



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ – UFOPA
INSTITUTO DE ENGENHARIA E GEOCIÊNCIAS – IEG
BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

MELRIANE LIMA DOS SANTOS

INTRODUÇÃO Á ELETRÔNICA DIGITAL USANDO FPGA

SANTARÉM

2020

MELRIANE LIMA DOS SANTOS

INTRODUÇÃO Á ELETRÔNICA DIGITAL USANDO FPGA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia para obtenção do grau de Bacharel em Ciência e Tecnologia na Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de Engenharia e Geociências.

Orientador: Marcel Antonionni De Andrade Romano

SANTARÉM

2020



INTRODUÇÃO À ELETRÔNICA DIGITAL USANDO FPGA

Melriane L. dos Santos – melriane31@gmail.com

Universidade Federal do Oeste do Pará, Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia

Marcel A. A. Romano – marcel.romano@ufopa.edu.br

Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de Engenharia e Geociência

Rua Vera Paz, s/n, Salé

68040-255 – Santarém - Pará

Resumo: *Este trabalho tem por premissa que a melhor forma de alcançar o aprendizado é através da prática e aplica este conceito no ensino da eletrônica digital, introduzindo o estudo do tema citado através de aplicações realizadas no FPGA - Field Programmable Gate Array ("Arranjo de portas programáveis em campo"), proporcionando uma base didática para o aprendizado conceitual e prático. São apresentados os conceitos exórdios dos sistemas digitais e a simulação dos circuitos dessa natureza no FPGA através da linguagem VHDL – VHSIC Hardware Description Language, onde os conteúdos básicos são explanados analisando o design, a descrição e a simulação de circuitos digitais, sabendo-se que esse método pode ser aplicado tanto para o nível dos circuitos aqui apresentados quanto para circuitos com maior complexidade, também sendo analisado o importante papel desse estudo para o crescimento científico e tecnológico.*

Palavras-chave: *Eletrônica digital. Sistemas digitais. FPGA. VHDL.*

1 INTRODUÇÃO

O mundo está em constante evolução e grande parte das conquistas recentes podem ser atribuídas aos avanços no desenvolvimento, projeto e uso de sistemas digitais. Os mesmos podem ser definidos como dispositivos projetados para lidar com informações discretas (PIMENTA, 2017) e contrapõe-se ao emprego de sistemas computacionais analógicos.

Os sistemas digitais apresentam diversas vantagens: são mais fáceis de projetar, são exatos e precisos, sua operação pode ser programada, são menos afetados por ruídos, armazenam com mais facilidade as informações e um grande número de circuitos digitais pode ser alocado em um circuito integrado, como por exemplo a ferramenta utilizada para implementação, o FPGA, um circuito integrado semiconductor projetado para ser alterado e manipulado pelo seu usuário (INTEL, 2020). Porém, um fator a ser considerado no projeto e na implementação de técnicas digitais é que o mundo real é quase que completamente analógico (TOCCI, 2011).

Vários sistemas de numeração são usados em análise e representação de sistemas digitais, sendo os mais comuns: binário, decimal, octal e o hexadecimal. Todos possuem uma aplicabilidade, sendo o binário geralmente empregado para transmissão de "informações" (tensões ou correntes) em circuitos físicos, o decimal na representação desses dados para o mundo exterior pois é o sistema usado no dia-a-dia, já o octal e o hexadecimal são comumente utilizados para representar valores binários extremamente elevados (PIMENTA, 2017).



Na realização de circuitos digitais, os valores lógicos binários recebem faixas de intervalo de tensão, logo esses circuitos são projetados para operar nesse intervalo, reduzindo os efeitos de possíveis fontes de interferências eletromagnéticas. Atualmente grande parte dos circuitos digitais são circuitos integrados (CIs), como o próprio FPGA, o que possibilita a construção de circuitos digitais complexos menores e confiáveis em um mesmo chip.

Alguns circuitos digitais possuem a propriedade de reter a informação de saída dos circuitos mesmo após a supressão das entradas que a geraram, princípio das memórias digitais, sendo que existem tecnologias que permitem o armazenamento de informações de forma temporária ou mesmo permanentemente, como por exemplo os microcontroladores e microprocessadores que estão presentes em diversos sistemas vistos no nosso cotidiano, de diversos tamanhos, tipos e aplicações, inclusive nos computadores digitais, a área mais notável ao qual a tecnologia digital é aplicada.

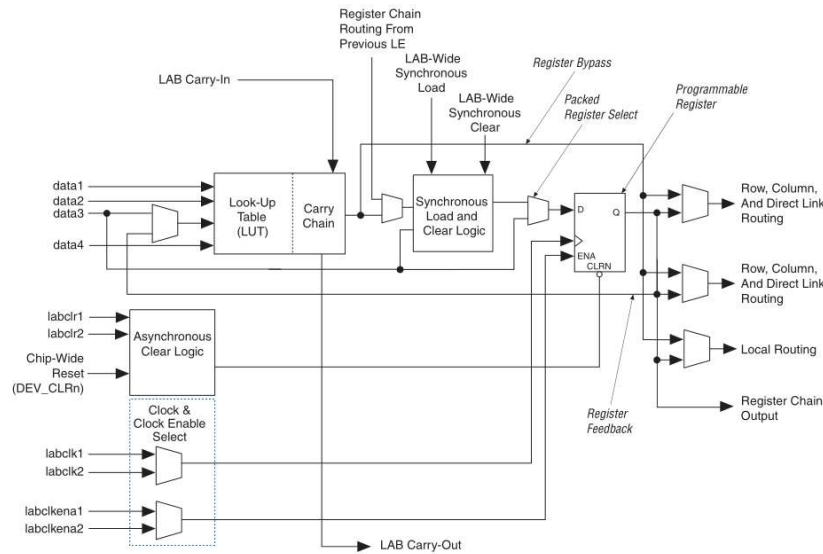
Todos os circuitos lógicos possuem uma descrição algébrica realizada através da álgebra booleana. Quando se obtém a expressão com valores de entrada já definidos pode-se encontrar o nível lógico de saída do circuito e também pode-se obter o diagrama do circuito diretamente dessa expressão. Além da notável colaboração da álgebra booleana para a análise de circuitos em sua expressão matemática, através de seus teoremas e dos teoremas de DeMorgan, essas expressões algébricas podem ser simplificadas (FLOYD, 2007), que são os chamados circuitos lógicos combinacionais.

Atualmente a tecnologia FPGA tem sido muito usada como ferramenta de ensino em diversas áreas e aplicações. Na Universidade de La Laguna na Espanha foi utilizado como ferramenta para o ensino de sistemas eletrônicos no mestrado de engenharia industrial, onde além do ensino dos conceitos fundamentais e simulações introdutórias também houve a execução de designs digitais reais (MAGDALENO, 2016). Na Universidade de Tecnologia de Tampere na Finlândia é utilizado como plataforma-base de hardware em exercícios de várias disciplinas, tanto em sistemas digitais quanto em sistemas de computador (VAINIO, 2010), além desses há vários outros exemplos do uso dessa tecnologia (SHI, 2010; JAGADEESH, 2008; BAŞÇIL, 2011; MORGAN, 2011).

2 FPGA – FIELD PROGRAMMABLE GATE ARRAY

Grande parte do estudo de sistemas digitais atuais são feitos com o emprego de FPGA, pois as placas de desenvolvimento em FPGA viabilizam o ensino de técnicas diversas de circuitos digitais de forma rápida e prática. Neste trabalho usa-se a família CYCLONE II pois ela apresenta soluções para aplicações de alto volume e baixo custo, como no automotivo, teste, entre outros (INTEL, 2020). É exemplificado a seguir a abordagem didática por meio de experiências com o uso da linguagem VHDL (que é uma linguagem de descrição de hardware VHSIC) a qual o código é descrito e simulado no Quartus® II e implementado na CYCLONE II EP2C35F672C6 (Figura 1), sendo realizadas simulações que replicam o funcionamento dos circuitos projetados.

Figura 1 – (a) Disposição dos elementos lógicos da Cyclone II



Fonte: ALTERA, 2008.

Os circuitos digitais realizam operações com números binários, portanto usam a ferramenta matemática chamada álgebra booleana, a qual permite descrever a relação entre a(s) entrada(s) e a saída de um circuito lógico. As entradas desses circuitos podem ser 1 (ALTO) e 0 (BAIXO), esses valores representam intervalos de tensão das ligações do circuito.

2.1 Circuito controlador bidirecional

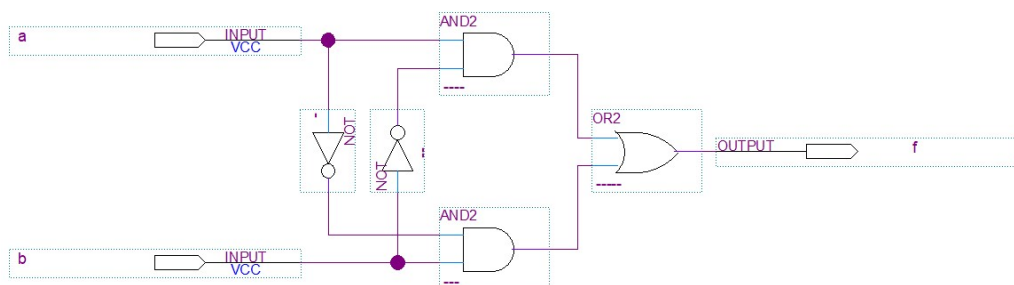
Esse circuito pode ser implementado em uma situação onde há 2 lâmpadas e com o intuito de economizar energia a lâmpada só será acesa quando somente um dos interruptores estiver ligado. Sua realização pode ser feita usando exclusivamente elementos da álgebra booleana, composto por duas entradas: “a” e “b”, possui dois INVERSORES, duas portas AND e um porta OR, a operação booleana de cada porta e seu respectivo operador são apresentados na Tabela 1. O circuito (Figura 2) apresentará saída “f” em ALTO somente quando as entradas forem de níveis diferentes.

Tabela 1 – Operação e operador das portas lógicas NOT, AND e OR

Portas	Operação	Operador
NOT	$x = A'$	
AND	$x = A.B$.
OR	$x = A+B$	+

Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 2 – Design do circuito controlador bidirecional



Fonte: Elaborada pelos autores

O circuito é descrito em VHDL, como apresentado abaixo (Figura 3). A entidade VHDL é chamada de controlador_bidirecional.

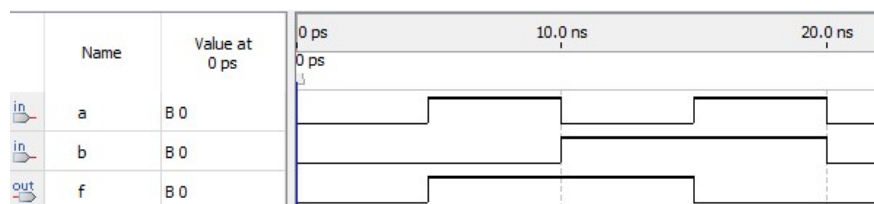
Figura 3 – Descrição em VHDL do circuito controlador bidirecional

```
library ieee;  
use ieee.std_logic_1164.all;  
  
entity controlador_bidirecional is port  
( a, b: in std_logic;  
  f: out std_logic);  
end controlador_bidirecional;  
  
architecture logic of controlador_bidirecional is begin  
  f<= (a and (not b)) or ((not a) and b);  
end logic;
```

Fonte: Elaborada pelos autores.

O circuito codificado em VHDL (Figura 3) é executado com a entrada “a” no intervalo de 10 ns e a entrada “b” no intervalo de 20ns (Figura 4).

Figura 4 - Gráfico do circuito controlador bidirecional em forma de onda de sinal



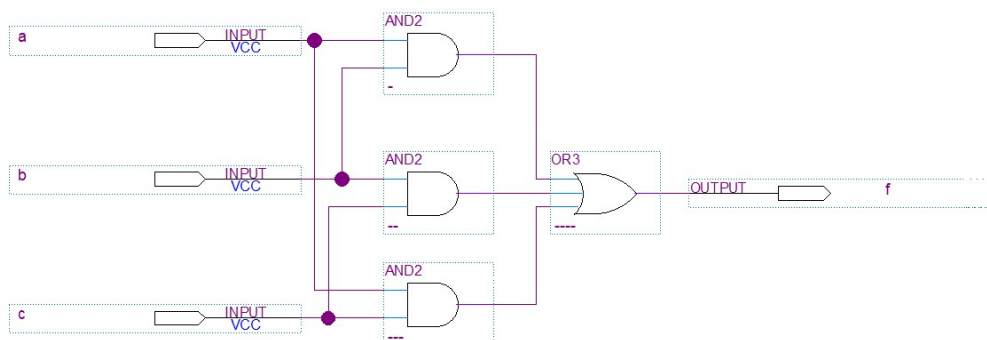
Fonte: Elaborada pelos autores.

2.2 Circuito $f = ab + bc + ac$

Esse circuito pode ser exemplificado na seguinte situação: Um sistema de refrigeração de ambiente possui 3 medidores de temperatura, e quando a temperatura for menor que 15°C o medidor será acionado, quando houver dois medidores ou mais acionados o sistema de refrigeração será desligado.

É composto por três entradas, “a”, “b” e “c”, possui três portas AND e uma porta OR. A saída “f” estará em ALTO somente quando mais de uma entrada estiver em ALTO (Figura 5).

Figura 5 – Design do circuito $f = ab + bc + ac$



Fonte: Elaborada pelos autores.



"Os desafios para formar hoje o engenheiro do amanhã"

O circuito (Figura 5) é descrito em VHDL, como apresentado abaixo (Figura 6), a entidade desse circuito se chama sistema_refrigeracao.

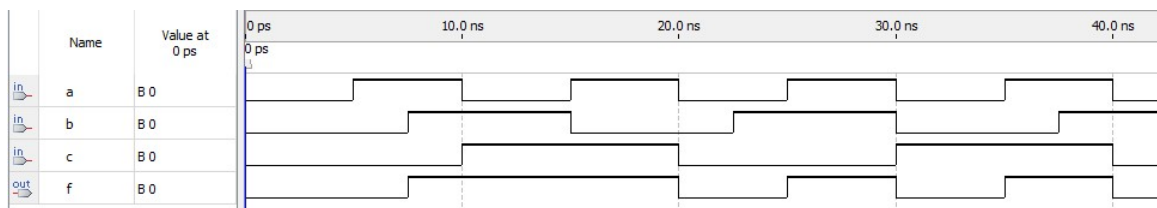
Figura 6 – Descrição em VHDL do circuito $f = ab + bc + ac$

```
library ieee;  
use ieee.std_logic_1164.all;  
  
entity sistema_refrigeracao is port  
(  a, b, c: in std_logic;  
  f: out std_logic);  
end sistema_refrigeracao;  
  
architecture logic of sistema_refrigeracao is begin  
  f<= (a and b) or (b and c) or (a and c);  
end logic;
```

Fonte: Elaborada pelos autores.

O circuito codificado (Figura 6) é executado com a entrada “a” no intervalo de 10 ns, a entrada “b” no intervalo de 15 ns e a entrada “c” no intervalo de 20ns (Figura 7).

Figura 7 - Gráfico do circuito $f = ab + bc + ac$ em forma de onda de sinal



Fonte: Elaborada pelos autores.

2.3 Circuito $f = a'c + ab' + bc' + abc$

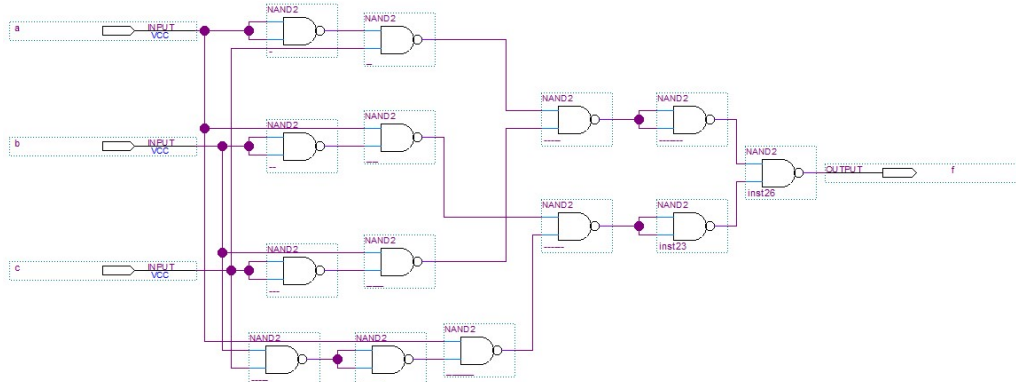
Os circuitos digitais podem possuir outras portas lógicas além das mencionadas anteriormente, podendo ser construídos também com as portas NOR e as portas NAND, as quais são basicamente a combinação das portas OR e AND com a operação NOT. Essas portas também são chamadas de portas universais pois pode-se representar qualquer expressão lógica usando somente portas NAND ou apenas portas NOR (FLOYD, 2007).

Abaixo será didaticamente apresentada a versão do circuito $f = a'c + ab' + bc' + abc$ que dispõe somente de portas NAND. Uma das possibilidades de aplicação desse circuito: em um estabelecimento há três atendentes, se o atendente estiver com cliente, o valor lógico será 0, e se estiver livre será 1. Quando um ou mais atendentes estiverem disponíveis uma luz irá acender, informando a disponibilidade para atendimento.

O circuito é formado por três entradas “a”, “b” e “c” e por catorze portas NAND. A saída “f” estará em ALTO somente quando uma ou mais entradas estiverem em ALTO (Figura 8).

"Os desafios para formar hoje o engenheiro do amanhã"

Figura 8 – Design do circuito $f = a'c + ab' + bc' + abc$ somente com portas lógicas universais NAND



Fonte: Elaborada pelos autores.

O circuito (Figura 8) é descrito em VHDL, código apresentado na Figura 9, a sua entidade é chamada disponibilidade_atendente.

Figura 9 – Descrição em VHDL do circuito $f = a'c + ab' + bc' + abc$ somente com portas NAND

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

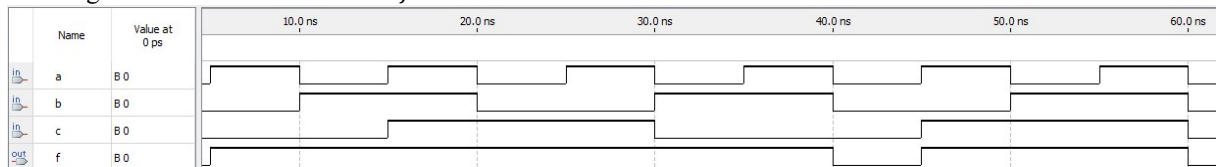
entity disponibilidade_atendente is port
( a, b, c: in std_logic;
  f: out std_logic);
end disponibilidade_atendente;

architecture logic of disponibilidade_atendente is begin
  f<= (((a nand a) nand c) nand (b nand (c nand c))) nand (((a nand
a) nand c) nand (b nand (c nand c))) nand (((a nand (b nand b)) nand
(a nand ((b nand c) nand (b nand c)))) nand ((a nand (b nand b)) nand
(a nand ((b nand c) nand (b nand c))));
end logic;
```

Fonte: Elaborada pelos autores.

O circuito codificado (Figura 9) é executado com a entrada “a” no intervalo de 10 ns, a entrada “b” no intervalo de 20 ns e a entrada “c” no intervalo de 30ns (Figura 10).

Figura 10 - Gráfico do circuito $f = a'c + ab' + bc' + abc$ em forma de onda de sinal



Fonte: Elaborada pelos autores.

Realizando a implementação no FPGA dos três circuitos apresentados nesse trabalho, pode-se observar a relação entre as entradas e saídas dos circuitos, possibilitando uma melhor visão da problemática e do resultado.



3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os conceitos básicos que possibilitam o aprendizado de sistemas digitais com o emprego da tecnologia FPGA podem ser realizados concomitantemente à apresentação do conteúdo teórico, possibilitando contato com sistemas reais e auxiliando a produtividade das aulas práticas do tema, com a aplicação de tecnologia moderna, compatível com as exigências do mercado.

Agradecimentos

Agradecemos à coordenação do Laboratório de Sinais e Sistemas e Sistemas Digitais da Universidade Federal do Oeste do Pará que permitiu a realização de estudos e testes para este material, ao Sr. Alecsander Matos, Sr. Andrey Lira e Sr. Jorge Kamassury pela colaboração.

REFERÊNCIAS

ALTERA. **Cyclone II device handbook**, volume 1. São José, Califórnia: Altera Corporation. 2008.

BAŞÇIL, M. Serdar; YAZICI, Irfan; TEMURTAS, Feyzullah. A FPGA based digital design training platform. 6th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE), 2011. **Anais**. Singapura, p. 1384-1389, 2011.

FLOYD, Thomas L. **Sistemas digitais: fundamentos e aplicações**. Porto Alegre: Bookman. 2007. p. 62 -155.

INTEL. **FPGAs Intel® Cyclone® e dispositivos Cyclone® V SoC**. Disponível em: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/programmable/cyclone-series.html>. Acesso em: 23 maio 2020.

JAGADEESH, G.R.; LAM, S.K.; SRIKANTHAN, T. A short course on implementing FPGA based digital systems. 14th IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems, 2008. **Anais**. Melbourne-VIC, p. 741-744, 2008.

MAGDALENO, Eduardo; RODRÍGUEZ, Manuel; HERNÁNDEZ, David; RODRÍGUEZ, Eduardo; PÉREZ, Fernando. Teaching methodology of the subject Design of Electronic Systems using FPGA in the new Master of Industrial Engineering. Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE), 2016. **Anais**. Sevilha, p. 1-6, 2016.

MORGAN, Fearghal; CAWLEY, Seamus. Enhancing learning of digital systems using a remote FPGA lab. 6th International Workshop on Reconfigurable Communications-Centric Systems-on-Chip (ReCoSoC), 2011. **Anais**. Montpellier, p. 1-8, 2011.

PIMENTA, Tales Cleber. **Circuitos digitais: análise e síntese lógica: aplicações em FPGA**. Rio de Janeiro: Editora Elsevier. 2017. p. 1-73.

SHI, Jianguo; DENG, Chunjian. Digital circuit experiment system based on FPGA. International Conference on E-Health Networking Digital Ecosystems and Technologies (EDT), 2010. **Anais**. Shenzhen, p. 277-280, 2010.

TOCCI, Ronald J.; WIDMER, Neal S.; MOSS, Gregory L. **Sistemas digitais: princípios e aplicações**. São Paulo: Editora Pearson Prentice Hall. 2011. p. 1-121.

VAINIO, Olli; SALMINEN, Erno; TAKALA, Jarmo. Teaching digital systems using a Unified FPGA platform. 12th Biennial Baltic Electronics Conference, 2010. **Anais**. Talín, o. 137-140, 2010.

DIGITAL ELECTRONICS INTRODUCTION USING FPGA

Abstract: *This work has a the premise that the best way to do learning is through practice and apply this concept in the teaching of digital electronics, introducing the study of the mentioned theme through applications carried out in the FPGA – Field Programmable Gate Array providing a didactic basis for conceptual and practical learning. We present introductory concepts of digital systems and simulation of circuits of this nature in the FPGA through the language VHDL – VHSIC Hardware Description Language, where the basic contents are explained through analyzing the design, description and simulation of digital circuits, knowing that this method must be applied both to the level of the circuits presented here than to circuits with greater complexity, also being analyzes the important role of the study for scientific and technological growth.*

Keywords: *Digital electronics. Digital systems. FPGA. VHDL.*