

THIAGO DE ANDRADE PRADO

**SÍNTESE DE UM CONTROLADOR DE RASTREAMENTO
DE MÁXIMA POTÊNCIA EM FPGA**

Guaratinguetá - SP

2016

Thiago de Andrade Prado

Síntese de um controlador de rastreamento de máxima potência em FPGA

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Mesquita

Guaratinguetá

2016

P896s

Prado, Thiago de Andrade

Síntese de um controlador de rastreamento de máxima potência em
FPGA / Thiago de Andrade Prado – Guaratinguetá, 2016.

58 f : il.

Bibliografia: f. 54-55

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Mesquita

1. Geração de energia fotovoltaica 2. MATLAB (Programa de
computador) 3. Controladores programáveis I. Título

CDU 620.91

unesp **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

Thiago de Andrade Prado

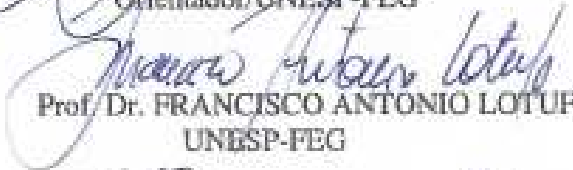
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA"

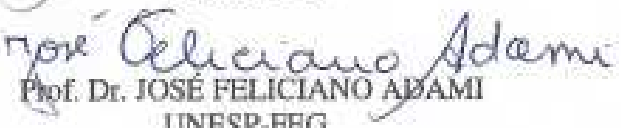
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. FRANCISCO ANTONIO LOTUFO
UNESP-FEG


Prof. Dr. JOSÉ FELICIANO ADAMI
UNESP-FEG

Dezembro de 2016

DADOS CURRICULARES

Thiago de Andrade Prado

NASCIMENTO 19.11.1992 – CAÇAPAVA / SP

FILIAÇÃO Paulo Sergio Prado
 Mirian Veloso de Andrade Prado

2011/2016 Curso de Graduação
 Engenharia Elétrica - Universidade Estadual Paulista

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a meus pais pelo apoio financeiro e me apoiar nos estudos desde os primeiros anos de escola. Ao InovEE e ao professor, orientador Leonardo Mesquita por fornecer equipamentos, estabelecimento e as ideias para a concepção de toda programação em VHDL, além da ideia inicial para realização da pesquisa. Pela ajuda e apoio na construção, concepção do projeto e realização de testes, agradeço ao meu amigo e companheiro de pesquisa Yago Henrique Delavia. Ao professor Teófilo Miguel de Souza por fornecer o painel fotovoltaico e equipamentos para teste e incentivar a realização da pesquisa acadêmica.

PRADO, T. A. **Síntese de um controlador de máxima potência em FPGA**, 2016. 58 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

RESUMO

Este trabalho tem como intuito desenvolver um controlador em FPGA utilizando o método de busca de máxima potência P&O. Primeiramente, simulações do sistema no software MATLAB serão realizados para se ter uma concepção inicial do sistema constituído pelo painel fotovoltaico, conversor de potência e controlador. Em seguida, será apresentado a construção dos blocos necessários à plataforma DE2-115 FPGA da ALTERA que constituem o controlador do sistema MPPT. O controlador MPPT tem como objetivo buscar para determinada condição de irradiação solar e temperatura o ponto em que o painel fornecerá a máxima potência à carga, controlando o fluxo de potência entre as duas interfaces, painel solar e carga, através de um conversor DC/DC,

PALAVRAS-CHAVE: Painel Fotovoltaico. MPPT. Matlab. FPGA. VHDL.

PRADO, T. A. **A design for a maximum power point controller using FPGA**, 2016. 58 f. Graduate Work (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

ABSTRACT

This Project aims to develop a FPGA controller using maximum power point tracking P&O algorithm. Firstly, MATLAB is used to develop the system simulation in order to have an initial idea about the system which includes the photovoltaic panel, DC/DC converter and controller. Later, the design construction of the converter using FPGA DE2-115 from ALTERA will be shown. The MPPT controller search for the irradiation and temperature operational point which the photovoltaic panel will provide the maximum power to the load, controlling the power flux between the two interfaces, load and panel, through a DC/DC converter.

KEYWORDS: Photovoltaic Panel. MPPT. Matlab. FPGA. VHDL.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Oferta de Energia Elétrica por fonte no Brasil.....	13
Figura 2: Radiação Solar Média Anual.	15
Figura 3: Circuito equivalente de uma célula Fotovoltaica.	18
Figura 4: Curvas de Tensão x Corrente para diferentes valores de radiação a temperatura de 25°C.....	19
Figura 5: Curvas de Potência x Tensão para diferentes valores de radiação	19
Figura 6: Influência da temperatura à radiação constante de 1000 W/m ² na curva de tensão x corrente ...	20
Figura 7: Influência da temperatura nas curvas de potência x tensão radiação constante de 1000 W/m ² .	20
Figura 8: Associação de módulos fotovoltaicos em série.....	21
Figura 9: Associação de módulos fotovoltaicos em série.....	22
Figura 10: Sistema de busca de Máxima Potência	23
Figura 11: Resistor Shunt.	24
Figura 12: Acoplador ótico 4N25	25
Figura 13: Disposição dos pinos do chip DIP do conversor A/D	25
Figura 14: Diagrama temporal do conversor ADC 0808.....	26
Figura 15: Algoritmo P&O ilustrado em lógica de blocos (Autor, 2016)	27
Figura 16: Placa FPGA DE-2 da ALTERA.....	28
Figura 17: Topologia conversor DC/DC do tipo Buck.....	29
Figura 18: Topologia High side MOSFET driver.....	30
Figura 19: Painel fotovoltaico desenvolvido em MATLAB	31
Figura 20: Curvas de potência para diversos valores de radiação.	32
Figura 21: Circuito elétrico equivalente de um módulo solar.	33
Figura 22: Algoritmo para cálculo dos valores de Rs e Rp.	35
Figura 23: Conversor Buck desenvolvido em MATLAB	36
Figura 24 Chaveamento de corrente e tensão do transistor Fonte: Autor	36
Figura 25: Conversor Buck tensão de entrada (superior) tensão de saída (inferior)	37
Figura 26: Script P&O utilizado em Matlab.....	39
Figura 28: Sistema MPPT P&O.....	40
Figura 29: Sistema MPPT P&O com radiação variável	40
Figura 30: Componentes básicos de um FPGA.	41
Figura 31: Principais etapas de um projeto utilizando VHDL Fonte: Autor	42
Figura 32: Controlador P&O desenvolvido em FPGA. Fonte: Autor	43
Figura 33: Módulo ADC0808 em VHDL Fonte: Autor	44

Figura 34: Módulo divisor de clock em VHD.L Fonte: Autor	44
Figura 35: Algoritmo de conversão de binário para BCD Fonte:Autor.....	44
Figura 36: Conversor BCD para 7 segmentos ânodo comum Fonte:Autor	45
Figura 37: Algoritmo P&O simulado em VHDL Fonte: Autor.....	46
Figura 38: Sistema MPPT com placa FPGA e seus componentes Fonte: Autor	47
Figura 39: Placa FPGA e sensores Fonte: Autor	48
Figura 40: Conversor Buck montado em placa teste Fonte: Autor.....	49
Figura 41: Painel Fotovoltaico HG-135 Fonte: Autor	49
Figura 42: Dados experimentais tensão x corrente Fonte: Autor.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Capacidade de geração de energia elétrica no mundo - 10 maiores países em 2011 Fonte: EPE (2015).....	13
Tabela 2: Informações técnicas painel solar HG 135 Fonte: Solarterra (2015).....	49

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Energias Renováveis	12
1.2 Fontes Renováveis de energia no Brasil	12
1.3 Energia Solar Fotovoltaica no Brasil	14
2 PAINEL FOTOVOLTAICO	17
2.1 Modelagem característica da célula solar.....	17
2.2 Curvas características do painel fotovoltaico.....	19
2.2.1 Influência da radiação solar.....	19
2.2.2 Influência da temperatura	20
2.3 Topologias dos módulos fotovoltaicos.....	20
2.3.1 Módulos associados em série.....	21
2.3.2 Módulos associados em paralelo.....	21
3 SISTEMA DE BUSCA DE MÁXIMA POTÊNCIA.....	23
3.1 Descrição Geral do Sistema.....	23
3.2 Sensor de corrente.....	24
3.3 Acoplador Ótico 4N25.....	24
3.4 Conversor ADC0808 8-bit com 8 canais.....	25
3.5 Algoritmos MPPT.....	26
3.5.1 Método P&O.....	27
3.6 Placa FPGA DE2-115'	28
3.7 Conversor Buck	28
4 SIMULAÇÕES.....	31
4.1 Painel Solar HG-135.....	31
4.2 Desenvolvimento do Painel Solar em Matlab.....	32

4.2.1 Método numérico para cálculo de R_s e R_p	33
4.2.2 Conversor Buck em MATLAB	35
4.3 Sistema MPPT com P&O	37
4.4 Resultados do Sistema P&O em MATLAB	40
5 SISTEMA MPPT EM VHDL	41
5.1 FPGA	41
5.2 Linguagem VHDL	41
5.3 Projeto Controlador P&O em VHDL	43
5.3.1 Módulo ADC0808 em VHDL	43
5.3.2 Módulo divisor de clock em VHDL	44
5.3.3 Módulo conversor binário para BCD	44
5.3.4 Módulo conversor BCD para display 7 segmentos	45
5.3.5 Algoritmo P&O	45
6 SISTEMA MPPT E RESULTADOS EXPERIMENTAIS	47
6.1 Placa FPGA Altera DE-2 e Sensores	48
6.2 Conversor Buck	48
6.3 Painel Fotovoltaico	49
6.4 Testes realizados	50
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
8 CONCLUSÃO	53
REFERÊNCIAS	54
APÊNDICE	56

1 INTRODUÇÃO

1.1 Energias Renováveis

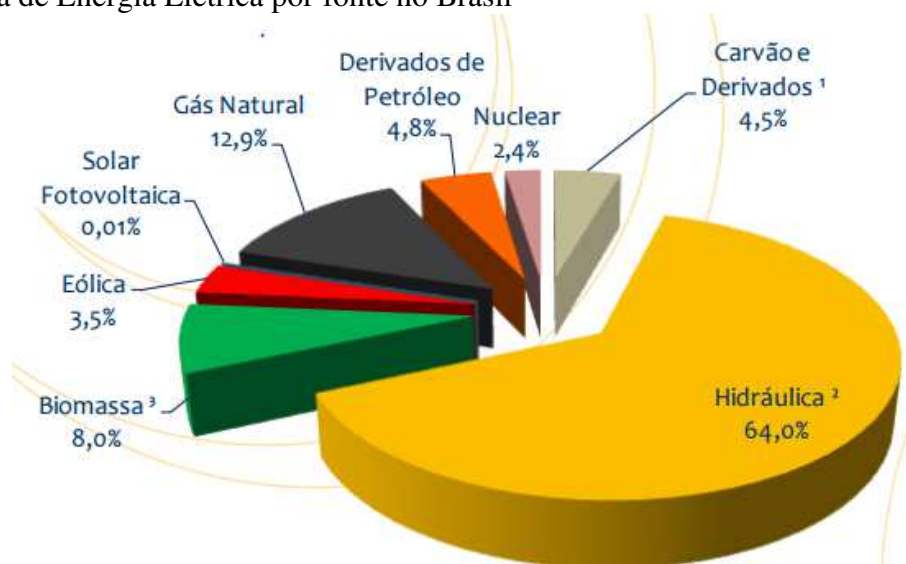
Sendo o Sol a principal fonte de energia do nosso planeta, a superfície da Terra recebe anualmente uma quantidade de energia solar suficiente para suprir as necessidades mundiais durante este período.

As fontes renováveis de energia são consideradas fontes inesgotáveis, limpas e rentáveis, a energia solar por exemplo é utilizada para a geração de eletricidade, hidrelétrica, eólica, oceânica, geotérmica e biomassa.

Além de serem ilimitadas, tais fontes de energia não causam grandes danos ambientais, e praticamente não produzem resíduos ou emitem poluentes.

1.2 Fontes Renováveis de energia no Brasil

O Brasil já emprega atualmente várias fontes renováveis, sendo grande parte da energia elétrica disponível proveniente de usinas hidrelétricas, conforme ilustrado na Figura 1. Segundo o Balanço Energético Nacional, o Brasil possuía em 2015 uma capacidade de geração elétrica de 134 GW.

Figura 1: Oferta de Energia Elétrica por fonte no Brasil

Fonte: MINISTERIO DE MINAS ENERGIA (2016)

Isto representa uma pequena parcela de capacidade de geração de energia que possuem vários países desenvolvidos conforme a Tabela 1, sendo em 2012 o Brasil o 10º país com maior capacidade da geração energia elétrica instalada no mundo.

Se percebe também a partir da Figura 1 uma participação muito pequena da energia solar fotovoltaica na matriz energética brasileira e uma grande participação de energia hidráulica na capacidade de geração de energia elétrica.

Tabela 1: Capacidade de geração de energia elétrica no mundo em GW.

	2008	2009	2010	2011	2012	Δ% (2012/2011)	Part. % (2012)	
Mundo	4.529,5	4.727,7	4.964,5	5.204,7	5.549,6	6,6	100	World
China	796,2	876,7	972,7	1.082,5	1.174,3	8,5	21,2	China
Estados Unidos	988,3	1.003,2	1.016,9	1.030,6	1.063,0	3,2	19,2	United States
Japão	254,4	257,0	259,5	261,2	293,3	12,3	5,3	Japan
Índia	173,0	185,2	203,5	233,5	254,7	9,1	4,6	India
Rússia	222,8	224,1	228,1	231,6	234,4	1,2	4,2	Russia
Alemanha	129,3	136,2	142,2	147,9	177,1	19,7	3,2	Germany
Canadá	126,4	131,6	132,2	132,8	135,0	1,7	2,4	Canada
França	86,3	87,8	90,0	92,9	129,3	39,1	2,3	France
Itália	77,0	79,8	84,7	96,5	124,2	28,7	2,2	Italy
Brasil	102,9	106,6	113,3	117,1	121,0	3,3	2,2	Brazil
Outros	1.820,7	1.889,1	1.967,7	2.026,7	1.843,3	-9,0	33,2	Other

Fonte: EPE (2015)

1.3 Energia Solar Fotovoltaica no Brasil

A energia solar fotovoltaica pode ser utilizada em todo o território brasileiro, pois o país é privilegiado com elevadas taxas de radiação solar em todas as regiões, considerando que a energia produzida pelo sistema fotovoltaico depende dessa taxa de radiação. A Alemanha atualmente é o país que mais usa a energia solar fotovoltaica com uma capacidade de 20 GW instalada e uma intensidade de insolação de até 3500 Wh/m^2 .

O Brasil, em comparação, possui uma faixa de intensidade de insolação diária de 4250 Wh/m^2 à 6000 Wh/m^2 , sendo assim o País demonstra um potencial de geração fotovoltaico grandioso capaz de torná-lo um dos principais líderes no emprego de energia fotovoltaica.

A Figura 2 ilustra a radiação média anual no país em suas regiões mostrando taxas de insolação elevadas e uniformes em toda a área do país (Inserção da Geração Fotovoltaica, 2006).

Figura 2: Radiação Solar Média Anual.



Fonte: ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR (2006)

Em uma pesquisa realizada em 2014 pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) do Ministério de Minas Energia, revelou que o Brasil possui um potencial de produção de energia fotovoltaica em residências de 33 MW gerando aproximadamente 287 *GWh/ano* de energia, considerando que o consumo médio residencial anual em 2013 era de 125 *GWh/ano*, sendo assim mais que suficiente para suprir a demanda de energia residencial o que representa em torno de 10% do consumo de energia do país. Estes dados foram obtidas através de um levantamento de informações que incluíram o mapeamento do recurso solar, a área de telhado disponível para instalação de sistemas fotovoltaicos no país e a eficiência na conversão do recurso solar em eletricidade.

Além disso, a EPE estimou levando-se em consideração a expansão do mercado de energia fotovoltaica e uma redução de custos entre 2010 e 2023 na instalação de sistemas fotovoltaicos residenciais que o custo de $R\$7,7/Wp^1$ se reduzirá gradativamente a $R\$4,1/Wp$ até 2023, o que indica uma maior viabilidade no uso dessa tecnologia (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016).

Desta forma, para o País alavancar seu crescimento e alcançar grandes potências mundiais é necessário explorar novas fontes de energia como solar e eólica que representam uma parcela ínfima na oferta de energia nacional (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

2 PAINEL FOTOVOLTAICO

Um sistema fotovoltaico é constituído de várias células fotovoltaicas. Sendo uma única célula solar capaz de gerar de 1 a 2 W de potência dependendo do tipo de material usado. Para fornecer maiores potências, estas células são conectadas entre si formando módulos que geram individualmente até 1 kW de acordo com o que está disponível atualmente no mercado (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016).

Desta forma sistemas fotovoltaicos consistem de numerosos módulos solares conectados para fornecer potência para cargas que exigem grandes demandas, como residências, motores, bombas e etc.

2.1 Modelagem característica da célula solar

A equação básica da célula solar provém da teoria de semicondutores que descreve matematicamente a característica corrente x tensão de uma célula solar como (BHATNAGAR, 2013):

$$I_m = I_{pv} - I_{ph} \left(e^{\frac{V+R_S I}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V+R_S I}{R_p} \quad (1)$$

Sendo:

- I_m Corrente de saída da célula solar [A]
- I_{pv} Corrente total equivalente gerada pela radiação [A].
- I_{ph} Corrente de saturação do diodo [A]
- V_T Tensão térmica do painel fotovoltaico [V].
- V Tensão entre os terminais da célula [V]
- q Carga elementar do elétron: 1.6×10^{-19} [C]
- k Constante de Boltzmann: 1.8×10^{-23} [$\frac{J}{K}$]
- T Temperatura ambiente da célula [K]
- R_S Resistência em série: Perdas por contato e condução [Ω].
- R_p Resistência em paralelo: Perdas devido as correntes de fuga [Ω].
- V_T a tensão térmica dada a 25°C [V]

A corrente de saturação reversa do diodo I_{sr} da temperatura e é dada por (BHATNAGAR, 2013):

$$I_{ph} = \frac{I_{scn} + K_I \Delta T}{e^{\left(\frac{V_{OC} + K_V \Delta T}{\alpha V_T}\right) - 1}} \quad (2)$$

Onde:

- K_I Coeficiente de temperatura/corrente $\left[\frac{K}{A}\right]$
- K_V Coeficiente de temperatura/tensão $\left[\frac{K}{V}\right]$
- V_{OC} Tensão de circuito-aberto [V]
- α Constante do diodo assumido como 1.3
- I_{scn} Corrente de curto-circuito nominal (A)
- ΔT Variação de temperatura [K]

E a corrente gerada pela incidência de fótons I_{ph} é dada por (BHATNAGAR, 2013):

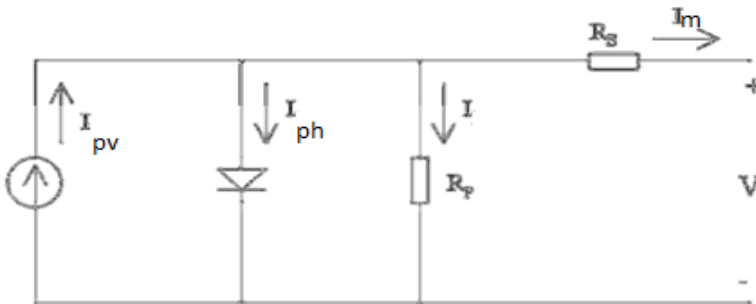
$$I_{pv} = (I_{pvn} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (3)$$

Onde:

- I_{pvn} Corrente de curto-circuito nominal [A]
- G Irradiação efetiva $\left[\frac{W}{m^2}\right]$
- G_n Irradiação nominal $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

Desta forma o circuito equivalente da célula solar é mostrado na Figura 3:

Figura 3: Circuito equivalente de uma célula Fotovoltaica.



Fonte: HECKTHEUER (2001).

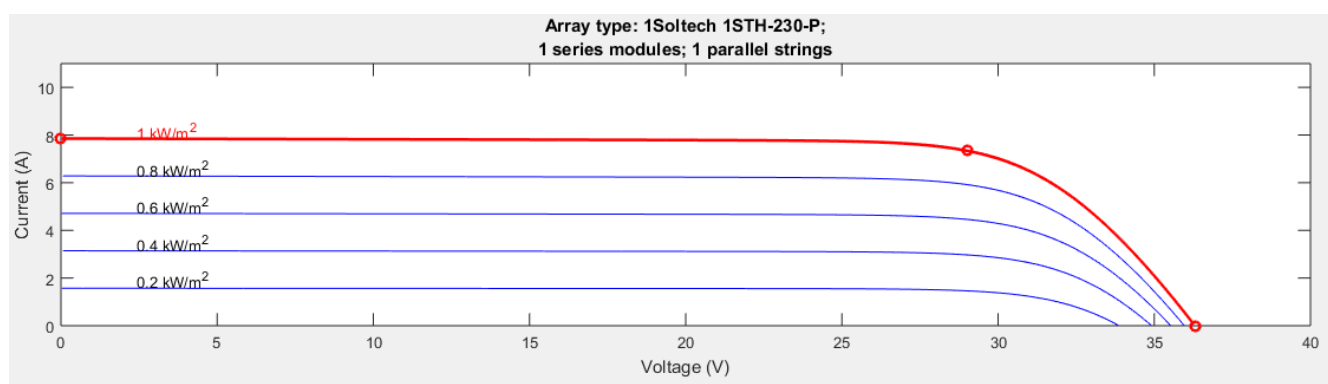
2.2 Curvas características do painel fotovoltaico

2.2.1 Influência da radiação solar

Nos manuais de um modulo fotovoltaico são encontradas informações como tensão em aberto, corrente de curto-circuito, tensão de máxima potência, corrente de máxima potência, coeficiente de corrente e tensão além das suas curvas equivalentes conforme mostrado nas Figuras 4 e 5 são mostradas as curvas de tensão x corrente e potência x tensão do painel fotovoltaico, sendo possível observar a influência da radiação nas características de tensão, corrente e potência do painel.

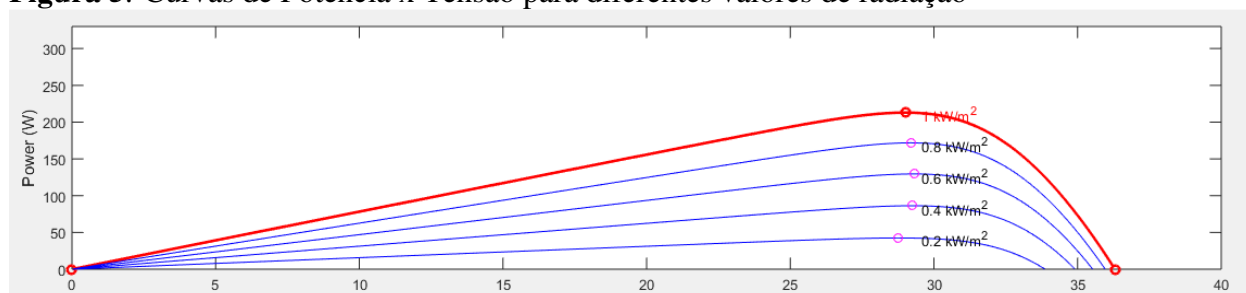
Também pode se observar na Figura 5 pontos marcados nas respectivas curvas de potência, sendo esses pontos caracterizados como o ponto de operação de máxima potência do painel para um determinado valor de radiação à temperatura de 25° C. É característico dos fabricantes de módulos solares informarem as características nominais dos painéis a temperatura nominal e a radiação de 1000 W/m².

Figura 4: Curvas de Tensão x Corrente para diferentes valores de radiação a temperatura de 25°C.



Fonte: Autor.

Figura 5: Curvas de Potência x Tensão para diferentes valores de radiação

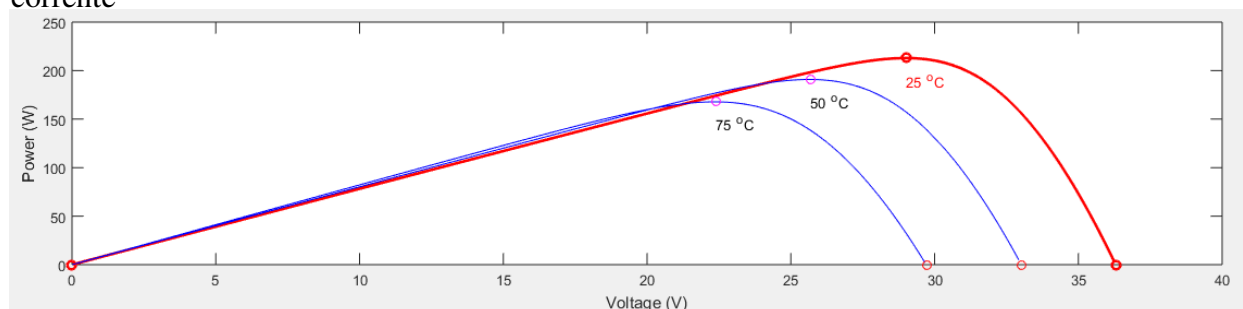


Fonte: Autor

2.2.2 Influência da temperatura

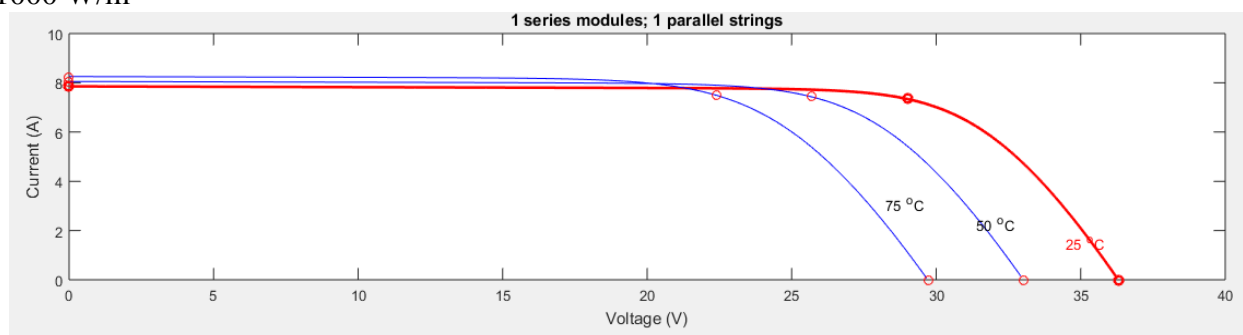
Nas Figuras 6 e 7 pode-se perceber a influência da temperatura nas curvas de tensão x corrente e potência x tensão de um módulo fotovoltaico. Os catálogos de fabricante informam temperaturas de operação que podem variar de 50° C a 80 ° C.

Figura 6: Influência da temperatura à radiação constante de 1000 W/m² na curva de tensão x corrente



Fonte: Autor

Figura 7: Influência da temperatura nas curvas de potência x tensão à radiação constante de 1000 W/m²



Fonte: Autor

2.3 Topologias dos módulos fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos podem ser associados tanto em série quanto em paralelo, ou mistas (série-paralelo), essas combinações obedecem de forma equivalente as associações de fonte de tensão ou corrente e são feitas para atingir níveis de tensão e corrente desejados pelo consumidor (REIS, 2002).

2.3.1 Módulos associados em série

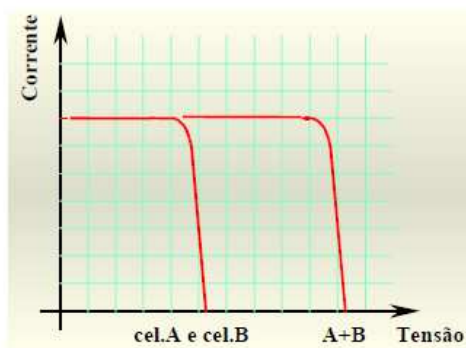
Seguindo as condições de fonte de tensão, módulos fotovoltaicos associados em série produzem na sua saída um valor igual à somatório dos valores individuais de cada PV e seu respectivo valor de tensão de saída. Sendo a relação de tensão corrente dada por:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \dots V_n \quad (4)$$

$$I = I_1 = I_2 = I_3 = \dots I_n \quad (5)$$

A associação em série com painéis que possuem características construtivas e corrente de curto-circuito diferentes será limitada pelo módulo que possui menor corrente. Porém, essa associação não é recomendada por causar superaquecimento dos módulos. O resultado da associação série em módulos fotovoltaicos é representada na Figura 8 onde a associação dos painéis fotovoltaicos produz um deslocamento da curva característica do sistema para a direita.

Figura 8: Associação de módulos fotovoltaicos em série.



Fonte: REIS (2002).

2.3.2 Módulos associados em paralelo

A associação em paralelo segue as mesmas condições de uma fonte de corrente, nesta topologia as correntes são adicionadas e tem-se a mesma tensão nos terminais do conjunto conforme em (6) e (7).

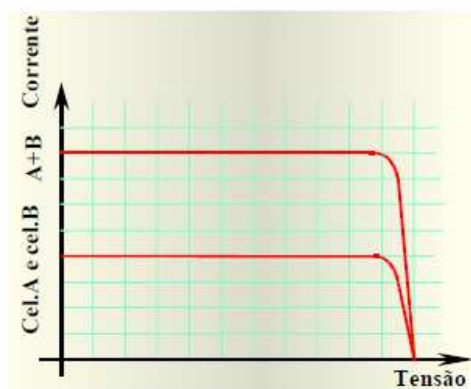
Sendo assim:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots I_n \quad (6)$$

$$V = V_1 = V_2 = V_3 = \dots V_n \quad (7)$$

Na Figura 9, podemos apresentar a associação de painéis solares como um deslocamento vertical da curva de corrente x tensão característica do sistema.

Figura 9: Associação de módulos fotovoltaicos em paralelo.



Fonte: REIS (2002)

3 SISTEMA DE BUSCA DE MÁXIMA POTÊNCIA

3.1 Descrição Geral do Sistema

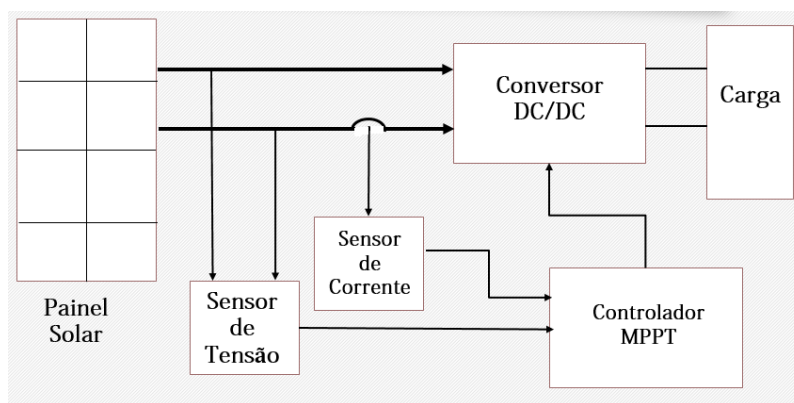
Os painéis fotovoltaicos isoladamente possuem baixa eficiência na produção de energia quando conectados diretamente a uma carga, pois este fica limitado as características da carga como a baixa tensão de uma bateria por exemplo, uma das maneiras para obter a máxima eficiência possível entregue a carga se faz usando técnicas de controle para forçar o módulo a operar em um ponto ótimo denominado ponto de máxima potência (MPP).

Para isto o sistema utiliza um conversor de tensão DC/DC que atua como uma interface entre o painel fotovoltaico e a carga, permitindo que a tensão de saída do painel se mantenha próximo ao MPP.

Visto que o painel fotovoltaico (PV) varia suas características de tensão, corrente e potência de acordo com a temperatura e irradiação solar é necessário ter um sistema que monitore continuamente o seu ponto de operação e faça o painel entregar à carga o maior valor possível de potência para uma determinada condição de temperatura e irradiação.

Para construção de um sistema de busca de máxima potência (MPPT) deve-se realizar uma montagem conforme a Figura 10. Este sistema consiste de um sensor de tensão, um sensor de corrente que são as entradas para o monitoramento do sistema fotovoltaico, um sistema de controle MPPT que consiste na inteligência, seguindo os procedimentos necessários para obtenção do resultado.

Figura 10: Sistema de busca de Máxima Potência



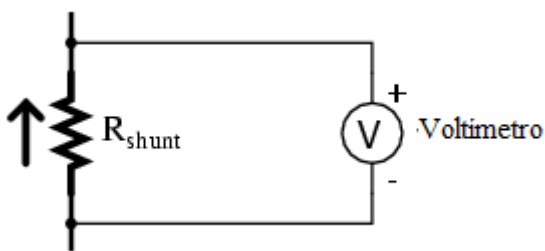
Fonte: Autor

Neste estudo é utilizado uma placa FPGA com o algoritmo MPPT P&O. A saída do sistema consiste em um controlador de geração de pulsos modulados por largura (PWM) que são levados a um circuito conversor DC/DC do tipo Buck. Sendo este conversor o meio intermediário entre o painel e a carga, responsável pela adequação de tensão e corrente e a transferência de potência.

3.2 Sensor de corrente

Para a leitura de corrente faz-se uso de um resistor *shunt*, este resistor com baixo valor de resistência é ligado em série entre o painel e o conversor DC/DC, o sensor gera um valor de tensão proporcional a corrente que circula e com isso permite sua medição. O dispositivo é ilustrado na Figura 11, este consegue medir valores de corrente de até 10 A em modo C.C. (corrente contínua) segundo a folha de dados do fabricante.

Figura 11: Resistor Shunt.



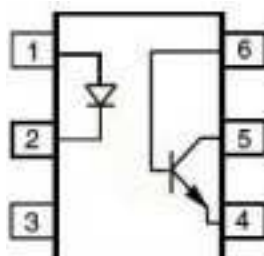
Fonte: Autor

3.3 Acoplador Ótico 4N25

O acoplador ótico 4N25 é um componente cuja finalidade é isolar tensões entre dois circuitos interligados. Principalmente circuitos que possuem ponto de terra distintos.

No caso do sistema fotovoltaico o opto-acoplador isola o painel solar da placa FPGA de forma a protege-la contra surtos de tensão e corrente, além de adaptar o nível de tensão para a entrada do conversor A/D.

Figura 12: Acoplador ótico 4N25



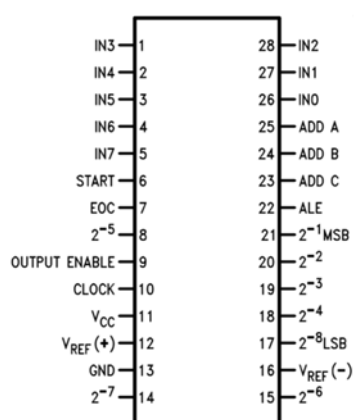
Fonte: Motorola (2010)

3.4 Conversor ADC0808 8-bit com 8 canais

O conversor analógico-digital (A/D) possui resolução de 8 bits e consome uma potência de 15 mW com tempo de conversão de 100 μ s.

A Figura 13 mostra a distribuição dos pinos do conversor A/D em um circuito integrado com encapsulamento DIP (*Dual In-line Package*).

Figura 13: Disposição dos pinos do chip DIP do conversor A/D



Fonte: Texas Instruments (2013).

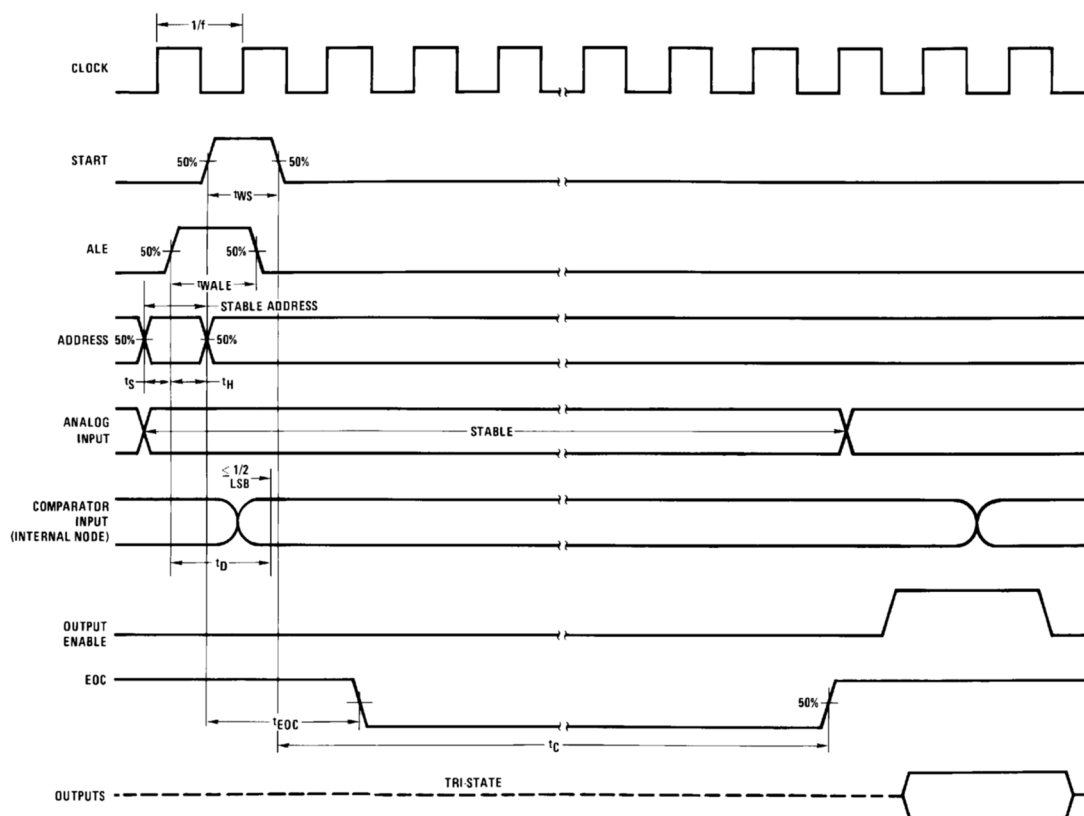
O conversor utiliza as entradas *ADD A*, *B* e *C* para multiplexar os canais de entrada *IN 0* à *IN 7* analógicos e em seguida converter em uma palavra de 8 bits equivalente ao sinal

analógico de entrada. Os pinos V_{cc} , GND , $V_{ref}(+)$ e $V_{ref}(-)$ correspondem aos pinos de energia, terra e aos limites superior e inferior do sinal analógico que deve ser inserido na entrada.

A Figura 14 demonstra o funcionamento e a sequência de utilização dos pinos, OE (output enable), ALE , $START$, $CLOCK$ e EOC (fim de conversão).

Inicialmente deve-se ter um sinal pulsante de clock com frequência de 1280 kHz (datasheet) e os canais $ADD A$, B e C selecionando um dos 8 canais de entrada, em seguida aplica-se um pulso de nível alto na entrada ALE para selecionar o canal a ser lido e $Start$ para início da conversão, em seguida deve-se esperar a saída OE ir ao nível lógico alto para leitura da palavra digital.

Figura 14: Diagrama temporal do conversor ADC 0808



Fonte: Texas Instruments (2013)

3.5 Algoritmos MPPT

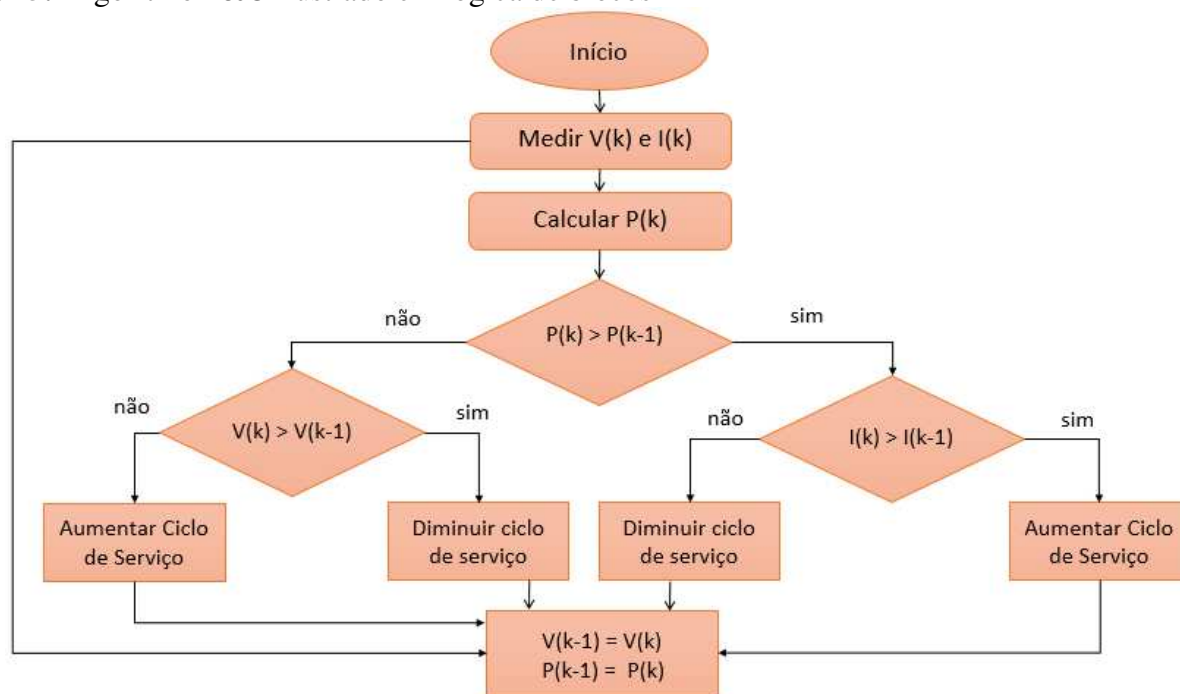
Existem diversos algoritmos MPPT, dentre os quais podemos citar os classificados como indireto, amostragem e baseado em técnicas de inteligência artificial (IA). O método indireto faz uso de parâmetros físicos do PV e dados empíricos coletados e armazenados em um banco de

dados. O método de amostragem mede continuamente a tensão e a corrente do painel fotovoltaico usado na geração de energia elétrica para buscar o ponto de máxima potência (BHATNAGAR, 2013). E os métodos de IA podem utilizar tanto os valores de tensão e corrente como as características do PV na modelagem do sistema buscando o ponto de máxima potência, do PV.

3.5.1 Método P&O

O algoritmo P&O, perturbação e observação realiza o constante monitoramento de tensão e corrente e tem sua lógica baseada conforme a Figura 15 a seguir. O princípio fundamental do algoritmo P&O consiste em gerar uma pequena perturbação na tensão do painel fotovoltaico em uma dada direção e em seguida observar a potência de saída gerada pelo PV. Caso a potência aumente continua-se gerando a perturbação no sentido de aumentar a transferência de potência, caso diminua, o sistema é perturbado na direção contrária. Em um estado permanente, o sistema oscila próximo ao ponto MPP, esta oscilação pode ser minimizada reduzindo-se o tamanho da perturbação, entretanto pequenas perturbações tornam a técnica lenta para rastrear o MPP.

Figura 15: Algoritmo P&O ilustrado em lógica de blocos



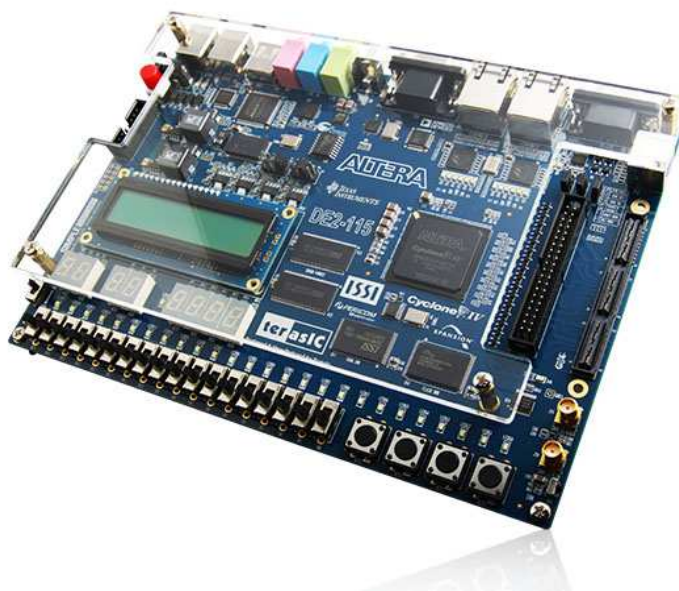
Fonte: Autor

A principal vantagem do algoritmo P&O é a sua simplicidade de implementação, necessidade de poucos parâmetros e a não dependência das características construtivas do como a dimensão do PV (CARVALHO, 2012).

3.6 Placa FPGA DE2-115'

A placa FPGA DE-2 115 é uma placa que possui 8 Megabytes de memória do tipo SDRAM e 512 *kilobyte* do tipo *SRAM*, além disso possui interfaces para operação manual como *push-buttons*, *switches*, LEDs, Módulo LCD, três osciladores de 50 MHz, 2 portas de expansão com 40 pinos cada, comunicação USB e o *FPGA Cyclone IV* da Altera com 114.480 elementos lógicos e 4 PLL's, além de 518 pinos de comunicação de entrada e saída para comunicação com os periféricos embutidos na placa. A Figura 16 ilustra a placa DE-115 utilizada neste projeto (ALTERA, 2010).

Figura 16: Placa FPGA DE-2 da ALTERA



Fonte: ALTERA (2016)

3.7 Conversor Buck

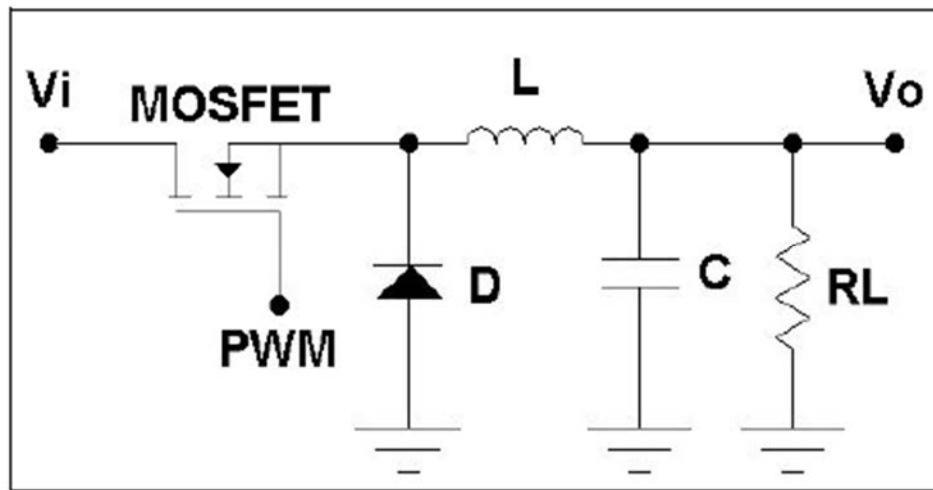
O Conversor *Buck* é um conversor DC/DC que reduz a tensão de entrada, o conversor utiliza a topologia ilustrada na Figura 17. O transistor opera como uma chave fechada durante

um tempo t_{on} e aberta durante um tempo t_{off} . Sendo os tempos t_{on} e t_{off} feito por um sinal PWM que é enviado ao dispositivo semicondutor.

A operação do conversor se dá pelo transistor *MOSFET* ilustrado na Figura 17, quando está ligado (t_{on}) a tensão de V_i é entregue para carga RL através do indutor L desprezando a queda sobre seus terminais.

Durante o tempo t_{off} o transistor deixa de conduzir e o indutor L inverte sua polarização de forma a manter seu estado anterior e a corrente circulando sobre ele, isto faz com que o diodo passe a conduzir mantendo corrente na carga. Assim a tensão de saída é proporcional ao tempo de polarização do indutor diretamente e inversamente a tensão de entrada conforme o chaveamento do transistor. A função do capacitor é fazer com que a tensão de saída fique mais próxima de um sinal DC (GASPARI, 2006).

Figura 17: Topologia conversor DC/DC do tipo Buck.



Fonte: GASPARI (2006).

O cálculo do indutor L, capacitor C é feito pelas equações (8) e (9) a seguir:

$$L = \frac{2.5V_o(V_i - V_o)}{V_i I_o f} \quad (8)$$

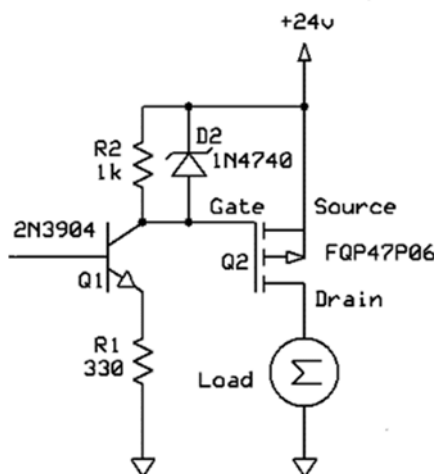
$$C = \frac{(V_i - V_o)V_o T^2}{8\Delta V.L.V_i} \quad (9)$$

Sendo:

- V_i : Tensão de entrada [V].
- V_o : Tensão de saída [V].
- I_o : Corrente de saída [A].
- T : Período de um pulso PWM [μ s].
- f : Frequência do sinal PWM [kHz].
- ΔV : Variação de tensão [V].

Devido às limitações da placa FPGA de fornecer sinais de até 3,3 V de nível de tensão como nível lógico alto, é necessário construir uma topologia chamada *High-side MOSFET Driver* para chaveamento do transistor MOSFET entre sua região de saturação e corte. Esta topologia utiliza um transistor auxiliar do tipo TBJ que faz com que a tensão de alimentação de entrada (no caso a tensão do painel fotovoltaico) produza o chaveamento do MOSFET. A topologia é mostrada na Figura 18:

Figura 18: Topologia *High side* MOSFET driver.



Fonte: Gammon (2016).

O motor ilustrado representa a carga do painel fotovoltaico, a tensão + 24 V, o sinal de saída do painel. O sinal PWM de saída do FPGA deve ser acoplado a base do transistor TBJ (transistor bipolar de junção). O valor de resistência de 330 Ω limita a corrente no transistor enquanto a de 1k Ω fornece nível alto ao gate do MOSFET quando o diodo TBJ é cortado.

4 SIMULAÇÕES

Para realização de simulações do sistema MPPT se utiliza a plataforma MATLAB da *MathWorks* que possui a ferramenta SIMULINK, nesta plataforma, existem blocos de controle pré-configurados para várias áreas da engenharia. Inclusive da área de fontes de energia renováveis e eletrônica de potência que são os assuntos abordados neste projeto.

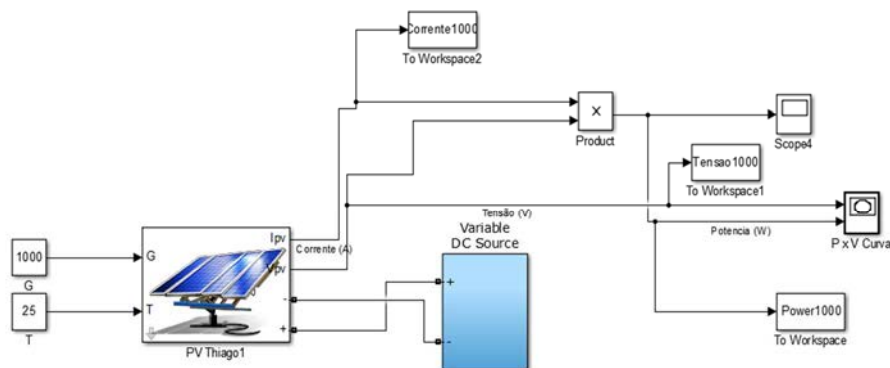
Em particular, antes da elaboração de um sistema de geração de energia renovável é interessante realizar simulações de modo a analisar quais são os componentes e interfaces necessárias para o sistema de acordo com as características locais e os equipamentos utilizados.

Além disso o SIMULINK pode auxiliar a prever o comportamento do painel solar, conversores DC/DC e os algoritmos sob mudanças de clima e mudança de parâmetros internos do sistema como inserção de novos módulos PV ou diferença de parâmetros de carga (DAS, 2012).

4.1 Painel Solar HG-135

Para validação do sistema MPPT em MATLAB, foi feito inicialmente uma simulação utilizando apenas o modelo do painel fotovoltaico HG-135 com uma radiação variável e temperatura de 25°C conforme a Figura 19. As informações técnicas do painel são disponíveis na Tabela 2.

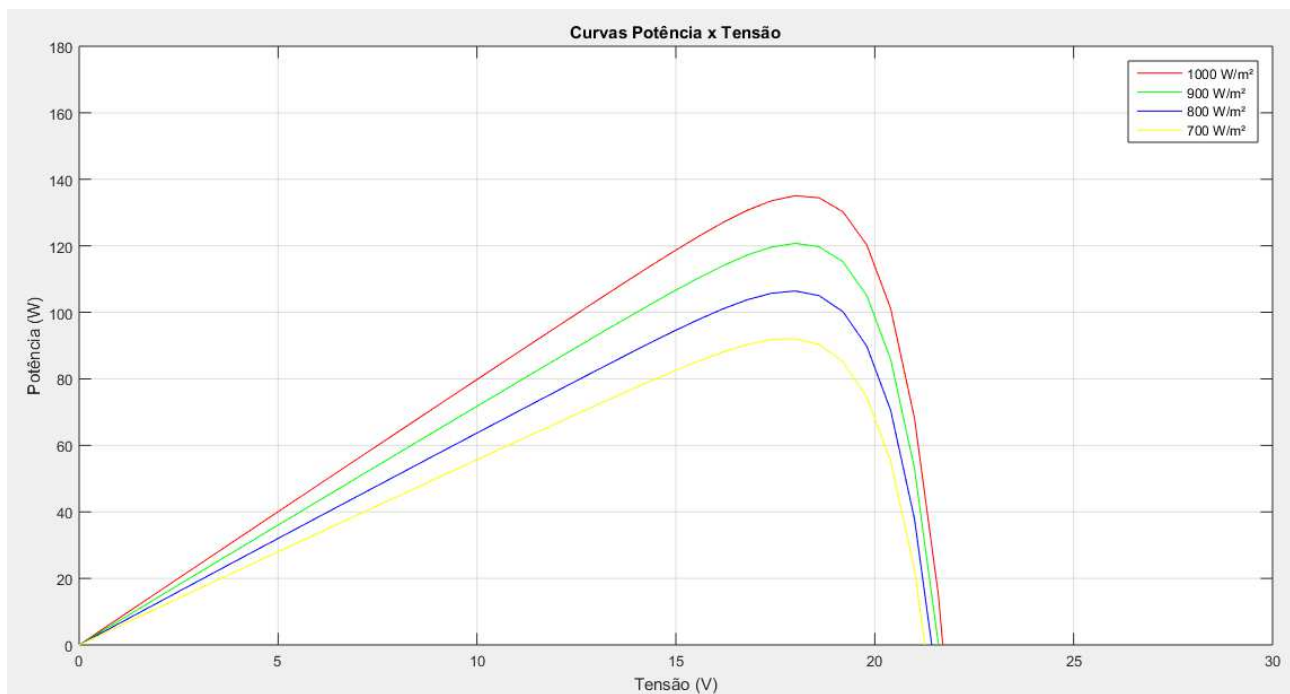
Figura 19: Painel fotovoltaico desenvolvido em MATLAB



Fonte: Autor

Na Figura 20 tem-se a curva de potência x tensão do PV para diversos valores de radiação do painel, verifica o ponto de máxima potência e a tensão em máxima potência próximo de 135W e 18V em 1000 W/m^2 .

Figura 20: Curvas de potência para diversos valores de radiação.

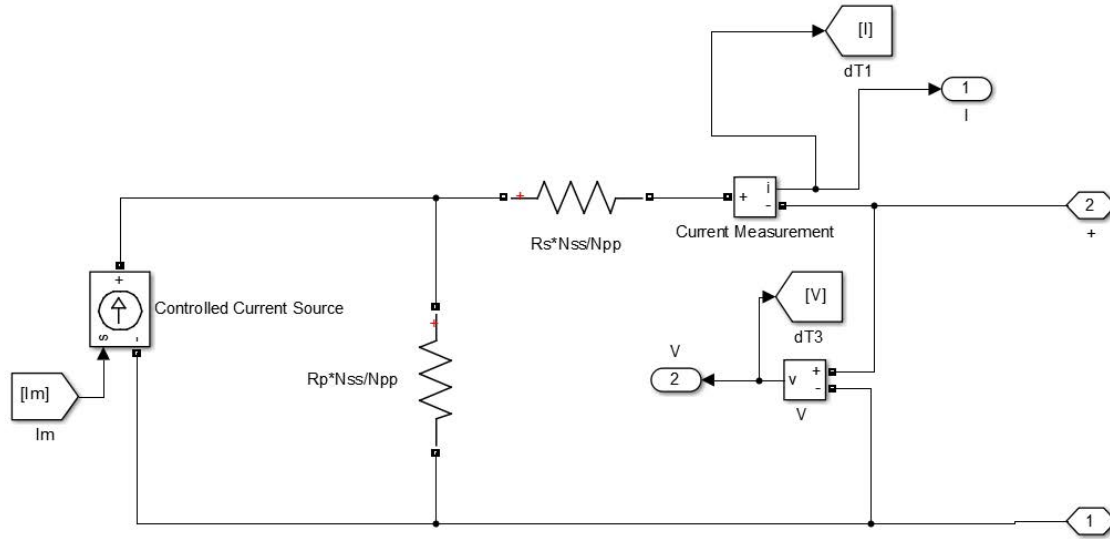


Fonte: Autor

4.2 Desenvolvimento do Painel Solar em Matlab

O painel solar desenvolvido em Matlab utiliza-se a modelagem descrita no capítulo 2 utilizando o modelo de circuito elétrico equivalente do painel conforme ilustrado:

Figura 21: Circuito elétrico equivalente de um módulo solar.



Fonte: Autor

Sendo R_p a resistência em paralelo equivalente e R_s a resistência em série equivalente, N_{ss} o número de módulos em série e N_{pp} o número de módulos em paralelo, o cálculo de I_m é escrito em Simulador utilizando as equações (1), (2) e (3).

4.2.1 Método numérico para cálculo de R_s e R_p

As equações relativas a uma célula solar não descrevem as características originais de um painel solar que é constituído de um bloco destas células, geralmente de 36 a 52 células dispostas em uma matriz retangular. Sendo assim alguns parâmetros adicionais devem ser inseridos na equação (1) resultando a seguinte equação:

$$I_m = I_{pv} - I_{ph} \left(e^{\left(\frac{V + R_s I}{V_t \alpha} \right)} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (10)$$

Em (10) valores de R_s e R_p são as únicas variáveis desconhecidas para o desenvolvimento do painel, sendo portanto necessário determinar seus parâmetros para simulação. Uma relação entre as duas resistências pode ser encontrada igualando o valor da potência máxima do painel (fornecida pelo fabricante na folha de dados do produto) com o valor experimental $P_{\max_e}$ calculado. Obtendo o valor da potência máxima de um painel dada por (11)

e substituindo as grandezas que descrevem matematicamente a corrente do módulo solar em (10) na equação (11), em seguida isolando R_p , obtemos a equação (12):

$$P_{m\acute{a}x} = V_{mp}I_{mp} \quad (11)$$

Onde

- I_{mp} : Valor da corrente de máxima potência
- V_{mp} : Valor de tensão de máxima potência

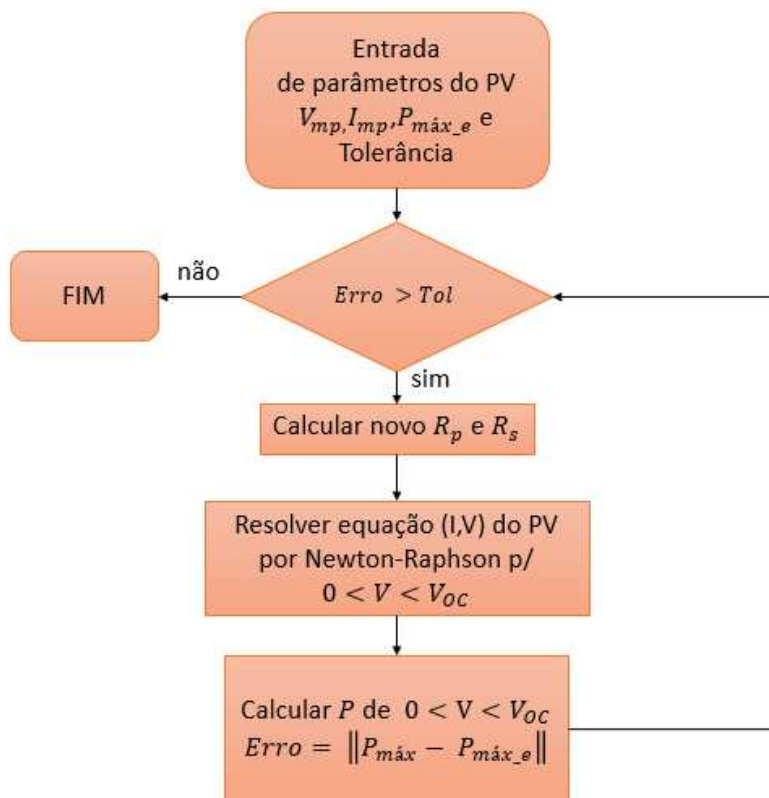
$$R_p = \frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{\left\{ V_{mp}I_{pv} - V_{mp}I_o \exp\left(\frac{(V_{mp} + I_{mp}R_s)q}{N_s\alpha}\right) + V_{mp}I_o - P_{\max_e} \right\}} \quad (12)$$

O que indica que para um certo valor de R_s haverá um valor de R_p que faz a curva passar pelo ponto de máxima potência teórico, indicado pelo fabricante. O objetivo então é encontrar estes valores através de iterações que modifiquem os valores de ambas as resistências até $P_{m\acute{a}x}$ teórico for igual ao experimental. O valor inicial de R_s pode ser nulo e o valor de R_p pode ser dado por (13):

$$R_{pmin} = \frac{V_{mp}}{I_{scn} - I_{mp}} - \frac{V_{oc} - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (13)$$

Um fluxograma descrito na Figura 22 a seguir demonstra resumidamente o algoritmo para encontrar os valores de R_p e R_s .

Figura 22: Algoritmo para cálculo dos valores de R_s e R_p baseado em método numérico de Newton-Raphson.



Fonte: Autor

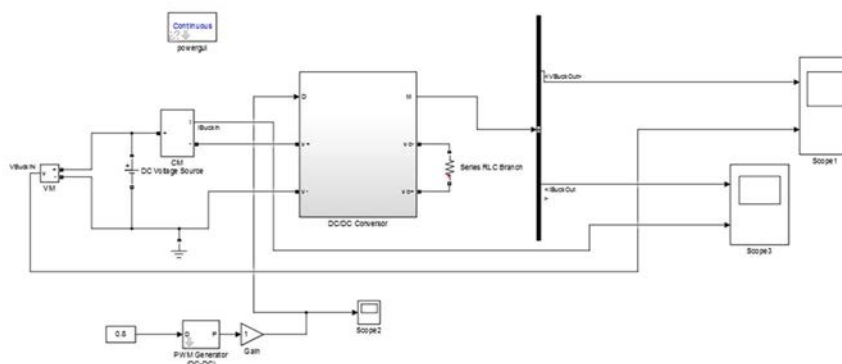
Basicamente o algoritmo recebe os valores fornecidos pelo fabricante e estipula inicialmente os valores de R_s e R_p , em seguida, calcula-se os valores de corrente I para um vetor de valores de tensão V utilizando o método numérico de Newton-Raphson para encontrar a solução da equação (10) para os diferentes valores de corrente. Finalmente, com os pontos da curva I-V obtidos calcula-se as potências e compara-se a máxima potência obtida com a informada pelo fabricante, caso esse valor seja melhor que a tolerância estipulada (0.001) termina-se o algoritmo e os valores pretendidos foram encontrados. Caso contrário, reinicia-se o procedimento para um valor de R_s incrementado e R_p recalculado conforme (12).

4.2.2 Conversor Buck em MATLAB

Na Figura 23 tem-se o conversor Buck desenvolvido em MATLAB utilizando blocos como o VSC disponíveis na *toolbox SimPower System* do Simulink, que simula o transistor de

chaveamento, um bloco para conversão do sinal de ciclo de serviço em um sinal PWM e os componentes elétricos necessário para o desenvolvimento do projeto.

Figura 23: Conversor Buck desenvolvido em MATLAB

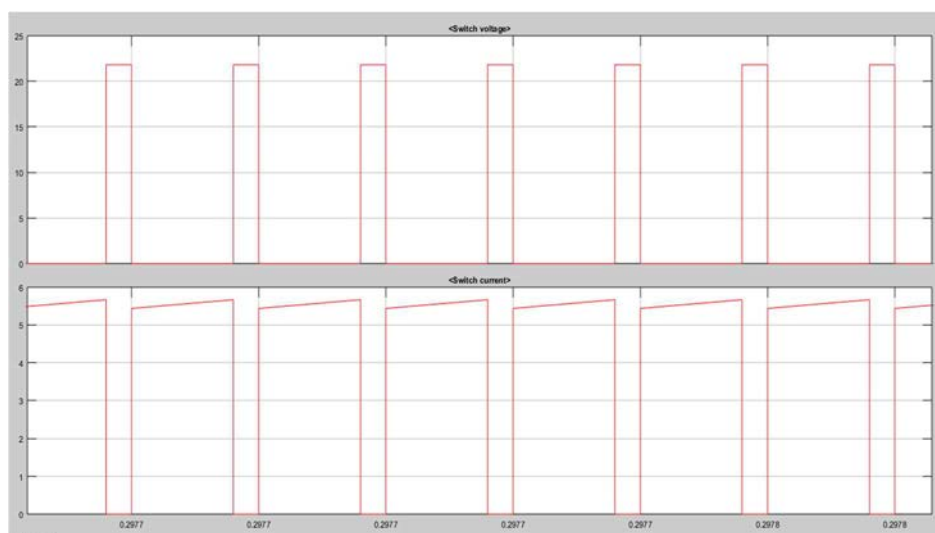


Fonte: Autor

Para validação do mesmo fez uma simulação do conversor com uma fonte DC de 21 V para valor de *duty cycle* de aproximadamente 80% ilustrado na Figura 24, ilustra-se também a saída do conversor Buck na Figura 25 em relação a entrada.

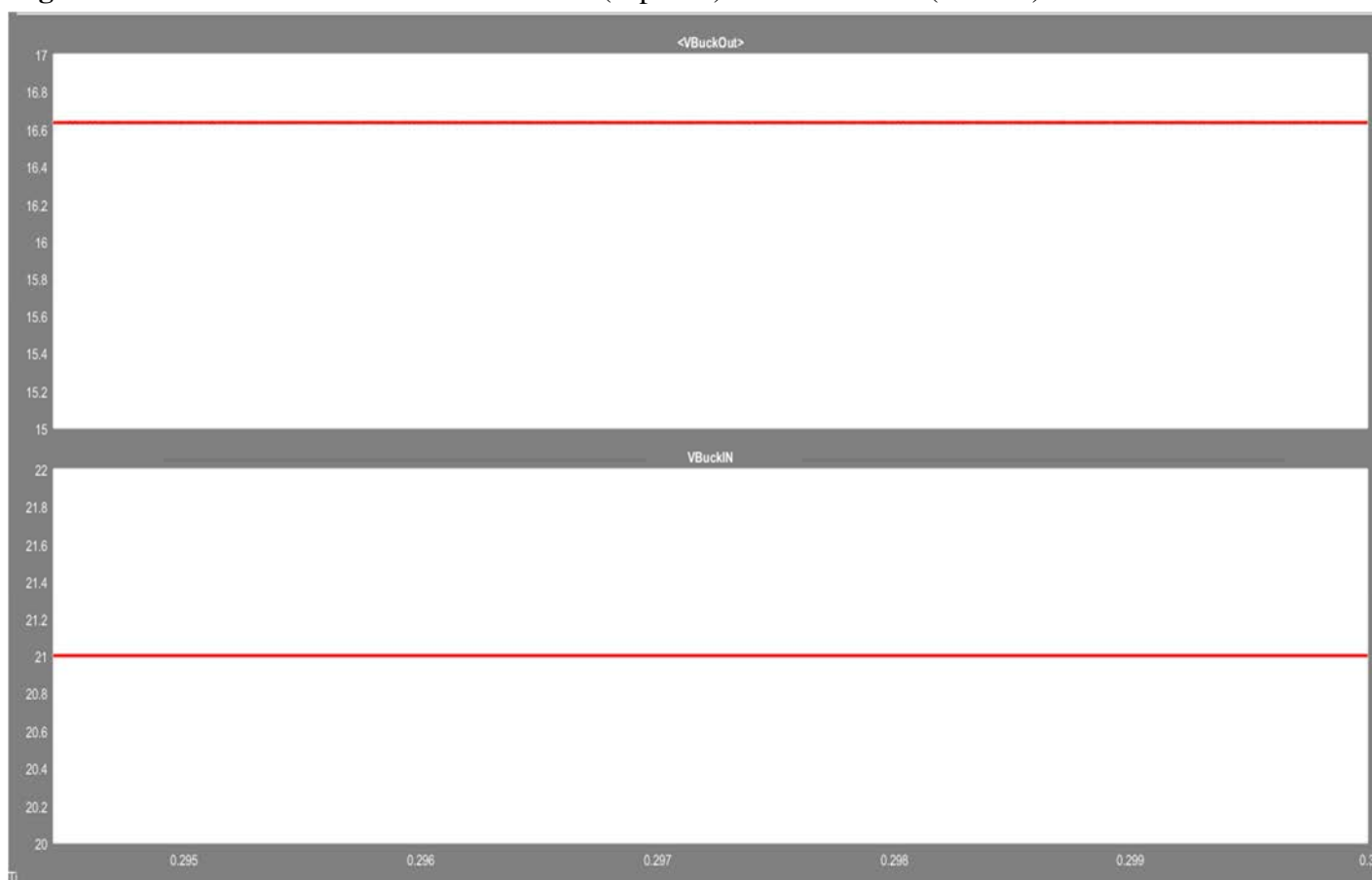
É evidente a proporcionalidade da tensão de saída menor que a entrada proporcional ao tempo de ciclo de serviço conforme esperado pelo conversor do tipo Buck.

Figura 24 Chaveamento de corrente e tensão do transistor tensão x tempo.



Fonte: Autor

Figura 25: Conversor Buck tensão de entrada (superior) tensão de saída (inferior)



Fonte: Autor

4.3 Sistema MPPT com P&O

Para desenvolver o sistema mostrado na Figura 26, se utilizou a plataforma *SIMULINK*, colocando como controlador o bloco lógico *MATLAB Function* que representa uma rotina escrita utilizando um *script* do MATLAB para criação do algoritmo P&O.

Além disso criou-se subsistemas como conversor DC-DC e geração de um sinal PWM com base no sinal de saída do algoritmo.

Figura 26: Script P&O utilizado em Matlab.

```

function D = Pe0(V, I)

%Controlador MPPT Pe0

% D output = Duty cycle do Conversor Buck (value between 0 and 1)
% V = Tensao do Modulo FV (V)
% I = Corrente do Modulo FV (A)
% Param input:
Dinit = 0.4;    %Valor inicial de D
Dmax = 0.95;    %Valor maximo de D
Dmin = 0.01;    %Valor Minimo de D
deltaD = 0.0002;

persistent Vold Pold Dold;

dataType = 'double';

if isempty(Vold)
    Vold= 0 ;
    Pold= 0;
    Dold=Dinit;
end
P= V*I;
dV= V - Vold;
dP= P - Pold;

if dP ~= 0
    if dP < 0
        if dV < 0
            D = Dold - deltaD;
        else
            D = Dold + deltaD;
        end
    else
        if dV < 0
            D = Dold + deltaD;
        else
            D = Dold - deltaD;
        end
    end
end

else
    D=Dold;
end

if D >= Dmax || D<= Dmin

    D=Dold;
End

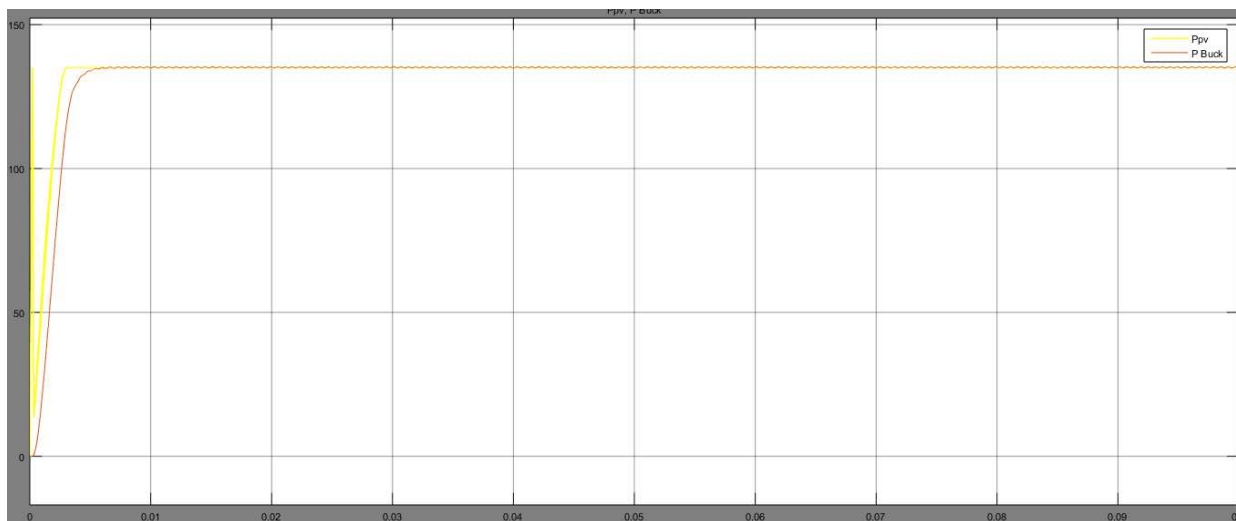
```

Fonte: Autor

4.4 Resultados do Sistema P&O em MATLAB

As curvas da Figura 28 demonstram o comportamento de potência de entrada e saída do sistema MPPT, para condições de irradiação constante de valor 1000 W/m^2 e temperatura ambiente de 25°C , Figura 28, o sistema encontra o ponto de máxima potência e lá permanece após um tempo de 2 ms de simulação.

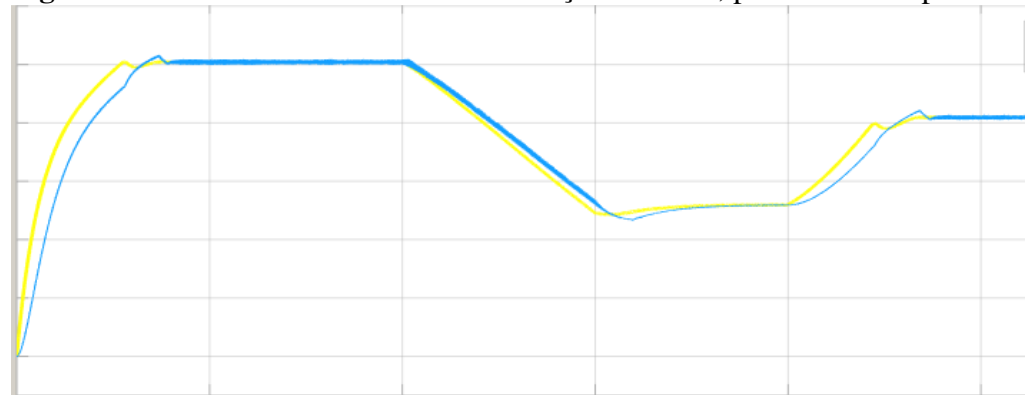
Figura 27: Sistema MPPT P&O potência x tempo.



Fonte: Autor

Na Figura 29 utiliza-se uma radiação variável na entrada do PV simulando o que ocorreria na realidade para uma temperatura constante de 25°C . O sistema para cada valor de radiação procura o ponto de máxima potência.

Figura 28: Sistema MPPT P&O com radiação variável, potência x tempo.



Fonte: Autor

5 SISTEMA MPPT EM VHDL

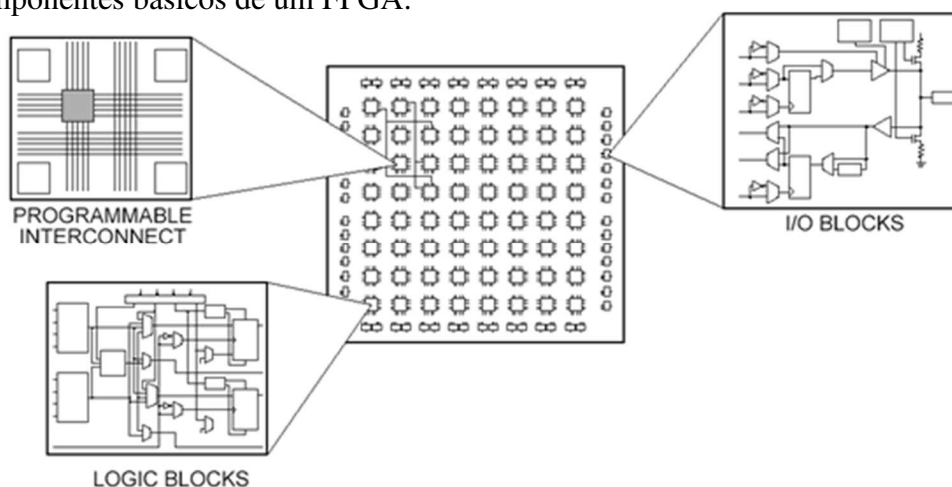
5.1 FPGA

Um FPGA – *Field Programmable Gate Array*, é um circuito integrado projetado para ser configurado pelo projetista, sendo largamente utilizado para o processamento de informações digitais.

Sendo composto por três tipos de componentes: Blocos de entrada e saída (IOB), blocos lógicos configuráveis (CLB) e as chaves de interconexão (*switch matrix*).

O FPGA é um circuito que suporta a implementação de circuitos lógicos relativamente grandes. Consiste em um grande arranjo de células lógicas ou blocos lógicos configuráveis contidos em único circuito integrado conforme ilustrado na Figura 30.

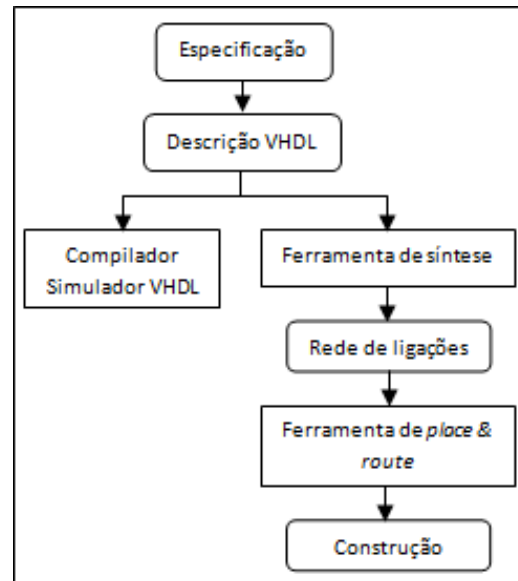
Figura 29: Componentes básicos de um FPGA.



Fonte: FERNANDES (2016)

5.2 Linguagem VHDL

A linguagem VHDL é uma linguagem de descrição de hardware que possui instruções concorrentes, ou seja, os comandos envolvidos em um mesmo evento ocorrem ao mesmo tempo, diferente de outras linguagens de programação de software, o que pode trazer vantagem no processamento de dados. A Figura 31 demonstra as etapas de um projeto utilizando VHDL (FERNANDES, 2016).

Figura 30: Principais etapas de um projeto utilizando VHDL

Fonte: FERNANDES (2016)

As primeiras etapas consistem na descrição em linguagem de alto-nível das variáveis presentes e da escrita do algoritmo respeitando a sintaxe VHDL.

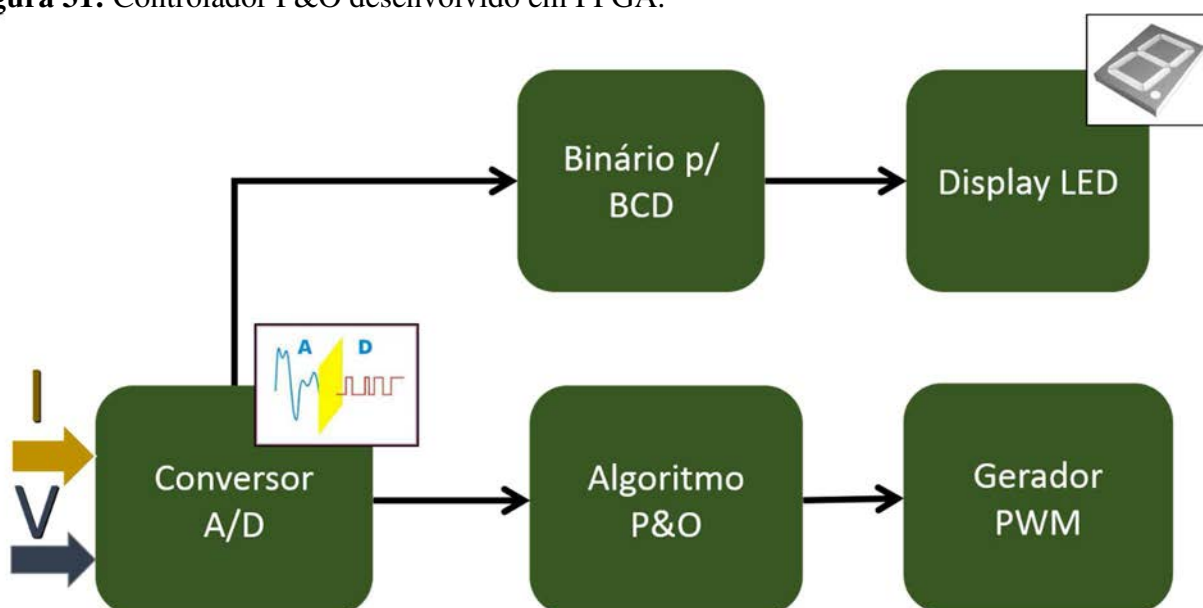
Em seguida uma ferramenta de síntese realiza a verificação de erros no código, apontando erros existentes em atribuição de tipos e de lógicas e conversões de formatos que não são permitidos. Posteriormente, ocorre a rede de ligação entre o código principal e os outros códigos realizando uma rede de ligações lógicas de acordo com a linguagem descrita.

Finalmente, são endereçadas as principais variáveis do projeto pertencente a uma entidade de projeto aos componentes presentes na placa FPGA que consistem em botões, leds, pinos de comunicação de entrada e saída (I/O) entre outros finalizando-se o carregamento do projeto.

5.3 Projeto Controlador P&O em VHDL

Os blocos representados na Figura 32 apresentam os módulos desenvolvidos e descritos no APÊNDICE A, o bloco conversor A/D realiza a conversão dos sinais analógicos, que são processados pelo algoritmo P&O. Ao mesmo tempo os valores convertidos são convertidos para o formato BCD (Codificação binária decimal) e mostrado em um display de LEDs de 7 segmentos. Os dados processados pelo algoritmo geram um sinal PWM de acordo com o algoritmo descrito na Figura 15.

Figura 31: Controlador P&O desenvolvido em FPGA.



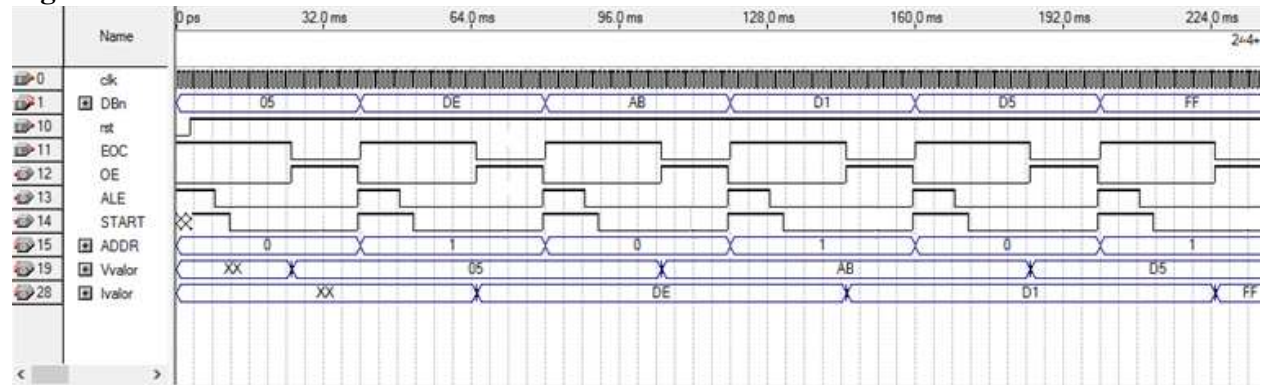
Fonte: Autor

5.3.1 Módulo ADC0808 em VHDL

O desenvolvimento do módulo ADC0808 é feito descrevendo o comportamento dos sinais de controle conforme explicado em 3.4. Na Figura 33 tem-se a simulação do conversor A/D que dado uma série de dados hexadecimais fornecidos em *DBn* envia estes dados alternadamente para os sinais de tensão (*Vvalor*) e de corrente (*Ivalor*), *ADDR* representa o barramento de endereço dos sinais de tensão e corrente, '0' e '1' sendo alternados após um pulso em *ALE*, *OE* indica a disponibilidade para leitura de dados após o fim de conversão (*EOC*) e um pulso *START* o início de conversão de um novo valor analógico para digital.

Fez-se também a simulação do algoritmo P&O controlador utilizando um sinal senoidal gerado em VHDL. Conforme indicado na Figura 37 o sistema encontra o ponto de máxima potência e nele se estabiliza após determinado tempo.

Figura 32: Módulo ADC0808 em VHDL



Fonte: Autor

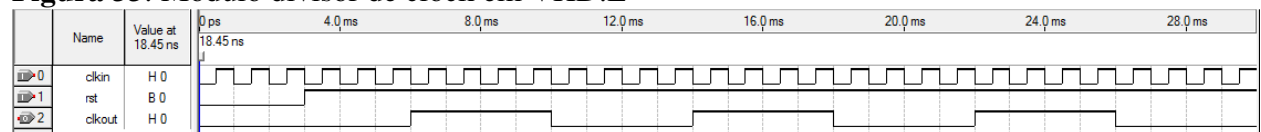
5.3.2 Módulo divisor de clock em VHDL

O módulo de divisão de clock consiste basicamente em um contador que utiliza os pulsos fornecidos pelo oscilador de 50 MHz encontrado na placa FPGA para fornecer pulsos de acordo com um período N calculado de acordo com a fórmula a seguir:

$$N = \frac{50 \text{ MHz}}{2f_{desejada}} \quad (14)$$

A Figura 34 ilustra o comportamento do módulo divisor de clock que possui um sinal $clkout$ com frequência quatro vezes menor que o clock de entrada $clkin$.

Figura 33: Módulo divisor de clock em VHDL



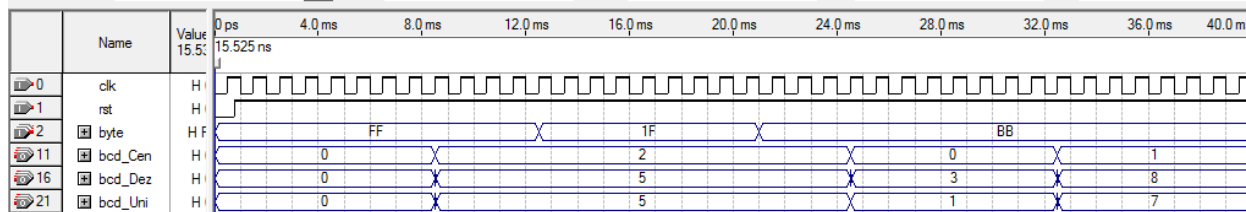
Fonte: Autor

5.3.3 Módulo conversor binário para BCD

O módulo conversor binário para BCD realiza a conversão dos valores fornecidos pelo conversor A/D para visualiza-los nos displays 7 segmentos.

Figura 34: Algoritmo de conversão de binário para BCD

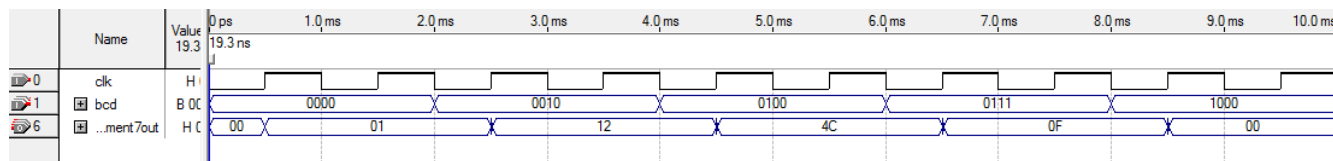
Fonte: Autor



O algoritmo utilizado para essa conversão consiste em deslocar os bits à esquerda 12 vezes (4 bits para cada casa de milhar), verificando a cada *nibble* (4 bits) é maior que 5, caso for, deve-se adicionar 3 unidades ao número. Tendo-se no final o valor descrito na Figura 35. Nesta simulação, tem-se os bytes em hexadecimal sendo convertidos após um período de *clocks* nos seus respectivos valores BCD.

5.3.4 Módulo conversor BCD para display 7 segmentos

Figura 35: Conversor BCD para 7 segmentos ânodo comum



Fonte: Autor

Este módulo descreve simplesmente um decodificador que dado um valor de 0 a 9 em BCD, decodifica em um conjunto de 8 bits que representa o número em um display de 7 segmentos.

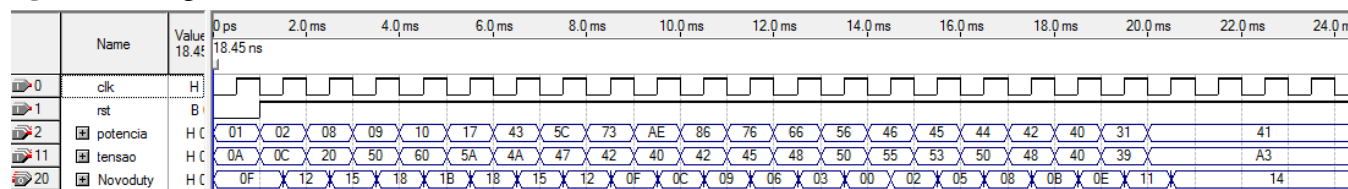
Na Figura 36 tem-se a simulação do conversor BCD, explicitando os vetores de 7 bits que são enviados ao display de led de 7 segmentos com ânodo comum.

5.3.5 Algoritmo P&O

A simulação do algoritmo P&O se faz explorando as situações descritas no algoritmo descrito anteriormente. Dividindo-se a simulação na Figura 37 em cinco trechos de 5 ms cada, cria-se dois sinais, potência e tensão que simulam o comportamento de um painel fotovoltaico

nas quatro combinações possíveis de perturbação, $\Delta P > 0$ e $\Delta V > 0$, $\Delta P > 0$ e $\Delta V < 0$, $\Delta P < 0$ e $\Delta V > 0$ e por último, $\Delta P < 0$ e $\Delta V < 0$, sequencialmente. Na saída tem-se a variação do ciclo de serviço em passo de três unidades, conforme as condições de perturbação em potência e tensão descritas no algoritmo, nos últimos 5 ms ilustra-se o caso em que a potência e tensão se tornam constantes ao longo do tempo e o sinal de controle deixa de variar demonstrando um possível caso de encontro de ponto de máximo.

Figura 36: Algoritmo P&O simulado em VHDL



Fonte: Autor

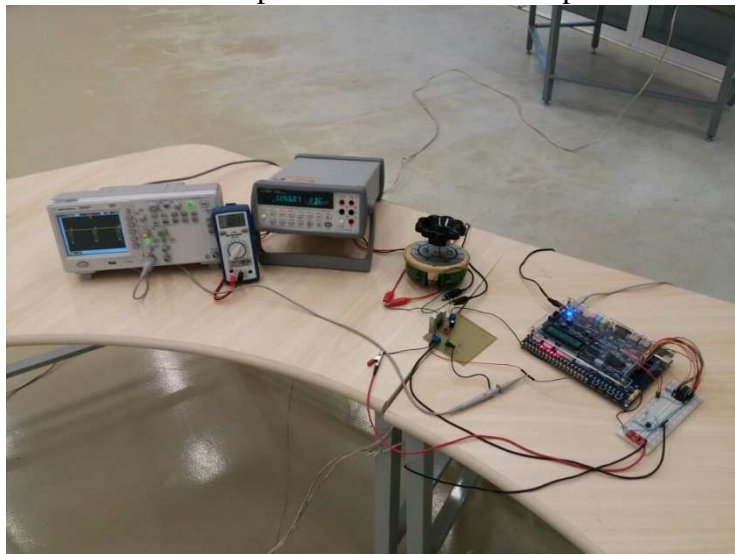
6 SISTEMA MPPT E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O Sistema MPPT foi implementado utilizando os seguintes componentes:

- Placa FPGA DE-2 115
- Conversor A/D 8 bits ADC0808
- Paine Solar 135 W – HG 135
- Sensor de Corrente do tipo shunt
- Opto-acoplador 4N25 Motorola
- Conversor Buck
- Jumpers Fêmea
- Protoboard
- Reostato de 100 Ohms.

Na Figura 38 é ilustrado o sistema MPPT desenvolvido em laboratório com os instrumentos de medida como osciloscópio, multímetros para medições:

Figura 37: Sistema MPPT sintetizado em placa FPGA e seus componentes

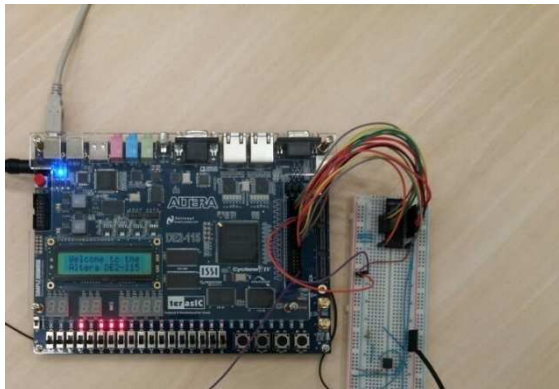


Fonte: Autor

6.1 Placa FPGA Altera DE-2 e Sensores

Na placa FPGA foram utilizadas as portas de GPIO disponíveis no módulo para comunicar através de jumpers com o conversor A/D, os sensores de corrente e tensão (acoplador óptico) foram colocados em um *protoboard* para facilitar as ligações entre estes componentes e o conversor A/D na Figura 39.

Figura 38: Placa FPGA e sensores



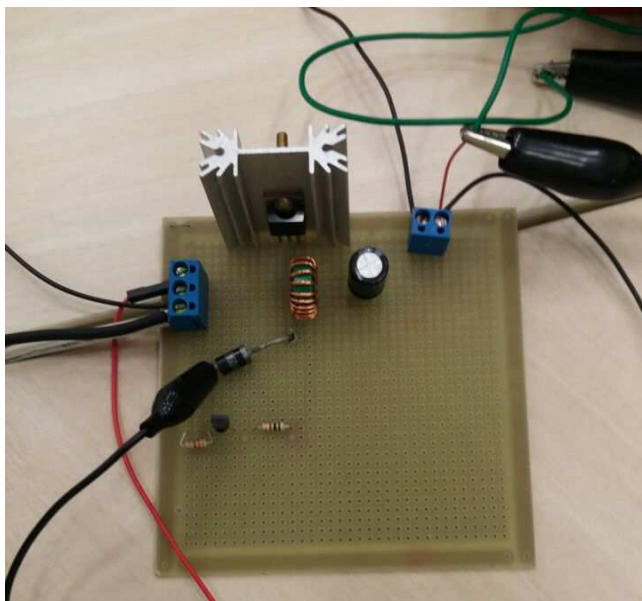
Fonte: Autor

6.2 Conversor Buck

O conversor Buck construído em laboratório é mostrado a seguir, seus componentes são soldados em uma placa teste para facilitar o manuseio e suportar valores elevados de tensão e corrente que danificariam as trilhas de solda da *protoboard*. O conversor é conectado a placa FPGA que envia o sinal de PWM ao painel solar. O PV fornece tensão e corrente ao circuito eletrônico presente na *Figura 40*.

A tensão reduzida pelo conversor é enviada ao reostato que simula o comportamento de uma carga como uma bateria recarregável.

Figura 39: Conversor Buck montado em placa teste.



Fonte: Autor

6.3 Painei Fotovoltaico

O painel fotovoltaico utilizado HG135 da empresa Solarterra possui como especificações técnicas os seguintes parâmetros fornecidos na Tabela 2. Na Figura 41 tem-se uma ilustração do painel fotovoltaico utilizado para coleta de dados e operação do sistema MPPT.

Figura 40: Painei Fotovoltaico HG-135



Fonte: Autor

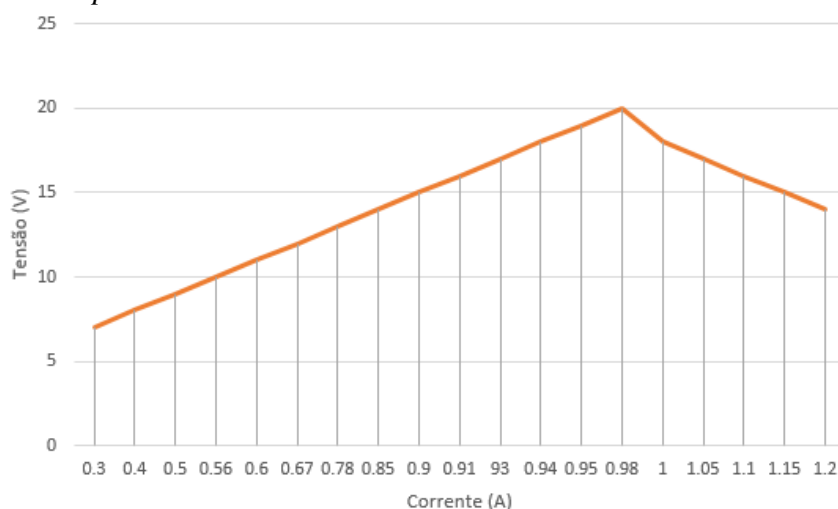
Tabela 2: Informações técnicas painel solar HG 135

Potência Máxima:	135 W
Corrente nominal (P _{máx}):	7.45 A
Tensão máxima (P _{máx}):	18.14 V
Corrente de Curto-circuito (I _{sc}):	8.04 A
Tensão de circuito aberto	21.74 V

Fonte: Solarterra (2015)

6.4 Testes realizados

Utilizando uma fonte de tensão local de 25 W realizou-se testes variando-se o reostato de 100 a 0 Ω simulando o carregamento de uma bateria, obteve-se uma coleta de dados que formaram o gráfico descrito a seguir:

Figura 41: *Dados experimentais tensão x corrente*

Fonte: Autor

A partir da *Figura 41* verifica-se que o sistema tende ao ponto de máxima potência, entretanto não consegue permanecer nesse estado, evidenciando que seja necessária uma melhor regulação na aquisição de dados, e sensor de corrente e tensão mais sensíveis e precisos.

Os testes realizados com o painel solar forneceram resultados abaixo do ponto de máxima potência evidenciado que o sistema ainda está se perdendo no ponto de máxima potência de forma semelhante aos dados coletados pela fonte, principalmente reduzindo-se o valor do reostato para maior fornecimento de potência.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto do controlador de máxima potência utilizou-se de uma diferente gama de recursos adquiridos durante o curso de engenharia elétrica, envolvendo conceitos de eletrônica digital, programação em alto e baixo nível, eletrônica de potência, circuitos elétricos e um estudo de painéis fotovoltaicos, além disso fez-se necessário a utilização de diversos instrumentos de medida e o entendimento de diversos componentes eletrônicos e sensores. O projeto em si apresenta uma série de fases que consistiram primeiramente em um estudo dos principais componentes como painel solar, conversor DC/DC, programação VHDL e aquisição de dados e simulação em MATLAB do projeto, o que fez com que o tempo de execução do projeto não fosse suficiente para obtenção de todos os objetivos estipulados.

Vários testes estão sendo realizados e algumas pequenas modificações nos códigos devem ser necessárias para adequação do projeto e obtenção de resultados significativos.

Atualmente o sistema MPPT opera em uma faixa estreita, faltando-se uma regulação nos algoritmos MPPT e uma maior precisão na aquisição dos dados entrada do controlador. Verificou-se que o sensor de corrente shunt é um sensor que produz muito ruído, e este fator pode estar interferindo na operação do controlador. Indica-se a introdução de filtros e sensores de correntes de efeito hall de boa regulação para melhor coletarmos os dados e assim evitar ruídos. Há também a possibilidade de utilizar um conversor A/D de maior resolução para aumentar a precisão da coleta de dados.

O conversor DC/DC funciona de forma adequada, apresentando características lineares para valores de tensão perdendo apenas um pouco de linearidade para valores de tensão de saída menores que 1 V. Uma proposta para melhoria desse componente é trocar o transistor MOSFET por um IGBT ou outro MOSFET com características de chaveamento mais robustas em relação ao tempo de resposta do dispositivo semiconductor, entretanto tal não linearidade não implica em grandes erros e problemas no projeto do sistema MPPT.

Após finalizarmos a caracterização dos protótipos para todas as condições pré-estabelecidas, como atualização deste projeto pretende-se usar o sistema MPPT como parte integrante de um sistema de geração de energia fotovoltaico que possua também armazenamento de energia, baseado em baterias, o qual será implantado no INOVEE – Centro de Inovação em Eficiência Energética.

8 CONCLUSÃO

Em relação aos resultados obtidos durante simulação e os encontrados com o sistema MPPT, o sistema com a placa FPGA ainda está se perdendo do ponto de máximo, produzindo valores de ciclo de serviço e transferência de potência que atingem o valor de máxima potência, porém experimentalmente verificou-se que o sistema busca valores de potência crescentes ao longo do tempo, porém não se estabilizando no MPPT pelo algoritmo P&O. Percebe-se que o algoritmo feito através da placa FPGA não faz com que o sistema fotovoltaico estabilize o seu valor de potência final como a simulação feita em MATLAB, principalmente por terem origens e capacidades de processamento de dados diferentes, e também por conta de aspecto reais que não foram gerados nesta simulação como ruídos, mau contatos e velocidade de conversão do dispositivo analógico-digital, sendo, portanto, a simulação desenvolvida neste projeto ideal para se ter uma noção geral do comportamento do sistema para diversas condições de temperatura, insolação e também de programação e topologia, antes da realização de um projeto.

Finalmente, verificou-se que o projeto serviu como uma fonte enorme de aprendizado, permitindo a interdisciplinaridade e a harmonia de estudos entre as disciplinas que foram cursadas e aprendidas de formas individuais durante o curso, entre elas eletrônica de potência, eletrônica digital, controle, programação e microprocessadores que foram fundamentais para a concepção do projeto.

REFERÊNCIAS

ALLEGRO, Multisystems LLC. **Fully Integrated Hall-Effect-Based Linear Current Sensor with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-resistance current conductor.**

Disponível em: <http://www.alegromicro.com>. Acesso em: 4 de jun. 2016.

ALTERA. **DE-2 User Manual.** Disponível em:

<http://www.terasic.com>. Acesso em: 3 de Abr. de 2016.

BHATNAGAR, P.; NEMA, R. K.; **Maximum power point control techniques: State-of-the-art in photovoltaic applications**, ELSEVIER, 2013.

CARVALHO, E. P.; PRADO, P. P. L.; GONÇALVES, J. B. **Uma nova abordagem de rastreamento do ponto de máxima potência em painéis fotovoltaicos.** 2012. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –Universidade de Taubaté, Taubaté, 2012

DAS Dispari, **FPGA Based Implementation of MPPT of Solar Cell**, 2012 National Conference on Computing and Communication Systems (NCCCS), Nanak Institute of Technology, Kolkata, India.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anual estatístico de Energia Elétrica 2015.**

Disponível em:

<http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Forms/Anurio.aspx>. Acesso em: 29 mar. 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil.** Disponível em:

<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/Forms/AllItems.aspx>. Acesso em : 3 abr. 2016.

FERNANDES V. Miranda; **Conceitos básicos sobre VHDL.** Disponível em:

<http://vhdl.com.br/site/vhdl/conceitos-basicos/148-conceitos-b%C3%AAsicos-sobre-vhdl>.

Acesso em: 25 de set. de 2016.

FREITAS, A. M. Camargos; **Um sensor de tensão com o Optoacoplador 4N25.** IFECT, Campus Formiga, Minas Gerais, 2015.

GAMMON, N.: Driving Motors, lights, etc. from an Arduino output pin. Disponível em:

<http://www.gammon.com.au/motors>. Acesso em : 25 de set. de 2016.

GASPARI, L. Rodrigues; **Modelagem e simulação de conversores DC-DC utilizando topologia Buck para o satélite universitário ITASAT.** São José dos Campos, ITA, 2006.

HECKTHEUER, Lúcio Almeida. **Análises de associações de módulos fotovoltaicos**. 2001.135 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande de Sul, Porto Alegre, 2001.

MESQUITA, L. **Arquiteturas Programáveis de uma Máquina de Inferência para uso em Microprocessadores Fuzzy em tecnologia CMOS**. 2002 162f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2002.

MICHELIN, T. José; **Controlador Fuzzy Digital Implementado em VHDL para controle de um motor universal**, Guaratinguetá, 2009.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanço Energético Nacional – Relatório Final 2015**. Disponível em:
<https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioFinal.aspx?anoColeta=2015&anoFimColeta=2014> Acesso em: 29 mar. 2016.

PEREIRA, B. ENIO; MARTINS R. FERNANDO; ABREU L. SAMUEL; RÜTHER RICARDO. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE, 2006.

REIS, L. O. Mattos; **Lógica Fuzzy Aplicada a um Sistema Híbrido de Geração de Energia Elétrica: Eólica, Fotovoltaica e Biogás**. 181 f Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Mecânica de Guaratinguetá, 2002

SOLAR DESIGN TOOL, STH-Soltech Solar Panel. Disponível em:
<http://www.solar design tool.com/components/module-panel-solar/1SolTech/839/1-STH-235/specification-data-sheet.html>. Acesso em: 5 de mai. de 2016

TEXAS INSTRUMENTS. **ADC0820-N-8bit High Speed uP Compatible A/D Converter with Track/Hold Function**. Disponível em:
<http://www.ti.com>. Acesso em: 9 de ago. de 2016.

VILLALVA, M. Gradella.; GAZOLI, J. Rafael. **Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações – Sistemas Isolados e Conectados à Rede**. São Paulo: Érica, 2012.

APÊNDICE A - Código VHDL para Controlador P&O

```

-- Autor: Thiago de Andrade Prado - FEG - UNESP - 2015
-- Projeto de um controlador PeO seguidor de máxima potência para painéis fotovoltaicos
--- Componentes:
-- Interface de controlador AD
-- PWM
-- Divisor de Clock
-- Metodo PeO

LIBRARY ieee;
USE ieee.std_logic_1164.all;
use IEEE.numeric_std.all;
USE ieee.std_logic_unsigned.all;

entity ControladorTste is

--generic (
  -- N: integer := 100000); -- numero de amostras
port (
  rst: in std_logic; -- botão de reset
  clk: in std_logic; -- oscilador interno 50 Mhz
  clkAD: out std_logic;
    OE: buffer std_logic; -- sinal para leitura de dado digital
    EOC: in std_logic; -- sinal para contabilizar numero de amostras
    DBn: in unsigned (7 downto 0); --barramento de 8 bits de saída;
    ADDR: out std_logic_vector (2 downto 0); -- endereço de entrada analógico
    START: out std_logic; -- sinal de início de conversão
    ALE: out std_logic; -- sinal de início de conversão
    LEDS: out unsigned (7 downto 0); -- Saída para LEDS da placa
    SETseg7, SETseg6,SETseg5,SETseg4,SETseg3,SETseg2,SETseg1,SETseg0 : out
    unsigned (6 downto 0);
    pwm: out std_logic -- saída pwm
  );
end ControladorTste;
architecture tp of ControladorTste is

  signal pulso, pulsoAD, teste : std_logic; -- divisor de clk khz
  signal DBout : unsigned (7 downto 0);-- sinais internos
  signal Novoduty: unsigned (7 downto 0);
  signal habilitar,ler: std_logic;
  signal VNovo: unsigned (7 downto 0);
  signal pwm1, rdy_aux:std_logic;
  signal sigstepup, sigstepdown: std_logic;
  signal Vvalor_tmp, Ivalor_tmp:unsigned (7 downto 0);
  signal Pvalor_tmp: unsigned (15 downto 0);

  -- display 7 segmentos V
  signal bcdV_Cen, bcdV_DeZ, bcdV_Uni: unsigned (3 downto 0);
  -- display 7 segmentos I
  signal bcdI_Cen, bcdI_DeZ, bcdI_Uni: unsigned (3 downto 0);
  -- display 7 segmentos P
  signal bcdP_Mil,bcdP_Cen, bcdP_DeZ, bcdP_Uni: unsigned (3 downto 0);

```

```

-- clock 1
COMPONENT clockDIV IS
PORT (
    clk,rst: IN std_logic;
    q: OUT std_logic
);
END COMPONENT;

COMPONENT pwmgerador is
PORT(
    clk      : IN STD_LOGIC;           --clock
    reset    : IN STD_LOGIC;           --reset
    duty     : IN unsigned (7 downto 0); --valor do ciclo de servico
    pwm_saida : OUT std_logic          -- saida pwm
);
END COMPONENT;

COMPONENT PeO is
port (
    rst: in std_logic;
    clk : in std_logic;
    EOC: in std_logic;
    Novoduty: out unsigned (7 downto 0);
    Potencia: in unsigned (15 downto 0);
    Vvalor, Ivalor : in unsigned (7 downto 0)
);
END COMPONENT;

COMPONENT ADC0808 is
port (
    rst: in std_logic; -- reset do sistema
    clk: in std_logic; -- sinal de clk p/ controle 500 kHz ADC 0808
    OE: buffer std_logic; -- sinal de leitura de dado digital
    EOC: in std_logic; -- sinal para contabilizar numero de amostras
    DBn: in unsigned (7 downto 0);--barramento de 8 bits de saida;
    ADDR: out std_logic_vector (2 downto 0); -- endereço de entrada analógico
    START: buffer std_logic; -- sinal de inicio de conversão
    ALE: out std_logic; -- sinal de inicio de conversão
    Vvalor,Ivalor: out unsigned (7 downto 0); -- Saida de dados conversor AD
    potencia: out unsigned (15 downto 0);
    LEDS: out unsigned (7 downto 0)
);
END COMPONENT;

COMPONENT BtoBCD is
port (
    clk, rst: in std_logic;
    byte : in unsigned (7 downto 0) ;
    bcd_Cen : out unsigned (3 downto 0) ;
    bcd_Dez : out unsigned (3 downto 0) ;
    bcd_Uni : out unsigned (3 downto 0)
);
END COMPONENT ;

```

```

COMPONENT Display7seg is
port (
    clk : in std_logic;
    bcd : in unsigned(3 downto 0); --BCD input
    segment7 : out unsigned(6 downto 0) -- 7 bit decoded output.
);
END COMPONENT Display7seg;

-OE => OE
begin

    pwm <= pwm1;
    -- clock para o conversor AD
    clkAD <= pulso;
    -- divisor de clock
    dat: clock PORT MAP (clk=>clk, rst=>rst, q=> pulso); -- Entrada 50 Mhz, Saida 500 KHz

    --conversor AD
    CONVERSADOR: ADC0808 PORT MAP (clk => pulso, rst => rst, START => START, OE=>OE, EOC =>
    EOC, ALE => ALE, ADDR => ADDR, LEDS => LEDS,potencia => Pvalor_tmp, Vvalor=>
    Vvalor_tmp,Ivalor=> Ivalor_tmp, DBn => DBn);

    -- Metodo MPPT P&O

    PandO: PeO PORT MAP (rst => rst, clk=> pulso,Vvalor => Vvalor_tmp, Ivalor=>
    Ivalor_tmp,potencia=>Pvalor_tmp,
    Novoduty=>Novoduty, EOC => EOC);

    -- Entrada 50 MHZ, Saida PWM 200 KHz

    GERAPWM : pwmgerador PORT MAP (clk => clk, reset=> rst, duty =>Novoduty, pwm_saida => pwm1);

    -- amostrar tensao no display
    displayV: BtoBCD port map(clk => clk, rst => rst, byte => Vvalor_tmp,bcd_Cen=> bcdV_Cen ,bcd_Deiz=>
    bcdV_Deiz, bcd_Uni=> bcdV_Uni);

    displayV_dez: Display7seg7 port map (clk=> pulso, bcd=>bcdV_Deiz, segment7=> SETseg7 );

    displayV_uni: Display7seg6 port map (clk=> pulso, bcd=>bcdV_uni, segment7=> SETseg6 );

    -- amostrar corrente no display
    displayI: BtoBCD2 port map(clk => clk, rst => rst, byte => Ivalor_tmp,bcd_Cen=> bcdI_Cen ,bcd_Deiz=>
    bcdI_Deiz, bcd_Uni=> bcdI_Uni);

    displayI_dez: Display7seg5 port map (clk=> pulso, bcd=>bcdI_Deiz, segment7=> SETseg5 );

    displayI_uni: Display7seg4 port map (clk=> pulso, bcd=>bcdI_uni, segment7=> SETseg4 );

    --amostrar Potencia no display
    displayP: BtoBCD3 port map(clk => clk, rst => rst, byte => Pvalor_tmp,bcd_Mil => bcdP_Mil,bcd_Cen=>
    bcdP_Cen ,bcd_Deiz=> bcdP_Deiz, bcd_Uni=> bcdP_Uni);

    displayP_Mil: Display7seg3 port map (clk=> pulso, bcd=>bcdP_Mil, segment7=> SETseg3 );
    displayP_cen: Display7seg2 port map (clk=> pulso, bcd=>bcdP_Cen, segment7=> SETseg2 );
    displayP_dez: Display7seg1 port map (clk=> pulso, bcd=>bcdP_Deiz, segment7=> SETseg1 );
    displayP_uni: Display7seg0 port map (clk=> pulso, bcd=>bcdP_Uni, segment7=> SETseg0 );

```