

µProcessador 4 Unidade de Controle Rudimentar

Hoje é o dia do esqueleto! Vamos fazer um programa armazenado em ROM ser percorrido por um PC e executar *jumps* incondicionais. Outra hora adicionaremos ULA e Banco de Registradores.

Como pode dar uns probleminhas pra funcionar, as equipes têm excepcionalmente *duas semanas* para entregar o projeto. Usem-nas com sabedoria. Fica para a daqui a treze dias às 23h59 (domingo para a S71 e 5ª feira para a S72).

Também excepcionalmente, há uma *outra tarefa* para entregar *semana que vem*. Veja o site.

ROM em VHDL

Para fazer uma ROM em VHDL vamos usar um modelo como o que segue. Neste caso, é uma ROM de 128 endereços, com dados de 12 bits em cada endereço.

```
library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;
use ieee.numeric_std.all;

entity rom is
    port( clk      : in std_logic;
          endereco : in unsigned(6 downto 0);
          dado      : out unsigned(11 downto 0)
    );
end entity;

architecture a_rom of rom is
    type mem is array (0 to 127) of unsigned(11 downto 0);
    constant conteudo_rom : mem := (
        -- caso endereco => conteudo
        0 => "0000000000010",
        1 => "1000000000000",
        2 => "0000000000000",
        3 => "0000000000000",
        4 => "1000000000000",
        5 => "0000000000010",
        6 => "1111000000011",
        7 => "0000000000010",
        8 => "0000000000010",
        9 => "0000000000000",
        10 => "0000000000000",
        -- abaixo: casos omissos => (zero em todos os bits)
        others => (others=>'0')
    );
begin
    process(clk)
    begin
        if(rising_edge(clk)) then
            dado <= conteudo_rom(to_integer(endereco));
        end if;
    end process;
end architecture;
```

Os dados tabelados em “conteudo_rom” são apenas ilustrativos.

Note que *esta ROM é síncrona!*¹ Isto significa que é preciso dar um *clock* nela para que ela leia os dados, ou seja, só quando houver rampa de subida no *clock* é que teremos uma resposta à saída.

1 Dentro duma FPGA as memórias são tipicamente síncronas.

- | | |
|---|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ► | Verifique no meu site as características de dimensões da ROM especificadas para a sua equipe de laboratório. Construa uma ROM de acordo.
Faça um <i>testbench</i> simples e se assegure de que está tudo ok. |
|---|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Máquina de Estados

Vamos evitar problemas? Vamos evitar problemas sim.

Então vamos já começar com uma máquina de dois estados. O primeiro *clock* vai fazer *fetch*, o segundo vai fazer *decode/execute* e é isso aí. Depois a gente incrementa a coisa e faz mais estados.

Mesmo neste laboratório com circuito ainda pequeno, seria complicado fazer as coisas em ciclo único (leia-se: só sai com chuncho, desorganização e coisa feia), especialmente por conta da atualização correta do PC.

- | | |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ► | Faça uma máquina de estados com dois estados. Para isso, use o esquema já visto de um registrador e adapte-o para usar só 1 bit (ver abaixo).
Faça mais um <i>testbench</i> simples só para este “.vhd” e se assegure novamente de que está tudo ok. |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Pra fazer isso, use um simples *flip-flop* T, ou seja, aquele que troca de estado a cada *clock*. Veja o trecho da arquitetura, alterada a partir de um registrador de 1 bit:

```
elsif rising_edge(clk) then
    estado <= not estado;
end if;
```

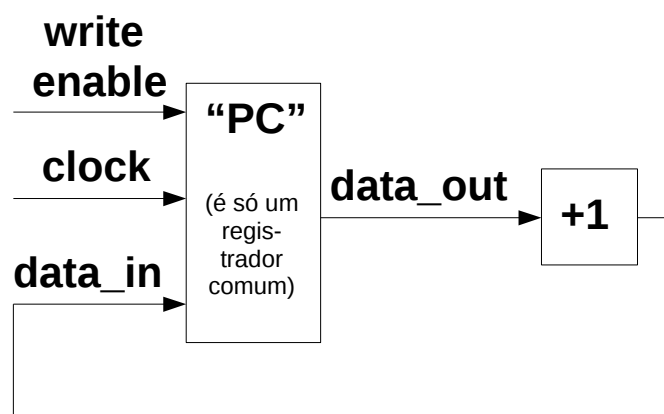
Não esqueça do *reset*. Teste separadamente esse *flip-flop* T pois essa é uma atitude saudável.

Dica: se os nomes iguais estiverem se trombando, é comum usar os sufixos *_i*, *_o* e *_s* para diferenciar pinos de entrada, saída e sinais internos, como “*dado_i*” e “*dado_o*” para pinos do bloco e “*dado_s*” para o *signal* interno, por exemplo.

Contador de Programa

O nosso PC (*Program Counter*) vai ser só um registrador, sem contagem interna, assim como nos circuitos vistos no livro. A “contagem” vai ser dada por um circuito externo somador com 1.

Eu sei que tem na internet os esquemas para fazer um contador em VHDL mas... **Não use um contador típico VHDL.** Estes circuitos incrementam o contador a cada *clock* e isso não vai prestar para a gente. Ao invés disso, construa um VHDL que faz como na figura:



►	<p>Faça o PC funcionar apenas contando para a frente. O PC é só um registrador comum, igual ao do laboratório #3. Não precisa ainda usar a máquina de estados.</p> <p>Crie outro módulo (uma proto-unidade de controle) que simplesmente adiciona 1 no valor de saída do PC e conecta o resultado desta soma de volta à entrada do PC.</p> <p>Por enquanto pode deixar <i>wr_en</i>=1 sempre, então todo <i>clock</i> vai incrementar.</p> <p>Faça outro <i>testbench</i> simples só para este PC e veja se está tudo ok, como já virou um hábito. Se você está pulando estes <i>testbenches</i>, acho que você pode se arrepender logo logo.</p>
---	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

E mais:

►	<p>Conecte a ROM ao PC!</p> <p>Basta ligar a saída do PC direto na entrada de endereços da ROM. Coloque a saída da ROM num pino do <i>top-level</i> e veja os conteúdos da memória serem apresentados em ordem, a partir do endereço zero, na tela do gtkwave.</p> <p>Sorria, isso já mostra o básico de um processador!</p>
---	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Unidade de Controle com Jump

Okay, chega de brincadeira.

►	<p>Inclua a máquina de estados de 1 bit no módulo da unidade de controle.</p> <p>O circuito deverá fazer a leitura da ROM no estado 0 (<i>fetch</i>) e a atualização do PC no estado 1 (<i>decode/execute</i>). Ele vai ignorar solenemente as instruções por enquanto.</p> <p>Faça um <i>testbench</i> e olhe bem para as formas de onda resultantes. Pense um pouco.</p>
---	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Lembre-se: *não use if-then*, a não ser para criar um *flip-flop* ou registro (cf. lab #3). Se você está colocando mais condições dentro do *if*, é provável que esteja fazendo besteira. Use *when-else* para construir qualquer lógica, que deve ser colocada fora do “process.”

Agora vamos implementar o *nop* e o *jump*.

►	<p>Crie uma codificação para a instrução <i>jump</i>. Pode ser parecida com a do formato J do MIPS se você quiser. Implemente (veja abaixo uma sugestão). Restrição: deve ser usado endereço absoluto (como no <i>j</i> do MIPS) e não endereço relativo (como no <i>branch</i> do MIPS).</p> <p>Agora faça um <i>testbench</i> bem pensado, decente. Faça a codificação das instruções em binário e coloque no “rom.vhd”, de preferência saltando alguns endereços para a frente e também fazendo um <i>loop</i>. Confira se as operações ocorrem no estado esperado.</p>
---	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Para decodificar instruções, basta separar os bits do opcode em sinais parciais e fazer comparações simples. Veja o trecho que usei:

```
architecture a_un_controle of un_controle is
    signal opcode: unsigned(3 downto 0);
begin
    -- coloquei o opcode nos 4 bits MSB
    opcode <= instr(11 downto 8);
    -- meu jump: opcode 1111
    jump_en <= '1' when opcode="1111" else
               '0';
```

Não custa lembrar: use *when-else*, não use *if-then* porque *if-then* costuma dar treta, além de ser usado só em blocos “process”.

Se quiser ser chique, verifique se a instrução é desconhecida (diferente de *jump* e *nop*) e neste caso paralise o PC e gere um sinal de erro (exceção de *opcode*). Mas só se você quiser.



Estime o número de *clocks* necessários para seu programa. Por exemplo, para dez instruções, ele deverá executar em vinte *clocks*. Confira isso como teste de sanidade

Entregue o tradicional .zip com apenas a última versão deste lab, incluindo *jumps* e testes com um programa simples.