelo código SystemVerilog abaixo utilizando portas lógicas, multiplexadores, registradores e contadores. Indicar no desenho os sinais que são do tipo entrada e saída, e o número de fios em cada sinal

```
module RTL (
    input logic reset,
    input logic clock,
    input logic [7:0] E0, E1, E2, E3,
    output logic [7:0] S0, S1, S2, S3
);

    logic [1:0] cont;
    logic [7:0] mux;

    assign mux = (cont == 2'b00) ? E0 :
                (cont == 2'b01) ? E1 :
                (cont == 2'b10) ? E2 :
                E3;

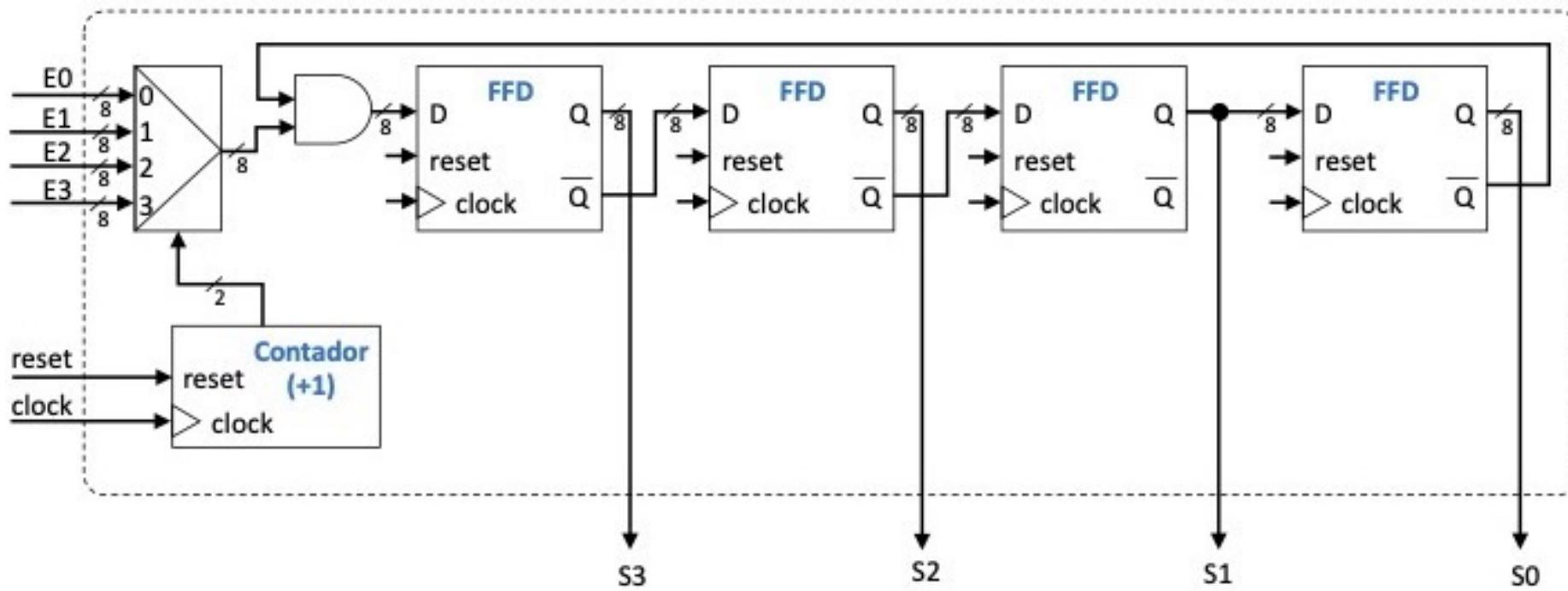
    always_ff @(posedge clock or posedge reset) begin
        if (reset) begin
            S3 <= 8'b0;
            S2 <= 8'b0;
            S1 <= 8'b0;
            S0 <= 8'b0;
            cont <= 2'b00;
        end else begin
            S3 <= mux & ~S0;
            S2 <= ~S3;
            S1 <= ~S2;
            S0 <= S1;
            cont <= cont + 1;
        end
    end
end
endmodule
```

Descrição RTL. Considere o circuito descrito pelo código SystemVerilog abaixo utilizando portas lógicas, multiplexadores, registradores e contadores. Indicar no desenho os sinais que são do tipo entrada e saída, e o número de fios em cada sinal

Solução

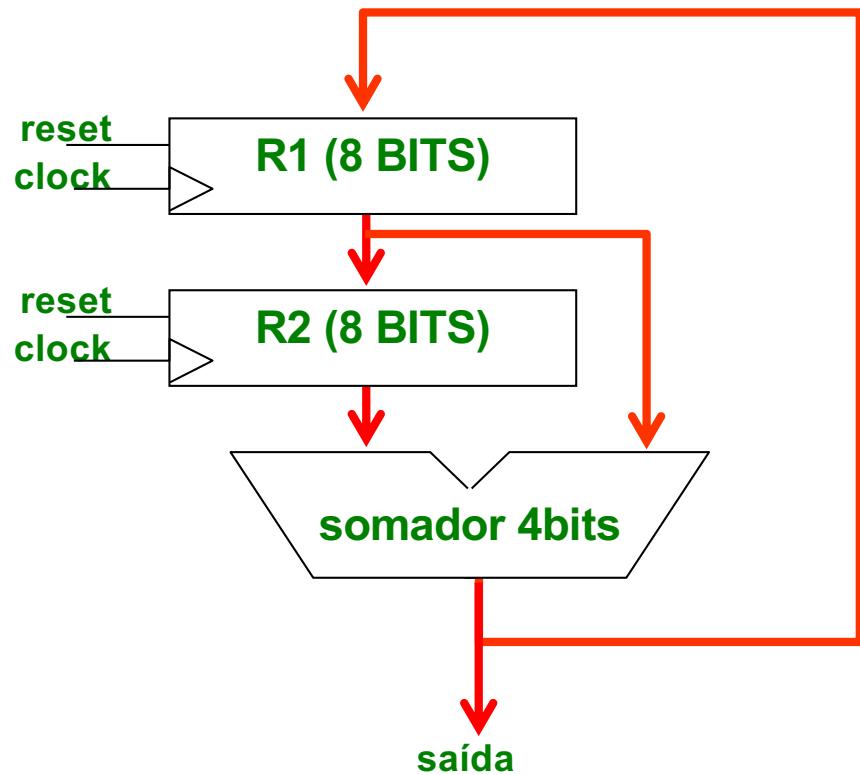
```
assign mux = (cont == 2'b00) ? E0 :  
           (cont == 2'b01) ? E1 :  
           (cont == 2'b10) ? E2 :  
           E3;  
  
end
```

```
always_ff @ (posedge clock or posedge reset) begin  
    if (reset) begin  
        S3 <= 8'b0; S2 <= 8'b0; S1 <= 8'b0; S0 <= 8'b0;  
        cont <= 2'b00;  
    end else begin  
        S3 <= mux & ~S0;  
        S2 <= ~S3;  
        S1 <= ~S2;  
        S0 <= S1;  
        cont <= cont + 1;  
    end  
end
```



Exercício de Simulação 3

- Quando o sinal de reset for ‘1’, os registradores R1 e R2 armazenam x“1” e x“0” respectivamente. A saída corresponde aos valores atuais de R1 e R2.



```
module ex3 (
    input logic clock,
    input logic reset,
    output logic [7:0] saída
);

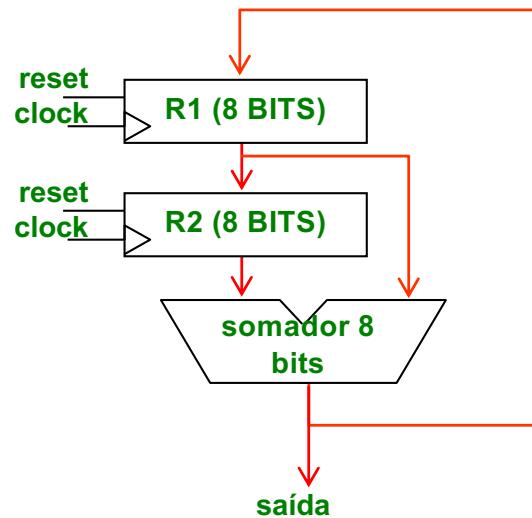
logic [7:0] R1, R2;

always_ff @(posedge clock or posedge reset) begin
    if (reset) begin
        R1 <= 8'h01;
        R2 <= '0;
    end else begin
        R1 <= saída;
        R2 <= R1;
    end
end

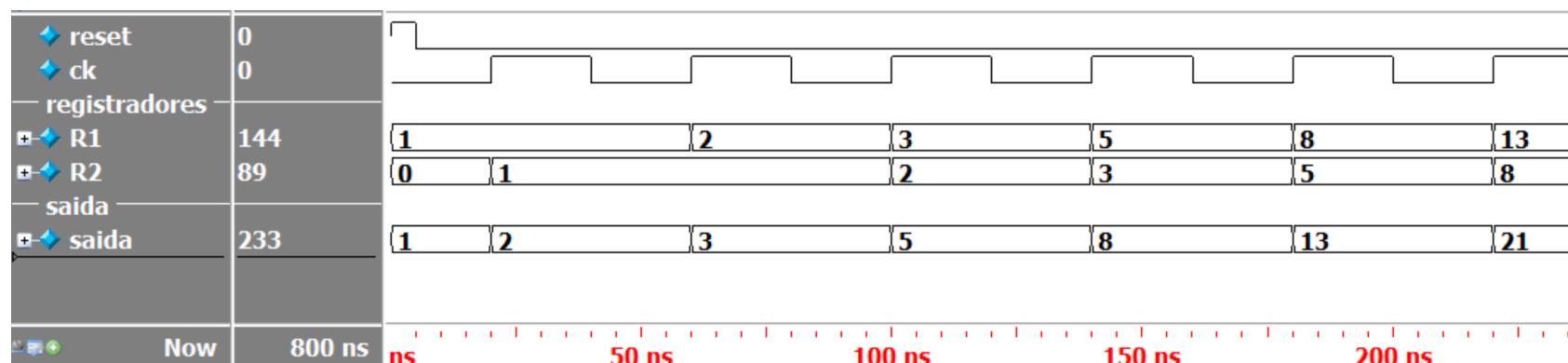
assign saída = R1 + R2;

endmodule
```

EXERCÍCIO DE SIMULAÇÃO 3



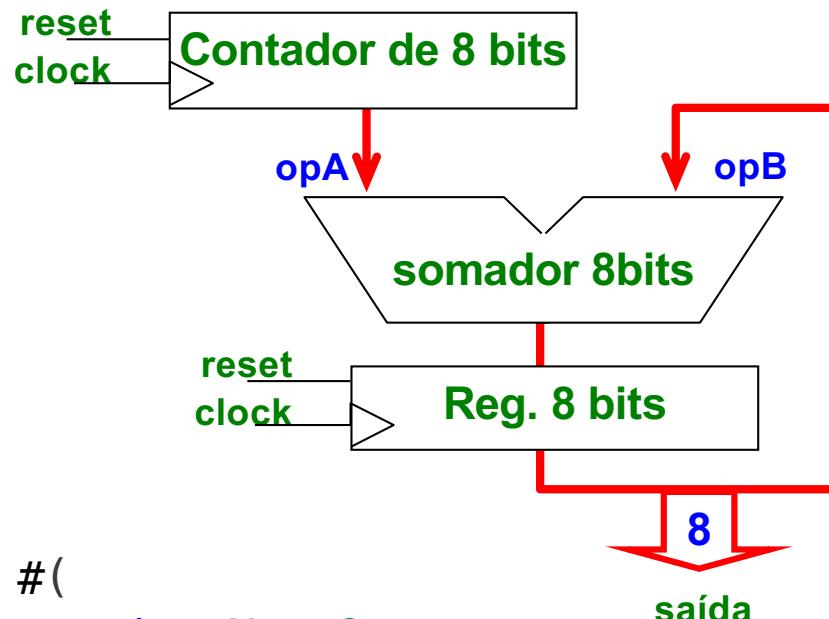
- Execute o script **do sim.do** (pasta ex3)



R1: 1 → 1 → 2 → 3
R2: 0 → 1 → 2 → 3 → 2
Saída: 1 → 2 → 3 → 5

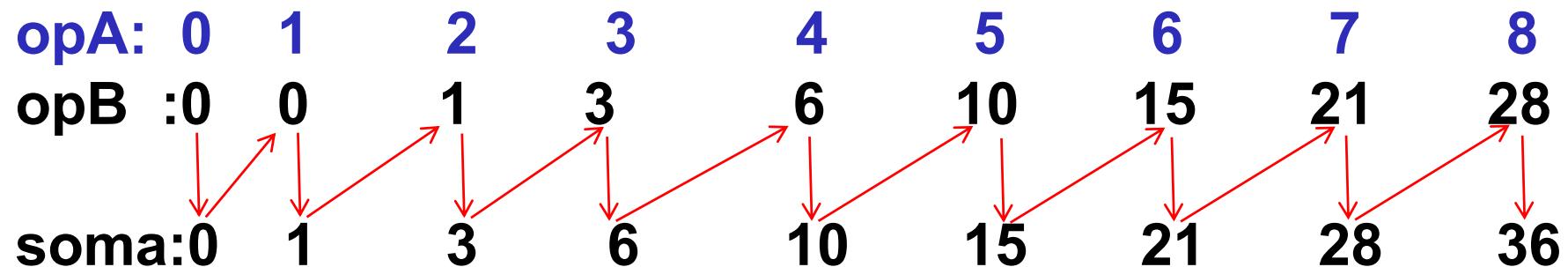
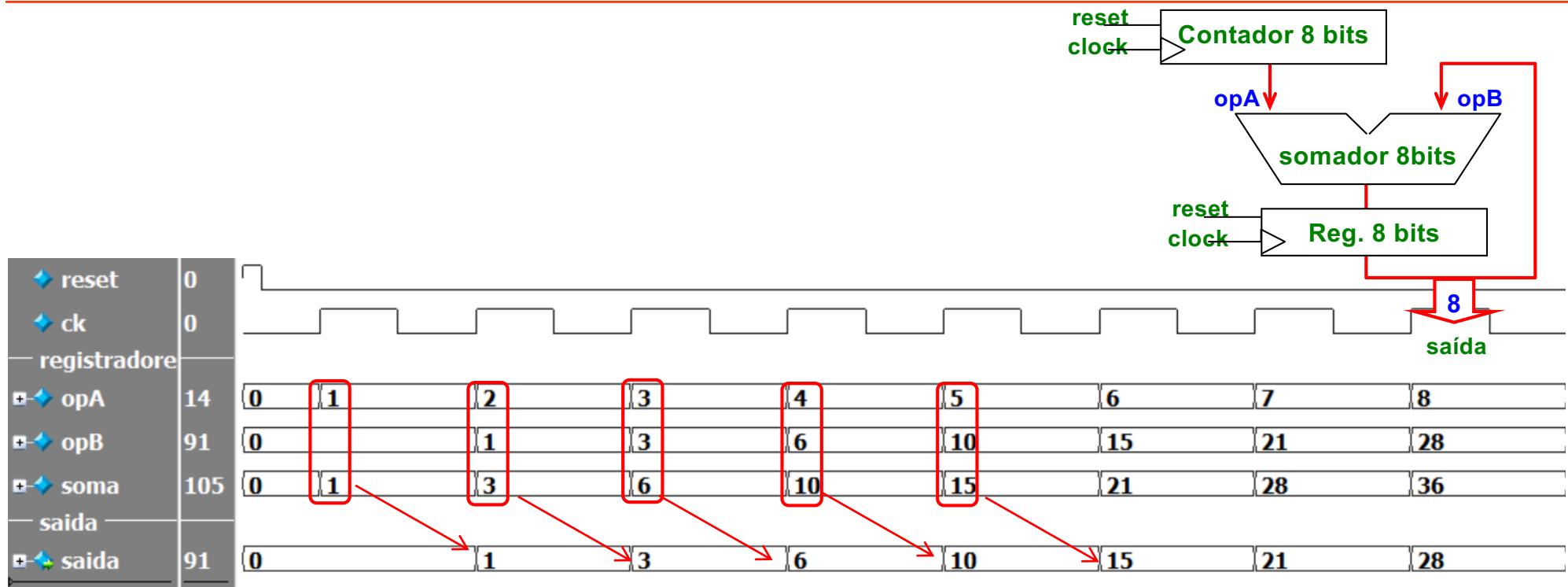
Exercício de Simulação 4

- Descreva o circuito abaixo em SystemVerilog:
 - Um só *always_ff* para opA e opB, pois as variáveis de controle (clock e reset) são as mesmas



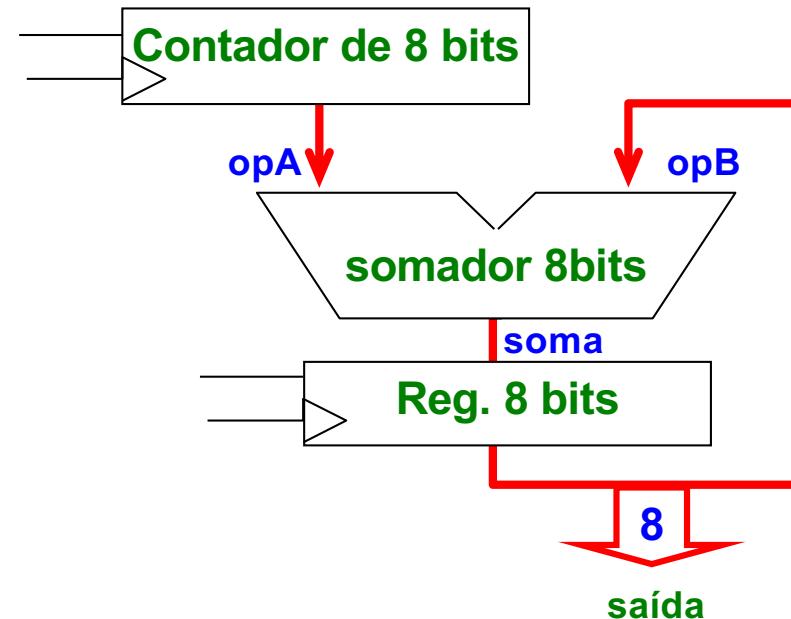
```
module ex4 #(
    parameter int N = 8
) (
    input logic clock,
    input logic reset,
    output logic [N-1:0] saída
);
```

EXERCÍCIO DE SIMULAÇÃO 4



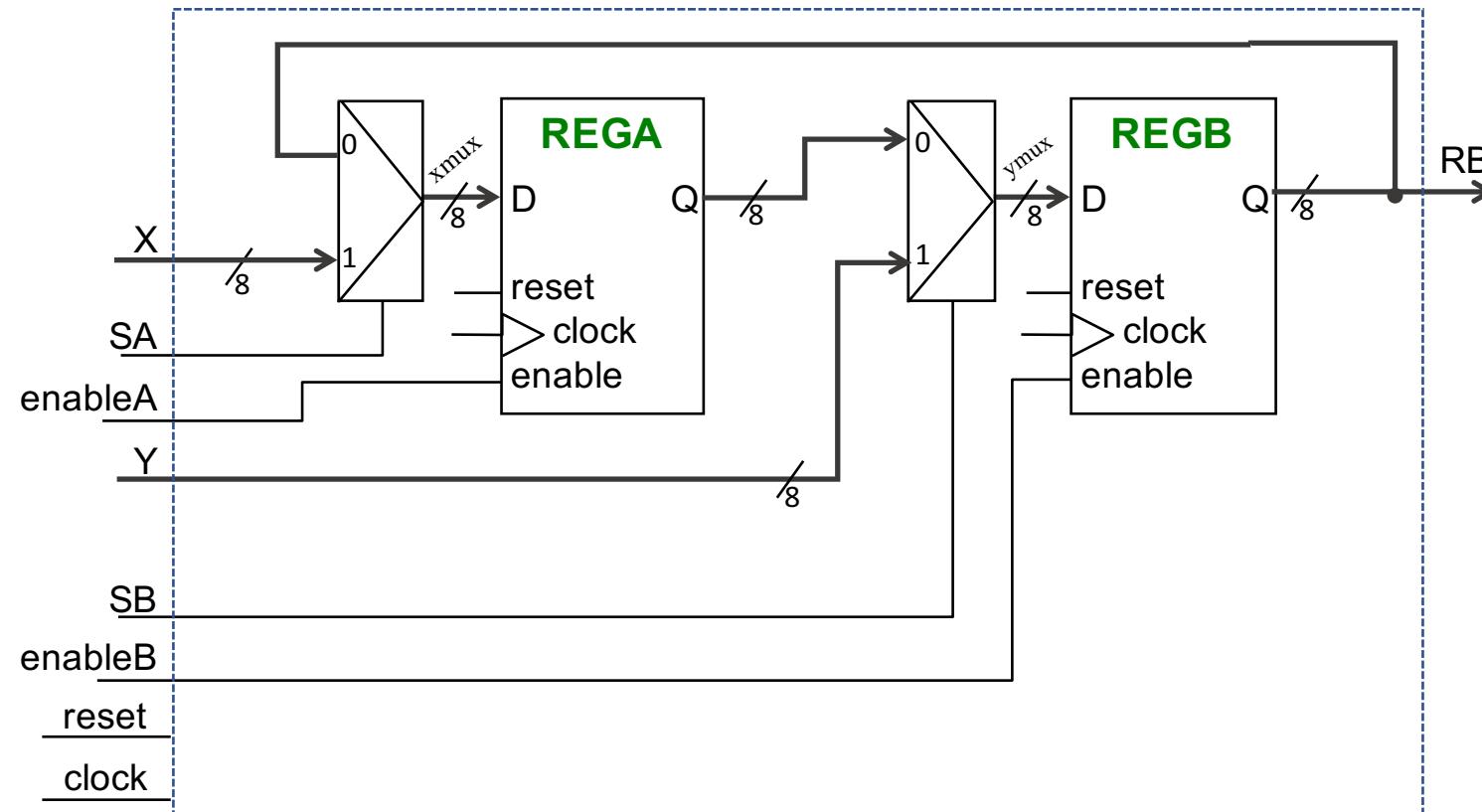
EXERCÍCIO DE SIMULAÇÃO 4

```
module ex4 #( parameter int N = 8)
(
    input logic clock,
    input logic reset,
    output logic [N-1:0] saída
);
    logic [N-1:0] opA, opB, soma;
    assign soma = opA + opB;
    assign saída = opB;
    always_ff @(completar) begin
        if (reset) begin
            opA <= completar;
            opB <= completar;
        end else begin
            opA <= completar;
            opB <= completar;
        end
    end
endmodule
```

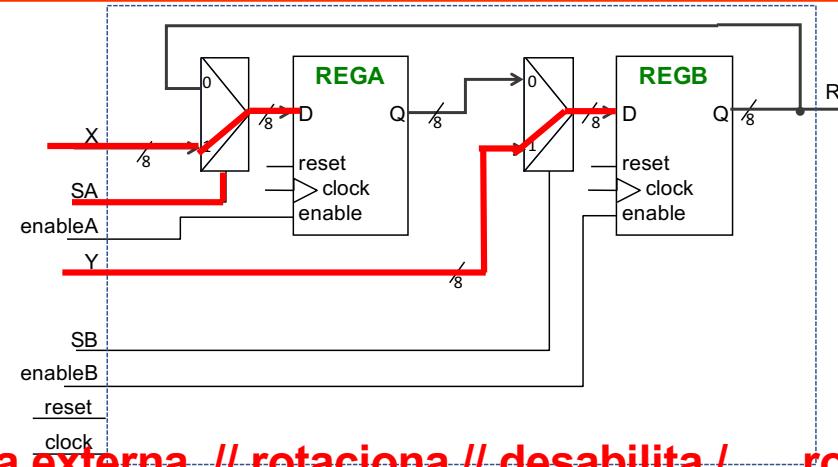


Exercício de Simulação 5

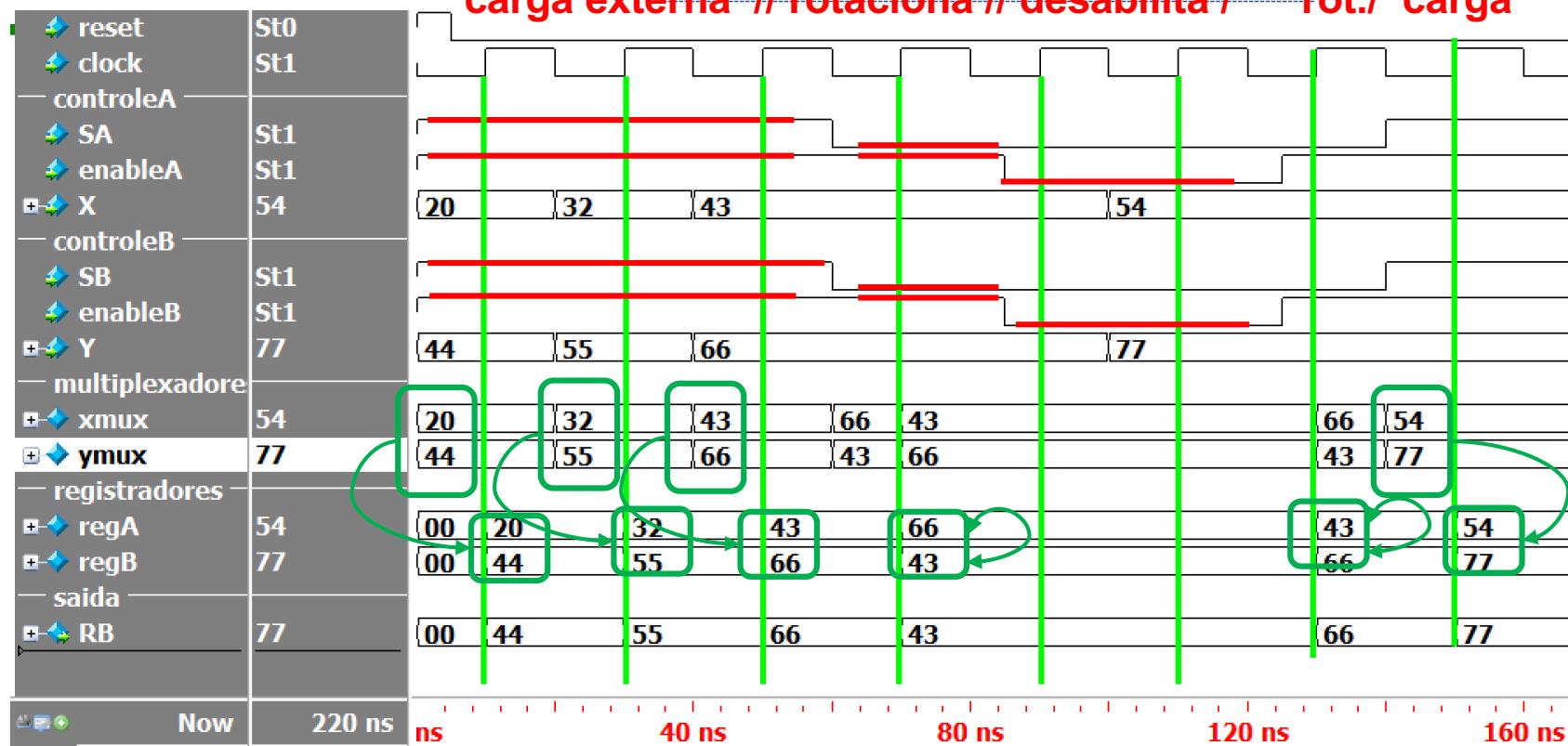
1. (2,5 pts) **Projeto RTL.** Considere o circuito abaixo composto por 2 registradores de 8 bits e dois multiplexadores 2x1. O circuito possui 8 **entradas**: dois sinais de 8 bits: X e Y , habilitação dos registradores: $enableA$ e $enableB$, seleção dos multiplexadores: SA e SB , e os sinais de *clock* e *reset* para os registradores. Como **saída** o circuito possui o valor do registrador REGB, RB .



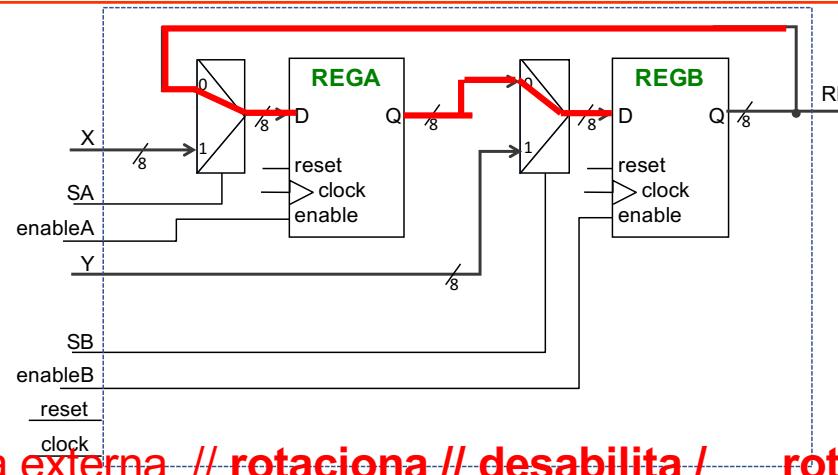
Exercício de Simulação 5



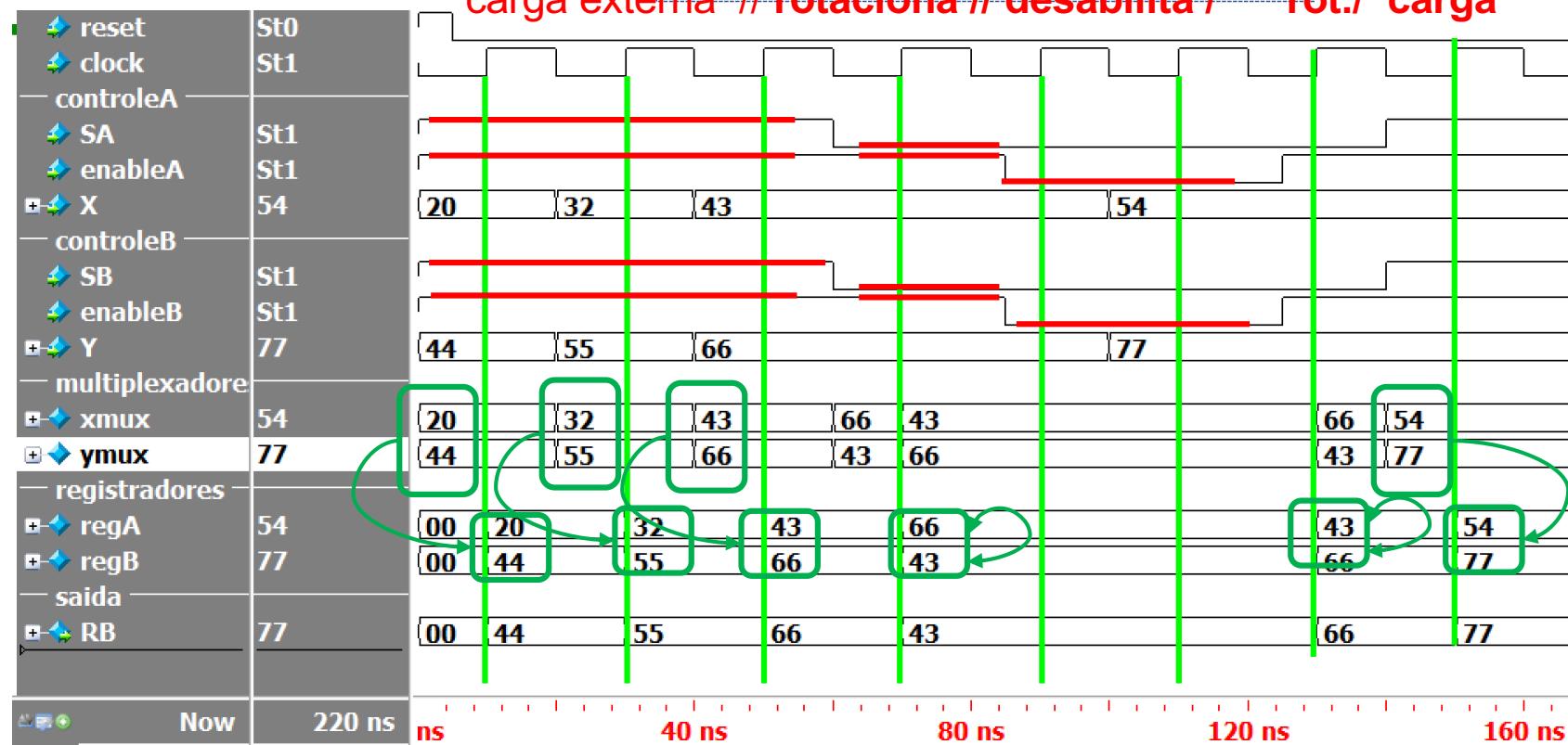
carga externa // rotaciona // desabilita / rot./ carga



Exercício de Simulação 5

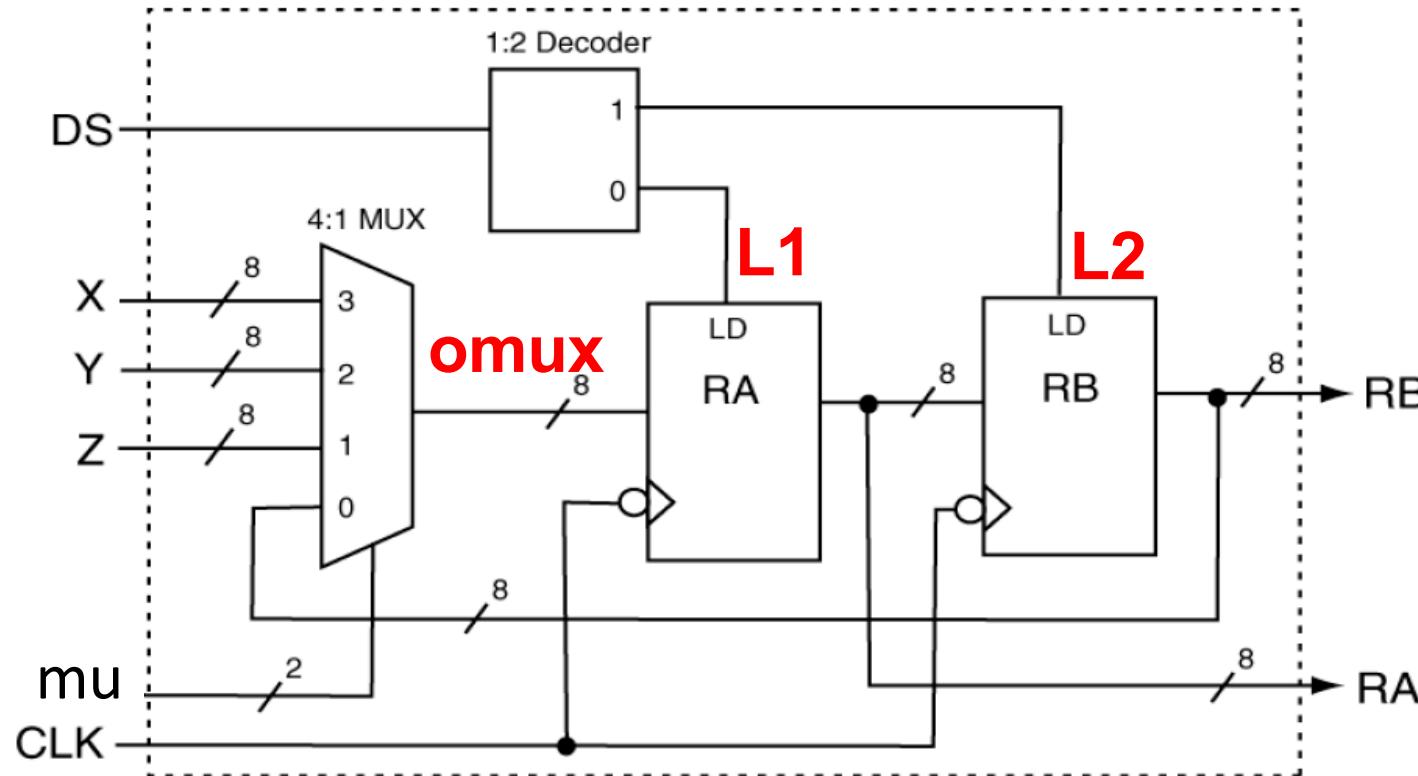


carga externa // rotaciona // desabilita / rot./ carga



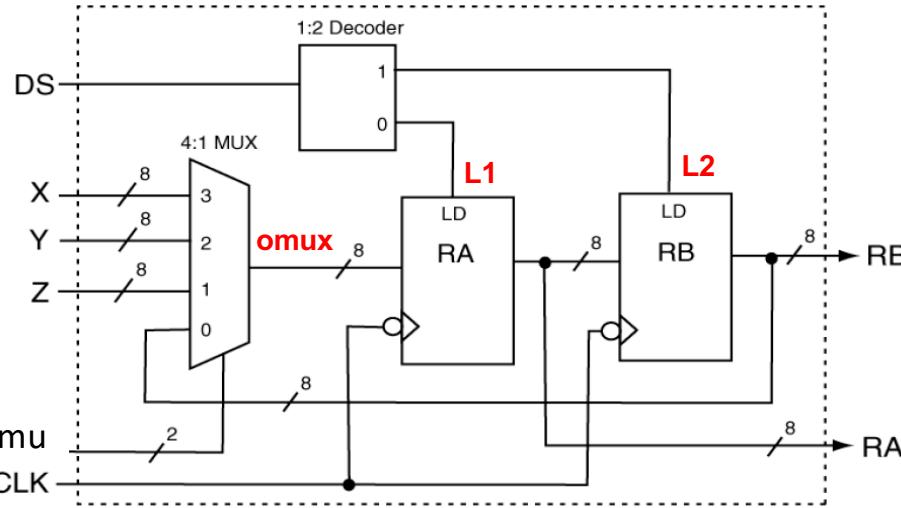
Exercício de Simulação 6

Descreve e simular o circuito abaixo utilizando SystemVerilog



O **reset** não está mostrado no desenho e deve ser incluído no circuito para inicializar os registradores

Saída esperado para o ex6



```

always_ff @(negedge clock or
posedge reset) begin
    if (reset) begin
        RA <= '0';
        RB <= '0';
    end else begin
        if (L1) RA <= OMUX;
        if (L2) RB <= RA;
    end
end

```

	/tb/dut/reset	St0	St1
	/tb/dut/clock	St1	
entradas			
+ /tb/dut/X	20	10 20 30 40 50 60 70 80 90 a0 b0 c0 d0 e0 f0 00 10	
+ /tb/dut/Y	5a	05 0a 0f 14 19 1e 23 28 2d 32 37 3c 41 46 4b 50 55	
+ /tb/dut/Z	24	02 04 06 08 0a 0c 0e 10 12 14 16 18 1a 1c 1e 20 22	
saida mux			
+ /tb/dut/mu	2	0 1 2 3 0 1 2 3 0 1 2 3 0 1 2 3 0 1 2 3 0 1	
+ /tb/dut/OMUX	5a	02 0a 30 0a 1e 70 0a 12 32 b0 0a 1a 46 f0 46 22	
registadores			
/tb/dut/DS	St1		
+ /tb/dut/RA	46	00 02 0a 1e 70 0a 1a 46	
+ /tb/dut/RB	46	00 0a	46

Ex. de Simulação 7

```
module ex7 (
    input logic fin,
    input logic rst,
    output logic fout
);

    logic A, B, C;

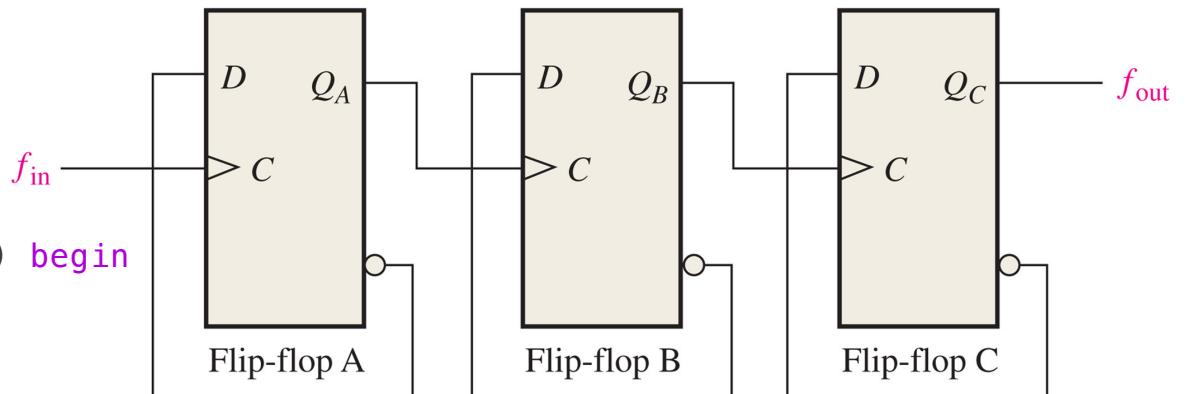
    always_ff @(posedge fin or posedge rst) begin
        if (rst)
            A <= 0;
        else
            A <= ~A;
    end

    always_ff @(posedge A or posedge rst) begin
        if (rst)
            B <= 0;
        else
            B <= ~B;
    end

    always_ff @(posedge B or posedge rst) begin
        if (rst)
            C <= 0;
        else
            C <= ~C;
    end

    assign fout = C;
endmodule
```

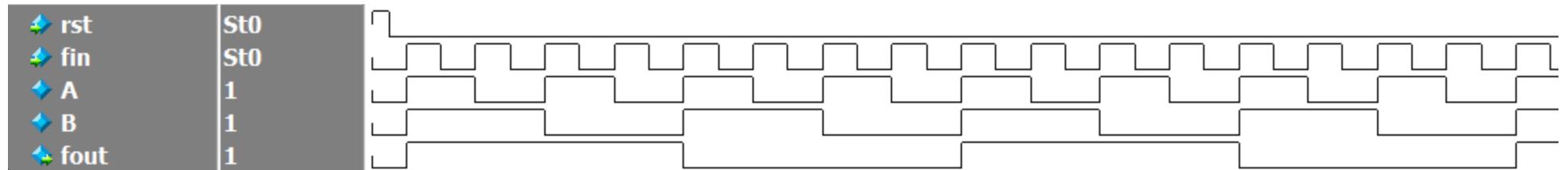
Qual a saída esperada para *f_{out}*?



O **reset** não está mostrado no desenho

Este é um circuito divisor de clock!

EXERCÍCIO 7 – Divisor de clock – test bench (2/2)



```
module tb;

    logic rst = 0;
    logic fin = 0;
    logic fout;

    always #10 fin = ~fin;

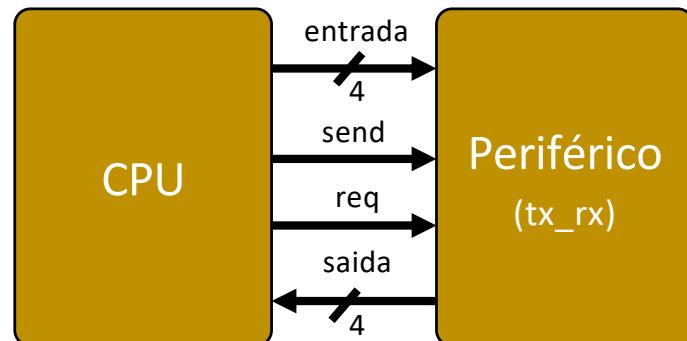
    initial begin
        rst = 1;
        #5 rst = 0;
    end

    ex7 dut ( .rst(rst), .fin(fin), .fout(fout) );

endmodule
```

Exercício de Simulação 8

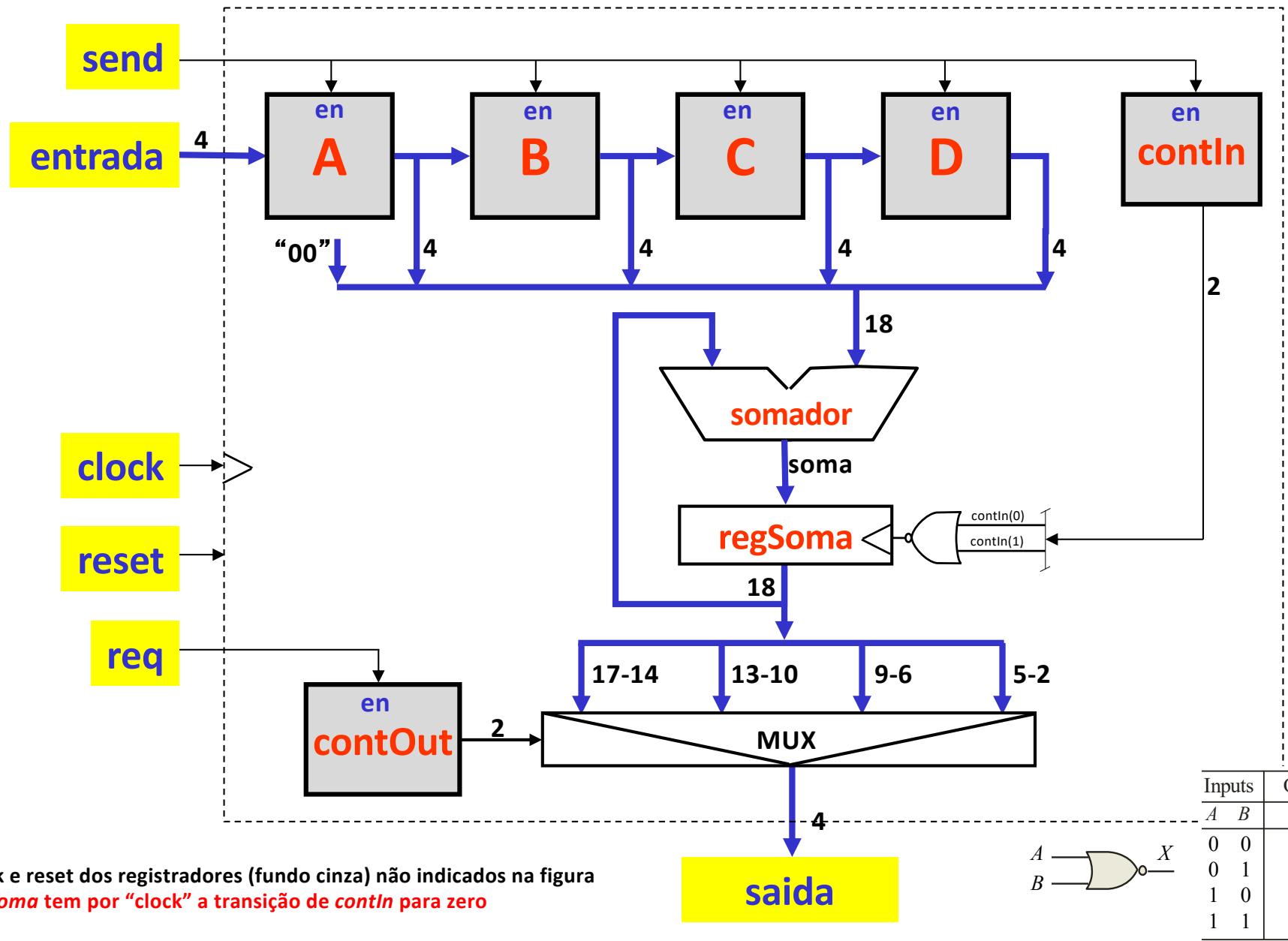
COMUNICAÇÃO ENTRE CPU E PERIFÉRICO



Função do Periférico:

- 1. Recebe 4 palavras de 16 bits**
 - ✓ A CPU deve enviar 16 palavras de 4 bits (cada **send** avisa que tem 4 bits disponíveis em **entrada**)
- 2. Somar as 4 palavras de 16 bits, sem perder precisão**
 - ✓ Para isto o somador deve ter 18 bits
- 3. Calcular a média aritmética das 4 palavras, sem utilizar divisão**
 - ✓ Emprego de deslocamento à direita
- 4. Enviar para a CPU a média (16 bits) em pacotes de 4 bits**
 - ✓ A CPU ativa **req** e o periférico devolve em **saída** parte da resposta
 - ✓ A CPU gera 4 **reqs**

Arquitetura – Visão Geral



```

module ex8 (
    input logic clock, reset, send, req,
    input logic [3:0] entrada,
    output logic [3:0] saida
);

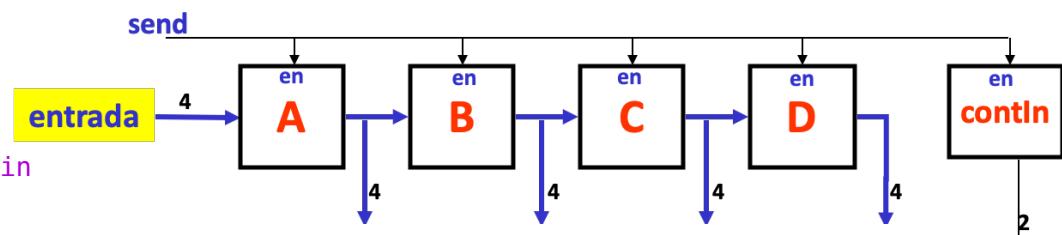
logic [3:0] A, B, C, D;
logic [1:0] contIn, contOut;
logic [17:0] vet, regSoma;
logic acumula;

always_ff @(posedge clock or posedge reset) begin
    if (reset) begin
        contIn <= 2'b00;
        A <= '0; B <= '0; C <= '0; D <= '0;
    end else if (send) begin
        contIn <= completar;
        A <= completar;
        B <= completar;
        C <= completar;
        D <= completar;
    end
end

endmodule

```

Entrada de Dados (1/5)



```

logic [3:0] padrao_de_teste [0:15] = '{  

    4'h1, 4'h2, 4'h3, 4'h4,  

    4'h5, 4'h6, 4'h7, 4'h8,  

    4'h3, 4'h4, 4'h4, 4'h5,  

    4'h2, 4'h1, 4'h1, 4'h3  

};

```

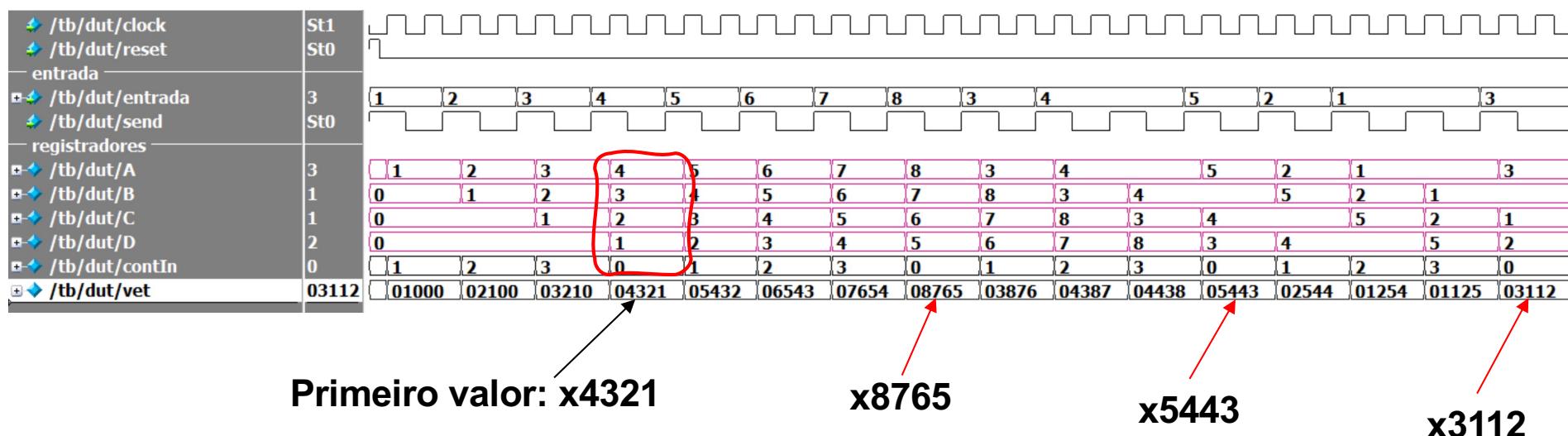
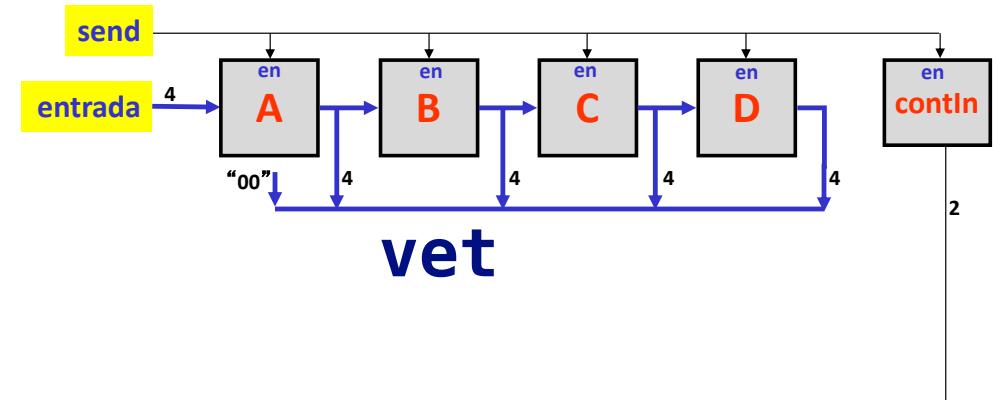
/tb/dut/clock	St1	
/tb/dut/reset	St0	
entrada	3	
/tb/dut/entrada	St0	
/tb/dut/send		
registradores		
/tb/dut/A	3	
/tb/dut/B	1	
/tb/dut/C	1	
/tb/dut/D	2	
/tb/dut/contIn	0	

Primeiro valor: x4321 x8765 x5443 x3112 64

Soma (2/5)

Criar o barramento *vet*, de 18 bits via concatenação

assign *vet* = {*A*, *B*, *C*, *D*};



Primeiro valor: x4321

x8765

x5443

x3112

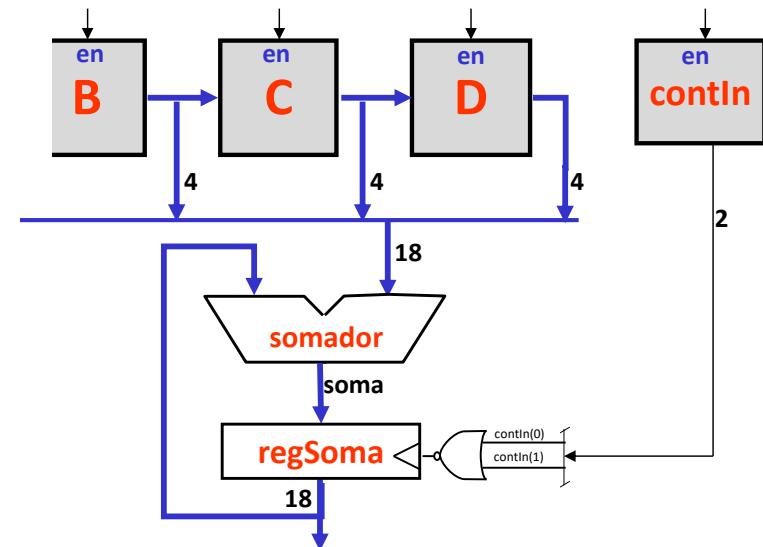
Acumulação (3/5)

Usar um sinal de controle que só permita a acumulação uma única vez por ciclo de 4 entradas de dados

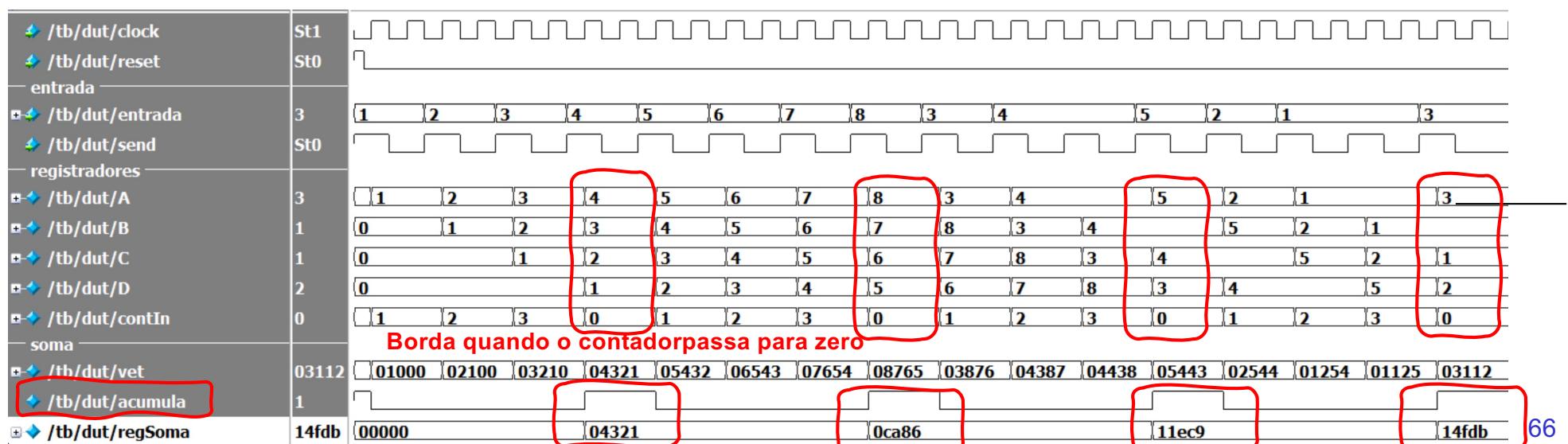
```
// verdadeiro se contIn == "00"
nor(acumula, contIn[0], contIn[1]);

always_ff @(posedge acumula or posedge reset) begin
    if (reset)
        regSoma <= '0;
    else
        regSoma <= regSoma + vet;
end
```

$$\begin{array}{r} 4321 \\ + 8765 \\ \hline \text{CA86} \end{array}$$



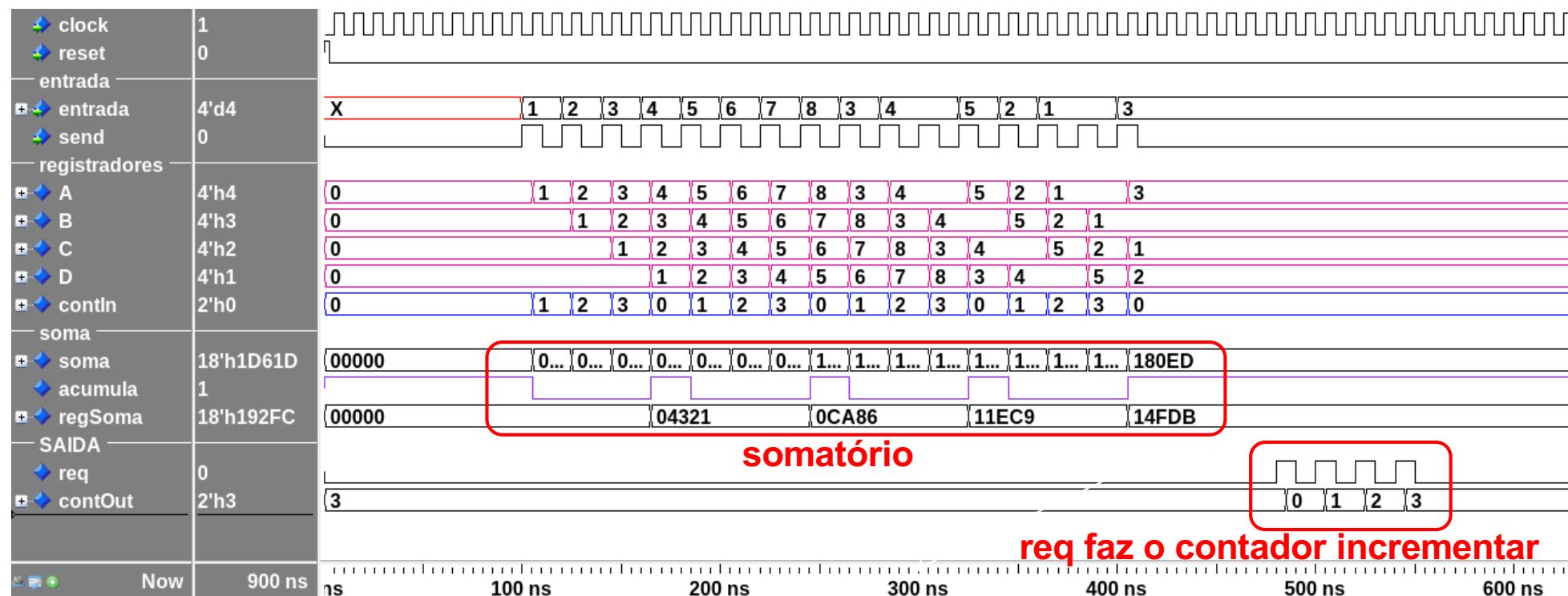
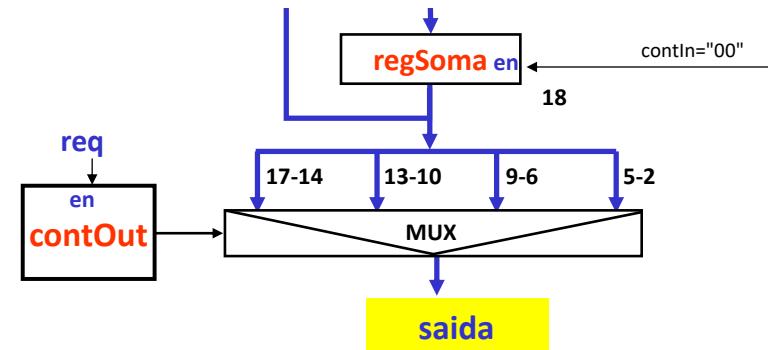
Detecta a transição de *contIn*="00" para acumular



Contador em função do *request* (4/5)

Contador de 2 bits, *contOut*, incrementado quando *req=1* (*Always_ff*)

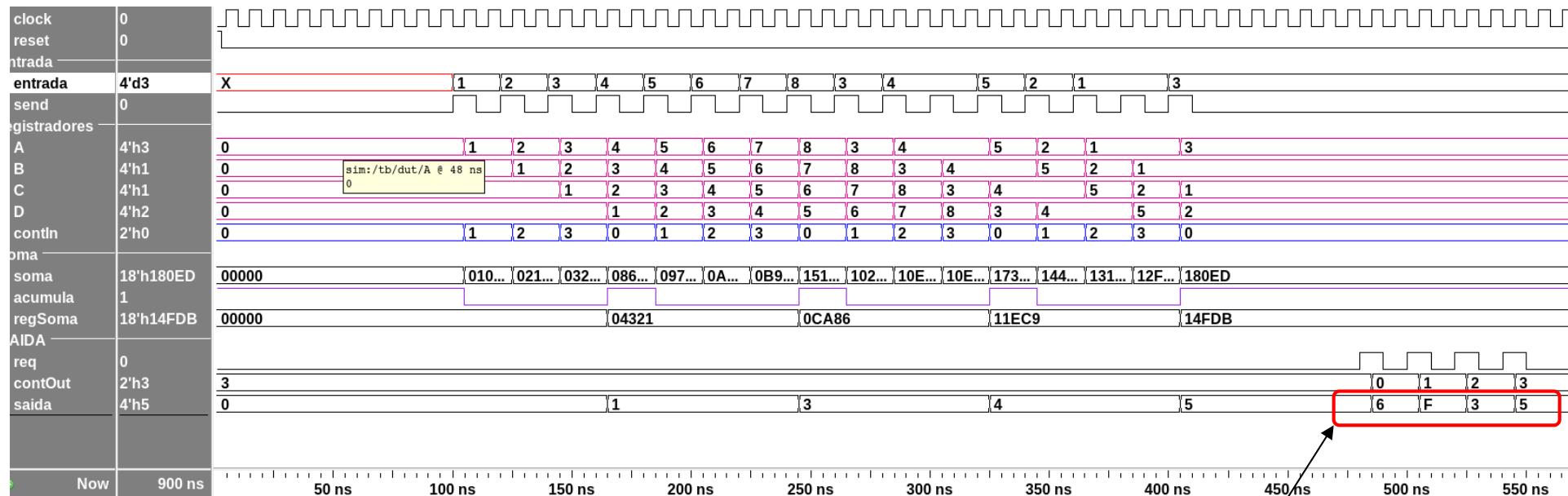
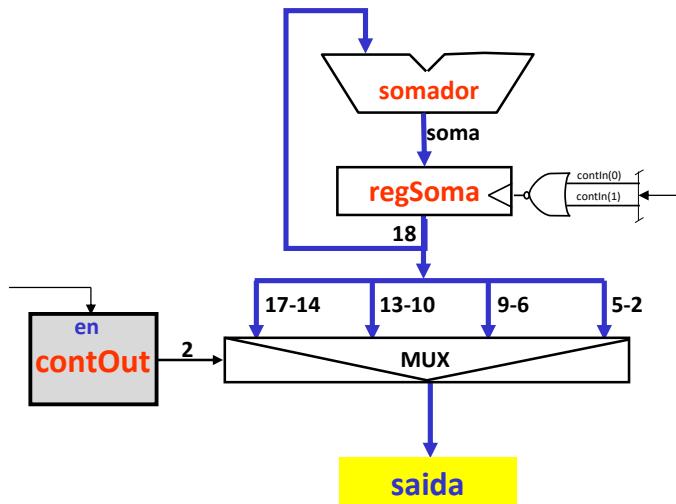
Cuidado: no reset inicializar em “11” para o primeiro valor ser “00”



Multiplexador de saída (5/5)

Bloco combinacional

```
assign saida = (contOut == 2'b00) ? regSoma[5:2] :  
    (contOut == 2'b01) ? regSoma[9:6] :  
    (contOut == 2'b10) ? regSoma[13:10] :  
    regSoma[17:14];
```



$$\text{Média: } 14\text{FDB} / 4 = 53\text{F6}$$

Fim
Parte flip-flops
e projeto RTL