

Laboratório de Sistemas Digitais

Trabalho Prático nº 7

Construção e utilização de *testbenches* em VHDL Simulação comportamental e temporal Depuração de circuitos em FPGA

Objetivos

- Construção e utilização de *testbenches* para simulação em VHDL de circuitos combinatórios e sequenciais.
- Simulação comportamental e temporal.
- Depuração de circuitos digitais implementados em FPGA com base em ferramentas de visualização de sinais capturados em tempo-real (analisadores lógicos).

Sumário

Este trabalho prático é dedicado à simulação comportamental, à simulação temporal e à depuração de um sistema em FPGA. Estas tarefas destinam-se a validar o projecto em diferentes etapas de desenvolvimento. A simulação comportamental pode ser usada logo após a modelação do sistema, para avaliar o seu funcionamento, considerando componentes ideais, i.e. sem atrasos, e independentemente da compilação (implementação) para uma FPGA específica. Por outro lado, a simulação temporal pode ser realizada após a compilação (implementação) do sistema para uma FPGA em concreto e já tem em conta estimativas para os atrasos dos componentes do sistema, dados o seu posicionamento e interligação na FPGA, pelo que permite assim uma simulação muito mais próxima do funcionamento do sistema em *hardware* real. Por último, a depuração é realizada com o sistema a funcionar em *hardware*, i.e. estando a FPGA configurada com o sistema-alvo. Utiliza ferramentas que permitem capturar em tempo real os sinais internos, com o objetivo de observar a operação do circuito e a sua resposta a estímulos reais.

Este trabalho prático está dividido em seis partes. A primeira e a segunda são dedicadas à simulação comportamental com base nos exemplos de *testbenches* apresentados nas aulas teórico-práticas (a primeira baseada num decodificador, como exemplo de um componente combinatório; a segunda baseada num contador, como exemplo de um circuito sequencial). Na terceira parte é utilizada uma *testbench* para um componente combinatório (ALU) de forma a realizar primeiro a sua simulação comportamental e depois a temporal.

A quarta parte é dedicada à depuração, apresentando o princípio de funcionamento e as capacidades dos analisadores lógicos integrados disponibilizados pelos fabricantes de FPGAs. Estes analisadores consistem num conjunto de blocos de *hardware* e ferramentas de software que permitem a captura de sinais em tempo real e a sua visualização. A apresentação é baseada no projeto de um contador binário, que permite ilustrar todos os passos necessários para a utilização do analisador lógico.

Na quinta parte pretende-se exercitar os três tipos de tarefas de validação (simulação comportamental, simulação temporal e depuração) ao longo do fluxo de projeto de um sistema baseado num temporizador, de forma a dar uma perspetiva global das tarefas de verificação de um sistema digital ao longo do fluxo de projeto.

Por último, na sexta parte, a realizar como TPC, pretende-se utilizar as ferramentas de depuração de forma didática para capturar e visualizar o *bounce* na comutação de contactos mecânicos.

Parte I

1. Abra a aplicação “*Quartus Prime*” e crie um novo projeto para a FPGA Cyclone IV EP4CE115F29C7. Poderá designar o projeto e a entidade *top-level* como “Dec2_4En”.
2. O código VHDL apresentado na Figura 1 implementa um decodificador binário de 2→4 com entrada de habilitação (*enable*). Crie um novo ficheiro VHDL, introduza esse código e grave o ficheiro com o nome “Dec2_4En.vhd”.
3. Execute o comando “*Analysis & Synthesis*” da aplicação “*Quartus Prime*” para realizar a análise e verificação sintática do projeto.
4. O código VHDL apresentado na Figura 2 implementa uma *testbench* para o decodificador da Figura 1. Crie um novo ficheiro VHDL, introduza esse código e grave o ficheiro com o nome “Dec2_4En_Tb.vhd”.
5. Execute a ferramenta de simulação “*Questa Intel FPGA Starter Edition*”, através do menu “*Tools → Run Simulation Tool → RTL Simulation*”.
6. Caso surja um erro, localize o ficheiro “<pasta de instalação de Quartus>\22.1std\quartus\common\tcl\internal\nativelink\qnativelinkflow.tcl” e na linha 122 (set questa_installation “\$questa_fse_directory”) adicione aspas no fim: set questa_installation “\$questa_fse_directory” e grave o ficheiro (caso não consiga gravar diretamente, grave noutra sítio com o mesmo nome qnativelinkflow.tcl e depois mova o ficheiro para a pasta original).

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

entity Dec2_4En is
    port(enable : in std_logic;
          inputs : in std_logic_vector(1 downto 0);
          outputs : out std_logic_vector(3 downto 0));
end Dec2_4En;

architecture Behavioral of Dec2_4En is
begin
    process(enable, inputs)
    begin
        if (enable = '0') then outputs <= "0000";
        else
            if (inputs = "00") then
                outputs <= "0001";
            elsif (inputs = "01") then
                outputs <= "0010";
            elsif (inputs = "10") then
                outputs <= "0100";
            else
                outputs <= "1000";
            end if;
        end if;
    end process;
end Behavioral;
```

Figura 1 – Código VHDL de um decodificador binário 2→4 com *enable* (“Dec2_4En”).

NOTA: No contexto da simulação comportamental, o módulo “Dec2_4En” (ou outro que se pretenda simular e seja a “Unit Under Test – UUT” numa *testbench*) deve ser o *top-level* e compilado previamente no “Quartus Prime”. Por outro lado, o módulo relativo à *testbench* só pode ser compilado na ferramenta de simulação “Questa Intel FPGA Starter Edition”, atuando como *top-level* apenas no simulador.

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

-- Entidade sem portos
entity Dec2_4En_Tb is
end Dec2_4En_Tb;

architecture Stimulus of Dec2_4En_Tb is

    -- Sinais para ligar às entradas da UUT
    signal s_enable   : std_logic;
    signal s_inputs   : std_logic_vector(1 downto 0);

    -- Sinal para ligar às saídas da UUT
    signal s_outputs  : std_logic_vector(3 downto 0);

begin
    -- Instanciação da Unit Under Test (UUT)
    uut: entity work.Dec2_4En(Behavioral)
        port map(enable => s_enable,
                  inputs => s_inputs,
                  outputs => s_outputs);

    --Process stim
    stim_proc : process
    begin
        wait for 100 ns;
        s_enable <= '0';
        wait for 100 ns;
        s_enable <= '1';
        wait for 100 ns;
        s_inputs <= "00";
        wait for 100 ns;
        s_inputs <= "10";
        wait for 100 ns;
        s_inputs <= "01";
        wait for 100 ns;
        s_inputs <= "11";
        wait for 100 ns;
    end process;
end Stimulus;
```

Figura 2 – Código VHDL de uma *testbench* (“Dec2_4En_Tb”) para o decodificador binário 2→4 com *enable* (“Dec2_4En”).

7. Quando executada, a ferramenta de simulação “*Questa Intel FPGA Starter Edition*” deve apresentar o aspeto ilustrado na Figura 3. Caso a janela “Wave” (destinada ao desenho das formas de onda) não apareça, poderá ativá-la através do menu “View → Wave”.

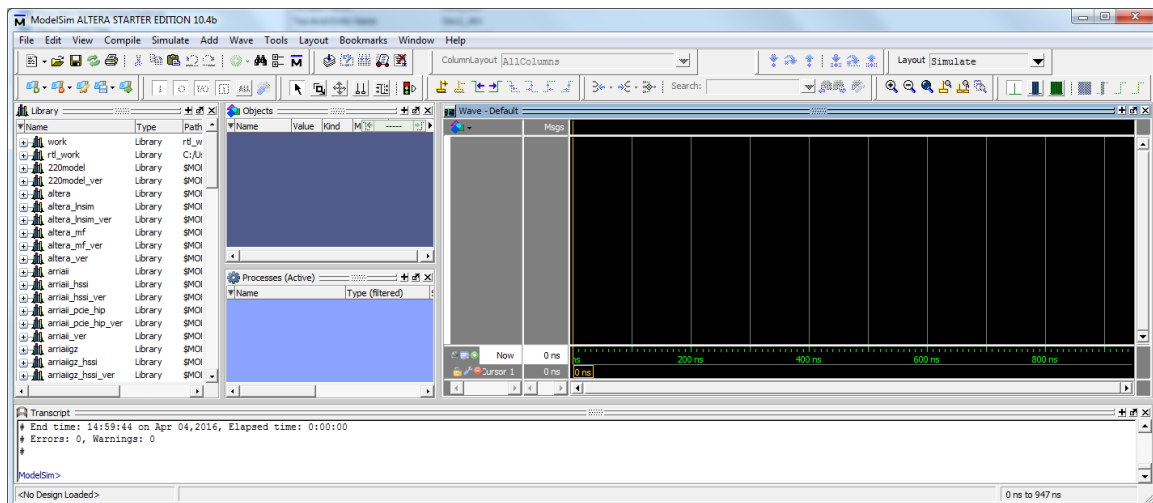


Figura 3 – Aspeto inicial da janela da ferramenta de simulação “*Questa Intel FPGA Starter Edition*”.

8. Compile a *testbench* através do menu “Compile → Compile”, seleccionando o ficheiro “Dec2_4En_Tb.vhd” e premindo “Compile” (Figura 4).

9. Inicie a simulação através do menu “Simulate → Start Simulation... → Optimization Options...”, seleccionando a opção “Apply full visibility to all modules” (Figura 5). Selecione a arquitetura Stimulus da entidade Dec2_4En_Tb.

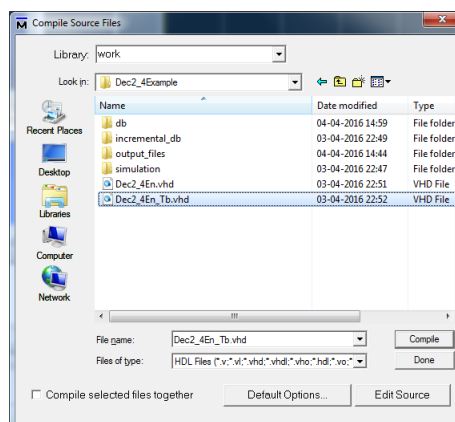


Figura 4 – Compilação da *testbench* “Dec2_4En_Tb.vhd”.

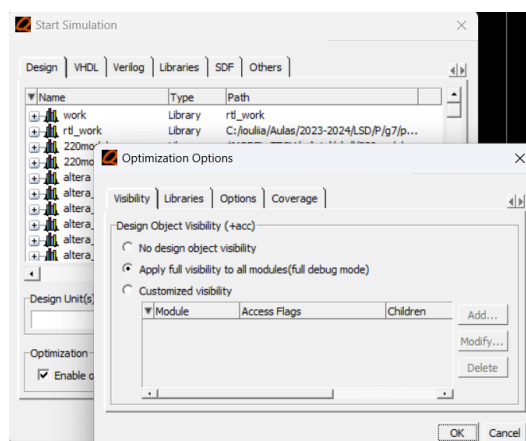


Figura 5 – Início da simulação da entidade Dec2_4En_Tb e arquitetura Stimulus.

10. Adicione à janela “Wave” (por *drag-and-drop* da janela “Objects”) os sinais da *testbench* ligados aos portos da entidade a simular (**s_enable**, **s_inputs** e **s_outputs**) conforme ilustrado na Figura 6.

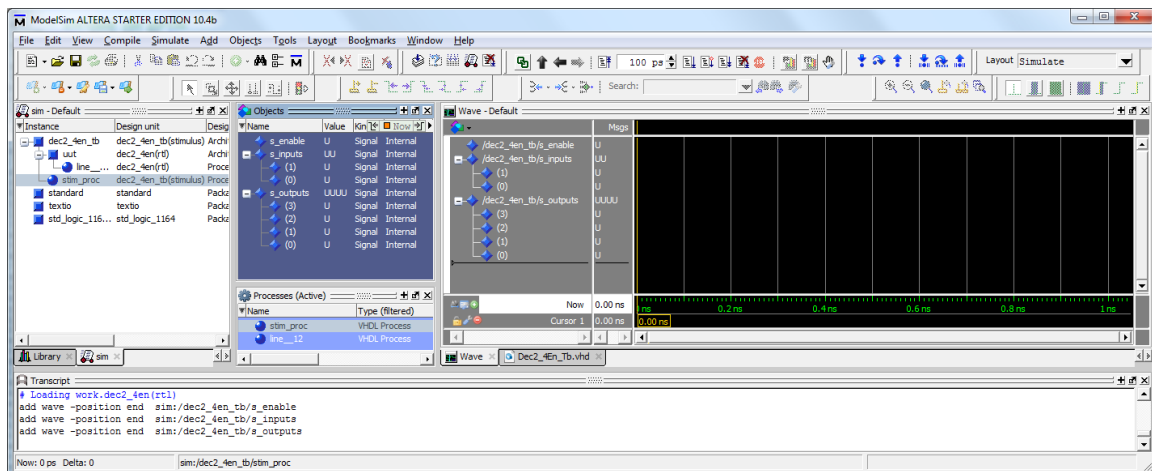


Figura 6 – Sinais **s_enable**, **s_inputs** e **s_outputs** adicionados à janela “Wave”.

11. Execute a simulação, especificando previamente o tempo pretendido (e.g. 1000 ns tal como ilustrado na Figura 7) e premindo “Run”. A janela “Wave” deve ser atualizada à medida que a simulação progride. Analise os resultados e no final feche a aplicação “*Questa Intel FPGA Starter Edition*” e de seguida o projeto.

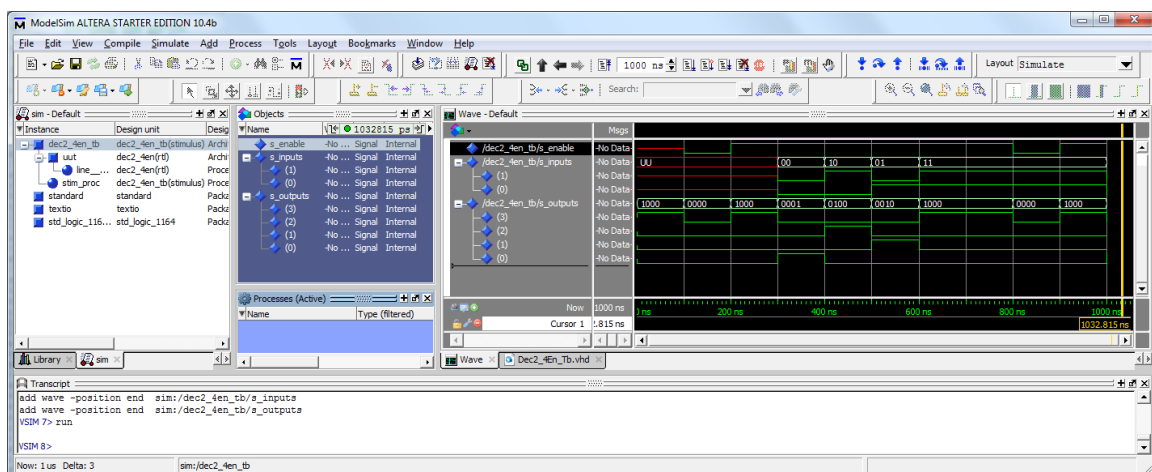


Figura 7 – Resultados de simulação do descodificador binário de 2→4 com *enable* “Dec2_4En.vhd” com a *testbench* “Dec2_4En_Tb.vhd”.

Parte II

Repita os passos da parte I deste guião para a simulação comportamental (com uma *testbench* em VHDL) do contador binário *up/down* de 4 bits apresentado nos slides da aula teórico-prática 7, como um exemplo de simulação de um componente sequencial.

Parte III

A simulação comportamental, realizada nas partes I e II deste guião, não toma em consideração os atrasos dos elementos lógicos da FPGA nem os atrasos devidos a recursos de encaminhamento; assume que todo o processamento é realizado em tempo zero, ou seja, que os elementos lógicos e recursos de interligação da FPGA são ideais.

Já a simulação temporal permite não só testar a função dum circuito mas também observar o cumprimento dos requisitos temporais, desde que sejam usados vetores de simulação adequados (que “exercitem” o caminho crítico). Para tal, utiliza o resultado da compilação, que incorpora o mapeamento da *netlist* em primitivas da FPGA e o seu posicionamento em localizações específicas, bem como o encaminhamento e interconexões entre as primitivas, o que permite obter estimativas bastante realistas dos atrasos envolvidos e assim modelar de forma mais precisa o comportamento do sistema em *hardware* real. Nesta parte, propõe-se a simulação temporal (com uma *testbench* em VHDL) de uma ALU de 16 *bits* semelhante à implementada (com 4 *bits*) na parte II do trabalho prático 3.

1. Abra a aplicação “*Quartus Prime*” e crie um novo projeto para a FPGA Cyclone IV EP4CE115F29C7. Poderá designar o projeto e a entidade *top-level* como “ALU16”.
2. O código VHDL apresentado na Figura 8 implementa uma ALU de 16 bits. Crie um novo ficheiro VHDL, introduza esse código e grave o ficheiro com o nome “ALU16.vhd”.
3. Execute o comando “*Analysis & Synthesis*” da aplicação “*Quartus Prime*” para realizar a análise e verificação sintática do projeto.
4. O código VHDL apresentado na Figura 9 implementa uma *testbench* para a ALU da Figura 8. Crie um novo ficheiro VHDL, introduza esse código e grave o ficheiro com o nome “ALU16_Tb.vhd”.
5. Realize a simulação comportamental da ALU com a *testbench* fornecida, executando a ferramenta “*Questa Intel FPGA Starter Edition*”, através do menu “*Tools → Run Simulation Tool → RTL Simulation*”, tal como na parte I deste guião. Apesar da *testbench* “ALU16_Tb.vhd” compilar com sucesso, a simulação não arranca devido a um erro. Sugestão: compile também o módulo “ALU16.vhd” na aplicação “*Questa Intel FPGA Starter Edition*” para ter mais informação sobre a causa do problema que não se manifestou anteriormente. **NOTA:** os módulos VHDL têm de ser compilados após terem sido alterados e antes de iniciar a simulação.
6. Analise os resultados da simulação que deverão ser semelhantes aos apresentados na Figura 10. Observe que a ALU não apresenta nesta simulação comportamental atrasos de propagação entre a alteração dos operandos de entrada e o resultado de saída. Para visualizar os valores dos sinais em hexadecimal, escolha a opção “*Radix → Hexadecimal*” do menu acessível com o botão direito do rato quando clica sobre o(s) sinal(is) pretendido(s) na janela “*Wave*”. No final feche a aplicação de simulação “*Questa Intel FPGA Starter Edition*”.

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

entity ALU16 is
    port(op : in std_logic_vector(2 downto 0);
          op0 : in std_logic_vector(15 downto 0);
          op1 : in std_logic_vector(15 downto 0);
          res : out std_logic_vector(15 downto 0);
          mHi : out std_logic_vector(15 downto 0));
end ALU16;

architecture Behavioral of ALU16 is

    signal s_mRes : std_logic_vector(31 downto 0);

begin

    s_mRes <= std_logic_vector(unsigned(op0) * unsigned(op1));

    process(op, op0, op1, s_mRes)
    begin
        case op is
            when "000" =>
                res <= std_logic_vector(unsigned(op0) + unsigned(op1));

            when "001" =>
                res <= std_logic_vector(unsigned(op0) - unsigned(op1));

            when "010" =>
                res <= s_mRes(15 downto 0);

            when "011" =>
                res <= std_logic_vector(unsigned(op0) / unsigned(op1));

            when "100" =>
                res <= std_logic_vector(unsigned(op0) rem unsigned(op1));

            when "101" =>
                res <= op0 and op1;

            when "110" =>
                res <= op0 or op1;

            when "111" =>
                res <= op0 xor op1;
            end case;
        end process;

        mHi <= s_mRes(31 downto 16) when (op = "010") else
            (others => '0');

    end Behavioral;
```

Figura 8 – Código VHDL de uma ALU de 16 bits ("ALU16").

```

library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.all;

entity ALU16_Tb is
end ALU16_Tb;

architecture Stimulus of ALU16_Tb is
    -- Sinais para ligar às entradas da UUT
    signal s_op   : std_logic_vector(2 downto 0);
    signal s_op0  : std_logic_vector(15 downto 0);
    signal s_op1  : std_logic_vector(15 downto 0);

    -- Sinais para ligar às saídas da UUT
    signal s_res  : std_logic_vector(15 downto 0);
    signal s_mHi  : std_logic_vector(15 downto 0);
begin
    uut: entity work.ALU16(Behavioral)
        port map(op   => s_op,
                  op0  => s_op0,
                  op1  => s_op1,
                  res  => s_res,
                  mHi  => s_mHi);

    --Process stim
    stim_proc : process
    begin
        s_op0 <= x"FEDC";
        s_op1 <= x"0123";
        s_op  <= "000"; -- +
        wait for 100 ns;
        s_op  <= "001"; -- -
        wait for 100 ns;
        s_op  <= "010"; -- *
        s_op1 <= x"89AB";
        wait for 100 ns;
        s_op  <= "011"; -- /
        s_op1 <= x"4567";
        wait for 100 ns;
        s_op  <= "100"; -- rem
        wait for 100 ns;
        s_op0 <= x"F30C";
        s_op1 <= x"F50A";
        s_op  <= "101"; -- and
        wait for 100 ns;
        s_op  <= "110"; -- or
        s_op1 <= x"0FA5";
        wait for 100 ns;
        s_op  <= "111"; -- xor
        wait for 100 ns;

        wait;

    end process;
end Stimulus;

```

Figura 9 – Código VHDL de uma *testbench* ("ALU16_Tb") para a ALU de 16 bits ("ALU16").

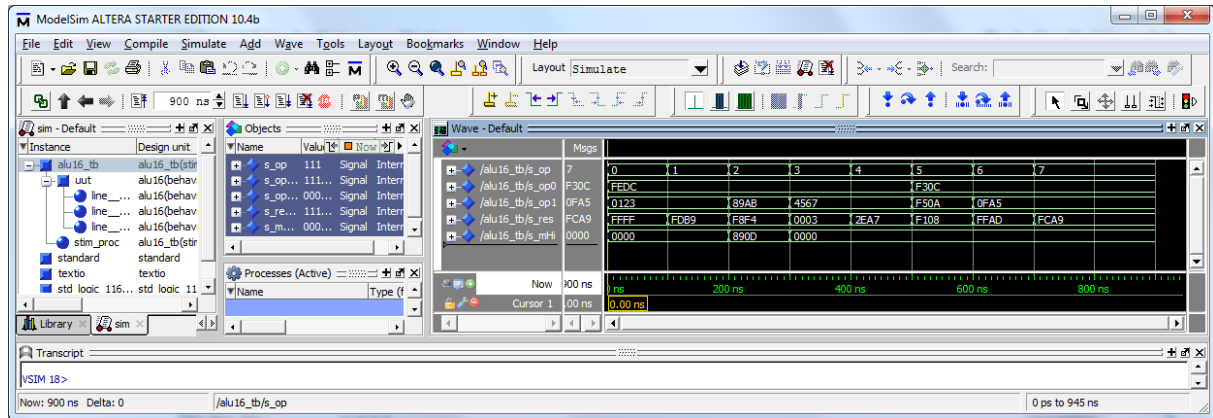


Figura 10 – Resultados da simulação comportamental da ALU de 16 bits com a *testbench* “ALU16_Tb”.

7. Para configurar as ferramentas de efetuar a simulação temporal da ALU, realize a seguinte sequência de passos:

- Especifique as opções de simulação através do menu “Assignments → Settings...” (que deverá abrir a janela da esquerda da Figura 11).
- Selecione a categoria “EDA Tool Settings (Simulation)”.
- Nas opções “NativeLink Settings” ative “Compile test bench:” e clique no botão “Test Benches...” (Figura 11).
- Na janela seguinte clique no botão “New...” e preencha todos os campos conforme ilustrado na Figura 12 (não se esquecendo de adicionar o ficheiro “ALU16_Tb.vhd” à lista de “Test bench and simulation files”).
- Voltando à janela anterior (Figura 11, janela da esquerda) selecione “More EDA Netlist Writer Settings”. Aparecem várias opções. Escolha “off” em “Generate functional simulation netlist”.
- Após configuração, as três janelas da Figura 11 devem apresentar o aspeto das Figuras 12 a 14.

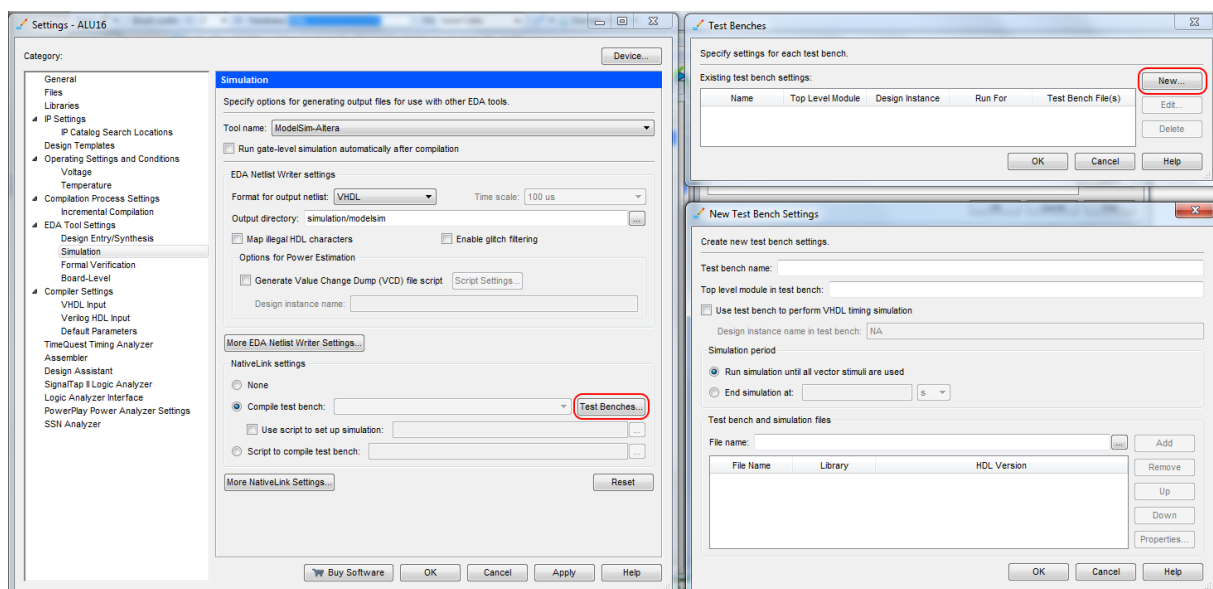


Figura 11 – Passos de configuração da *testbench* a usar na simulação temporal da ALU de 16 bits.

8. Execute a opção “Compile Design”. Para além de gerar o ficheiro de configuração da FPGA e os relatórios adequados, serão também criados o ficheiro “ALU16.vho” que contém a *netlist* sintetizada e o ficheiro “ALU16_vhd.sdo” com a informação temporal. Estes ficheiros encontram-se no subdiretório “simulation\questa” do projeto. Abra cada um destes ficheiros

e observe, no ficheiro “ALU16.vho”, que a arquitetura criada com o modelo da ALU pós-implementação possui o nome “**structure**”.

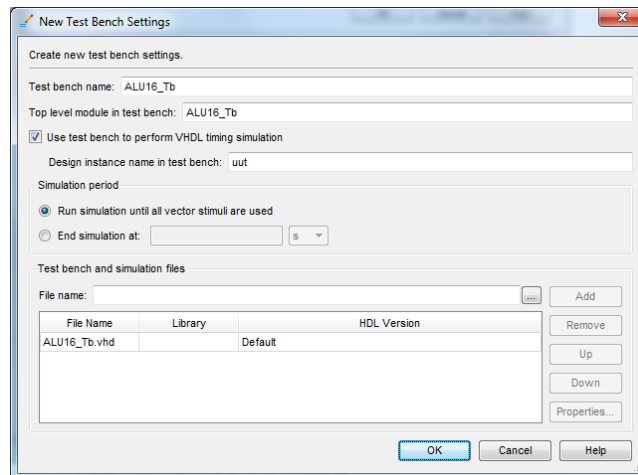


Figura 12 – Aspeto da janela “New Test Bench Settings” após configuração das opções.

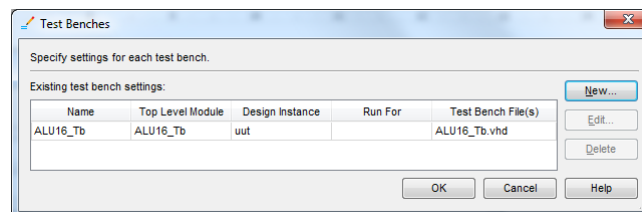


Figura 13 – Aspeto da janela “Test Benches” após configuração das opções.

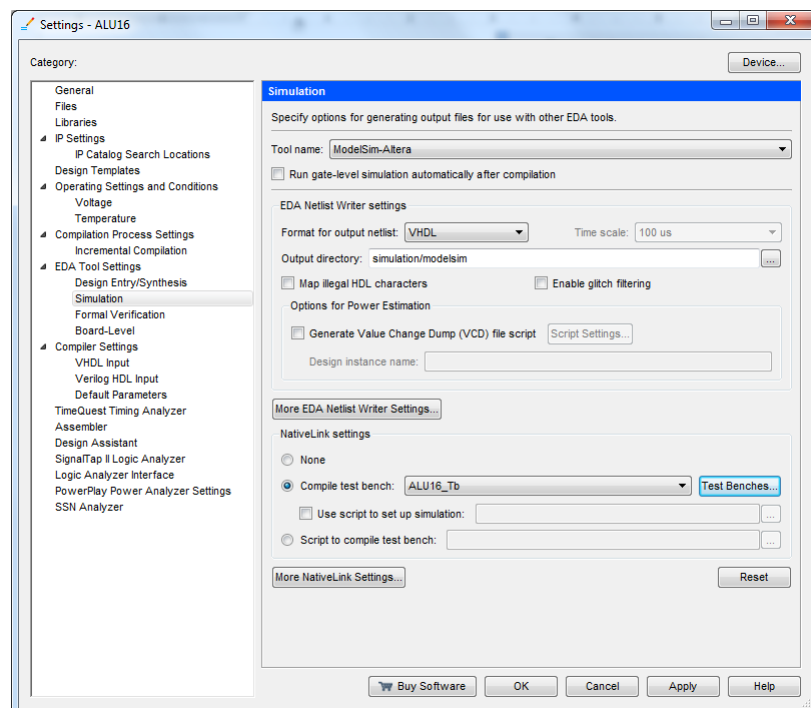


Figura 14 – Aspeto da janela “Settings” após configuração das opções.

9. Altere nome da arquitetura instanciada no módulo “ALU16_Tb” da *testbench* para “structure” (na linha “*uut: “entity work.ALU16(BehavioralStructure)”*”).

10. Execute a ferramenta de simulação “Questa Intel FPGA Starter Edition”, através do menu “Tools → Run Simulation Tool → Gate Level Simulation...”. Selecione o modelo temporal da simulação “Slow -7 1.2V 85 Model” e clique em “Run” (Figura 15).

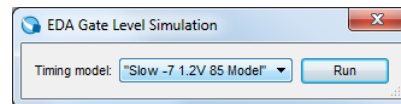


Figura 15 – Especificação do modelo temporal da simulação (*speed grade* da FPGA, tensão de alimentação e temperatura do dispositivo).

11. A simulação arrancará automaticamente, através de uma *script* gerada pelo “Quartus Prime” e de acordo com a configuração realizada no ponto 7. Analise os resultados da simulação (que deverão ser semelhantes aos apresentados na Figura 16) e observe os atrasos de propagação entre a modificação dos operandos de entrada e a atualização do resultado à saída da ALU. Faça “Zoom In” das forma de onda na janela “Wave” de forma a observar as múltiplas transições espúrias (*glitches*) que ocorrem sempre que o resultado da ALU é atualizado. A que se devem estes *glitches*?

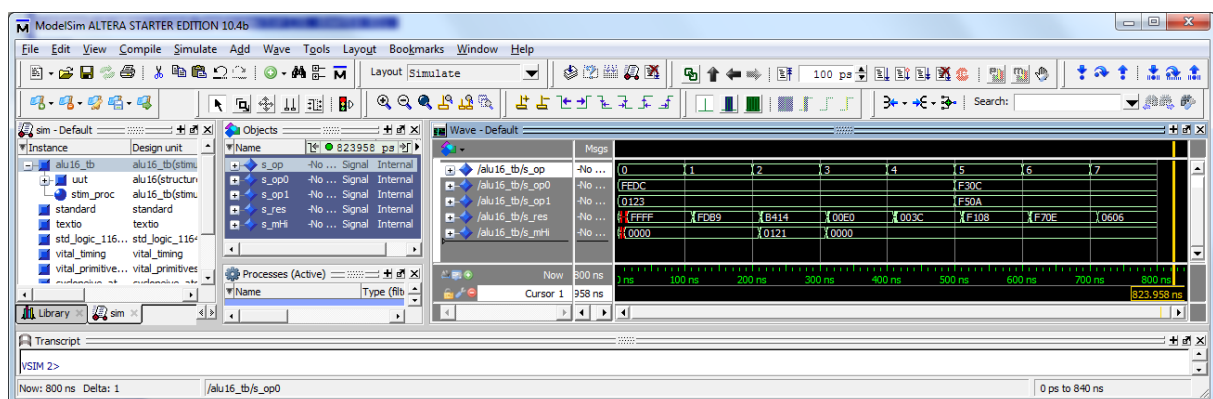


Figura 16 – Resultados da simulação temporal da ALU de 16 bits com a *testbench* “ALU16_Tb”.

Parte IV

1. Crie um novo projeto para a FPGA Cyclone IV EP4CE115F29C7. Poderá designar o projeto e a entidade *top-level* como “DebugDemo”. O projeto consistirá num contador binário crescente, apresentado na Figura 17 e descrito no ficheiro “CntUp.vhd”. O módulo *top-level* “DebugDemo.vhd” interliga os portos do contador a dispositivos do kit DE2-115 (Figura 18). Edite os ficheiros com o código fonte fornecido, grave-os com os nomes indicados, importe o ficheiro “master.qsf”, compile o projeto, programe a FPGA e responda às questões dos pontos seguintes.

- Qual a frequência de incremento (atualização) do contador?
- Que bits de saída do contador não estão ligados aos LEDs?
- Qual a frequência do bit de saída menos significativo do contador?
- Qual a frequência do bit de saída mais significativo do contador?

- e. Qual a frequência do bit de saída menos significativo do contador visível nos LEDs?
- f. Quanto tempo demora um ciclo completo de contagem (entre 2 passagens por zero)?

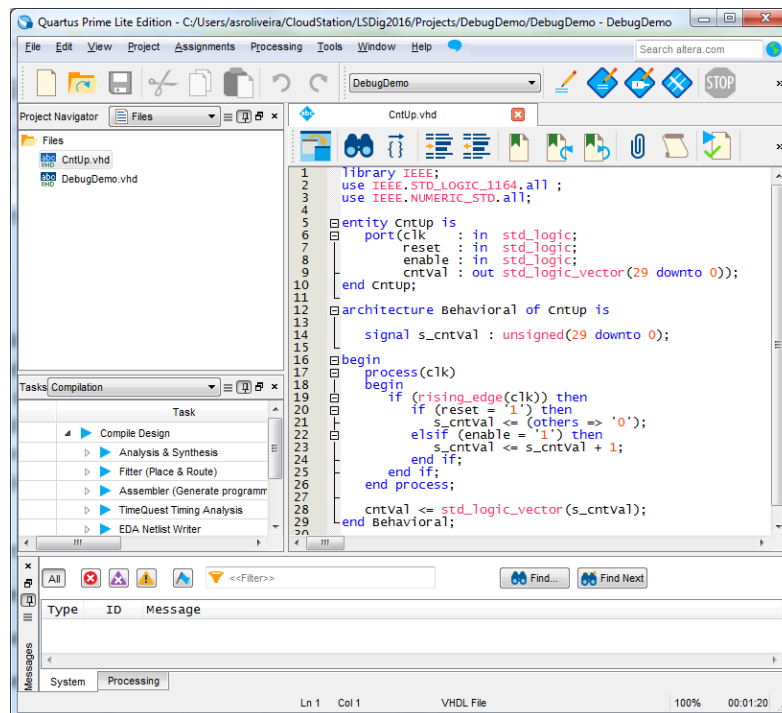


Figura 17 – Código fonte do módulo “CntUp.vhd”.

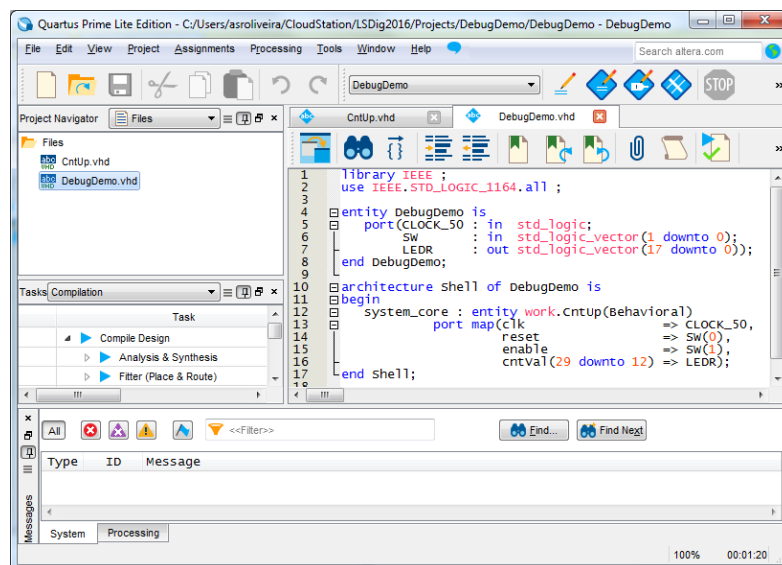


Figura 18 – Código fonte do módulo “DebugDemo.vhd”.

2. Devido à elevada frequência de comutação, a maioria dos bits do contador não podem ser devidamente observados a olho nu em dispositivos simples como os LEDs. Para resolver este problema e avaliar o funcionamento correto de todos os bits do contador vamos recorrer a uma ferramenta, genericamente designada por “Analisador Lógico Integrado”, tipicamente disponibilizada pelos fabricantes das FPGA. Estas ferramentas permitem especificar os sinais do sistema que pretendemos visualizar, adicionar de forma transparente e automática a lógica necessária para a sua captura, armazenamento e transferência para um computador de desenvolvimento onde será realizada a sua visualização. A lógica adicionada para este efeito utiliza os próprios recursos lógicos programáveis da FPGA. A interface para transferir os sinais capturados é também a usada na programação da FPGA (denominada JTAG e acessível através

do porto “USB Blaster”) o que é bastante conveniente. Para usar esta facilidade, o primeiro passo é a criação de um ficheiro no “Quartus Prime” do tipo “SignalTap Logic Analyzer File” (Figura 19).

3. Após a criação do ficheiro do tipo *SignalTap Logic Analyzer File* é apresentada a aplicação da Figura 20, onde devem ser especificados os sinais que se pretende capturar e visualizar, o sinal de *clock* usado para estabelecer a frequência de amostragem dos sinais, o número de amostras capturadas e as condições que disparam a amostragem. A configuração destes parâmetros vai ser descrita nos próximos pontos.

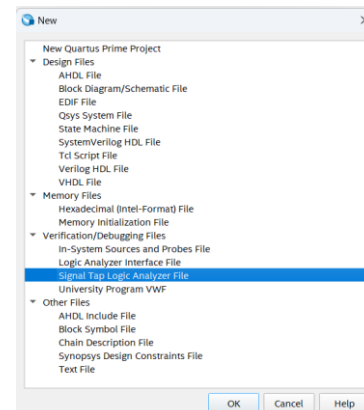


Figura 19 – Criação de um ficheiro do tipo “SignalTap Logic Analyzer File”.

4. O primeiro passo é a adição dos nodos (sinais e portos) do sistema que se pretende capturar. Para tal, deve ser seleccionada a opção “Add Nodes...” do menu acessível com o botão direito do rato na área “Setup” mostrada na Figura 20. Os portos a seleccionar para captura e visualização no analisador lógico são os apresentados na Figura 21. Selecione a opção “Design Entry (all names)” no parâmetro “Filter”.

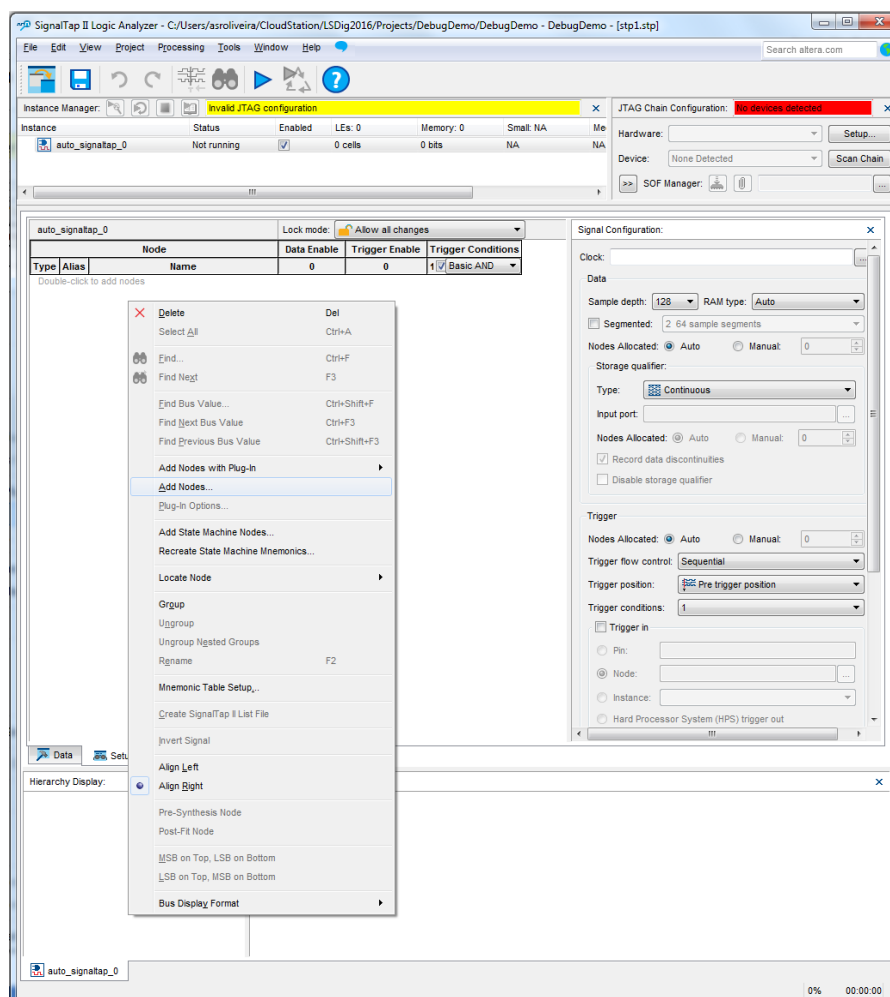


Figura 20 – Aspetto inicial da aplicação “SignalTap Logic Analyzer”.

5. Após premir *Insert* e fechar a janela de “*Node Finder*” deverá configurar na janela principal os seguintes parâmetros (Figura 22):

- **Hardware:** USB-Blaster (dispositivo/interface usado para programação e depuração)
- **Clock:** CLOCK_50 (sinal de relógio usado para estabelecer os instantes de amostragem / frequência de amostragem – 50 MHz)
- **Sample Depth:** 4K (número de amostras consecutivas a capturar)
- **Trigger Conditions** (condições que levam ao disparo da captura de amostras; neste caso *reset* = 0 e *enable* = 1 para capturar o instante em que é libertado o *reset*)
 - CntUp:system_core | reset = 0
 - CntUp:system_core | enable = 1

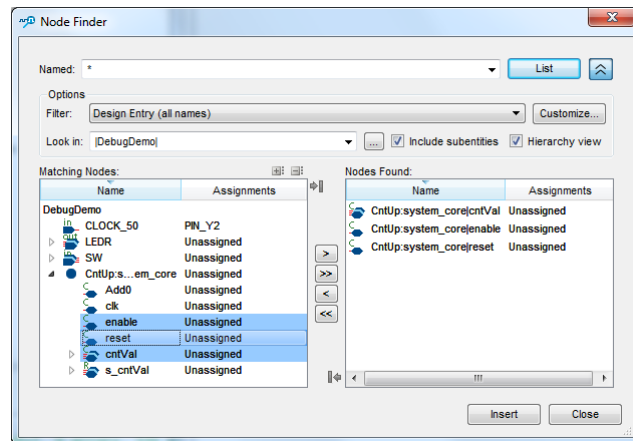


Figura 21 – Portos do contador seleccionados (“reset”, “enable” e “cntVal”).

6. Seguidamente, grave o ficheiro com o nome “DebugDemo.stp”.

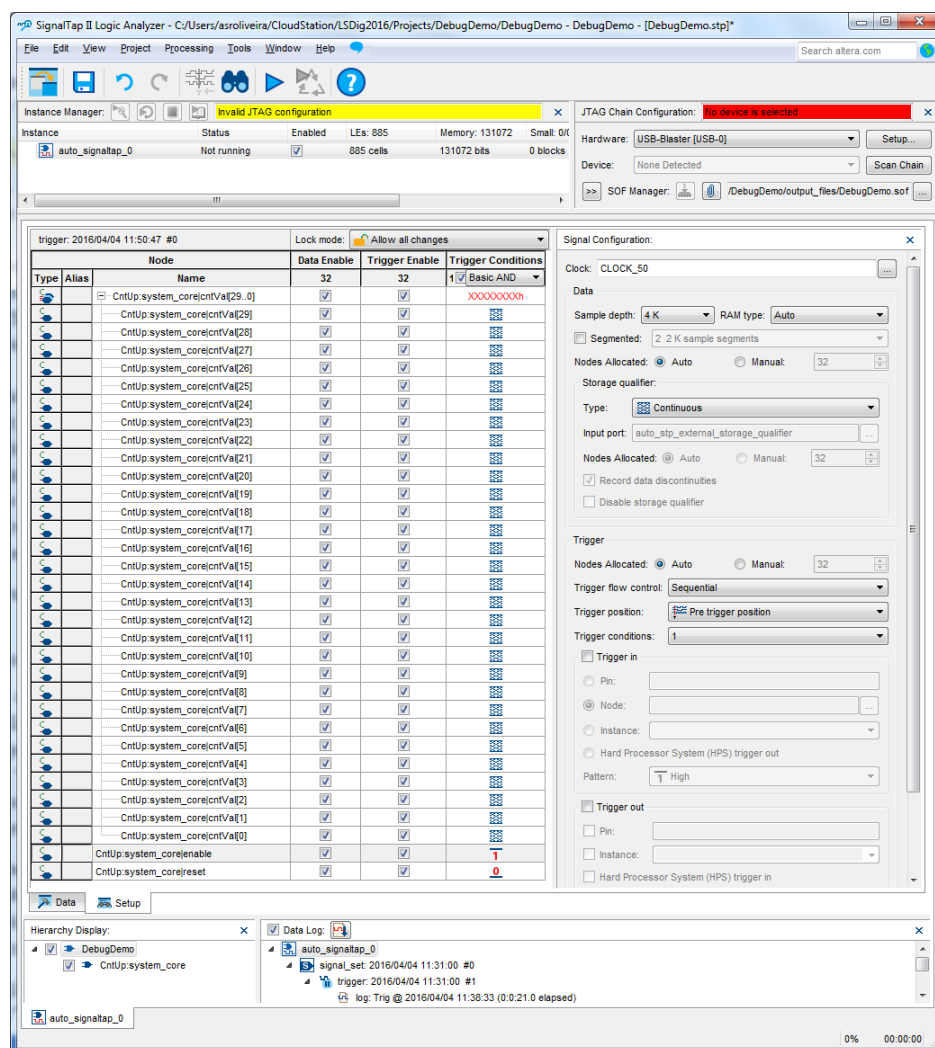



Figura 22 – Aspeto da aplicação “*SignalTap Logic Analyzer*” com os parâmetros configurados.

7. Uma vez que as componentes de hardware do analisador lógico usam recursos lógicos programáveis da FPGA, antes de efetuar a captura e visualização dos sinais, é necessário voltar a compilar todo o projeto no “*Quartus Prime*”. O projeto consiste nos ficheiros “*DebugDemo.vhd*”, “*CntUp.vhd*” e “*DebugDemo.stp*”. O ficheiro *top-level* deve continuar a ser o “*DebugDemo.vhd*”. Após compilação, execute a aplicação “*SignalTap Logic Analyzer*” (menu “*Tools → SignalTap Logic Analyzer*”).

8. Especifique o ficheiro SOF a usar para configurar a FPGA (“*output_files/DebugDemo.sof*”) e programe a FPGA (botão  no canto superior direito da Figura 22). O ficheiro SOF inclui quer a configuração da lógica do sistema desenvolvido, quer a configuração da lógica correspondente às componentes de hardware do analisador lógico.

9. Após a programação da FPGA (Figura 23) mude a janela principal da aplicação “*SignalTap Analyzer*” de “*Setup*” para “*Data*” (Figura 24). Neste ponto está tudo configurado e preparado para ser iniciada a captura de amostras dos sinais pretendidos. Para tal, basta selecionar o comando “*Processing → Run Analysis*” e de seguida desativar a entrada de “*reset*” e ativar a entrada de “*enable*” do contador de forma a que seja satisfeita a condição de *trigger* e iniciada a captura dos sinais pretendidos. Uma vez recolhidas 4K amostras de cada sinal, os respetivos valores são transferidos para o computador e visualizados na aplicação “*SignalTap Analyzer*” (Figura 25).

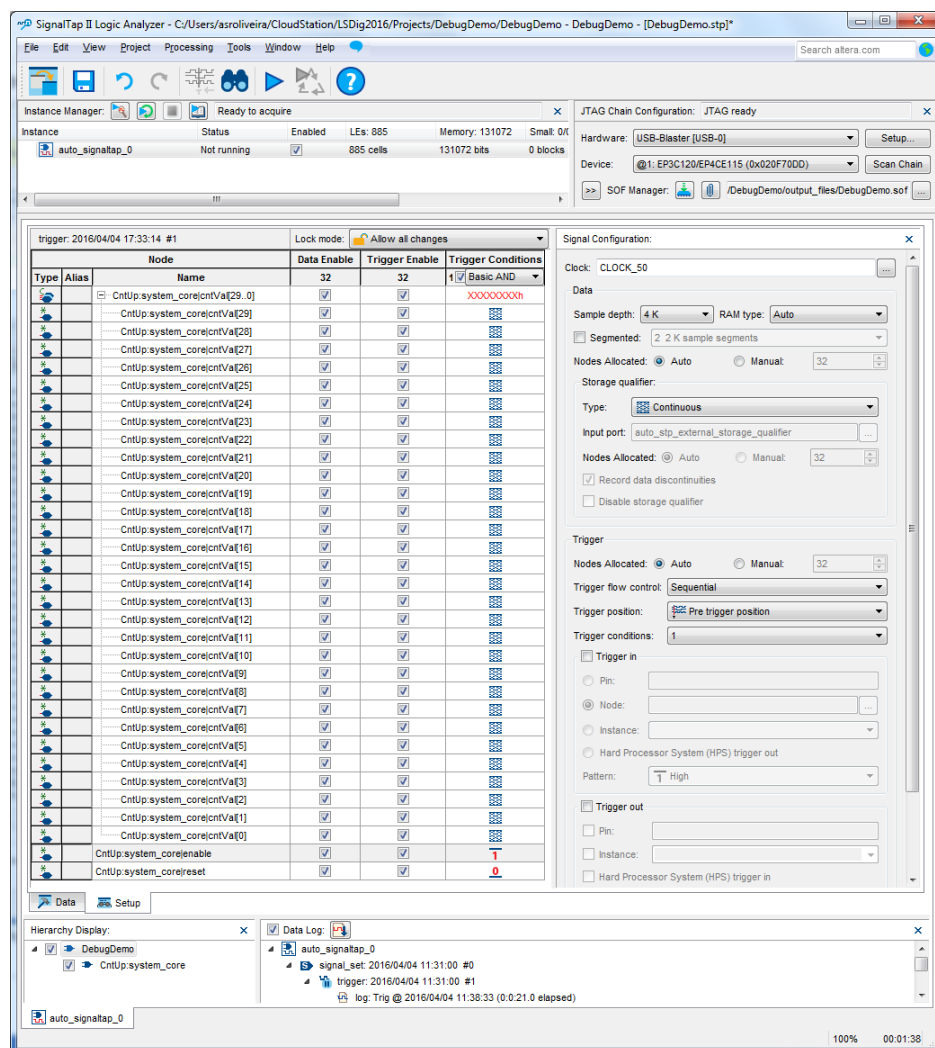


Figura 23 – Aspeto da aplicação “*SignalTap Logic Analyzer*” após programação da FPGA.

10. Podem ser visualizados instantes particulares da contagem se forem definidas condições de *trigger* mais restritas. A título de exemplo, pode ser visualizado o instante de *wrap-around* do contador através da atribuição do valor “11...100” a *cntVal*, o que leva a que a captura seja disparada três ciclos de relógio antes do contador voltar à contagem “00...00” (Figura 26). Volte a executar o comando “*Processing* → *Run Analysis*” para efetuar a captura (Figura 27).

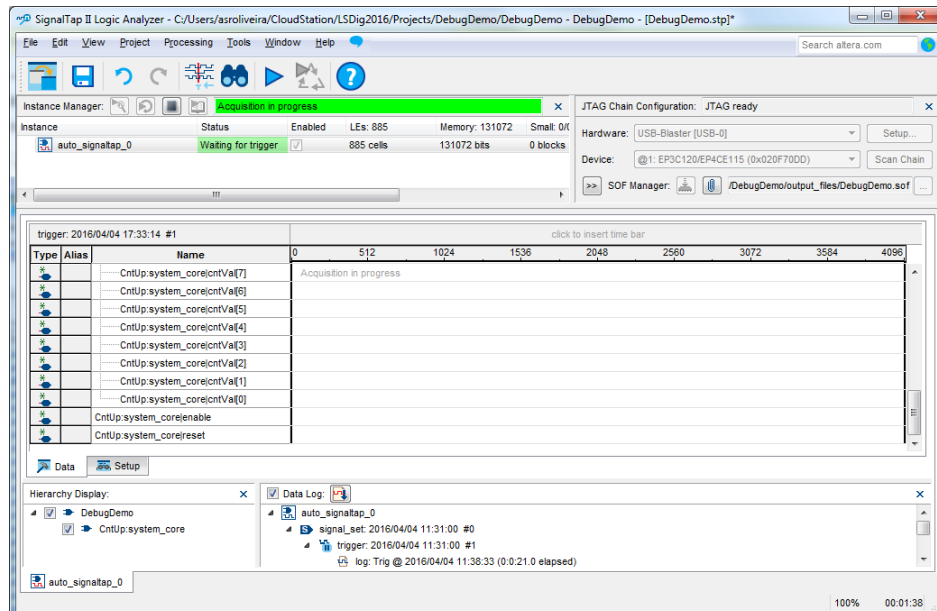


Figura 24 – Janela “Data” da aplicação “SignalTap Logic Analyzer” antes da captura (aguardar verificação da condição de disparo da captura).

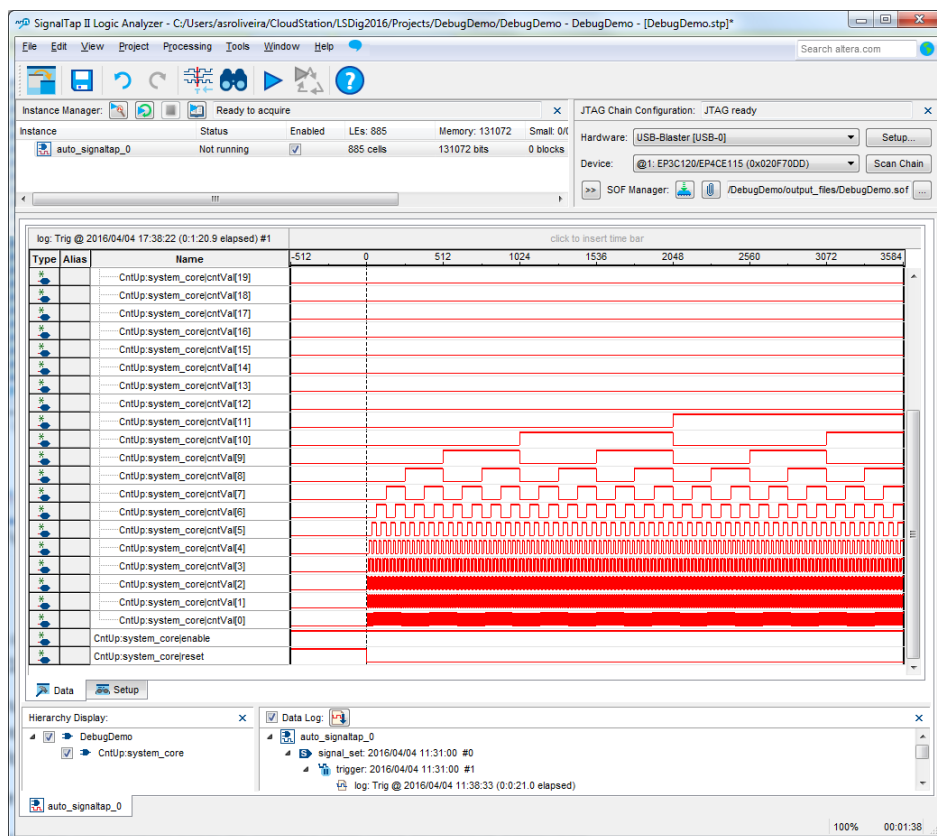


Figura 25 – Janela “Data” da aplicação “SignalTap Logic Analyzer” depois da captura.

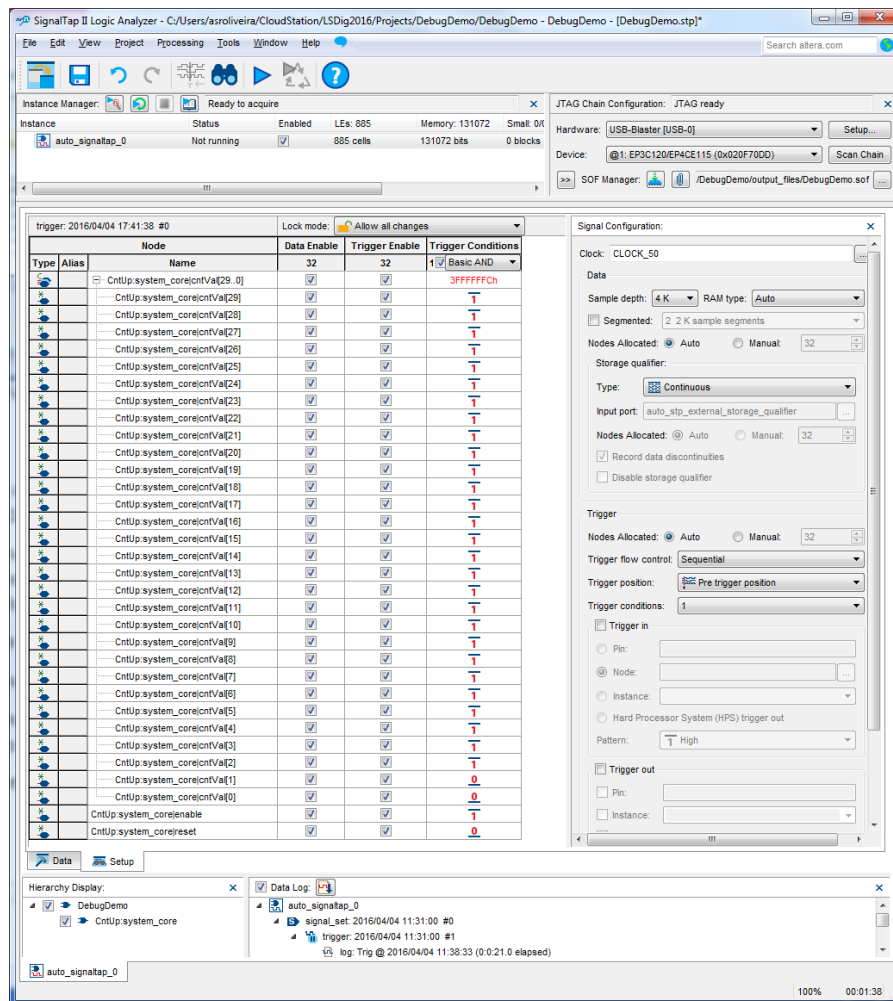


Figura 26 – Configuração do instante de disparo da captura (*trigger*) com base no valor dos sinais **reset**, **enable** e **cntVal**.

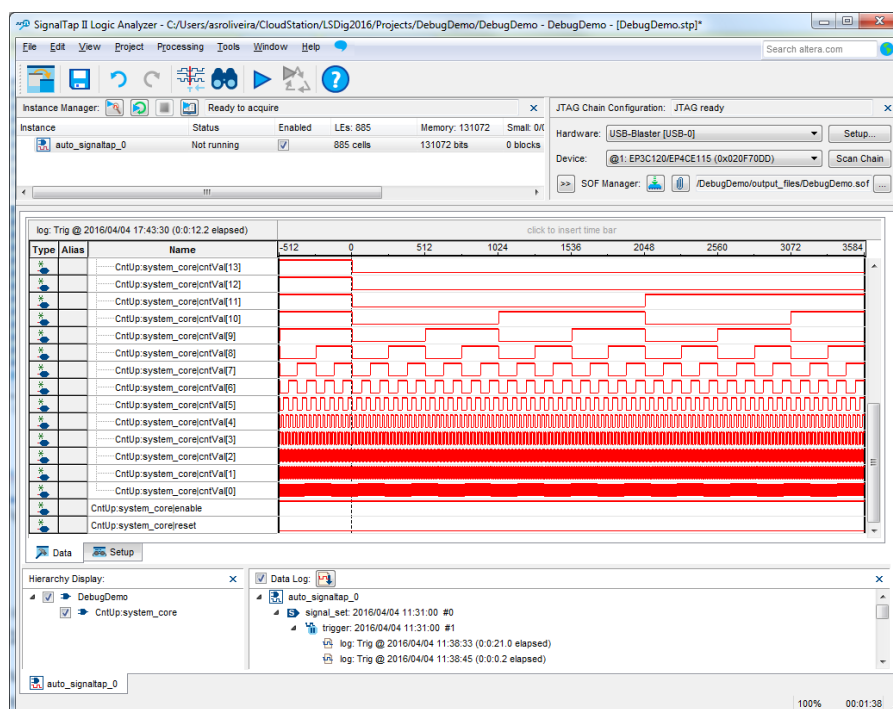


Figura 27 – Janela “Data” da aplicação “SignalTap Logic Analyzer” depois de uma nova aquisição, onde foi capturado o *wrap-around* do contador.

Parte V

1. Abra a aplicação “*Quartus Prime*” e crie um novo projeto para a FPGA Cyclone IV EP4CE115F29C7. Designe o projeto e a entidade *top-level* como “TimerTest”.

2. Construa um módulo relativo a um temporizador (parametrizável) de atraso à desoperação. Na sua instanciação utilize um sinal de relógio de 50 MHz e configure-o de modo a que, cada vez que for disparado, forneça um impulso na saída com a duração de 200 ns.

3. Realize todos os passos necessários para efetuar:

- A simulação comportamental do sistema com uma *testbench* adequada.
- A simulação temporal do sistema, após a sua compilação, com a mesma *testbench* do ponto anterior.
- A captura dos sinais em tempo-real e depuração do circuito implementado em FPGA.

[TPC] Repita os pontos anteriores para um temporizador (parametrizável) de atraso à operação.

Parte VI

[TPC] Desenvolva e teste um projeto no “*Quartus Prime*”, que utilize a aplicação “*SignalTap Logic Analyzer*”, para capturar e visualizar o *bounce* na comutação de contactos mecânicos dos interruptores e botões de pressão do kit DE2-115.

PDF criado em 22/01/2025 às 14:26:57