

Tutorial 2 - FPGA - NIOS

Nesse tutorial iremos criar e customizar um soft processor (sistema embarcado com um processador e periférico), embarcar na FPGA e escrever um código para ele. Ao final, vamos ter os mesmos LEDs que do projeto anterior, com operação similar, mas agora sendo controlados por um programa e não por um hardware dedicado.

Pré-requisitos

Para seguir esse tutorial, é necessário:

- **Hardware:** DE10-Standard e acessórios
- **Softwares:** Quartus 18.01
- **Documentos:** [DE10-Standard_User_manual.pdf](#)

Entrega no git:

- **Pasta:** `Tutorial-FPGA-NIOS`

Soft processor

Projetos em HDL não são muito flexíveis, cada alteração no projeto implica na modificação do Hardware o que não é algo tão simples. Além da dificuldade de implementar as modificações, temos o tempo de teste e compilação do projeto que não é algo imediato.

Uma solução para tornar o projeto mais flexível é o de tornar os LEDs controlados não por uma lógica dedicada mas sim por um hardware que possa executar uma série de instruções: um microcontrolador.

Como a FPGA pode implementar circuitos lógicos digitais, é possível sintetizarmos um microcontrolador na FPGA e fazermos esse uC controlar os LEDs (Sim!! o uC é um hardware descrito em HDL). Agora a alteração na lógica

de controle depende do programa que será executado no uC, tornando o projeto muito mais flexível.

O ARM também é um código em HDL:

- <https://www.arm.com/about/newsroom/arm-offers-free-access-to-cortex-m0-processor-ip-to-streamline-embedded-soc-design.php>

Processadores que são sintetizáveis em dispositivos lógicos programáveis (FPGA,..) são chamados de **Soft Processor**. Diversos são os Soft Processors disponíveis comercialmente/ open source:

- **NIOS II: Intel**
- **MicroBlazer: Xilinx**
- 👉 **LEON: Gaisler** (aerospacial/ SPARCV8)
- dentre outros

A adição de periféricos e funcionalidades extras ao Soft Processor (podemos por exemplo colocar um gerenciador de memória, timers, controlador de rede, ...) faz com que o sistema passe a ser chamado de **System On Chip** (SoC).

Hard Processor são os microprocessadores tradicionais, que não sofrem alteração de HW.

Existem SoCs que não são implementados em FPGAs, mas ainda assim concentram uma série de outros componentes em um único chip, é o caso dos SoCs utilizados em celulares. Esses dispositivos, muitas vezes utilizam SoCs que possuem além da parte de processamento, sistemas responsáveis pela comunicação pela: interface gráfica; gestão das câmeras; comunicação 4g; A Qualcomm é uma das empresas líderes do setor com o dispositivo **SnapDragon**.

Plataform Designer

O Platform Designer era chamado de QSYS, ainda dá para achar muitas coisas com essa referência

O Platform Designer é um software disponível pela INtel e integrado no Quartus que possibilita desenvolvermos sistemas complexos de forma simples e visual. Com ele podemos adicionar e conectar **Intellectual property cores** (IP Core) para desenvolvermos uma aplicação de maneira rápida e visual.

Os IP cores podem ser da própria **Intel**, de terceiros ou proprietários.



Quer se aprofundar?

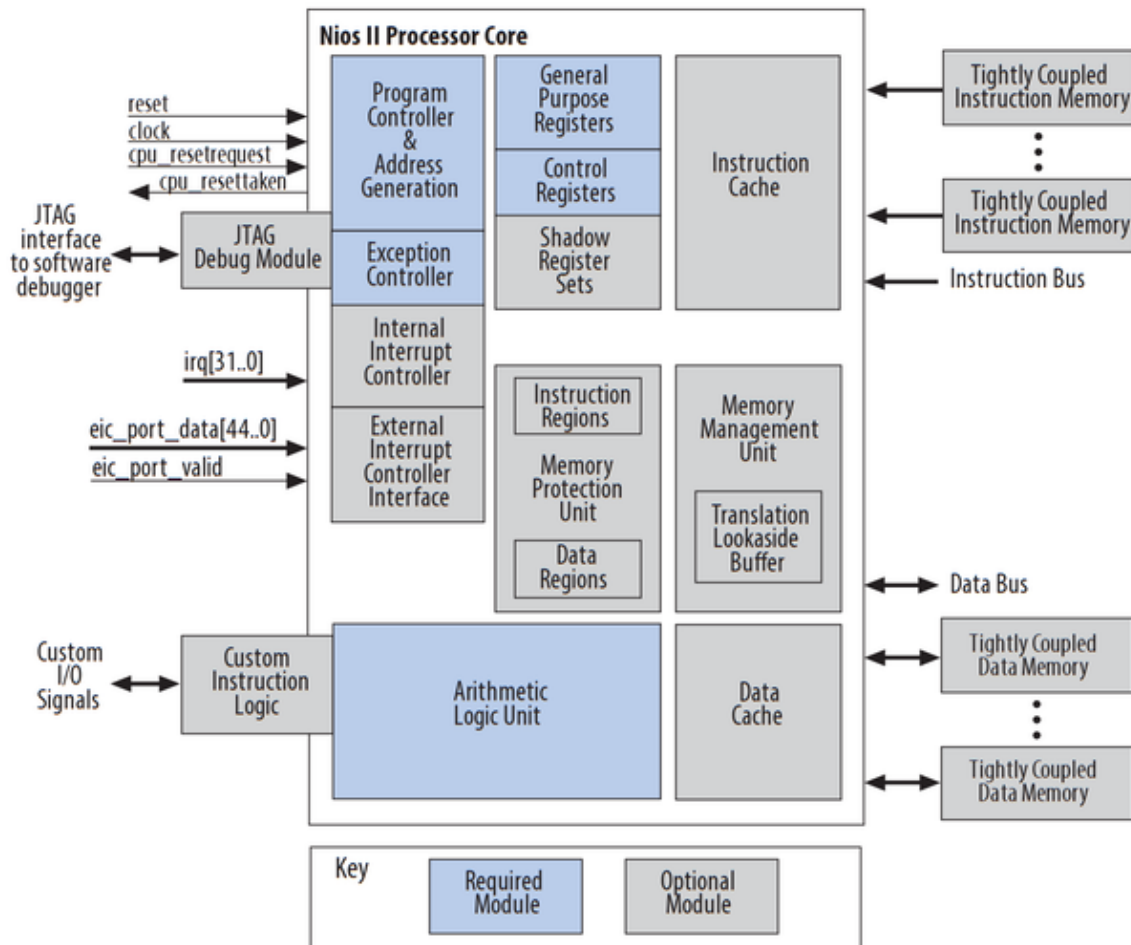


Tem um curso online que mostra como o PD funciona: [Introduction to Platform Designer](#)

NIOS

NIOS é o soft processor fornecido pela Altera-Intel e integrado na ferramenta. O NIOS é baseado na arquitetura do MIPS com **arquitetura de 32 bits** e controle de exceções, barramento de comunicação, controle de memória,

A figura a seguir descreve os componentes essenciais do NIOS (azul) e o que é customizável (cinza).



- **Processor Architecture**

O NIOS suporta que novas instruções sejam adicionadas a seu instruction set, essas instruções são implementadas em HDL e inseridas no core de forma transparente ao desenvolvedor. Existem graus de instruções customizadas: Combinacional; Multiciclo; Estendidas; Que faz uso do banco de registradores original ou aquelas que adicionam novos registradores. Para maiores detalhes consulte o documento :

- **Nios II Custom Instruction User Guide**

Criando um simples SoC

Nesse etapa iremos adicionar um processador e a infraestrutura mínima necessária para sua operação, iremos incluir no projeto:

- Uma interface de clock

- Uma memória (de dados e programa)
- O processador (NIOS II)
- Um periférico PIO (para gerenciar saídas digitais)
- Um JTAG-UART, para suportar debug via print.

Para começarmos:

1. Copie a pasta do projeto da Entrega-1 renomeando para Tutorial-FPGA-NIOS
2. Abra essa nova pasta Tutorial-FPGA-NIOS no Quartus
3. Abra o Platform Designer:
4. **Quartus** → **Tools** → **Platform Designer**
5. Adicione os seguintes periféricos:
6. On-Chip Memory (RAM or ROM Intel FPGA IP)
 - Type: **RAM**
 - Total Memory size: **32768 bytes**
7. JTAG UART Intel FPGA IP
 - **Default**
8. PIO (Parallel I/O) Intel FPGA IP
 - Width: **6**
 - Direction: **Output**
9. NIOS II
 - Type: **NIOS II/e**

Você deve obter algo similar a:

System Contents Address Map Interconnect Requirements Schematic									
System: niosHello Path: onchip_memory2_0.reset1									
Use	Connections	Name	Description	Export	Clock	Base	End	IRQ	
<input checked="" type="checkbox"/>		clk_0	Clock Source	clk	exported				
<input checked="" type="checkbox"/>		onchip_memory2_0	On-Chip Memory (RAM or ROM)	reset	clk_0				
<input checked="" type="checkbox"/>		jtag_uart_0	JTAG UART	clk	unconnected				
<input checked="" type="checkbox"/>		pio_0	PIO (Parallel I/O)	clk	unconnected				
<input checked="" type="checkbox"/>		nios2_gen2_0	Nios II Processor	clk	unconnected				

Conectando Clock e Reset

Os periféricos do Qsys são como sistemas independentes (pensem em cada bloco é como um chip), que necessitam ser conectados no mínimo a um Clock e a um Reset. O sistema pode operar em diversos domínios de clocks e resets diferentes, portanto essa conexão deve ser feita pelo desenvolvedor.

Pense nessa etapa como sendo similar ao port map do VHDL, porém em um nível muito mais superior. O Qsys será responsável por fazer a compatibilidade dos sinais para nós. Conecte todos os sinais de clocks e reset aos sinais `clk` e `clk_rst` do periférico `clk_0`, conforme figura a seguir:

System Contents Address Map Interconnect Requirements Schematic									
System: niosHello Path: onchip_memory2_0.reset1									
Use	Connections	Name	Description	Export	Clock	Base	End	IRQ	
<input checked="" type="checkbox"/>		clk_0	Clock Source	clk	exported				
<input checked="" type="checkbox"/>		onchip_memory2_0	On-Chip Memory (RAM or ROM)	reset	clk_0				
<input checked="" type="checkbox"/>		jtag_uart_0	JTAG UART	clk	clk_0				
<input checked="" type="checkbox"/>		pio_0	PIO (Parallel I/O)	clk	clk_0				
<input checked="" type="checkbox"/>		nios2_gen2_0	Nios II Processor	clk	clk_0				

Conectando barramento

A Altera define dois tipos de barramento de dados para o Qsys: Avalon e AXI. O barramento Avalon é a principal maneira de conectar um periférico ao NIOS (processador), já o AXI é o padrão de barramento do ARM, que será utilizado posteriormente.

O barramento Avalon define basicamente dois tipos de comunicação: **Memory Mapped (MM)** e **Avalon Streaming Interface (ST)**, conforme descrição a seguir extraído da documentação :

- [Avalon Interface Specifications](#)

O principal barramento do NIOS é o **memory mapped**, e todo periférico conectado ao **NIOS** (processador) deverá possuir esse barramento. A Altera disponibiliza conversores e adaptadores para podermos transforma uma forma de comunicação na outra.

Em um futuro breve nós iremos desenvolver um periférico proprietário que será conectado nesse barramento. Melhorando o entendimento do sistema.

Note que o NIOS possui dois barramentos do tipo **MM**: `data_master` e `instruction_master` . Como o NIOS II é um processador baseado no MIPS **harvard** ele possui dois barramentos, um para dados e outro para o programa (instrução).

Nessa nossa topologia de hardware, só possuímos uma única memória (**on_chip_memory**) que será a principio compartilhada entre o dado e programa (temos uma perda de eficiência aqui, já que a memória só poderá ser acessada por um barramento por vez), **depois vamos melhorar isso!**

Vamos portanto conectar todos os periféricos (**PIO, UART e OnChip Memory**) ao barramento `data_master` e vamos conectar somente a memória (**OnChip Memory**) ao barramento de instrução (`instruction_master`), resultando na montagem a seguir:

System Contents Address Map Interconnect Requirements									
System: niosHelloTutorial Path: clk_0									
Use	Connections	Name	Description	Export	Clock	Base	End	IRQ	
<input checked="" type="checkbox"/>		clk_0	Clock Source	clk	exported				
		clk_in	Reset Input	reset	clk_0				
		clk_in_reset	Reset Input	Double-click to					
		clk	Clock Output	Double-click to					
		clk_reset	Reset Output	Double-click to					
<input checked="" type="checkbox"/>		onchip_memory2_0	On-Chip Memory (RAM or ROM)	Double-click to	clk_0	# 0x0000_0000	0x0000_ffff		
		clk1	Clock Input	Double-click to	[clk1]				
		s1	Avalon Memory Mapped Slave	Double-click to					
		reset1	Reset Input	Double-click to					
<input checked="" type="checkbox"/>		jtag_uart_0	JTAG UART	Double-click to	clk_0	# 0x0001_1010	0x0001_1017		
		clk	Clock Input	Double-click to	[clk]				
		reset	Reset Input	Double-click to					
		avalon_jtag_slave	Avalon Memory Mapped Slave	Double-click to					
		irq	Interrupt Sender	Double-click to					
<input checked="" type="checkbox"/>		pio_0	PIO (Parallel I/O)	Double-click to	clk_0	# 0x0001_1000	0x0001_100f		
		clk	Clock Input	Double-click to	[clk]				
		reset	Reset Input	Double-click to					
		s1	Avalon Memory Mapped Slave	Double-click to					
		external_connection	Conduit	Double-click to					
<input checked="" type="checkbox"/>		nios2_gen2_0	Nios II Processor	Double-click to	clk_0				
		clk	Clock Input	Double-click to	[clk]				
		reset	Reset Input	Double-click to					
		data_master	Avalon Memory Mapped Master	Double-click to					
		instruction_master	Avalon Memory Mapped Master	Double-click to					
		irq	Interrupt Receiver	Double-click to					
		debug_reset_request	Reset Output	Double-click to					
		debug_mem_slave	Avalon Memory Mapped Slave	Double-click to					
		custom_instruction_master	Custom Instruction Master	Double-click to					

Mapa de memória

Após realizarmos as conexões, devemos especificar o endereço de memória de cada periférico. São duas as maneiras de realizarmos isso: manual ou automática.

Na manual, pode-se alocar os periféricos em endereços de memória a sua escolha, tomando os cuidados para não haver sobreposição dos endereços. Na automática, deixamos para a ferramenta alocar os periféricos nos endereços corretos.

Para realizar a alocação automática: System ➔ Assign Base Address . Para visualizar o resultado, clique na aba: Address Map

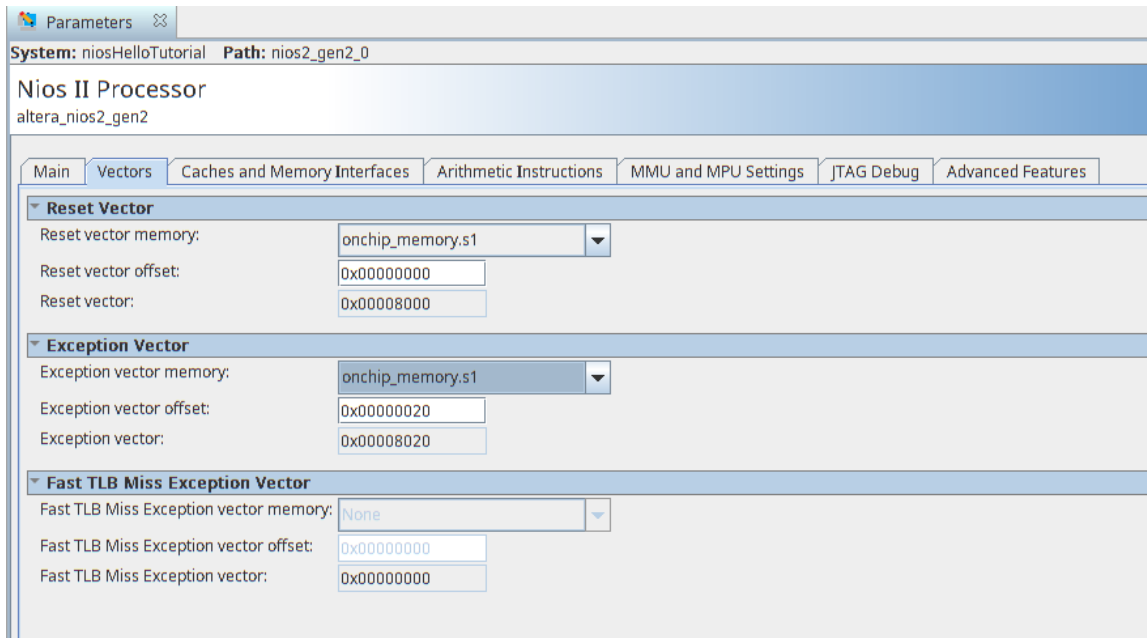
System Contents Address Map Interconnect Requirements Schematic			
System: niosHello Path: clk_0			
	nios2_gen2_0.data_master ▲	nios2_gen2_0.instruction_master	
onchip_memory2_0.s1	0x0000_0000 - 0x0000_ffff	0x0000_0000 - 0x0000_ffff	
nios2_gen2_0.debug_mem_sl...	0x0001_0000 - 0x0001_0fff	0x0001_0000 - 0x0001_0fff	
pio_0.s1	0x0001_1000 - 0x0001_100f		
jtag_uart_0.avalon_jtag_slave	0x0001_1010 - 0x0001_1017		

Configurando NIOS

Agora precisamos configurar o NIOS para utilizar a memória recém conectada a ele, de um clique duplo no NIOS, para abrir a aba: **Parameters**.

Em Vector  configure :

- Reset vector memory: **onchip_memory**
- Exception vector memory: **onchip_memory**



Dica

O nome **onchip_memory** pode alterar de acordo com o seu projeto e o endereço também (isso depende da ordem na qual os componentes foram inseridos).

Export

A coluna export do **Platform Designer** indica quais sinais serão exportados para fora do sistema, pense nesses sinais como sendo os que terão contato com o mundo externo (serão mapeados para os pinos no topLevel).

De um clique duplo na coluna export na linha do sinal **external_connection** do component **PIO** e de o nome de LEDs para esse sinal.


Finalizando

Ao final de tudo você deve obter algo como a figura a seguir:

System: niosHello Path: nios2_gen2_0.data_master									
Use	Connections	Name	Description	Export	Clock	Base	End	IRQ	
<input checked="" type="checkbox"/>		clk_0	Clock Source	clk	exported				
<input checked="" type="checkbox"/>		clk_in	Clock Input	reset	clk_0				
<input checked="" type="checkbox"/>		clk_in_reset	Reset Input	Double-click to					
<input checked="" type="checkbox"/>		clk	Clock Output	Double-click to					
<input checked="" type="checkbox"/>		clk_reset	Reset Output	Double-click to					
<input checked="" type="checkbox"/>		onchip_memory2_0	On-Chip Memory (RAM or ROM)	Double-click to					
<input checked="" type="checkbox"/>		clk1	Clock Input	Double-click to	clk_0				
<input checked="" type="checkbox"/>		s1	Avalon Memory Mapped Slave	Double-click to	[clk1]	0x0000_8000	0x0000_ffff		
<input checked="" type="checkbox"/>		reset1	Reset Input	Double-click to	[clk1]				
<input checked="" type="checkbox"/>		jtag_uart_0	JTAG UART	Double-click to	clk_0				
<input checked="" type="checkbox"/>		clk	Clock Input	Double-click to	[clk]				
<input checked="" type="checkbox"/>		reset	Reset Input	Double-click to	[clk]				
<input checked="" type="checkbox"/>		avalon_jtag_slave	Avalon Memory Mapped Slave	Double-click to	[clk]	0x0001_1010	0x0001_1017		
<input checked="" type="checkbox"/>		irq	Interrupt Sender	Double-click to	[clk]				
<input checked="" type="checkbox"/>		pio_0	PIO (Parallel I/O)	Double-click to	clk_0				
<input checked="" type="checkbox"/>		clk	Clock Input	Double-click to	[clk]				
<input checked="" type="checkbox"/>		reset	Reset Input	Double-click to	[clk]				
<input checked="" type="checkbox"/>		s1	Avalon Memory Mapped Slave	Double-click to	[clk]	0x0001_1000	0x0001_100f		
<input checked="" type="checkbox"/>		external_connection	Conduit	Double-click to	leds				
<input checked="" type="checkbox"/>		nios2_gen2_0	Nios II Processor	Double-click to	clk_0				
<input checked="" type="checkbox"/>		clk	Clock Input	Double-click to	[clk]				
<input checked="" type="checkbox"/>		reset	Reset Input	Double-click to	[clk]				
<input checked="" type="checkbox"/>		data_master	Avalon Memory Mapped Master	Double-click to	[clk]				
<input checked="" type="checkbox"/>		instruction_master	Avalon Memory Mapped Master	Double-click to	[clk]				
<input checked="" type="checkbox"/>		irq	Interrupt Receiver	Double-click to	[clk]				
<input checked="" type="checkbox"/>		debug_reset_request	Reset Output	Double-click to	[clk]				
<input checked="" type="checkbox"/>		debug_mem_slave	Avalon Memory Mapped Slave	Double-click to	[clk]	0x0001_0800	0x0001_0fff		
<input checked="" type="checkbox"/>		custom_instruction_master	Custom Instruction Master	Double-click to					

Salve o projeto com o nome `niosHello.qsys` na pasta do projeto e clique em **Generate HDL**, para o Qsys gerar o projeto.

Utilizando o componente

Ainda no Qsys, clique em: **Generate**  **Show Instatiation Template**, selecione VHDL como linguagem HDL. E você deve obter algo como:

Dica

Anote isso, iremos utilizar na próxima etapa!

```

component niosHello is
  port (
    clk_clk      : in  std_logic                                := 'X';
    -- clk
    reset_reset_n : in  std_logic                                := 'X';
    -- reset_n
    leds_export   : out std_logic_vector(5 downto 0)
    -- export
  );
end component niosHello;

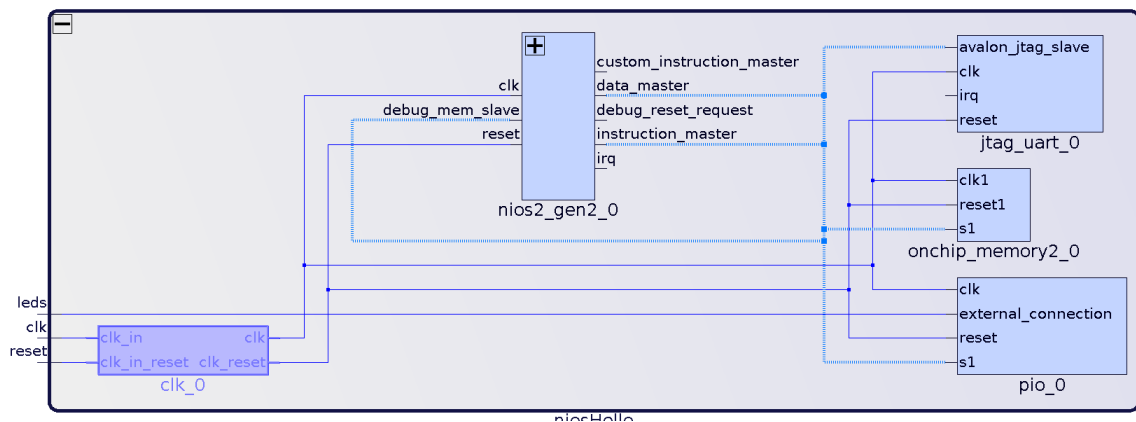
u0 : component niosHello
  port map (
    clk_clk      => CONNECTED_TO_clk_clk,      -- clk.clk
    reset_reset_n => CONNECTED_TO_reset_reset_n, --
    reset.reset_n
    leds_export  => CONNECTED_TO_leds_export  --
  
```

```
leds.export  
);
```

Isso é um atalho de como devemos utilizar esse componente no nosso projeto. Esse trecho de código indica que o projeto recém criado no Qsys possui três interfaces externas: `clk_clk`, `reset_reset_n` e `leds_export`. Esses sinais terão que ser mapeados no `topLevel` para seus respectivos pinos.

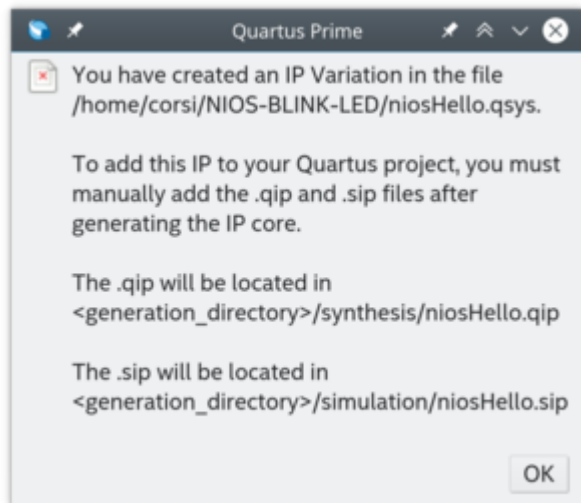
Esses nomes podem mudar no seu projeto!

O esquemático (gerado pelo Platform Designer ➡ View ➡ Schematic) ilustra o SoC recém criado e suas interfaces:



Finalizando

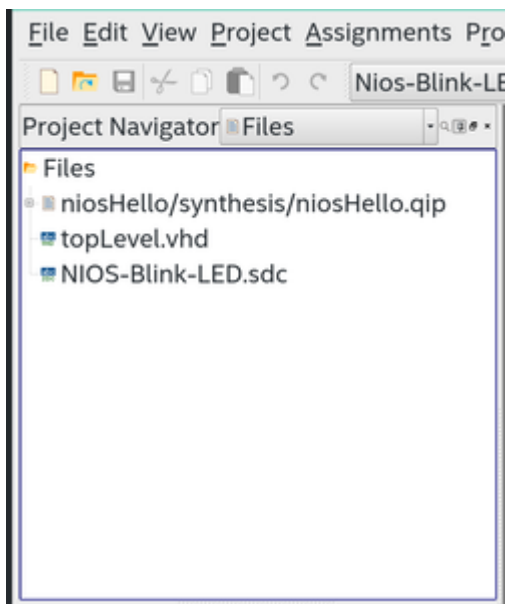
Clique em `finish` e deixe tudo como o padrão, agora o qsys irá criar o sistema e todos os componentes que nele foi configurado. O Quartus dará uma alerta indicando que é necessário incluir alguns arquivos no Quartus para que ele tenha acesso ao projeto recém criado no Qsys:



No Quartus: Project  Add/remove files in project e adicione o arquivo:

- niosHello/synthesis/niosHello.qip

Resultando em:



Modificando o topLevel.vhd

Agora é necessário modificar o `topLevel.vhd` para incluir o componente `niosHello` recém criado. Note que não estamos utilizando o sinal de reset (o `_n` indica que o reset é negativo, ou seja, em `0`).

```

library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;

entity topLevel is
    port (
        -- Gloabals
        fpga_clk_50      : in  std_logic;          --
clock.clk

        -- I/Os
        fpga_led_pio     : out std_logic_vector(5 downto 0)
    );
end entity topLevel;

architecture rtl of topLevel is

    component niosHello is port (
        clk_clk          : in  std_logic           := 'X'; -- clk
        reset_reset_n    : in  std_logic           := 'X'; --
reset_n
        leds_export      : out std_logic_vector(5 downto 0)      --
export
    );
end component niosHello;

begin

    u0 : component niosHello port map (
        clk_clk          => fpga_clk_50,          -- clk.clk
        reset_reset_n    => '1',                  -- reset.reset_n
        leds_export      => fpga_led_pio          -- leds.export
    );

end rtl;

```

✓ Compilando e gravando

1. Compile o projeto e analise o RTL, verifique se está de acordo com o esperado.
2. Grave o projeto na FPGA.

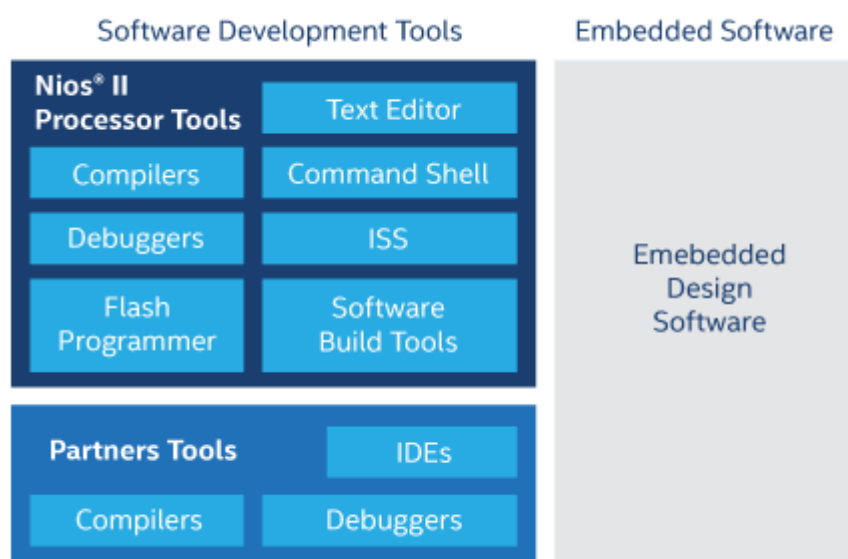
Programando o NIOS - Soft processor

Agora que temos o projeto criado e a FPGA gravada com o novo hardware, que inclui o processador NIOS. Precisamos gerar e gravar um programa que realiza o controle dos LEDs. Para isso iremos abrir a IDE **NIOS Software Build for Eclipse** (SBT) que possui todo o toolchain necessário para desenvolvermos firmware para o NIOS.

No Quartus: **Tools** ➔ **Nios II Software Build ...** e uma interface do eclipse será aberta.

Quando desenvolvemos projetos para sistemas SoCs temos um problema: o hardware não é padronizado. Como tudo é customizado existe um problema que deve-se ser tratado, a interface entre o hardware criado e o toolchain de software (compilador, linker...).

A Altera resolveu isso criando uma camada de abstração de hardware (**Hardware Abstraction Layer - HAL**) ou como a Intel chama: **Board Support Package (BSP)**, na qual extrai-se informações do Platform Designer para ser utilizado pela toolchain de compilação (GCC). Quando formos criar um projeto no **NIOS II - Eclipse**, dois projetos serão criados: Um que contém o firmware a ser gravado no NIOS e outro (BSP) que contém informações relevantes sobre o Hardware para uso no firmware e toolchain.

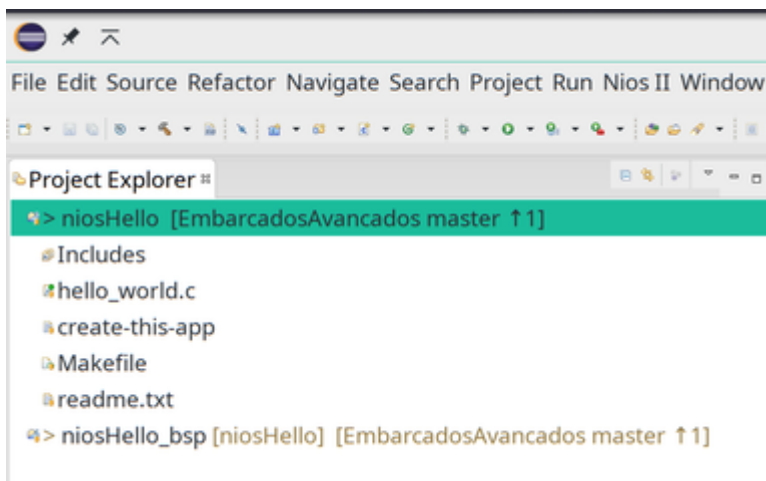


Para mais informações:

- <https://www.altera.com/products/processors/design-tools.html#SBT>

Criando o projeto

1. No **Quartus** → Tools → NIOS II - Eclipse
2. No **NIOS II - Eclipse** → File → NIOS II Application and BSP from template
3. SOPC Information File Name :
 - Na pasta do projeto, procure pelo arquivo : `niosHello.sopc`
 - Esse arquivo é criado pelo Qsys quando o projeto é compilado, e está na pasta do projeto.
4. Project name: `niosHello`
5. Após avançar o SBT irá criar duas pastas de projeto :
 - `niosHello` : firmware a ser embarcado
 - `niosHello_bsp` : Board support package para o firmware



Analisando e configurando o bsp

No Project Explorer do Eclipse, clique com o botão direito no:

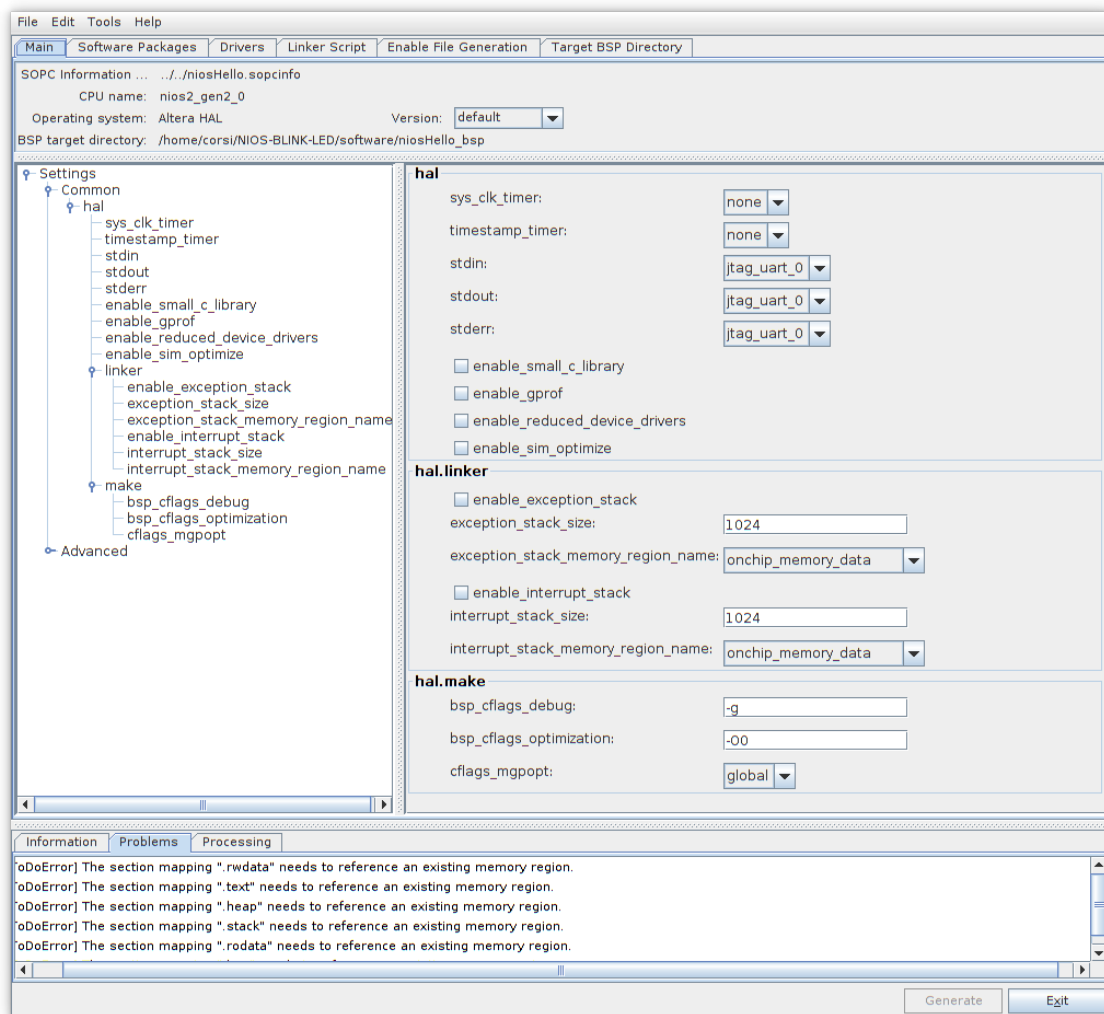
- Project Explorer → niosHello_bsp → NIOS II → bsp Editor

Isso abrirá uma interface de configuração para o bsp. Diversas são as opções de configurações, algumas delas :

- `sys_clk_timer` : periférico utilizado para bibliotecas de delay (não inserimos no Platform Designer)
- `timestamp_timer` : periférico que seria utilizado pelo timestamp
- `stdin` , `stdout` , `stderr` : periférico utilizado pelo **standard IO** do C, no nosso caso: `jtag_uart_0` (poderia ser outro).

Note

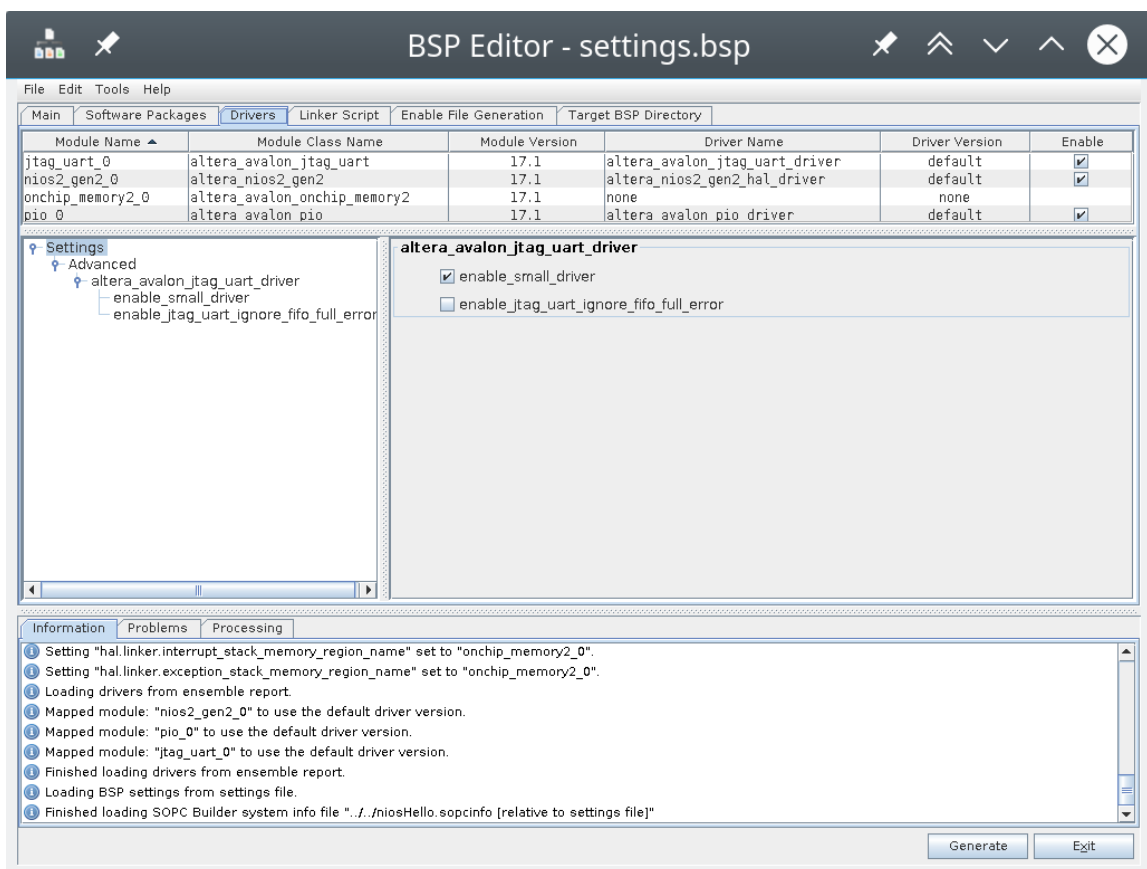
Note que a região de memória do stack já está configurada para a `onchip_memory` . Aqui teríamos a opção de mapear para outro local (no caso do sistema possuir outras memórias, tais como memórias DDR externas a FPGA).



Jtag-UART small driver

Note que no nosso projeto no QSYS o periférico jtag-uart não teve seu sinal de interrupção conectado no NIOS, isso dificulta o acesso a uart, já que o firmware não será interrompido caso um novo dado chegue (gets) ou na transmissão (puts). O driver deve ficar fazendo um polling no periférico para verificar o envio e recepção dos dados. Para isso funcionar, devemos ativar uma opção no driver do jtag_avalon no bsp:

- BSP Editor ➡ Drivers ➡ jtag_uart ➡ enable_small_driver



Gerando o bsp

Toda vez que o bsp for editado ou o hardware alterado (qsys) deve-se regenerar o bsp :

De volta no eclipse, devemos gerar os arquivos bsp. Para isso clique em:

niosHello_bsp ➡ NIOS II ➡ Generate BSP

Embarcando!

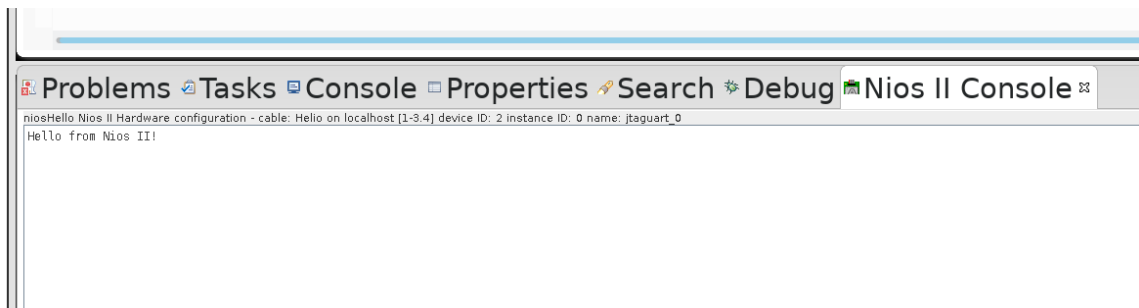
Com o bsp editado abra agora a pasta `niosHello` e note que existe inicializada com um arquivo: `hello_world.c` que imprime via JTAG-UART uma string. Insira o código a seguir no eclipse:

```
#include <stdio.h>

int main()
{
    printf("Hello from Nios II!\n");

    return 0;
}
```

Com o `hello_world.c` aberto (é necessário para o eclipse saber qual projeto você quer embarcar), clique em: Run ➡ Run ➡ NIOS II Hardware . Isso fará com que a aplicação seja descarregada na memória do Qsys que alocamos para o Nios e que o hardware seja reiniciado para executar o firmware. Quando o firmware for executado, abra a aba do eclipse **NIOS II console**:



Blink LED

Edite main para conter o código a seguir:

```
#include <stdio.h>
#include "system.h"
#include <alt_types.h>
#include <io.h> /* Leiutura e escrita no Avalon */

int delay(int n){
    unsigned int delay = 0 ;
    while(delay < n){
```

```

        delay++;
    }
}

int main(void){
    unsigned int led = 0;

    printf("Embarcados++ \n");

    while(1){
        if (led <= 5){
            IOWR_32DIRECT(PIO_0_BASE, 0, 0x01 << led++);
            usleep(50000);
        }
        else{
            led = 0;
        }
    };

    return 0;
}

```

Embarque no NIOS e veja o resultado nos LEDS!

Entrega 2

Siga para a [Entrega 2](#)