



UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS - UEA
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA - EST

JACKELINE DOURADO DA SILVA

**ESTUDO DE CONVERSORES CC-CC UTILIZADOS EM SISTEMAS DE PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS RESIDENCIAIS AUTONOMOS PARA AUMENTO DE
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Manaus

2018

JACKELINE DOURADO DA SILVA

**ESTUDO DE CONVERSORES CC-CC UTILIZADOS EM SISTEMAS
DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS RESIDENCIAIS AUTONOMOS PARA
AUMENTO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Pesquisa desenvolvida durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e apresentada à banca avaliadora do Curso de Engenharia Elétrica da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Engenheira Eletricista.

Orientador: Walter Prado de Souza Guimarães

Manaus

2018

Universidade do Estado do Amazonas – UEA
Escola Superior de Tecnologia - EST

Reitor:

Cleinaldo de Almeida Costa

Vice-Reitor:

Cleto Cavalcante de Souza Leal

Diretor da Escola Superior de Tecnologia:

Roberto Higino Pereira da Silva

Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica:

Ingrid Sammyne Gadelha Figueiredo

Banca Avaliadora composta por:

Data da defesa: 11/06/2018.

Prof. Walter Prado de Souza Guimarães (Orientador)

Prof. Israel Gondres Torné

Prof. Daniel Guzman

CIP – Catalogação na Publicação

Silva, Jackeline Dourado da

Estudo conversores CC-CC utilizados em sistema de painéis fotovoltaicos residenciais autônomos para aumento de eficiência energética / Jackeline Dourado da Silva; [orientada por] Walter Prado de Souza Guimarães. – Manaus: 2018.

57 p.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade do Estado do Amazonas, 2018.

1. Painéis Fotovoltaicos. 2. Conversores CC/CC. 3. Rastreamento de Máxima Potência.

I. Prado de Souza Guimarães, Walter.

JACKELINE DOURADO DA SILVA

ESTUDO DE CONVERSORES CC-CC UTILIZADOS EM SISTEMAS DE
PAINÉIS FOTOVOLTAICOS RESIDENCIAIS AUTONOMOS PARA
AUMENTO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Pesquisa desenvolvida durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e apresentada à banca avaliadora do Curso de Engenharia Elétrica da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Engenheira Eletricista.

Nota obtida: 9,30 (Nove vírgula três)

Aprovada em 11/06/2018.

Área de concentração: Sistemas de Painéis Fotovoltaicos

BANCA EXAMINADORA


Orientador: Walter Prado de Souza Guimarães, Dr.


Avaliador: Israel Gondres Torne, Dr.


Avaliador: Daniel Guzman, Dr.

Dedicatória

Dedico à minha família por sua capacidade de acreditar e investir em mim. Mãe seu cuidado e dedicação foi o que deram, em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai e irmãos a presença de vocês significaram segurança e certeza de que não estou sozinha nessa caminhada.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus por sua infinita bondade e por ter dado saúde e força a todo instante.

Aos meus pais o meu sincero agradecimento pelo esforço e luta diária para proporcionar-me um curso superior. Foram sempre as minhas referências e o meu alicerce para nunca desistir.

Aos Notáveis e amigos da graduação pelos momentos únicos vividos, por tudo que foi compartilhado, diversão e trabalho, alegrias e tristezas, vitórias e derrotas.

Ao meu orientador, Walter Prado, por fornecer apoio ao que precisava na realização deste trabalho.

E por fim, um agradecimento especial a todos que contribuíram de todas as formas para que este trabalho fosse possível.

*“Grandes batalhas só são dadas a
grandes guerreiros.”*

(Mahatma Gandhi)

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o estudo, dimensionamento e simulação de um conversor CC-CC para sistema solar fotovoltaico residencial autônomo de baixo consumo de energia, capaz de otimizar a produção de energia e compensar o efeito sombra. Para tanto, propõe-se a implementação de conversor CC-CC do tipo abaixador de tensão, cuja o controle é baseado na técnica de Rastreamento do ponto de máxima potência, *Maximum Power Point Tracker (MPPT)*, com o algoritmo de Perturbação e Observação. O projeto proposto foi desenvolvido e simulado no *software* PSIM, utilizando ferramentas que permitem simular um painel fotovoltaico com as características e comportamentos o mais real possível. As simulações realizadas durante este trabalho, permitiram comprovar que a técnica utilizada é capaz de fornecer a máxima potência extraída do painel solar para as baterias ou cargas. Vale ressaltar que os resultados apresentados evidenciam que o método proposto obteve um bom desempenho do sistema fotovoltaico, tornando-se interessante para uma aplicação.

Palavra-chave: sistema solar fotovoltaico autônomo. conversor CC-CC. técnicas de MPPT.

ABSTRACT

This objective of this work is the study, design and simulation a DC-DC converter for autonomous residential solar photovoltaic system of low energy consumption, able to optimize energy production and compensate for the shadow effect. In order to do so, it is proposed the implementation of DC-DC converter of voltage lowering type, with the control is based on the technique of Maximum Power Point Tracker (MPPT), with the disturbance and observation algorithm. The proposed project was developed and simulated in the PSIM software, using tools that allow to simulate a photovoltaic panel with the characteristics and behaviors as real as possible. The simulations carried out during this work allowed us to prove that the technique used is able to provide the maximum power extracted from the solar panel to the batteries or loads. It is noteworthy that the obtained results show that the standard method has a good performance of the photovoltaic system, making it interesting for an application.

Keywords: Stand-alone photovoltaic system. DC-DC converter. MPPT techniques.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Estruturas do Painel fotovoltaico.....	14
Figura 2 - Circuito Equivalente de uma célula fotovoltaica.....	15
Figura 3 - Curvas características de um painel solar fotovoltaico.....	17
Figura 4 - Diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico isolado série.....	18
Figura 5 - Diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico isolado paralelo.....	18
Figura 6 - (a) Topologia do conversor CC-CC buck. (b) Conversor buck com a chave fechada. (c) Conversor buck com a chave aberta.....	20
Figura 7 - Tensão sobre uma indutância em regime.....	21
Figura 8 - Topologia do conversor CC-CC boost.....	22
Figura 9 - Topologia do conversor CC-CC buck-boost.....	23
Figura 10 - Técnica de comutação por PWM.....	24
Figura 11 - Modelos elétricos de uma bateria.....	26
Figura 12 - Curva de corrente e tensão do processo de carga de uma bateria de chumbo-ácido.	26
Figura 13 - (a) Curva característica de um painel fotovoltaico para diferentes quantidades de irradiância. (b) - Curva característica de um painel fotovoltaico para diferentes temperaturas.	27
Figura 14 - Princípio de funcionamento do algoritmo de perturbação e observação.....	29
Figura 15 – Diagrama de Fluxo P&O.....	29
Figura 16 – Diagrama de Fluxo Condutância Incremental.....	30
Figura 17 - Diagrama do trabalho desenvolvido.....	34
Figura 18 - Visão geral do modelo de simulação implementado.....	40
Figura 19 - Ambiente gráfico da funcionalidade “Solar Module (physical model)” do PSIM.....	41
Figura 20 - Representação do painel fotovoltaico.....	42
Figura 21 - Esquema de implementação do método MPPT-P&O.....	43
Figura 22 - Tensões de entrada e saída do conversor Buck.....	44

Figura 23 - Corrente de entrada e saída do Conversor Buck.....	45
Figura 24 - Potências de entrada e saída do conversor CC-CC Buck.	46
Figura 25 – Corrente, tensão e potência do painel fotovoltaico.	47
Figura 26 - Potência do painel (vermelho) e potência MPPT (azul).	47
Figura 27 - Variação da radiação e Temperatura constante.	49
Figura 28 - Potência de entrada (vermelho), Potência de saída (azul) e eficiência do sistema (verde).....	49
Figura 29 - Circuito implementado com controlador PWM.	50
Figura 30 - Potência máxima do painel e Potência de saída com técnica de controle PWM...	50
Figura 31 - Potência máxima e potência de saída com técnica de controle MPPT.....	51

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de um painel fotovoltaico	16
Tabela 2 - Consumo esperado de energia elétrica da residência	35
Tabela 3 - Parâmetros para dimensionamento do Painel Fotovoltaico.	36
Tabela 4 - Característica do Painel YL095P-17b.	37
Tabela 5 - Requisitos de projeto do Conversor CC-CC Buck.	38
Tabela 6 - Dados calculados do Conversor CC-CC Buck.....	39
Tabela 7 - Resultados de simulação do Conversor Buck.	45
Tabela 8 - Valores de diferentes grandezas físicas no MPP com radiação variável e temperatura constante (25°C).	48
Tabela 9 - Valores de diferentes grandezas físicas no MPP com temperatura variável e radiação constante (1000W/m ²).	48
Tabela 10 - Análise da comparação dos resultados entre as técnicas de PWM e MPPT.	52

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
1 REFERENCIAL TEÓRICO	14
1.1 PAINEL FOTOVOLTAICO	14
1.1.1 Características elétricas dos painéis fotovoltaicos	15
1.1.2 Sistemas Fotovoltaicos Isolados da Rede Elétrica	17
1.2 CONVERSORES CC-CC NÃO ISOLADOS	19
1.2.1 Conversor CC-CC <i>Buck</i>	20
1.2.2 Conversor CC-CC <i>Boost</i>	22
1.3 TÉCNICA DE CONTROLE DO CONVERSOR CC-CC	24
1.4 BATERIA	24
1.5 CONTROLADORES MPPT	27
1.5.1 Métodos de rastreamento de máxima potência	27
1.5.2 Perturbação e Observação	28
1.5.3 Condutância Incremental	30
1.6 SOFTWARE PARA SIMULAÇÃO (PSIM)	31
1.7 TRABALHOS RELACIONADOS COM O TEMA	31
2 METODOLOGIA	33
3 IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO	35
3.1 DIMENSIONAMENTO DO PAINEL FOTOVOLTAICO	35
3.1.2 Dimensionamento do banco de baterias	37
3.1.3 Dimensionamento do conversor	37
3.2 SIMULAÇÕES NO PSIM	39
3.2.1 Sistema Implementado em Simulação	40
3.2.2 Simulação do Módulo Fotovoltaico no PSIM	41
3.2.3 Simulação Controle do Conversor CC-CC <i>Buck</i>	42
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	44
CONCLUSÃO	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
ANEXO A – FOLHA DE DADOS DO PAINEL YL095P-17b	57

INTRODUÇÃO

Desde cedo, os sistemas solares fotovoltaicos que se baseiam na produção de energia elétrica a partir da radiação solar, afirmaram-se como sendo uma das melhores apostas na área das energias renováveis. Isto deve-se em grande parte à elevada disponibilidade geográfica da sua fonte de energia, o sol, bem como ao fato de requererem pouca manutenção, possuírem um tempo de vida útil elevado, serem silenciosos e ainda por poderem ser facilmente integrados em edifícios ou outro tipo de construções. Adicionalmente é fundamental referir que o custo e o rendimento associado a estes sistemas, fatores que no passado eram os principais entraves no momento da sua escolha, atualmente não apresentam uma importância tão significativa, em virtude do decréscimo do preço dos painéis fotovoltaicos e da eletrônica de potência que permite otimizar o rendimento deste tipo de instalações (CARVALHO, 2013).

Com isso, o tema deste trabalho se destina a um estudo de implementação de um sistema fotovoltaico autônomo com um método de controle que visa fornecer a máxima potência do painel fotovoltaico.

Sabe-se que potência instantânea extraída de um sistema solar fotovoltaico está em constante alteração, devido a variações nas condições ambientais a que está submetido, sendo destaque a radiação e a temperatura (BORGES, 2013). De modo a otimizar o rendimento destes sistemas costuma-se recorrer a circuitos de potência, que o controle baseia-se em métodos de seguidor do ponto de máxima potência, *Maximum Power Point Tracking (MPPT)*, que tem como função determinar as condições de funcionamento ótimas que permitem aos painéis fotovoltaicos operar no seu ponto de máxima potência.

Este trabalho tem por hipótese a ideia de que é possível obter a eficiência em sistemas fotovoltaicos utilizando conversores eletrônicos de potência do tipo CC-CC e controlando a potência extraída do painel fotovoltaico.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar um estudo técnico com base em simulações em computador pessoal da implementação de um conversor eletrônico de potência CC-CC em sistemas fotovoltaicos autônomos, que seja capaz de otimizar o rendimento de uma

instalação solar fotovoltaico por meio de técnicas de controle de rastreamento do ponto de máxima potência.

A justificativa é o aprofundamento nas disciplinas do curso de engenharia elétrica como: Sistema Fotovoltaico, Eficiência Energética, Energias Renováveis, Eletrônica de Potência I e II. Também, justifica-se este trabalho pelo estudo técnico de conversores eletrônicos de potência CC-CC aplicados a geração de energia fotovoltaica, como forma de aumentar a eficiência energética. Possibilitando, por exemplo, a entrega da máxima potência extraída dos painéis fotovoltaicos a carga, diminuindo as perdas e aumentando o rendimento do sistema solar fotovoltaico.

Este trabalho está dividido em quatro seções citadas a seguir: Referencial Teórico; Metodologia; Implementação e Análise e Interpretação dos Resultados.

A primeira seção está destinada ao Referencial Teórico, que consiste na revisão dos assuntos citados acima. São descritas as características de painéis solares e maneiras de utilização de sistemas fotovoltaicos isolados, apresenta-se também as partes que compõem um sistema solar fotovoltaico isolados, como os conversores CC-CC, baterias e as principais técnicas utilizadas para rastrear o ponto de máxima potência. Realizado um breve resumo do software PSIM utilizado para obtenção de resultados da simulação. A última subseção do referencial teórico está destinada a trabalhos anteriores que serviram de base e exemplo no estudo de sistema fotovoltaicos isolados, utilizando técnicas para rastrear o ponto de máxima potência.

A segunda seção é a metodologia, nela serão descritas as etapas para construção do sistema solar fotovoltaico proposto. Dimensiona-se o arranjo solar fotovoltaico e o banco de baterias, além dos conversores de potência utilizados no sistema e é apresentada uma estratégia de controle para o conversor CC-CC.

A terceira seção são efetuados todos os cálculos preliminares, com base nos fundamentos teóricos da seção 1, que servem de apoio para a elaboração do modelo de simulação no software PSIM, que permite ajustar e validar a configuração apresentada, para otimizar o sistema fotovoltaico.

A quarta seção está destinada a análise e interpretação dos resultados experimentais obtidos em simulação, que permite comprovar o funcionamento do sistema implementado.

Por fim, apresenta-se a conclusão referente ao trabalho realizado e são efetuadas algumas sugestões com intuito de melhorias para o futuro.

1 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção será realizada uma revisão aos assuntos relacionados ao tema deste trabalho. Os assuntos abordados reproduzem o conteúdo de disciplinas do curso de Engenharia Elétrica como: Sistema Fotovoltaico, Eficiência Energética, Energias Renováveis, Eletrônica de Potência I e II e Circuitos Elétricos. Está estruturado em três etapas:

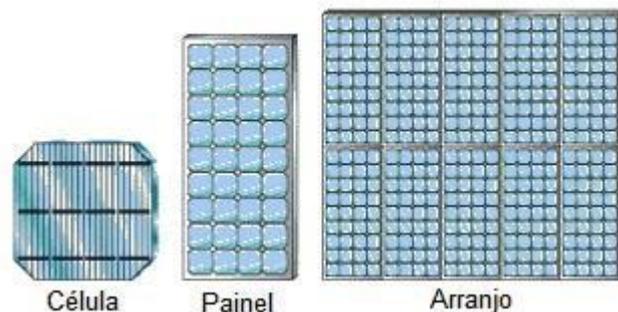
- a) Painel fotovoltaico;
- b) Circuito de potência;
- c) Métodos de rastreamento de máxima potência.
- d) Bateria

1.1 PAINEL FOTOVOLTAICO

Os painéis fotovoltaicos tratam-se de dispositivos utilizados para converter a energia solar em energia elétrica. Silva (2012), afirma que um painel fotovoltaico é um conjunto de células fotovoltaicas as quais são arranjadas em série ou paralelo para gerar a tensão e a corrente desejada.

Uma célula solar tradicional é formada por uma junção P-N num material semicondutor, de maneira similar a um diodo, e funciona de forma que a energia de cada fóton presente na luz solar é parcialmente transmitida para os elétrons da camada de valência do semicondutor (LORENZO, 1994). As estruturas descritas previamente estão representadas na Figura 1.

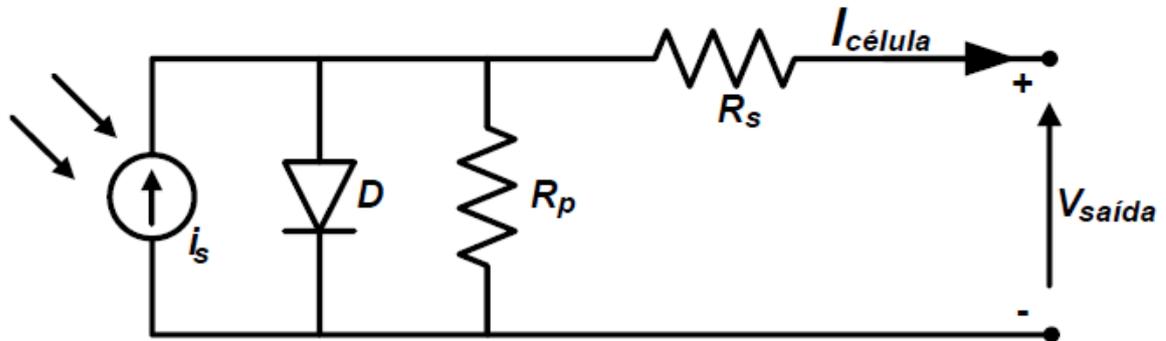
Figura 1 - Estruturas do Painel fotovoltaico.



Fonte: (CARVALHO, 2013).

O modelo equivalente do arranjo solar fotovoltaico é composto por uma fonte de corrente em paralelo com o diodo, associado a um circuito resistivo, conforme mostra a Figura 2 (BORGES, 2013).

Figura 2 - Circuito Equivalente de uma célula fotovoltaica.



Fonte: (BORGES, 2013).

Por meio do circuito elétrico mostrado na Figura 2, é possível descrever a Equação (1).

$$I = I_s - I_o \cdot \left[e^{\frac{q \cdot (V_{saída} + I_{célula} \cdot R_s)}{K \cdot T \cdot A}} - 1 \right] - \frac{V_{saída} + I_{célula} \cdot R_s}{R_p} \quad (1)$$

Onde:

- $V_{célula}$, $I_{célula}$ é tensão e corrente nos terminais de saída de uma célula fotovoltaica [V] e [A];
- I_s é a corrente gerada pelo efeito fotovoltaico [A];
- I_o é corrente de saturação do diodo [A];
- R_s , R_p são as Resistências série e paralela da célula [Ω];
- q é a carga do elétron, $1,6 \times 10^{-19} \text{C}$;
- A é o fator de qualidade da junção p-n;
- k é a constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23} \text{J/K}$;
- T é a Temperatura ambiente, em Kelvin [K].

1.1.1 Características elétricas dos painéis fotovoltaicos

Para que seja possível comparar os diferentes painéis fotovoltaicos existentes no mercado, tendo em conta as suas características elétricas, os fabricantes efetuam um conjunto de testes de acordo com condições de funcionamento padrão específicas, designadas por *Standard Test Conditions* (STC). Segundo os STC, os ensaios aos painéis solares devem ser realizados com uma radiação incidente uniforme de 1000 W/m^2 , a temperatura das células mantida nos 25°C (CARVALHO, 2013).

Destes testes resultam um conjunto de características elétricas que são incluídas nos *datasheets* dos fabricantes, o que permite aferir a performance de um determinado painel

fotovoltaico. Na Tabela 1 são abordados de forma breve os principais parâmetros que definem as condições de funcionamento nominais de um painel solar, tendo em conta os STC.

Tabela 1 - Parâmetros de um painel fotovoltaico

Parâmetro	Sigla	Funcionalidade
Corrente de curto- circuito	I_{SC}	Valor máximo da corrente de carga é a corrente gerada por efeito FV
Tensão de Curto-circuito	V_{OC}	Valor máximo de tensão nos terminais do módulo FV, sem carga
Ponto de Máxima Potência	MPP	Para cada ponto na curva I-V, o produto corrente versus tensão representa a potência gerada para aquela condição de operação.
Tensão de máxima potência	V_{max}	Corresponde a tensão no ponto de máxima potência
Corrente de máxima potência	I_{max}	Corresponde a corrente no ponto de máxima potência
Temperatura normal de operação	NOCT	Devido o módulo trabalhar exposto ao sol, o fabricante fornece a temperatura de operação normal da célula.

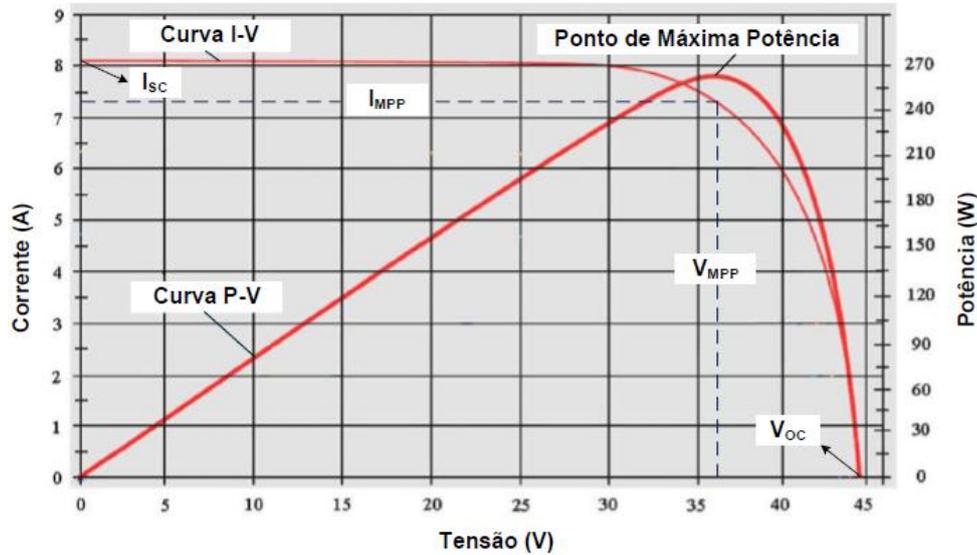
Fonte: Adaptado de (PINHO; GALDINO 2014).

Exemplos de curvas características típicas I-V e P-V para um módulo fotovoltaico nas condições padrões de testes, são apresentada na Figura 3. Pode-se ver que máxima corrente fornecida pelo módulo fotovoltaico é a de curto circuito I_{SC} , porém neste ponto a potência é zero, pois a tensão nos terminais é de 0V. O mesmo ocorre no ponto em que a tensão é máxima, o de circuito aberto (V_{OC}), pois nele a corrente é 0A.

A multiplicação ponto a ponto da corrente pela tensão origina a curva P-V, a partir da qual se percebe que apenas existe um único ponto de operação onde a potência extraída é máxima. Esse ponto resulta da combinação de um valor específico de corrente e tensão, denominados em cima como $IMPP$ e $VMPP$, respetivamente. Idealmente, um painel solar deve funcionar sempre nessas condições de forma a otimizar a produção de energia (CARVALHO, 2013).

Porém, o valor de corrente e de tensão no ponto de máxima potência sofrem alterações, em consequência de variações das condições ambientais a que o painel está sujeito. Assim sendo, é de extrema importância a implementação de um algoritmo de controlo *Maximum Power Point Tracker* (MPPT), cuja função é determinar o ponto ótimo de funcionamento do painel solar para diferentes condições de temperatura e de radiação (SEGUEL, 2009).

Figura 3 - Curvas características de um painel solar fotovoltaico.



Fonte: (CARVALHO, 2013).

Os Sistemas Fotovoltaicos podem ser classificados em duas categorias: isolados e conectados à rede. Em ambos os casos, podem operar a partir apenas da fonte fotovoltaica ou combinados com uma ou mais fontes de energia, quando são chamados de híbridos. A utilização de cada uma dessas opções depende da aplicação e/ou da disponibilidade dos recursos energéticos. Cada um deles pode ser de complexidade variável, dependendo da aplicação em questão e das especificações específicas de cada projeto (PINHO; GALDINO, 2014).

1.1.2 Sistemas Fotovoltaicos Isolados da Rede Elétrica

Sistemas isolados, em geral necessitam de algum tipo de armazenamento. O armazenamento pode ser em baterias, quando se deseja utilizar aparelhos elétricos nos períodos em que não há geração fotovoltaica, ou em outras formas de armazenamento de energia. A bateria também funciona como uma referência de tensão CC para os inversores formadores da rede do sistema isolado (PINHO; GALDINO, 2014).

Segundo Imhoff (2007), estes sistemas podem ser classificados de duas formas: Sistema em Série ou Sistemas em Paralelo, que se diferenciam pela forma com que o sistema de armazenamento de energia é empregado.

O sistema em série na Figura 4, é composto pelo painel fotovoltaico, carregador de baterias/MPPT, banco de baterias, conversor CC/CC, Inversor e carga CA. Neste método o

carregador de baterias além de fazer o ajuste da tensão que é entregue para a carga do banco de baterias, também busca o ponto de máxima potência.

Figura 4 - Diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico isolado série.



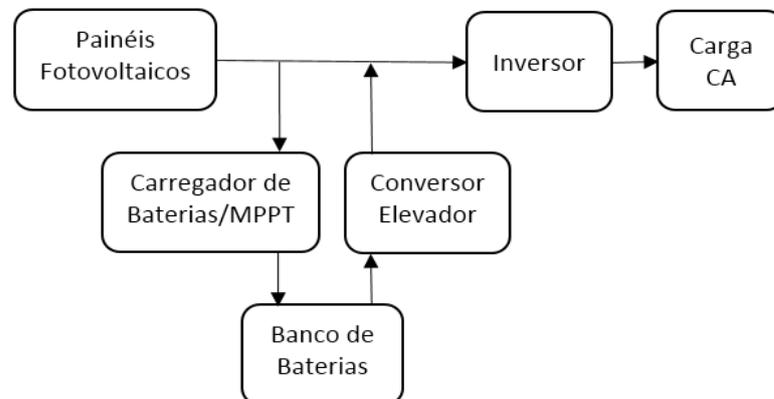
Fonte: (SEGUEL, 2009).

Já dizia IMHOFF, 2007 que as principais desvantagens de uma configuração série em sistemas autônomos com banco de baterias são: Na configuração em série, toda energia utilizada pelo sistema circula pelo banco de baterias, diminuindo a vida útil das baterias, o que aumenta os custos de manutenção do sistema e a outra desvantagem é que nos sistemas fotovoltaicos residenciais, o sistema é exigido a ter pelo menos três estágios de conversão, devido que as tensões do arranjo de painéis fotovoltaicos, do banco de baterias e do barramento CC são geralmente diferentes. Isto afeta significativamente a eficiência do sistema pelo maior número de conversões necessárias.

O sistema em paralelo é composto pelos mesmo componentes, porém a diferença é que o banco de baterias e o conversor fazem ligação em paralelo com os demais estágios de processamento de energia, Figura 5.

Desta forma, a configuração de Sistemas em Paralelo possui algumas vantagens em relação ao Sistema em Série, pelo fato do banco de baterias, após estar completamente carregado, ser desconectado do sistema, podendo a carga ser alimentada apenas pela energia gerada pelos painéis fotovoltaicos.

Figura 5 - Diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico isolado paralelo.



Fonte: (SEGUEL, 2009).

Esta configuração também permite um melhor controle da carga do banco de baterias e, pelo fato de apenas a energia necessária para a recarga das baterias circular entre elas, a sua vida útil é aumentada significativamente, comparada ao sistema em série.

Além disso, como a potência processada por este conversor durante a carga das baterias e o estágio de elevação de tensão são diferentes, a frequência de operação e os componentes (semicondutores) utilizados em cada modo de operação são dimensionados de acordo com a potência processada e não para a potência nominal, como no caso da configuração série (SEGUEL, 2009).

1.2 CONVERSORES CC-CC NÃO ISOLADOS

Nesta seção será mostrado circuitos de conversores CC-CC com topologias *Buck*, *Boost* e *Buck-Boost*.

Os conversores CC-CC são dispositivos utilizados para converter uma fonte de tensão contínua de um nível para outro. Trata-se de uma classe de potência que utilizam comutação de sinal e armazenamento (indutor ou capacitor) com uma determinada frequência, fazendo com que o fluxo de corrente seja armazenado e mais tarde liberado para saída (POMILIO, 2014).

Outra aplicação muito comum de conversores CC-CC é como controlador de carga de baterias a partir da energia gerada pelo painel fotovoltaico. Com a utilização destes conversores é possível controlar de forma mais precisa a corrente e a tensão que são aplicadas às baterias, proporcionando assim um aumento da vida útil das mesmas e uma melhor eficiência do processo de transferência de energia do painel fotovoltaico para a bateria (PINHO; GALDINO, 2014).

Quando se pretende utilizar uma tensão inferior à produzida pelos módulos fotovoltaicos utiliza-se um conversor *Buck* (abaixador de tensão), este conversor é composto por um semicondutor controlado, um diodo e uma bobina. Caso se pretenda utilizar uma tensão mais elevada do que a fornecida pelo módulo, utiliza-se um conversor *Boost* (elevador de tensão), os componentes são os mesmo do conversor *Buck*, mas ligados de maneira diferente (BARBOSA, 2013).

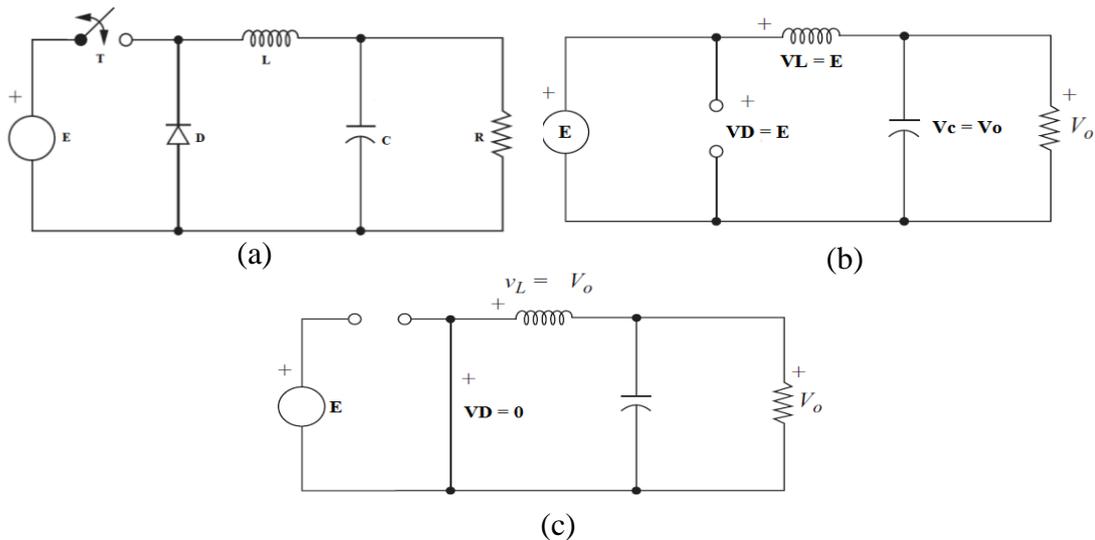
Existem grupos distintos de conversores, os isolados e os não isolados, que a principal diferença é o uso de transformadores de alta frequência nos conversores isolados. Não será falado com detalhes sobre os conversores isolados neste trabalho, pois foge do contexto desta pesquisa, porém, todas as topologias existentes podem ser utilizadas, esta escolha dependerá da necessidade do projetista.

1.2.1 Conversor CC-CC *Buck*

No conversor *Buck* o valor de tensão da saída é sempre menor que o valor de entrada. Quando a chave *S* está conduzindo, transfere-se energia da fonte para o indutor *L*, aumentando a corrente de saída caso contrário, transistor não conduzindo, o diodo conduz dando continuidade à corrente no indutor, a energia armazenada em *L* é entregue ao capacitor e à carga. O circuito do conversor *Buck* é apresentado na Figura 6.

Já dizia Pomilio (2014), que enquanto o valor instantâneo da corrente pelo indutor for maior do que a corrente na carga, a diferença carrega o capacitor e quando a corrente for menor o capacitor se descarrega. A tensão a ser suportada, tanto pelo transistor quanto pelo diodo é igual à tensão de entrada.

Figura 6 - (a) Topologia do conversor CC-CC *buck*. (b) Conversor *buck* com a chave fechada. (c) Conversor *buck* com a chave aberta.



Fonte: Adaptado de (HART, 2012).

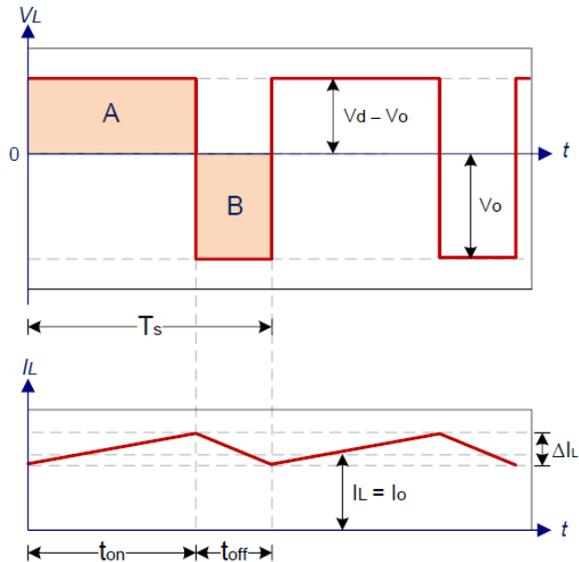
A operação do conversor *Buck* pode ser analisada em dois estados alternantes para cada período do sinal digital de controle (MOHAN, 2012). O primeiro estado ocorre com a chave *T* estando fechada Figura 6b, situação na qual a fonte fornece a energia utilizada para carregamento do indutor *L* e do capacitor *C*, bem como para a alimentação da carga (*R*). Já a abertura da chave (*T*) caracteriza o segundo estado Figura 6c, no qual o diodo passa a ser polarizado diretamente e o indutor (*L*) é submetido ao negativo da tensão de saída, provocando sua gradativa descarga. Quando a corrente deste elemento se torna inferior à drenada pelo

resistor (R), inicia-se a descarga do capacitor (C) para supri-la. Ao final de um período, a chave fecha e o ciclo se reinicia (GÓES, 2016).

De acordo com a variação de corrente no indutor, o conversor pode apresentar três diferentes modos de condução: descontínua, crítica e contínua (HART, 2012). No primeiro deles, quando a chave é aberta, o indutor descarrega totalmente antes de um novo fechamento do MOSFET, gerando intervalos periódicos de interrupção da corrente. Já no modo de condução crítica, a corrente no indutor atinge o valor zero no instante exato do novo fechamento, voltando a aumentar imediatamente. Por fim, a condução contínua tem caráter ininterrupto, por não haver descarga total do indutor durante a abertura da chave (GÓES, 2016).

Assumindo o interruptor (T) como ideal, uma fonte de tensão na entrada constante (E) e uma carga puramente resistiva (R). Em regime permanente e modo de condução contínua (MCC), a relação entrada/saída pode ser feita a partir do comportamento de elementos que transfere energia da entrada para saída. Sabe-se que a tensão média sobre uma indutância ideal, em regime, é nula, como mostrado na Figura 7 (POMILIO, 2014).

Figura 7 - Tensão sobre uma indutância em regime.



Fonte: (BORGES, 2013).

No caso do conversor *Buck*, quando T conduz, $V_L = E - V_o$, e quando D conduz, $V_L = -V_o$. Equação (2) e (3) tem-se:

$$A = B \Rightarrow (E - V_o) \cdot t_{on} = V_o \cdot (T_s - t_{on}) \quad (2)$$

$$D = \frac{V_o}{E} = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (3)$$

O indutor mínimo para que o conversor *Buck* funcione no modo MCC é dado pela Equação (4), onde f é a frequência de comutação e ΔI_L é a ondulação pico a pico da corrente no indutor (MOHAN, 2012).

$$L_{min} = \frac{V_o \cdot (V_d - V_o)}{V_d \cdot f \cdot \Delta I_L} \quad (4)$$

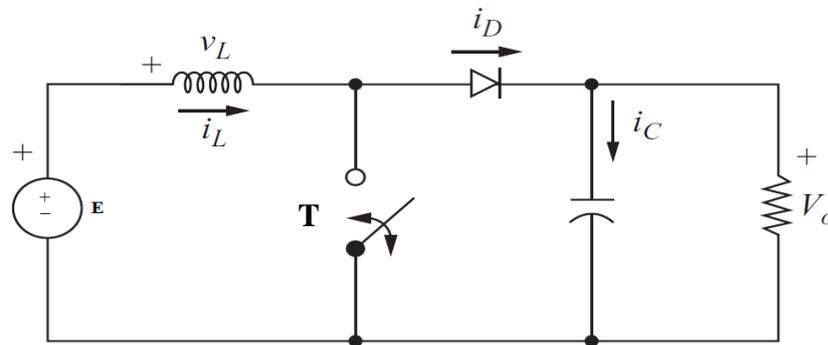
O capacitor é dado pela Equação (5), onde ΔV_C é a ondulação pico a pico da tensão no capacitor.

$$C = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f \cdot \Delta V_C} \quad (5)$$

1.2.2 Conversor CC-CC *Boost*

Pomílio (2014) afirma, que no conversor *Boost* a tensão de saída será sempre maior que a tensão de entrada. O chaveamento neste caso é feito através da chave (T). Enquanto T estiver conduzindo, a corrente no indutor L aumenta linearmente. Quando T é bloqueado, a energia armazenada em L faz com que a energia passe a ser conduzida pelo diodo D. O conversor *Boost* é possível ser observado no esquema elétrico na Figura 8.

Figura 8 - Topologia do conversor CC-CC *boost*.



Fonte: (HART, 2012).

No caso do *Boost* quando T conduz, $V_L = E$ (durante T_{on}). Quando D conduz, $V_L = -(V_o - E)$ durante $(T_s - t_{on})$. A razão cíclica do conversor é dado pela Equação (6):

$$D = \frac{V_o - E}{V_o} \quad (6)$$

O indutor mínimo para que o conversor funcione no modo MCC é dado por (7), em que f é a frequência de comutação e ΔV_L é a ondulação pico a pico da corrente no indutor (MOHAN, 2012).

$$L_{min} = \frac{V_d \cdot D}{f \cdot \Delta I_L} \quad (7)$$

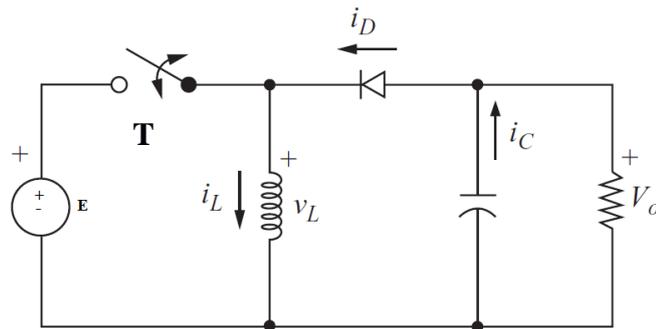
O capacitor é dado por (8), onde ΔV_C é a ondulação pico a pico da tensão no capacitor.

$$C = \frac{I_o \cdot D}{f \cdot \Delta V_C} \quad (8)$$

1.2.3 Conversor CC-CC *Buck-Boost*

Na topologia do conversor *Buck-Boost*, Figura 9, a tensão de saída tem polaridade oposta à da tensão de entrada. Quando T é ligado, transfere-se energia da fonte para o indutor, o diodo não conduz e o capacitor alimenta a carga. Quando T desliga, a continuidade da corrente do indutor se faz pela condução do diodo D e a energia armazenada em L é entregue ao capacitor C e à carga R (POMILIO, 2014).

Figura 9 - Topologia do conversor CC-CC *buck-boost*.



Fonte: (HART, 2012).

Pomilio 2013 afirma, que quando T conduz $V_L = E$ durante T_{on} e quando D conduz, $V_L = -V_o$ durante $(T_s - t_{on})$. A Equação (9) relaciona a razão cíclica do conversor:

$$D = \frac{(1 - V_o)}{V_o \cdot (E - 1)} \quad (9)$$

O indutor mínimo para que o conversor funcione no modo MCC é dado por (10).

$$L_{min} = \frac{(1 - D)^2 \cdot R}{2 \cdot f} \quad (10)$$

O capacitor é dado por (11), onde ΔV_C é a ondulação pico a pico da tensão no capacitor.

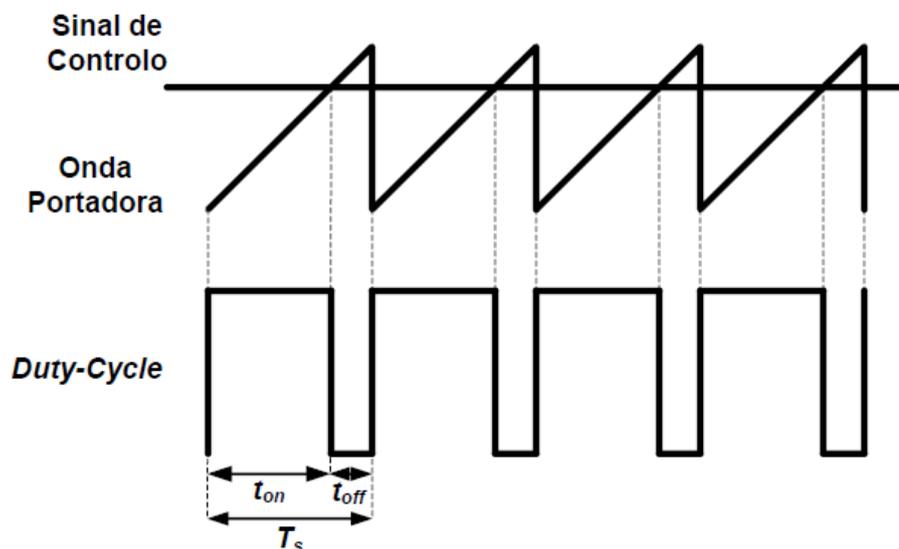
$$C = \frac{V_o \cdot D}{R \cdot f \cdot \Delta V_C} \quad (11)$$

1.3 TÉCNICA DE CONTROLE DO CONVERSOR CC-CC

Os conversores do tipo CC-CC permitem manter o valor médio da tensão de saída constante, apesar da existência de flutuações na tensão de entrada ou na carga. Uma das técnicas utilizadas para controlar a tensão de saída denomina-se modelação por largura de impulso, vulgarmente chamada PWM (*Pulse With Modulation*). O princípio de funcionamento desta técnica é bastante simples, uma vez que opera a uma frequência fixa o período de comutação é constante. Sendo assim, controlando a duração do tempo em que o interruptor está em condução é possível controlar o valor médio da tensão de saída (MOHAN, 2012)

A implementação desta técnica consiste na comparação de um sinal de controlo, determinado previamente por um controlador (tipicamente PI), com uma onda em forma de dente-de-serra designada onda portadora. Na Figura 10 observa-se a onda que é gerada ininterruptamente, apresentando uma amplitude e frequência constantes. A frequência da onda portadora define a frequência de comutação do conversor. Da comparação do sinal de controlo com a onda portadora resulta o sinal que especifica os tempos em que o interruptor deve estar ligado e desligado de forma a manter a tensão de saída constante (MOHAN, 2012).

Figura 10 - Técnica de comutação por PWM



Fonte: (CARVALHO, 2013).

1.4 BATERIA

Em sistemas fotovoltaicos isolados da rede elétrica, o uso de dispositivo de armazenamento de energia faz-se necessário para atender a demanda em períodos nos quais a

geração é nula ou insuficiente (à noite ou em dias chuvosos e nublados, com baixos níveis de irradiância solar). Assim, parte da energia convertida em energia elétrica pelos módulos fotovoltaicos durante o dia é armazenada para ser usada em outros momentos (PINHO; GALDINO, 2014).

Existem diversos tipos de baterias eletroquímicas existentes, a bateria de chumbo-ácido (Pb-ácido) mais empregada nos sistemas fotovoltaicos isolados e tem as baterias com mais tecnologias, com maior eficiência, maior vida útil, maior profundidade de descarga) como a Níquel-Cádmio (NiCd), Níquel-hidreto metálico (NiMH), íon de Lítio (Li-on), entre outras, porém devido terem mais tecnologias são economicamente mais caras.

As baterias empregadas em sistemas fotovoltaicos estão sujeitas as mais diversas condições operacionais, devido à geração não linear de energia pelos painéis fotovoltaicos. Pode-se citar como principais situações cargas e descargas irregulares, devido à variação de radiação solar durante o dia, descargas com corrente de baixa intensidade, cargas escassas, devido à ausência de sol por vários dias (IMHOFF, 2007).

Pinho e Galdino (2014) afirmam, que as células de chumbo-ácido são as tecnologias de armazenamento de energia de menor custo por Wh. Um parâmetro importante na escolha de uma bateria chumbo-ácido é sua profundidade de descarga. A profundidade de descarga define o percentual em relação a sua de capacidade nominal que uma bateria pode fornecer sem que seja comprometida sua vida útil.

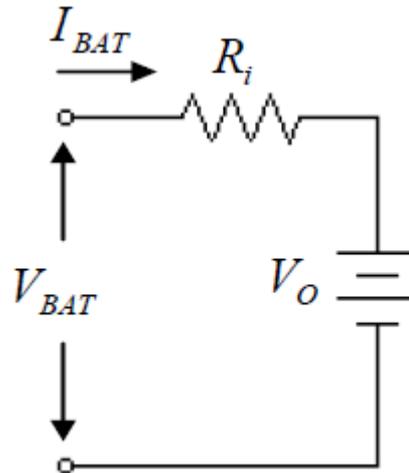
Existem baterias chumbo-ácido de baixa profundidade de descarga, empregadas principalmente em automóveis, e baterias de alta profundidade de descarga, que são as mais indicadas para aplicação nos sistemas fotovoltaicos de geração de energia elétrica (IMHOFF, 2007).

Encontrar um modelo elétrico ou matemático que descreva o comportamento dinâmico de uma bateria não é uma tarefa fácil, visto que suas reações químicas não são lineares e sofrem a influência de distintos fatores inter-relacionados, tais como temperatura, o estado de carga e o aspectos construtivos. Na literatura são proposto vários modelos para simulação de baterias. Entre os propostos, alguns autores optam por modelos que possibilitem a descrição detalhada do comportamento físico destes equipamentos (SEGUEL, 2009).

Estes modelos físicos são, no entanto, inadequados para integração em simulações com outros circuitos elétricos. O modelo mais simples e que será utilizado na implementação é mostrado na Figura 11. É constituído por apenas uma resistência R (que representa a resistência interna da bateria) em série com uma fonte de tensão ideal V_0 (que representa a tensão de

circuito aberto). Este modelo é simples e permite uma rápida integração com outros circuitos eletrônicos em simulação (SEGUEL, 2009).

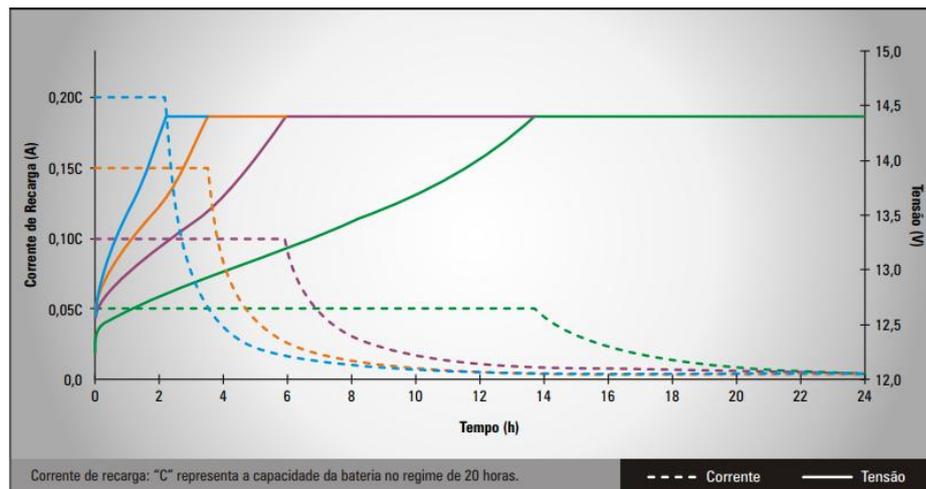
Figura 11 - Modelos elétricos de uma bateria.



Fonte: (SEGUEL, 2009).

O nível de tensão na bateria aumenta conforme recebe corrente e é carregada, no modo descarga é similar o processo da bateria, irá fornecer corrente e o nível de tensão será reduzido. Sendo assim, o valor de tensão é um bom indicativo da carga de uma bateria. Na Figura 12 é mostrado um exemplo de curva de carga de uma bateria de chumbo-ácido.

Figura 12 - Curva de corrente e tensão do processo de carga de uma bateria de chumbo-ácido.



Fonte: (MOURA, 2017).

Na Figura 12 é possível observar, que a tensão da bateria tem um determinado limite, no gráfico mostrado é de 14,4V. Quando a bateria atinge essa tensão, a corrente de carga começa a diminuir e o carregamento se torna mais lento. Chegando a um ponto que uma pequena

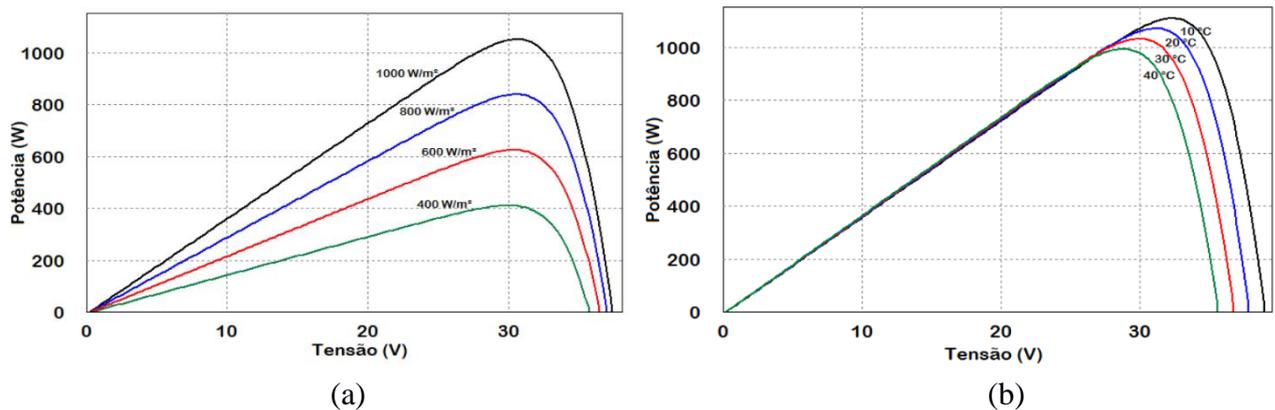
quantidade de corrente é suficiente para manter a bateria carregada, estando, portanto, no estágio de flutuação.

1.5 CONTROLADORES MPPT

Em um arranjo fotovoltaico a geração de energia elétrica é intermitente e sofre forte influência da nebulosidade e da temperatura. Esses fatores fazem com que o ponto de operação que leva à extração da máxima potência do arranjo fotovoltaico mude constantemente. Assim, rastrear esse ponto de máxima potência (MPP), do inglês, *Maximum Power Point* continuamente é uma forma de garantir uma maior eficiência na conversão de energia (SOUZA, 2016). O funcionamento do MPPT é definido por um controlador que deve determinar o valor de cada parâmetro da saída a cada instante de acordo com os valores instantâneos dos parâmetros de entrada.

Na Figura 13a e 13b, é possível observar as curvas características de arranjos fotovoltaicos em diferentes situações de radiação e temperatura. As variações de temperatura no arranjo fotovoltaico são mais lentas, do que a radiação que pode apresentar mudanças drásticas em questão de segundos. Isso faz com que o ponto de operação necessite ser continuamente reajustado para garantir o rastreamento da máxima potência de forma constante.

Figura 13 - (a) Curva característica de um painel fotovoltaico para diferentes quantidades de irradiância. (b) - Curva característica de um painel fotovoltaico para diferentes temperaturas.



Fonte: (SOUZA, 2016).

1.5.1 Métodos de rastreamento de máxima potência

A solução para o problema da extração da máxima potência passa por utilizar um conversor CC-CC associado a um sistema de controle que implemente um algoritmo de MPPT.

O objetivo do controlador é variar a tensão e corrente de saída do módulo fotovoltaico de forma a chegar aos respectivos valores onde a potência é máxima. São vários os algoritmos de MPPT que se podem encontrar na literatura, uns mais simples e outros mais complexos. A seguir são apresentados alguns dos algoritmos mais frequentes na literatura.

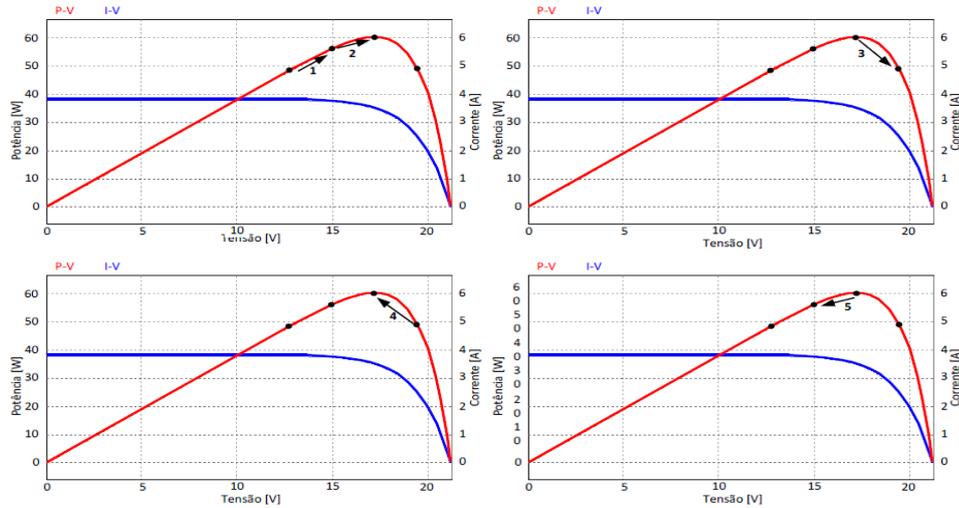
1.5.2 Perturbação e Observação

Tal como o nome indica, o algoritmo de Perturbação e Observação (P&O) aplica uma pequena variação no valor da tensão de saída e em seguida observa como evolui o valor da potência extraída. O seu funcionamento é bastante simples, o valor da tensão é sempre incrementado enquanto o valor da potência extraída for aumentando. Quando for detectado que em uma determinada iteração o valor da potência diminui, o valor da tensão é diminuído até que se detecte uma nova descida da potência (BARBOSA, 2013).

O princípio de funcionamento anteriormente descrito pode ser visto na prática na Figura 14. Presumindo que o primeiro ponto representa o estado inicial do sistema, segundo o fluxograma da Figura 15 o controlador aumenta a tensão de saída do módulo fotovoltaico representado pela transição “1”. Em seguida o controlador calcula o novo valor de potência, se for maior que o anterior o controlador aumenta novamente a tensão de saída do módulo fotovoltaico representado pela transição “2”. Apesar de agora ser extraída a máxima potência o controlador não se sabe, e como a potência subiu em relação à última iteração vai incrementar novamente a tensão, representado pela transição “3”. Desta vez ao calcular a potência extraída, o controlador percebe-se que a potência diminui, logo começa a reduzir o valor da tensão, representado pela transição “4”. Tal como sugere o fluxograma, o controlador continua a diminuir a tensão até que a potência comece a diminuir, por isso efetua a transição “5”. A partir deste ponto o controlador vai entrar em regime permanente e repetir sempre a seguinte sequência de transições “2”, “3”, “4”, “5”, “2”, “3”, “4”, “5”, até que a curva característica se altere devido à mudança da radiação solar ou da temperatura. Quando isso acontecer, o controlador irá procurar um novo ponto de máxima potência, e entrará novamente no regime permanente que foi descrito (BARBOSA, 2013).

A grande vantagem deste método é que a procura pelo ponto de potência máxima será feita independentemente das condições ambientais, no entanto este método requer a medição de tensão e corrente. Na Figura 15, encontra-se um diagrama de fluxo que mostra o funcionamento do método P&O (SOUZA, 2016).

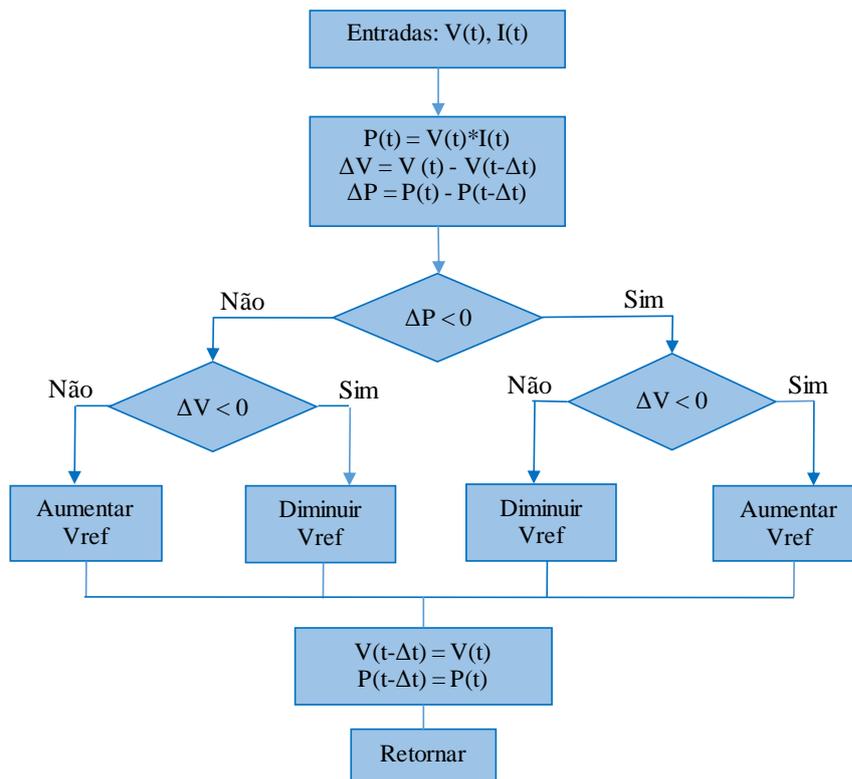
Figura 14 - Princípio de funcionamento do algoritmo de perturbação e observação.



Fonte: (BARBOSA, 2013).

Há que ressaltar que na realidade os pontos encontram-se mais perto uns dos outros do que é mostrado na figura, mas encontram-se assim espaçados para permitir uma melhor visualização de todo o processo. Um valor elevado de perturbação permite ao sistema convergir rapidamente para o ponto de máxima potência *Maximum Power Point* (MPP), mas quanto maior for o valor, maior será a oscilação do sistema à volta do MPP (BARBOSA, 2013).

Figura 15 – Diagrama de Fluxo P&O.



Fonte: Adaptado de (SOUZA, 2016).

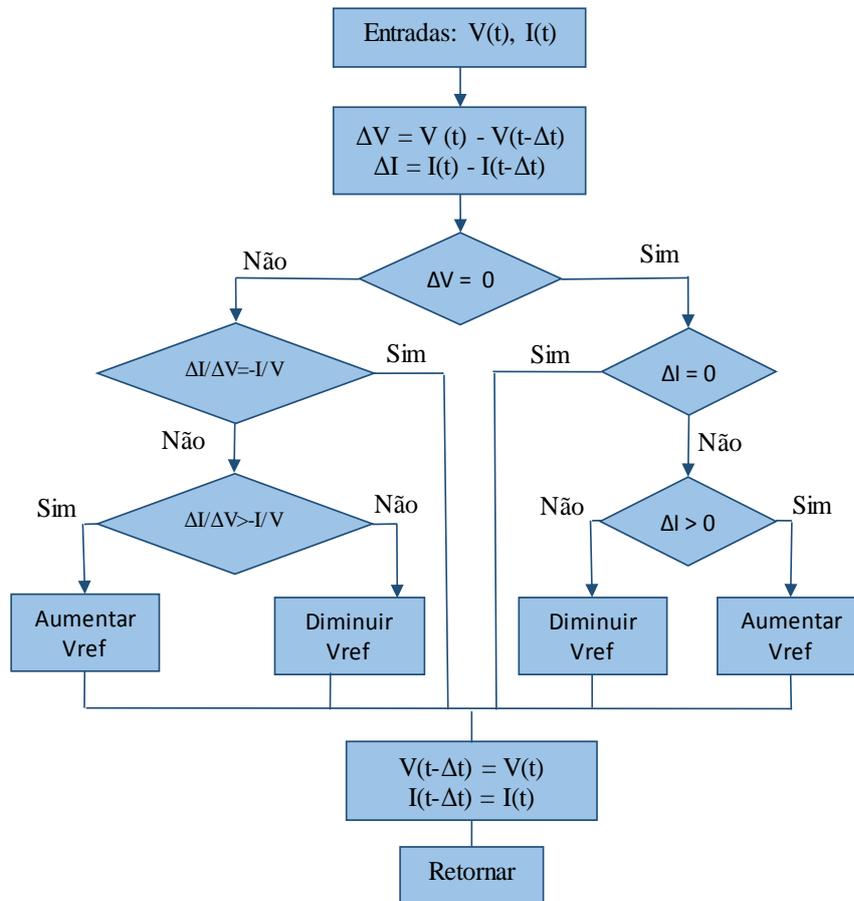
1.5.3 Condutância Incremental

Assim como o método anterior, também são medidas a tensão e corrente de saída, sendo calculada a potência de saída e em seguida realizada a derivada em função da tensão, dP/dV . A derivada pode ser calculada do seguinte modo, na Equação 12:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = I + \frac{dI}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dV} = 0 \quad (12)$$

Quando a derivada for positiva o ponto de operação está funcionando à esquerda do ponto de máxima potência. Quando a derivada for negativa o ponto de operação está à direita do ponto de máxima potência e quando a derivada for igual ou próximo de zero o ponto de operação está operando no ponto de máxima potência. O fluxograma deste método é mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Diagrama de Fluxo Condutância Incremental.



Fonte: Adaptado de (SOUZA, 2016).

Tal como no método anterior é necessário encontrar um compromisso entre a rapidez da resposta às alterações do MPP e a oscilação em regime permanente em torno deste (BARBOSA, 2013).

1.6 SOFTWARE PARA SIMULAÇÃO (PSIM)

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado o PSIM, que é um software projetado para simulações em eletrônica de potência. Possui interface amigável, simulação rápida e apresenta os resultados como formas de onda similares às apresentadas na tela de um osciloscópio. Pode ser utilizado em circuitos analógicos e digitais. Todo o circuito de potência e todo o controlador desenvolvido neste trabalho será simulado no PSIM (PSIM, 2017).

Outro fator importante de se escolher o PSIM é que o processo de simulação de sistemas fotovoltaicos são bem próximos do mundo real, que levam em conta os efeitos da intensidade de luz e temperatura e permite aos usuários inserir parâmetros da célula solar escolhida, possui uma ferramenta que facilita a extração dos parâmetros do modelo a partir de dados do fabricante (PSIM, 2017).

1.7 TRABALHOS RELACIONADOS COM O TEMA

Trabalhos que visam determinar a eficiência energética em sistemas fotovoltaicos, utilizando conversor CC/CC e algoritmos de MPPT são propostas de aumento para o rendimento de painéis fotovoltaico. Para se garantir a viabilidade técnica desse processo, deve-se levar em conta o conversor CC/CC e os algoritmos de rastreamento utilizados, analisando a eficiência do ponto de potência máxima.

Em dissertação de mestrado de 2012, Moçambique discursa sobre a aplicação de algoritmos de busca do ponto de máxima potência e controladores CC/CC para a regulação da tensão terminal de painéis fotovoltaicos. Ao fim do trabalho, chegou à conclusão de que "há necessidade de controlar a tensão do painel fotovoltaico para a melhoria do desempenho dos algoritmos de busca do ponto de máxima potência, uma vez que a tensão de referência varia constantemente em função do MPPT e das condições ambientais" (MOÇAMBIQUE, 2012).

Em artigo de 2015, Oliveira et al estudam um sistema fotovoltaico monofásico, com MPPT's e utilizando conversores CC/CC *Boost*. O intuito da estrutura é minimizar o efeito de sombra parcial nos módulos fotovoltaicos, aumentando a eficiência na extração da potência. Em suas conclusões os autores apresentam resultados positivos, cuja potência extraída e a

tensão no terminal da carga foram praticamente as suas respectivas referências, validando assim a alta eficiência técnica de extração de máxima potência (OLIVEIRA, 2015).

Outro ponto a ser observado é a frequência de comutação do sistema, ou seja, se forem utilizadas frequências muito altas é possível reduzir o tamanho de elementos passivos como a bobina. As bobinas são principais elementos em conversores CC/CC, no qual devem armazenar energia.

Em dissertação de mestrado de 2012, Silva realiza a implementação de um conversor CC/CC em instalação fotovoltaica, no trabalho faz-se um estudo aprofundado sobre os tipos de conversores CC/CC, de modo que saiba os modelos mais utilizados no mercado e as vantagens de cada conversor. Ao fim, alerta que "é importante fazer o correto dimensionamento dos conversores, devido a presença de elementos passivos, podendo causar perdas de energia" (SILVA, 2012).

2 METODOLOGIA

O presente trabalho apresentado foi uma pesquisa aplicada, tendo como objetivo a realização de uma pesquisa exploratória sobre o material bibliográfico, de laboratório e em computador adquirido sobre o assunto. Os procedimentos técnicos serem utilizados foram os de pesquisa bibliográfica. Como método de abordagem, foi utilizado o hipotético-dedutivo. A elaboração foi do método de procedimento monográfico. Para a coleta de dados foi utilizada documentação indireta e a análise e interpretação dos dados, qualitativos, ocorrerá de forma global.

Para a implementação deste trabalho inicialmente realizou-se um levantamento bibliográfico sobre painéis fotovoltaicos, dando ênfase nos tipos de sistemas fotovoltaicos existentes e parâmetros de painéis fotovoltaicos. Também foram realizadas pesquisas literárias sobre Eletrônica de Potência, referentes aos modelos de conversores CC-CC não isolados, demonstrando quando está conduzindo energia no circuito. E por fim, abordou-se sobre baterias e os métodos de rastreamento do ponto da máxima potência.

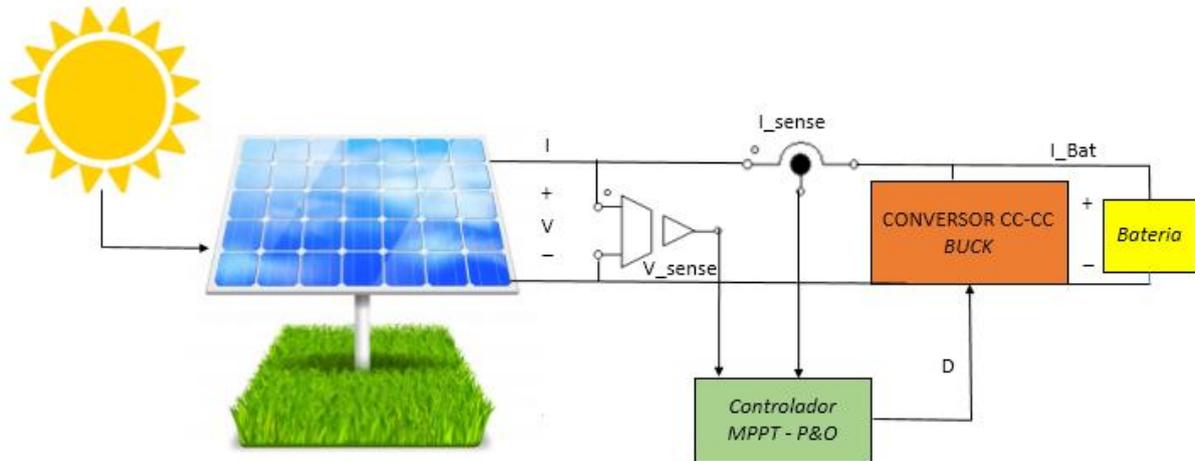
Para o desenvolvimento prático deste trabalho foi utilizado um *notebook Samsung Electronics* com processador *Intel® Core™ i7-3630QM CPU @ 2.4GHz*.

A partir dos conhecimentos adquiridos no levantamento bibliográfico, iniciou-se o dimensionamento do sistema fotovoltaico autônomo de baixa potência. Inicialmente foi previsto o consumo diário esperado de energia elétrica da residência em estudo, em seguida estimou-se a potência mínima que deve ser gerada pelo painel fotovoltaico e levando em consideração as perdas nos equipamentos que compõe o sistema foi dimensionado o banco de baterias, suficiente não só para o período noturno, mas também para intervalos maiores com radiação solar abaixo da média. E por fim, são definidas as especificações de funcionamento do conversor abaixador de tensão e através das equações é calculado o valor da razão cíclica, indutância da bobina e da capacidade do condensador, respetivamente. Para o díodo e o MOSFET não são efetuados cálculos, visto que ao nível desta simulação esses elementos são considerados ideais.

Para a implementação deste projeto foi realizada por meio do software PSIM (Versão 9.0.3.400), este software possui uma ferramenta que permite simular um painel fotovoltaico com suas características e comportamentos o mais fielmente possível. Concluída a simulação do painel fotovoltaico efetuou-se a ligação do conversor de potência *Buck*, tendo-se verificado a sua capacidade de abaixar a tensão de saída, dentro das especificações do dimensionamento realizado, uma fonte de tensão junto com a uma resistência é representado o banco de baterias,

finalizada esta etapa foi implementado o circuito de controle MPPT de P&O, com o objetivo de extrair a máxima potência do painel solar para diferentes valores de radiação. Na Figura 17 observa-se o diagrama do trabalho desenvolvido no *software* PSIM.

Figura 17 - Diagrama do trabalho desenvolvido.



Fonte: Elaborada pela autora.

Por fim, com base nos resultados obtidos na simulação, via gráficos serão analisados se houve melhoria da eficiência energética nos painéis fotovoltaicos, comprovando se a técnica de rastreamento do ponto de máxima potência é realmente eficiente para os sistemas fotovoltaicos autônomos.

3 IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO

3.1 DIMENSIONAMENTO DO PAINEL FOTOVOLTAICO

O sistema implementado enfatiza o conversor CC/CC, fazendo com que seja possível a extração da máxima potência do painel usando uma técnica MPPT. Com isto, foi necessário dimensionar os seguintes componentes do sistema como painel solar, conversor CC/CC, banco de baterias e descrever a implementação do método de controle utilizado.

Primeiramente é necessário conhecer algumas características meteorológicas de onde o sistema será implementado e o consumo de carga a ser alimentada, pois esses dois fatores influenciam diretamente no correto dimensionamento do sistema.

O consumo de energia diária esperada será definido considerando um sistema fotovoltaico autônomo de baixa potência elétrica, destinado basicamente para iluminação de uma residência de baixa renda. De acordo com caso de estudo definido serão dimensionados todos os componentes do sistema visando obter um bom casamento entre a energia fornecida pelo sol e a demanda esperada de energia, requerimento necessário de qualquer projeto fotovoltaico.

Para determinar o consumo diário esperado de energia elétrica da residência, foram adotados valores de potências de lâmpadas de alta eficiência e aparelhos comerciais de baixo consumo e tempos de utilização padrão fornecidos por (PINHO; GALDINO, 2014). A Tabela 2, mostra que a carga instalada para a residência em estudo é de 83W e o consumo de energia diário corresponde, aproximadamente, a 436 WH/dia.

Tabela 2 - Consumo esperado de energia elétrica da residência

Cargas	Potência (W)	Utilização (H/dia)	Energia (WH/dia)
Lâmpada sala	11	4	44
Lâmpada quarto 1	8	3	24
Lâmpada banheiro	8	1	8
Lâmpada cozinha	8	3	24
Modem Internet	12	10	120
TV 15"	36	6	216
Total	83		436

Fonte: Adaptado de (PINHO; GALDINO, 2014).

A variação da radiação solar e da temperatura são fatores predominantes que determinam a potência produzida pelo painel solar fotovoltaico. Para que o painel opere na

Condição de máxima potência, uma técnica MPPT identifica a tensão e a corrente terminal que o painel deve funcionar para assegurar a operação no MPP.

Faz-se necessário saber o número de horas de sol pleno da localidade que será implementado o sistema, outro parâmetro importante também é o nível de tensão em que o sistema operará.

O número de horas do sol pleno (HSP), conforme a Equação 13 é dado pelo número de horas necessárias para que a radiação solar deva alcançar à $1kW/m^2$. Para o dimensionamento dos painéis utiliza-se uma taxa diária de insolação de $4,9kWh/m^2$ (PINHO; GALDINO, 2014). O número de horas do sol pleno na cidade de Manaus é dado por:

$$HSP = \frac{4,9kWh/m^2}{1kW / m^2} = 4,38h \quad (13)$$

Pode-se dizer então que o valor de $4,9kWh/m^2$ de radiação diária é produzido por 4,9 horas de potência incidente constante e igual a $1000W/m^2$ (condição padrão). Na Tabela 3, são apresentados os parâmetros adotados para o cálculo do arranjo de painéis fotovoltaicos e demais componentes do sistema.

Tabela 3 - Parâmetros para dimensionamento do Pannel Fotovoltaico.

Carga instalada	83W
Consumo diário de energia	436Wh/dia
Radiação diária média mensal	4.9kW/m ²
Tensão de operação do sistema C.C	24V

Fonte: Elaborada pela autora.

Desta forma, tem-se a potência mínima do pannel fotovoltaico:

$$P_{min} = \frac{436Wh}{4,9h} = 88,9W \quad (14)$$

O pannel escolhido para simulação foi um modelo do fabricante YL095P-17b com 95W de potência nominal máxima. Para se atingir a tensão requerida é necessário que utilize apenas 1 pannel. Os parâmetros principais do pannel fotovoltaico escolhido podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4 - Característica do Painel YL095P-17b.

Parâmetros do Painel Fotovoltaico		
Potência Máxima	Pmax	95W
Tensão em Circuito aberto	Voc	22.5V
Corrente em curto-circuito	Isc	5.59A
Tensão Máxima	Vmpp	18.18V
Corrente Máxima	Impp	5.23A
Resistência em Série	Rs	0,0132Ω

Fonte: Elaborada pela autora.

3.1.2 Dimensionamento do banco de baterias

Os parâmetros mais importantes do banco de baterias eletroquímicas são a eficiência, a máxima profundidade de descarga e a autonomia do sistema. A profundidade de descarga de uma bateria está relacionada diretamente com a vida útil dela. O consumo diário de corrente da carga é dado pela Equação (15).

$$I_{diario} = \frac{C_{diario}}{V_{entrada}} = \frac{436Wh}{12V} = 36,33Ah \quad (15)$$

Finalizando, o consumo de corrente total do banco de baterias é dado pela Equação (16), onde τ é o fator que corrige a capacidade da bateria para baixas temperaturas. O valor padrão para o Brasil é 1, pois é um país tropical (PINHO; GALDINO,2014).

$$I_{total} = \frac{I_{diario} \times autonomia}{prof \ de \ descarga \times \tau} = \frac{36,33 \times 2}{0,3 \times 1} = 242,22Ah \quad (16)$$

Portanto, pode-se utilizar uma bateria de 250 Ah de capacidade, com tensão nominal de 12V.

3.1.3 Dimensionamento do conversor CC-CC *Buck*

A escolha da topologia de conversor depende das características da aplicação. Por exemplo, para interface com a bateria é preferível baixa ondulação de corrente. O sistema PV proposto possui um painel PV que gera 18,18V no MPP em condições ideais de radiação solar e de temperatura. Portanto, é necessário um conversor abaixador de tensão, já que o banco de baterias e carga funcionam com uma tensão nominal de 12V.

No sistema em estudo, a fonte de entrada é representada pelo painel fotovoltaico e a saída é representada por uma bateria, os requisitos do projetos podem ser vistos na Tabela 5.

Tabela 5 - Requisitos de projeto do Conversor CC-CC *Buck*.

Potência de entrada	P_{in}	95W
Tensão de saída	V_{bat}	12V
Tensão máxima de entrada	V_{pv}	18,18V
Frequência de comutação	F	20kHz
Percentual de ondulação pico-pico da corrente do indutor	β	10%
Percentual de ondulação pico-pico da tensão no capacitor	ω	2%

Fonte: Elaborada pela autora.

Será considerado o modo de operação de condição contínua para o conversor, a razão cíclica (D) do conversor é dada pela relação entre as tensões V_{pv} e V_{bat} como pode ser visto na Equação (17).

$$D = \frac{V_{bat}}{V_{pv}} = 0,66 \quad (17)$$

Sabe-se que os componentes do conversor são considerados ideais, a energia fornecida pelo painel fotovoltaico deve ser a mesma energia absorvida pela carga:

$$R_{carga} = \frac{V_{bat}^2}{P_{in}} = 1,51\Omega \quad (18)$$

A corrente no indutor do conversor (I_L) é encontrada em (19).

$$I_L = \frac{P_{out}}{V_{bat}} = 7,91A \quad (19)$$

Fixando o percentual de ondulação pico a pico da corrente no indutor de 10% obtém-se (20).

$$\Delta I_L = I_L \cdot \beta_{\%} = 0,79A \quad (20)$$

Logo, o valor mínimo do indutor (L_{min}) para que o conversor funcione no modo de condição contínua deve ser:

$$L_{min} = \frac{V_{bat} \cdot (V_{pv} - V_{bat})}{V_{pv} \cdot f \cdot \Delta I_L} = 258,17\mu H \quad (21)$$

Fixando o percentual de ondulação pico a pico da tensão no capacitor ($\omega\%$) em 2% obtém-se Equação (22).

$$\Delta V_C = V_C \cdot \omega\% = 0,24V \quad (22)$$

Por fim obtém-se o valor mínimo do capacitor (C) na Equação (23).

$$C_{min} = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f \cdot \Delta V_C} = 20,57\mu F \quad (23)$$

Em um conversor cuja entrada consiste em um arranjo fotovoltaico e a saída de um banco de baterias, os valores de tensão podem variar bastante. Assim, o projeto considerou os valores para tensão de entrada (V_{pv}) e saída (V_{bat}) para os quais se espera que o conversor opere na maior parte do tempo. Evidentemente, a operação fora dessa faixa de valores pode ocorrer, no entanto, pode-se perder parte da eficiência na operação, além de haver possibilidade de não atendimento da especificação de ondulação na saída. Na Tabela 6 seguem os dados calculados para o projeto do conversor *Buck*.

Tabela 6 - Dados calculados do Conversor CC-CC *Buck*.

Razão Cíclica	D	0,66
Resistor da carga	R _{carga}	1,6Ω
Indutor	L	1mH
Capacitor	C	22μF

Fonte: Elaborada pela autora.

Uma vez determinado o valor dos componentes constituintes do conversor de potência, estão reunidas todas as condições necessárias para se proceder à elaboração do modelo de simulação

3.2 SIMULAÇÕES NO PSIM

Para validar o método que permite maximizar a eficiência energética de um sistema solar fotovoltaico sujeito a diferentes condições de radiação, foi implementado um modelo de simulação constituído de um painel fotovoltaico, conectado em série, através dos conversores abaixadores de tensão *Buck*.

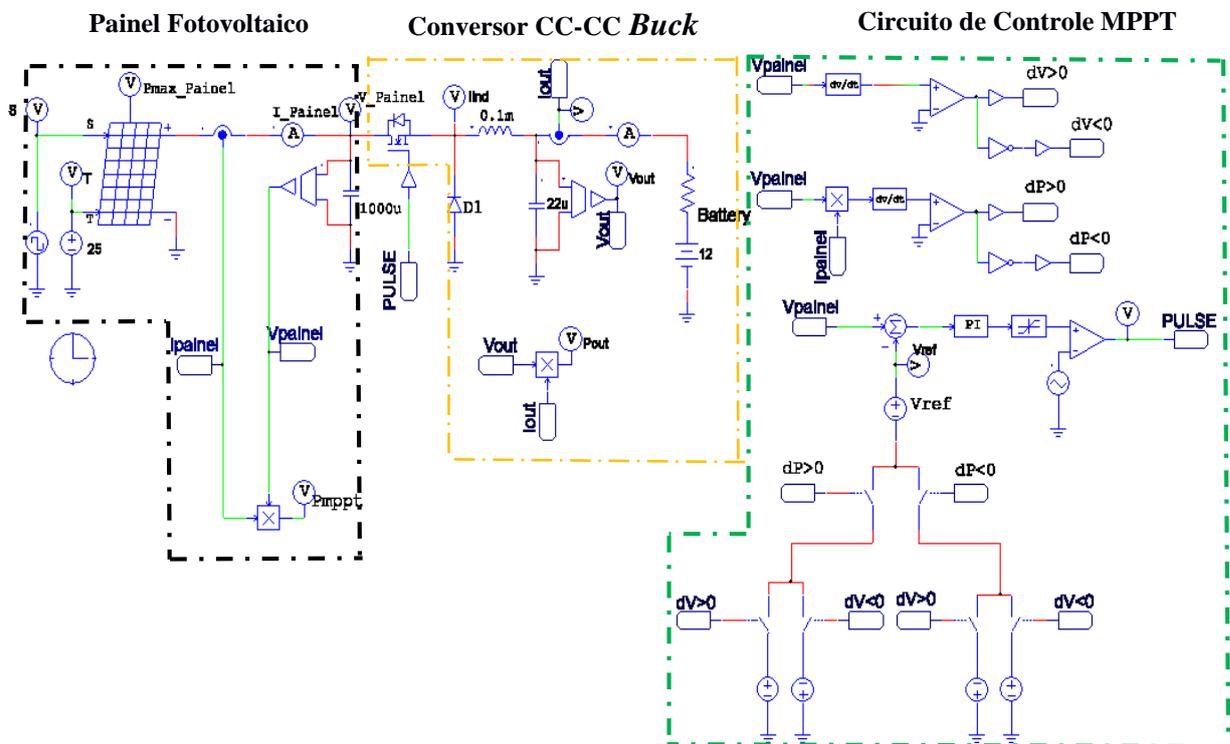
O sistema foi projetado de forma parcial. Em primeiro lugar simulou-se o comportamento do painel fotovoltaico YL095P-17b, criando um modelo equivalente com

recurso à ferramenta de simulação PSIM. Concluído o modelo equivalente efetuou-se a ligação entre o painel solar e o conversor de potência *Buck*, tendo-se verificado a sua capacidade de abaixar a tensão de saída, dentro das especificações proposta. Em seguida ligou-se com uma fonte de tensão que representará o banco de baterias. Finalizada esta etapa foi implementado o circuito de controle MPPT de Perturbar e Observar, com o objetivo de extrair a potência máxima do painel solar para diferentes valores de radiação.

3.2.1 Sistema Implementado em Simulação

Na Figura 18 é apresentado o modelo de simulação implementado no PSIM. Pela imagem percebe-se que o sistema é composto por painel fotovoltaico disposto em série com o conversor CC-CC *Buck* e a bateria. O conversor é controlado pelo bloco PI, que será detalhado. Em seguida é descrito com detalhe como foi simulado o comportamento do painel fotovoltaico e é explicada a estratégia de controle aplicada no conversor CC-CC *Buck*.

Figura 18 - Visão geral do modelo de simulação implementado.



Fonte: Elaborada pela autora.

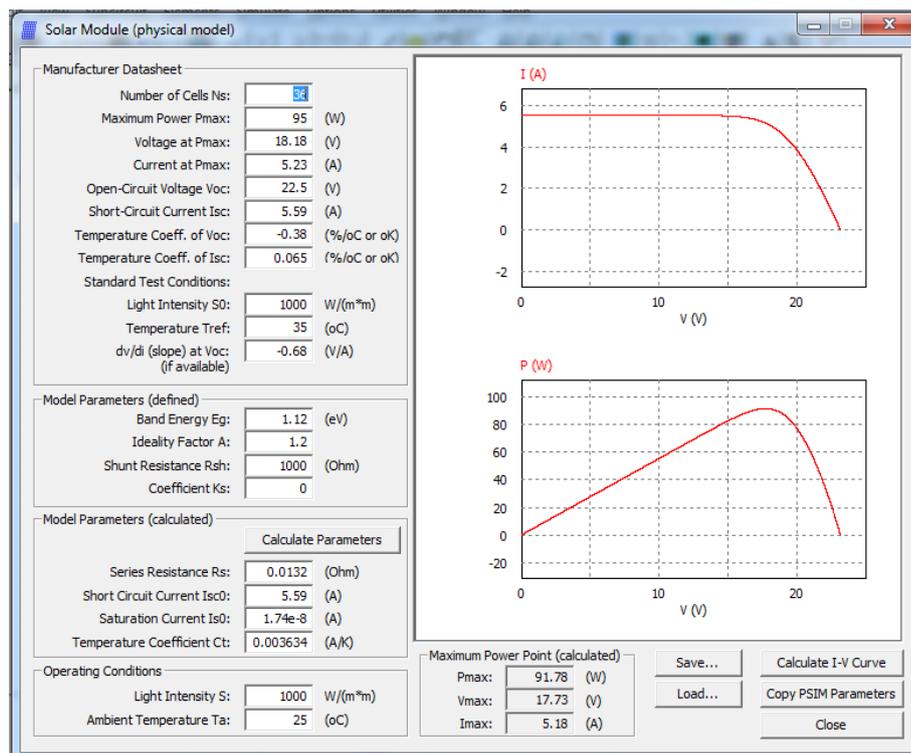
Em seguida é descrito com detalhe de como foi simulado o comportamento do painel solar e é explicada a estratégia de controlo aplicada no conversor CC-CC *Buck*.

3.2.2 Simulação do Módulo Fotovoltaico no PSIM

O módulo fotovoltaico foi implementado no PSIM utilizando o bloco “*Solar Module (physical model)*”. Esta ferramenta possibilita que o módulo simulado se comporte aproximadamente como o módulo na realidade, pois utiliza os dados do *datasheet* do painel, no caso o utilizado foi YL095P-17b. Ao utilizar o modelo físico, ao invés do modelo funcional, é possível variar os valores da temperatura do módulo bem como a radiação solar, Figura 19.

A ferramenta para modelar o módulo é a da janela com os gráficos I – V e P - V, onde é possível verificar se o ponto de máxima potência é o mesmo que o do painel real. Se necessário é possível alterar alguns parâmetros para obter a melhor caracterização possível do painel em simulação. Caso seja necessário o utilizador tem liberdade para alterar alguns dos parâmetros até conseguir obter a melhor caracterização possível do painel que pretende simular.

Figura 19 - Ambiente gráfico da funcionalidade “Solar Module (physical model)” do PSIM.



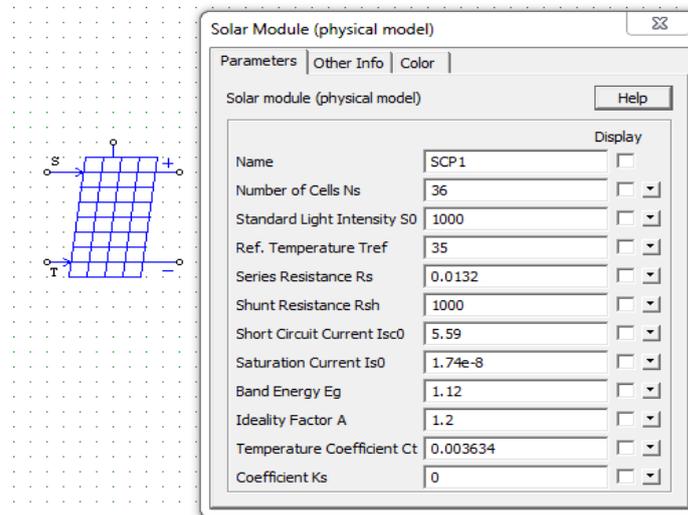
Fonte: Elaborada pela autora.

Depois de ter concluído o modelo equivalente do painel, o mesmo é exportado para o ambiente de simulação, conforme a Figura 20. Este modelo permite tanto variar a radiação e a temperatura, pela alteração dos parâmetros S e T, respectivamente.

Os parâmetros apresentados na Figura 20, que simula o painel fotovoltaico foram os utilizados para a simulação deste trabalho. Adicionalmente, o modelo consegue ainda indicar

o valor teórico de potência máxima que é possível extrair para as condições de radiação e de temperatura estabelecidas.

Figura 20 - Representação do painel fotovoltaico.



Fonte: Elaborada pela autora.

Deste modo, consegue-se replicar de forma concreta as condições ambientais a que estas estruturas estão sujeitas, sendo possível analisar o seu comportamento para diferentes situações.

3.2.3 Controle do Conversor CC-CC *Buck*

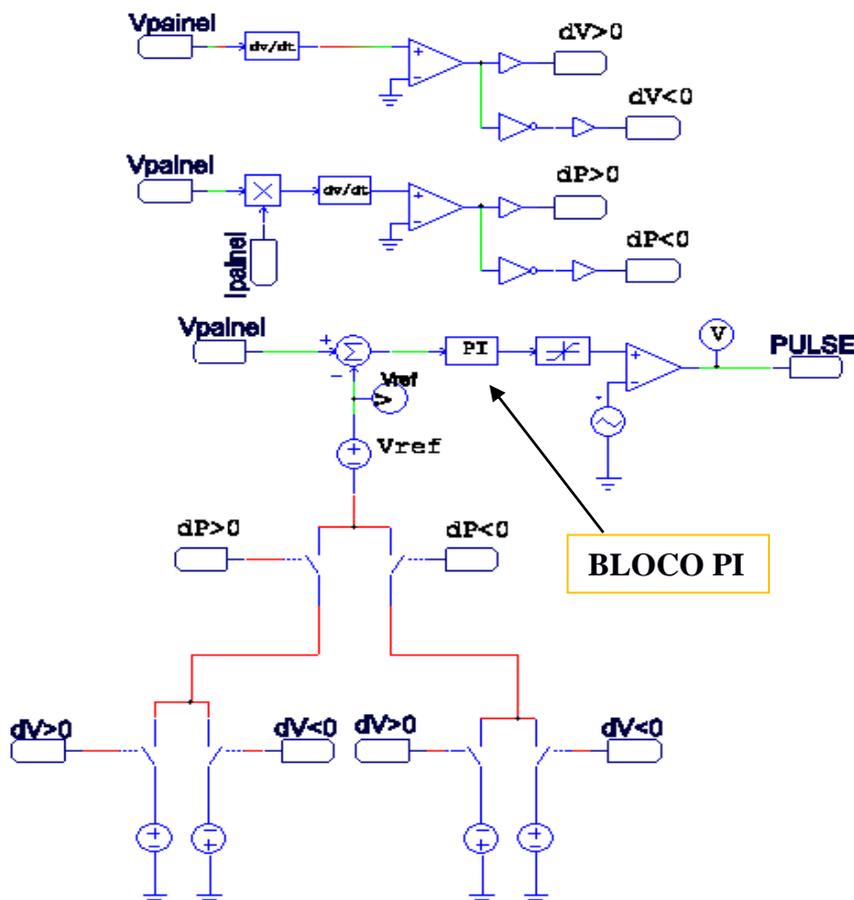
Para o projeto de controle do conversor é importante saber que a potência disponibilizada varia de acordo com as alterações de controle MPPT capaz de acompanhar de forma dinâmica as variações da curva de potência do painel solar. A técnica de controle MPPT utilizada em simulação foi a de Perturbar e Observar por apresentar uma maior simplicidade e eficácia. Para além da extração da potência máxima também é importante manter a tensão de saída do conversor regulada, tendo sido utilizado para esse fim um controlador do tipo Proporcional-Integral (PI). Assim, quando ocorre um aumento ou uma diminuição no valor da corrente total de saída do sistema, a potência do conversor é mantida constante através da regulação do valor da tensão de saída.

Na Figura 21, a tensão e a corrente fornecida pelo painel fotovoltaico são medidas e calculadas a potência, P_o . O bloco dv/dt compara o valor atual da potência com o valor anterior. Se o valor incrementado na potência for positivo, então a tensão variável de perturbação é incrementada.

A tensão de referência do conversor *Buck* é determinada pela fonte de tensão (V_{ref}), tendo em atenção a potência máxima que o painel fotovoltaico é capaz de fornecer. Para que

seja possível manter a tensão de saída do conversor regulada para que a carga não influencie nas condições de operação do painel solar, à referência é subtraída do valor da tensão de saída do conversor, gerando-se um erro que é usado pelo bloco de controlador Proporcional-Integral, que é responsável pela determinação do sinal de comando. Desta forma, garante-se que a carga não solicite ao painel solar um valor superior ao que consegue disponibilizar. De modo, que para evitar esta saturação é colocado um limitador na saída do controlador PI, em seguida compara-se com uma onda dente-de-serra para gerar o pulso no MOSFET do conversor *Buck*, é possível observar na Figura 21.

Figura 21 - Esquema de implementação do método MPPT-P&O.



Fonte: Elaborada pela autora.

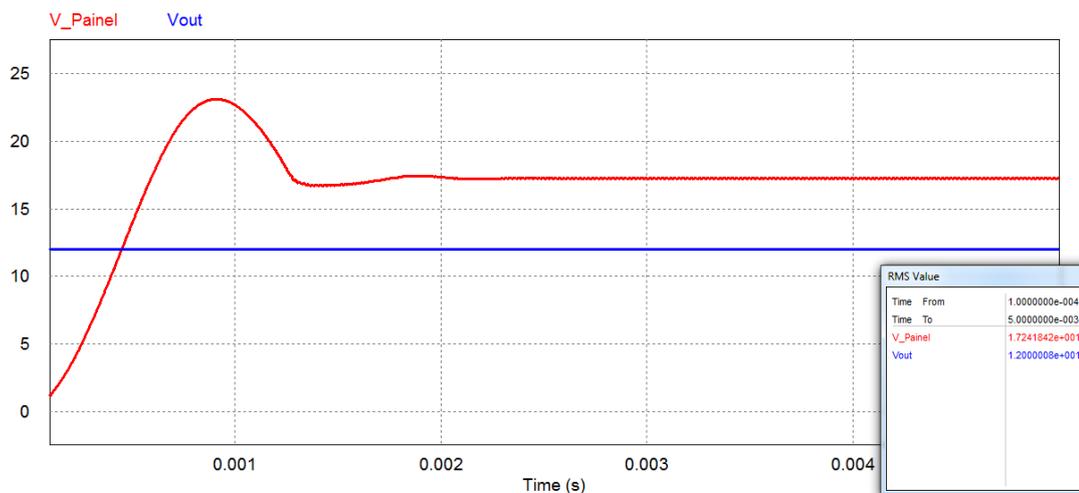
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Após o dimensionamento do sistema fotovoltaico isolado e conversor, serão analisados os resultados de simulação que possibilitam provar que a técnica MPPT consegue minimizar os problemas inerentes ao efeito sombra numa instalação solar fotovoltaica. Os resultados de simulação serão demonstrados, começando pelo correto funcionamento do conversor CC-CC, em seguida pela estratégia de controle implementada e terminando com os resultados que comprovam que o conceito de Perturbar e Observar em um sistema fotovoltaico é funcional e eficaz.

Inicialmente foi simulado o conversor *Buck* em função dos dimensionamentos efetuados, com o objetivo de examinar a sua capacidade de abaixar a tensão de saída, de acordo com o valor da razão cíclica especificada.

O painel fotovoltaico a que o conversor está associado, funciona em condições ideais, ou seja, com uma constante de 1000 W/m^2 e uma temperatura de 25°C , porém testou-se diferentes variações de radiação e temperatura no painel fotovoltaico de modo a tirar conclusões do comportamento do conversor e do controle. Nesta situação o conversor é responsável por abaixar a tensão de saída, além de otimizar a potência extraída do painel. A Figura 22, tem-se a tensão de entrada do conversor representada pelo gráfico em vermelho e no gráfico azul é apresentada a tensão de saída do conversor *Buck*. Os resultados foram obtidos com um tempo total de simulação de 0,5s.

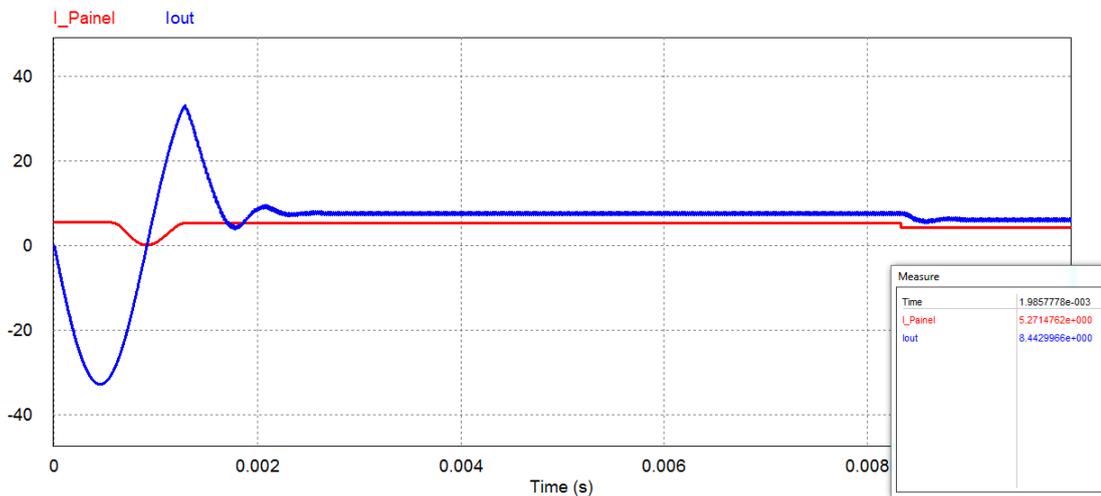
Figura 22 - Tensões de entrada e saída do conversor *Buck*.



Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 23, observa-se a forma de onda simulada da corrente de entrada do conversor representada pelo gráfico em vermelho e no gráfico azul é apresentada a tensão de saída do conversor *Buck*.

Figura 23 - Corrente de entrada e saída do Conversor *Buck*.



Fonte: Elaborada pela autora.

Da forma de onda da saída do conversor observa-se que a tensão decresce para aproximadamente 12V e a corrente aumenta para aproximadamente 7,5A, com isso verificou-se a competência do conversor *Buck* de abaixar a tensão do painel fotovoltaico a que está conectado.

Os valores obtidos da simulação do conversor *Buck*, apresentam-se na Tabela 7 e estão de acordo com os cálculos efetuados. A tensão de saída apresenta um valor praticamente constante, porque o conversor foi simulado com um fonte CC de 12V na saída. Em relação a corrente de saída, que apresenta algumas ondulações devido a comutação dos semicondutores e também porque o sistema foi simulado com parâmetros reais, portanto a saída apresenta perdas.

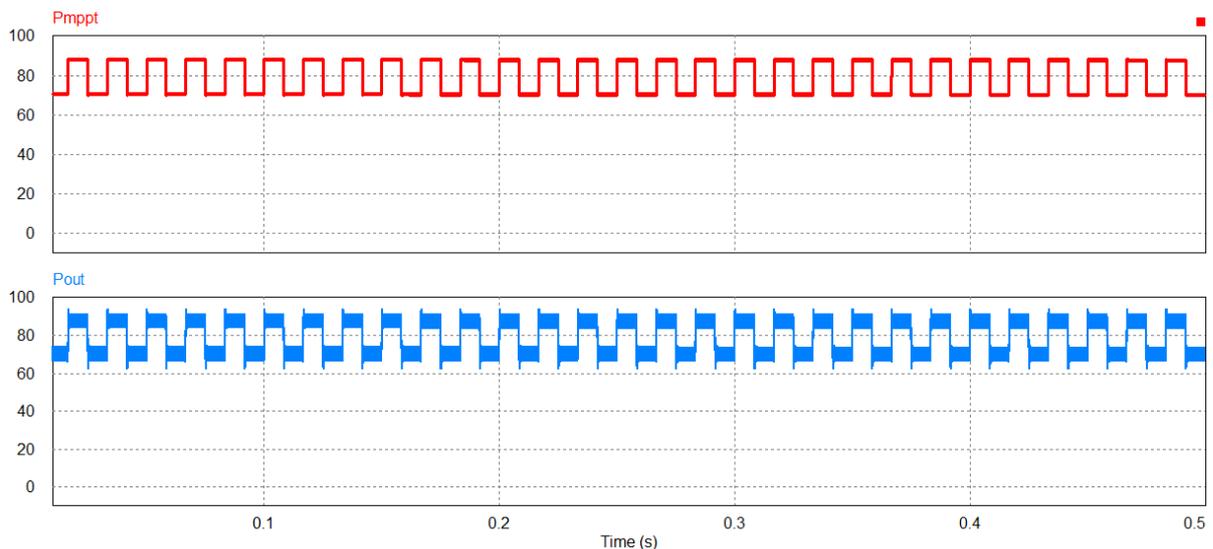
Tabela 7 - Resultados de simulação do Conversor *Buck*.

		Valor Eficaz	Valor Médio	Valor Máximo	Valor Mínimo
Tensão de Entrada	V_Painel	17,27V	17,24V	23,11V	11,46V
Tensão de Saída	Vout	11,98V	11,99V	12,5V	0V
Corrente de Entrada	I_Painel	4,79A	4,75A	5,55A	0,098A
Corrente de Saída	Iout	7,43A	6,69A	32,99A	0,033A

Fonte: Elaborada pela autora.

Na Figura 24 observa-se a potência de entrada e saída para valores de radiação e temperaturas fixos, 1000W/m² e 25°C respectivamente. A potência de entrada é 88,28W, como a tensão de saída é praticamente constante, a corrente é proporcional a potência de saída, ou seja, a ondulação presente na corrente será a mesma ondulação que na potência de saída

Figura 24 - Potências de entrada e saída do conversor CC-CC *Buck*.



Fonte: Elaborada pela autora.

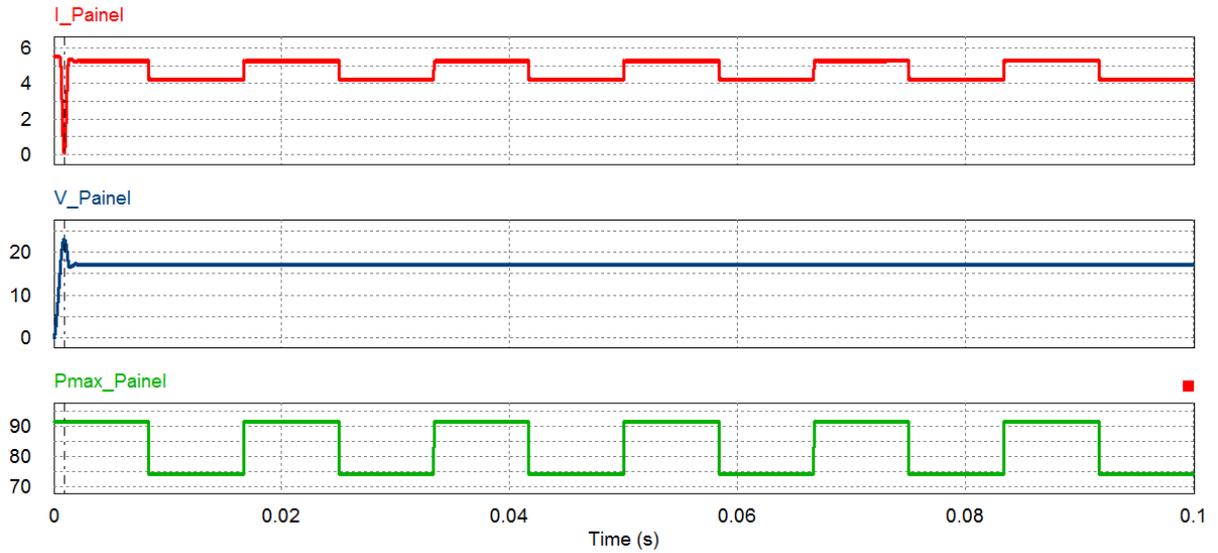
O valor médio da potência de saída é de 85,05W, portanto conclui-se com isso que o conversor em ambiente de simulação apresenta 3W de perdas, tendo então uma eficiência energética de 96,34%. É uma boa eficiência considerado que o circuito possui elementos de potência que incrementam perdas no sistema. Na Equação 24 é calculado a eficiência energética do conversor simulado.

$$Eficiência (\%) = 1 - \frac{P_{in} - P_{out}}{P_{in}} * 100 = 96\% \quad (24)$$

Em seguida, também foi simulado o comportamento do painel solar YL095P-17b, no sentido de verificar se as suas condições nominais de funcionamento foram aplicadas para o modelo de simulação.

Pela observação da Figura 25 percebe-se que no momento em que as formas de onda entram em regime permanente, é possível constatar que o valor médio da corrente do painel solar é muito próximo de 5,23A, o valor médio de tensão é próximo de 18,18V e o valor médio da potência máxima é próximo 95W, correspondente aos valores de corrente, tensão e potência máximas indicados no *datasheet* do fabricante do painel.

Figura 25 – Corrente, tensão e potência do painel fotovoltaico.

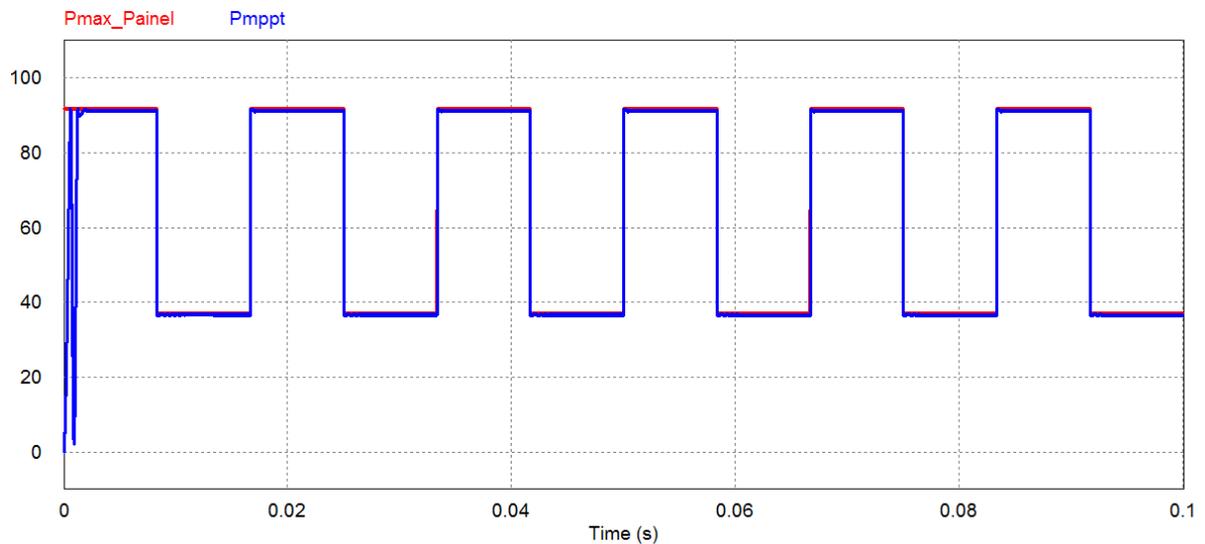


Fonte: Elaborada pela autora.

Os valores de radiação e temperatura fixos, 1000W/m^2 e 25°C respectivamente. Nota-se na Figura 25, que a tensão e corrente de entrada apresentam baixas ondulações e atingem valores, em regime permanente muito próximo do MPP do painel fotovoltaico parametrizado, portanto pode-se concluir que o sistema está maximizando a potência do painel.

Com finalidade de verificar a eficiência e a validade da técnica de controle MPPT de P&O a estratégia utilizada consistiu na variação do valor da radiação e da temperatura do painel fotovoltaico e analisando o comportamento. A simulação efetuada baseou-se inicialmente em colocar o painel solar a uma radiação uniforme de 1000W/m^2 , depois decrementou-se 200W/m^2

Figura 26 - Potência do painel (vermelho) e potência MPPT (azul).



Fonte: Elaborada pela autora.

até os 200W/m², a temperatura fixou-se em 25°C e a frequência a 60Hz. Em seguida variou a temperatura de 45°C, decrementando-se até os 10°C e fixou-se a radiação em 1000W/m². Para melhor observação dos resultados da simulação do controle de MPPT, foi concebida as Tabelas 8 e 9, que representam as grandezas de corrente I_{mpp} , tensão V_{mpp} e potência P_{mpp} .

Tabela 8 - Valores de diferentes grandezas físicas no MPP com radiação variável e temperatura constante (25°C).

Radiação (W/m ²)	I_{mpp} (A)	V_{mpp} (V)	P_{mpp} (W)
1000	4,79	17,23	82,53
800	3,76	17,22	64,77
600	2,71	17,23	46,73
400	1,67	17,23	28,74
200	0,73	16,88	12,72

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 9 - Valores de diferentes grandezas físicas no MPP com temperatura variável e radiação constante (1000W/m²).

Temperatura (°C)	I_{mpp} (A)	V_{mpp} (V)	P_{mpp} (W)
45	4,7	16,96	76,05
35	4,66	17,17	79,9
25	4,79	17,23	82,53
20	4,84	17,23	83,32
10	4,88	17,23	84,11

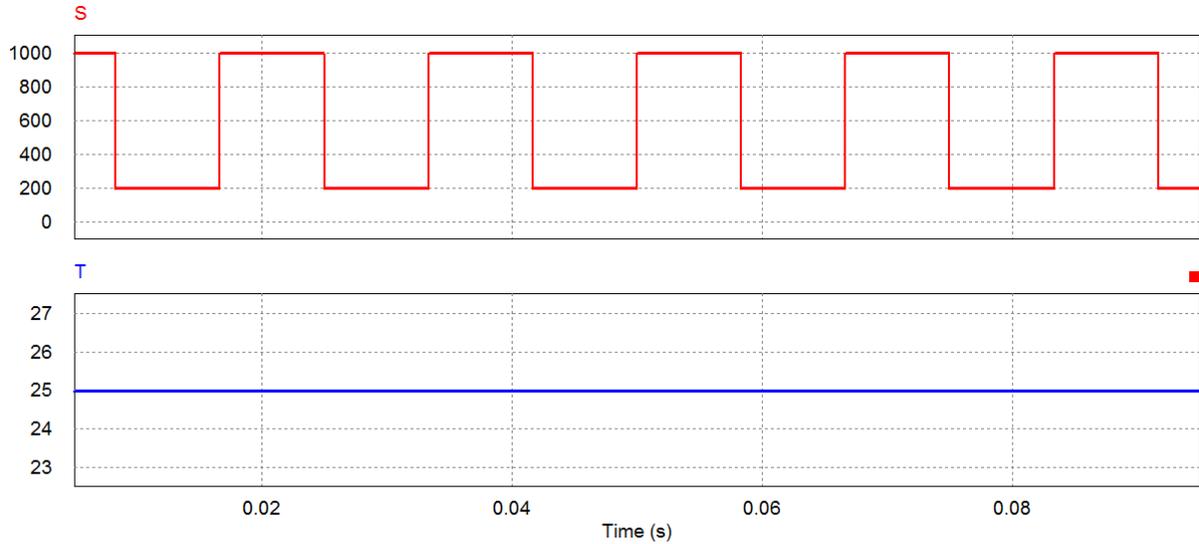
Fonte: Elaborada pela autora.

É possível observar também, que o sistema consegue fazer o rastreamento mais eficiente quando varia a temperatura do que quando varia a radiação. Isto deve-se ao fato que o aumento da temperatura diminui a tensão e a potência gerada.

Na Figura 26, observa-se que o sistema responde de uma forma rápida a uma variação de radiação em degrau. A forma de onda vermelha indica a potência máxima que o painel é capaz de fornecer e a forma de onda azul indica a potência extraída do painel fotovoltaico pelo conversor CC-CC *Buck*, conforme a Figura 27, que mostra as condições de radiação e de temperatura que está sendo submetido. É possível observar que a potência extraída do painel se ajusta a potência máxima que o painel é capaz de fornecer, desta forma sabe-se que o circuito de controle implementado foi capaz de acompanhar a evolução da potência produzida, em resposta às alterações aplicadas, uma vez que a potência exigida pelo conversor em cada

instante corresponde à potência máxima que o painel consegue fornecer resposta às alterações aplicadas.

Figura 27 - Variação da radiação e Temperatura constante.

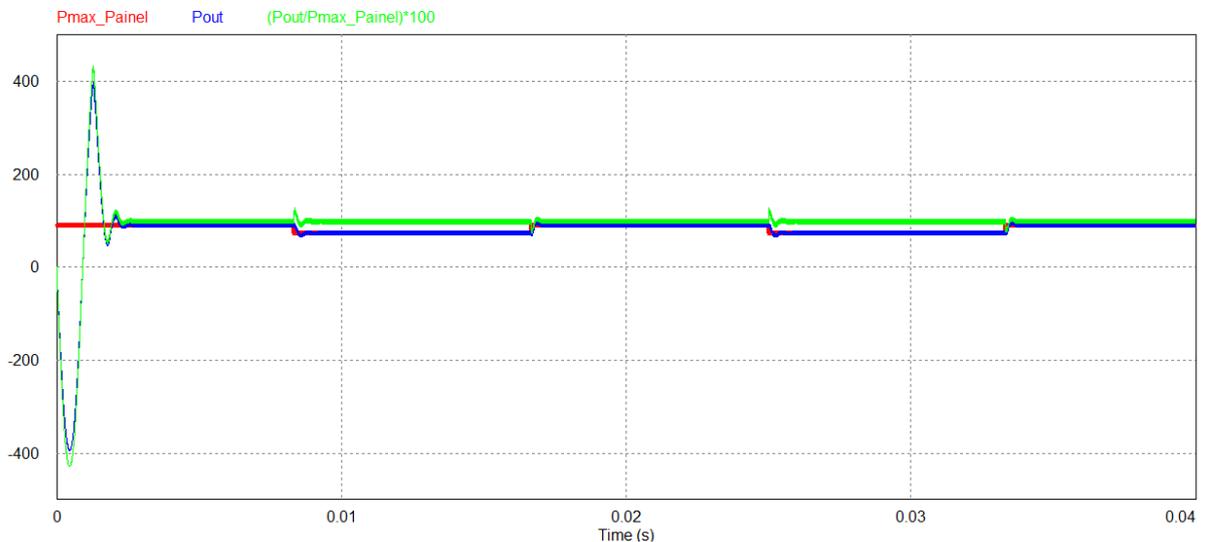


Fonte: Elaborada pela autora.

Através dos resultados nota-se que o circuito de controle responde rapidamente as mudanças repentinas de radiação. Pois a tensão mantém-se praticamente constante durante a simulação e o valor da corrente aumenta como esperado.

Como se pode ver na Figura 28 o comportamento do sistema conforme as variações tanto de temperatura quanto de radiação, pode-se observar que o sistema consegue seguir a potência máxima em cerca de 95,47% do tempo.

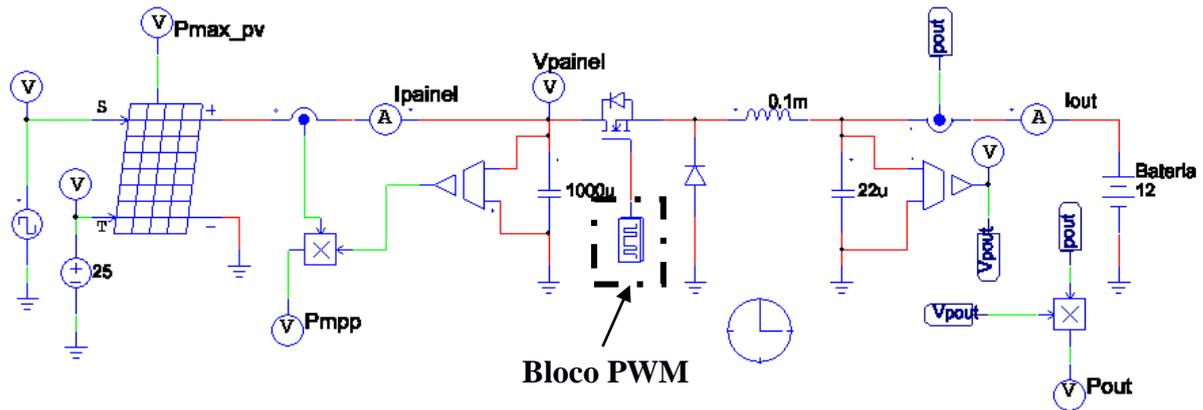
Figura 28 - Potência de entrada (vermelho), Potência de saída (azul) e eficiência do sistema (verde).



Fonte: Elaborada pela autora.

De modo a comparar a eficiência do sistema fotovoltaico autônomo com controlador *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) e com controlador *Pulse-Width Modulation* (PWM), utilizou-se o bloco de pulso *Gating Block* do PSIM na Figura 29. Os parâmetros do painel solar, do conversor abaixador e da bateria seguiu-se o mesmo que na simulação anterior.

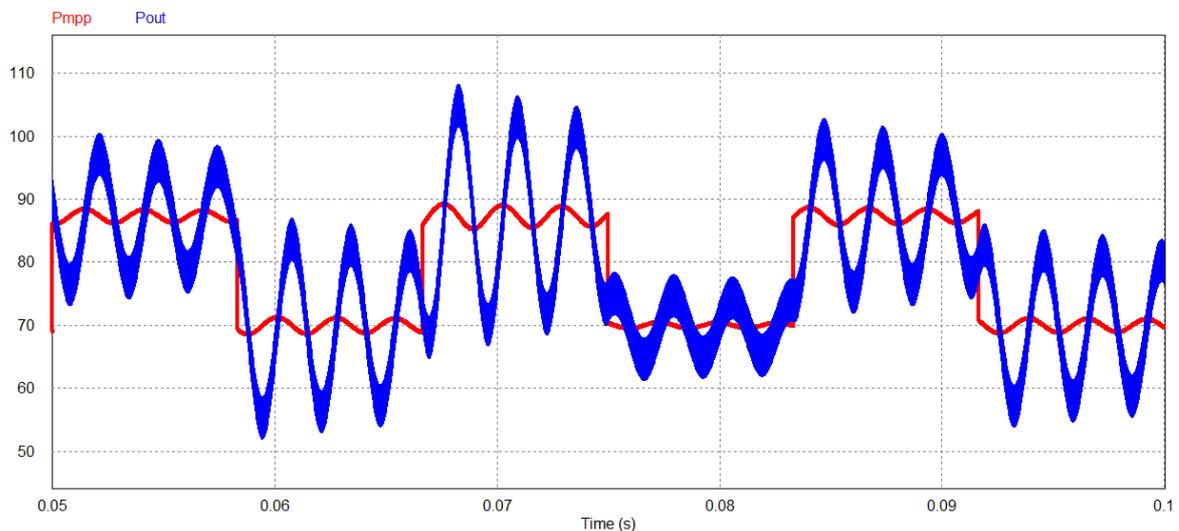
Figura 29 - Circuito implementado com controlador PWM.



Fonte: Elaborada pela autora.

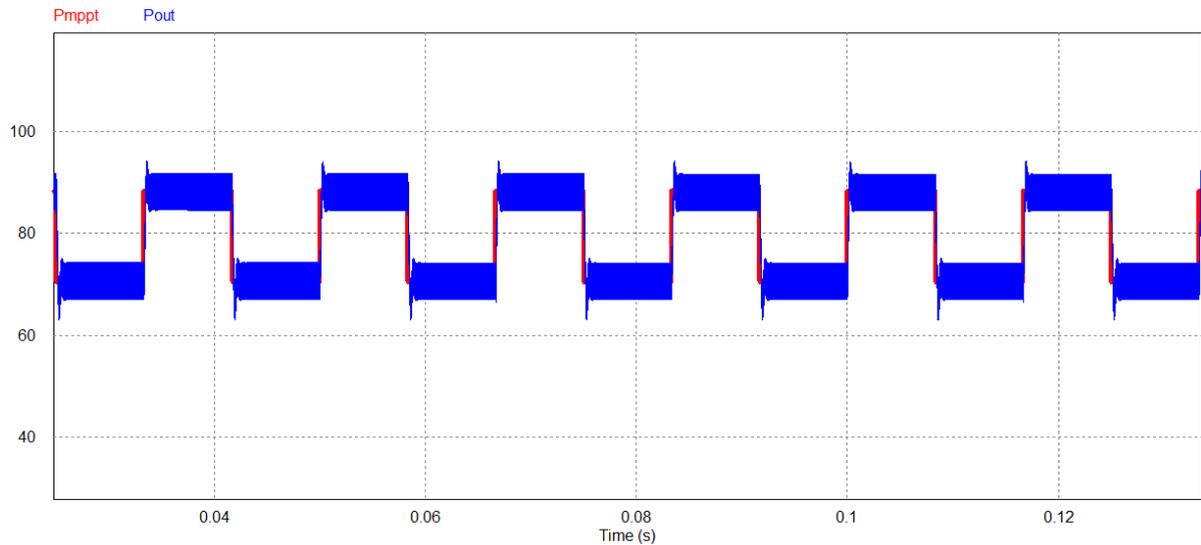
A simulação seguiu-se o mesmo princípio anterior variando-se radiação de 200W/m^2 a 1000W/m^2 com temperatura fixa de 25°C . Na Figura 30 observa-se a forma de onda em (vermelho) que representa a potência máxima do painel fotovoltaico e a forma de onda em (azul) que representa a potência de saída, utilizando a técnica de controle PWM. Da mesma forma na Figura 31 é representado as potência máxima do painel e a potência de saída do sistema com a técnica de controle MPPT.

Figura 30 - Potência máxima do painel e Potência de saída com técnica de controle PWM.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 31 - Potência máxima e potência de saída com técnica de controle MPPT.



Fonte: Elaborada pela autora.

É notória a diferença nas formas de onda de cada técnica, na Figura 30 percebe-se que a potência de saída não tem estabilidade e muitas vezes oscila em valores mais altos que a bateria necessita. Já na Figura 30 o sinal é mais estável, com menos ruído ou seja com uma potência de saída ajustada e próximo da potência máxima do painel solar.

Na Tabela 10 com base nos resultados obtidos na comparação das técnicas de PWM e MPPT, nota-se que a técnica PWM apresenta valores menores na potência de saída (P_{out}) do sistema. Isto acontece devido a corrente de saída (I_{out}) se manter praticamente a mesma corrente máxima (I_{mpp}) que o painel solar pode fornecer e diminui a tensão de saída (V_{out}) por conta da necessidade da bateria, surgindo assim uma potência de saída bem distante do valor da potência máxima (P_{mpp}) do painel solar.

No caso da técnica MPPT ocorre a redução da tensão de saída (V_{out}) que a bateria necessita, porém em compensação aumenta a corrente de saída (I_{out}) proporcionalmente para manter a corrente máxima (I_{mpp}) que o painel fornece, mantendo-se também a potência máxima na saída do sistema.

Tabela 10 - Análise da comparação dos resultados entre as técnicas de PWM e MPPT.

Valores obtidos da simulação do sistema fotovoltaico com a técnica PWM						
Radiação (W/m ²)	Impp (A)	Vmpp (V)	Pmpp (W)	Iout (A)	Vout (V)	Pout (W)
1000	4,94	16,01	79,03	5,01	12	60,12
800	3,86	16,05	61,76	3,92	12	47,04
600	2,78	16,04	44,45	2,8	12	33,6
400	1,71	16,02	27,36	1,74	12	20,88
200	0,7	15,99	11,19	0,71	12	8,52

Valores obtidos da simulação do sistema fotovoltaico com a técnica MPPT						
Radiação (W/m ²)	Impp (A)	Vmpp (V)	Pmpp (W)	Iout (A)	Vout (V)	Pout (W)
1000	4,79	17,23	82,53	7,02	12	84,23
800	3,76	17,22	64,77	5,51	12	66,07
600	2,71	17,23	46,73	4,09	12	49,03
400	1,67	17,23	28,74	2,86	12	34,29
200	0,73	16,88	12,72	1,36	12	16,32

Fonte: Elaborada pela autora.

CONCLUSÃO

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho foram feitas revisões sobre os assuntos: características elétricas dos painéis fotovoltaicos e sistema fotovoltaico isolados da rede elétrica; conversores CC-CC *Buck*, *Boost*, *Buck-Boost*; baterias; métodos de rastreamento de máxima potência; perturbação e observação; condutância incremental, técnicas de controle do conversor CC-CC e software para simulação, os assuntos foram desenvolvidos no referencial teórico.

Aplicou-se a sequência disposta na metodologia para o dimensionamento e simulação de seguidor do ponto de máxima potência para sistemas solares fotovoltaicos autônomos. Tendo em consideração as especificações elétricas foram realizados os cálculos teóricos necessários para o dimensionamento do sistema fotovoltaico, juntamente com a bateria e conversor CC-CC *Buck*. Após o dimensionamento, elaborou-se um modelo de simulação equivalente do painel solar, recorrendo a uma funcionalidade do *software* de simulação PSIM, tendo-se conseguido alcançar uma resposta bastante similar à do painel real. Em seguida, foi descrita a estratégia de controle aplicada ao conversor de potência, que se fundamenta na determinação do valor de tensão de referência através do método de controle MPPT de Perturba e Observa. Esse valor é utilizado, de imediato, por um controlador do tipo PI que tem como função manter a tensão de saída regulada.

Foram apresentados de forma gradual os resultados de simulação do modelo implementado. Em primeiro lugar verificou-se o conversor *Buck* é capaz de diminuir a tensão de saída para os níveis desejados, de acordo com os proposto nos cálculos teóricos. Logo depois comprovou-se a eficácia do método de controle MPPT de Perturba e Observa para diferentes valores de radiação e temperatura, verificando-se que em cada instante a potência que o painel era capaz de produzir uma potência de saída bem satisfatória.

A simulação da técnica de controle MPPT permitiu verificar que de fato este tipo de controladores é essencial para se extrair a máxima potência de um painel fotovoltaico e ter um sistema solar com um bom rendimento.

Comparando-se os dois tipos de controladores MPPT e PWM em simulação, nota-se que os resultados obtidos são bem interessantes entre os dois métodos, visto que o método com controlador MPPT atinge uma eficiência de aproximadamente 96% no sistema solar e o método PWM atinge uma eficiência de 76% no sistema proposto.

Com isso, percebe-se que o sistema solar fotovoltaico proposto demonstrou um melhor aproveitamento da energia gerada.

Com base nisso merecem destaque os seguintes trabalhos futuros.

- Implementar a outra técnica presente no referencial teórico, como a de Condutância Incremental, de forma que compare o seu comportamento e rendimento em relação a Perturbação e Observação.
- Melhoria do Controle do conversor CC-CC *Buck*, realizando-se a linearização de um conversor não-linear, para que seja representado por uma função de transferência e projetado o controlador PI.
- Implementar este método na forma física para validar os resultados obtidos em simulação, da eficiência destas técnicas de rastreamentos de máxima potência em sistema de fotovoltaicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBOSA, Helder Miguel. **Sistema de Carregamento Externo de Baterias de Veículos Elétricos com Interface a Fonte de Energia Renovável**. 2013. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2013. Disponível em: <<https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/42037/1/Helder%20Barbosa%20Disserta%C3%A7%C3%A3o%202013%20.pdf>>. Acesso em: 13 de mar. 2018.
- BORGES, Leandro da Motta. **Dimensionamento e Gestão de Energia Solar Fotovoltaica para Aplicação em Sistemas Automatizados Isolados da Rede Elétrica**. 2013. Dissertação (Pós-Graduação), Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais, 2013. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/labsolar/files/2011/05/Dimensionamento-e-Gest%C3%A3o-de-Energia-Solar-Fotovoltaica-para-Aplica%C3%A7%C3%A3o-em-Sistemas-Automatizados-Isolados-da-Rede-El%C3%A9trica.pdf>>. Acesso em: 01 mar. 2018.
- CARVALHO, Pedro António. **Seguidor do Ponto de Máxima Potência Multi-Convertor para Sistema Solares Fotovoltaicos**. 2013. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2013. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/40057/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Pedro%20Carvalho_2013.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2018.
- GÓES, Duaymy Bruno. **Investigação Experimental de Técnicas de Controle Clássico e Robusto Aplicadas a um Conversor de Potência CC-CC Buck**. Belém, Pará, 2016. Dissertação (Graduação), Universidade Federal do Pará, 2016.
- HART, Daniel W. **Eletrônica de Potência: análise e projetos de circuitos**. New York: McGraw-Hill, 2011. Porto Alegre: AMGH, 2012.
- IMHOFF, Johninon. **Desenvolvimento de Conversores Estáticos para Sistemas Fotovoltaicos Autônomos**. 2007. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, 2007. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8608/JOHNINSONIMHOFF.pdf>>. Acesso em: 05 jan. 2018.
- LORENZO, Eduardo. **Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic systems**. Sevilla, Spain: Progensa, 1994.
- MOHAN, Ned. **Power Electronics: a First Course**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2012.

MOURA. **Folha de dados da bateria Moura Clean 12MC220**. Disponível em:<<http://www.minhacasasolar.hospedagemdesites.ws/Manual%20t%C3%A9cnico%20Moura%20Clean.pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2017.

MOÇAMBIQUE, Nilton. **Aplicação de Algoritmos de Busca do Ponto de Máxima Potência e Controladores Lineares e/ou Fuzzy para a Regulação da Tensão Terminal de Painéis Fotovoltaicos**. São Carlos: EESC/USP, 2012. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012. Disponível em:< <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18153/tde-26072012-091641/pt-br.php>>. Acesso em: 20 out. 2016.

OLIVEIRA, Cláudio. et al. **Projeto e Simulação de um Arranjo Fotovoltaico Composto por 2 strings Utilizando MPPT's Independentes**. Uberlândia: XIII CEEL-ISSN2178-8308. Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Elétrica, 2015. Disponível em:< http://www.ceel.eletrica.ufu.br/artigos2015/ceel2015_artigo074_r01.pdf>. Acesso em: 21 out. 2016.

PEREIRA, Filipe Miguel Costa. **Conversor CC/CC para Painéis Fotovoltaicos**. 2012. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2012. Disponível em:< <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/65675/1/000154283.pdf>>. Acesso em: 09 mai. 2018.

PINHO, João; GALDINO, Marco. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL-CRESESB, 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 5 out. 2016.

POMILIO, José Antenor; DECKMANN, Sigmar. **Eletrônica de Potência no Sistema de Energia Elétrica**. São Paulo, 2014.

SEGUEL, Julio Igor. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital**. 2009. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <<http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/farias/materiais/316M.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

SILVA, Carlos André. **Conversor CC/CC para Aplicação em Instalação Fotovoltaica**. 2012. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2012. Disponível em:< http://paginas.fe.up.pt/~ee07308/docs/Estado%20de%20Arte_v3.pdf >. Acesso em: 5 out. 2016.

SOUZA, Jefferson Ribeiro. **Projeto de MPPT para uma Embarcação Solar Fotovoltaica**. 2016. Dissertação de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro-Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em:<<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10016468.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2017.

PSIM. **Histórico do Powersim**. 2017. Disponível em: < <https://powersimtech.com/about-us>>. Acesso em: 28 out. 2017.

ANEXO A – FOLHA DE DADOS DO PAINEL YL095P-17b

ELECTRICAL PERFORMANCE

Electrical parameters at Standard Test Conditions (STC)

Module name			YGE 95	YGE 90	YGE 85
Module type			YL95P-17b 2/3	YL90P-17b 2/3	YL85P-17b 2/3
Power output	P_{max}	W	95	90	85
Power output tolerances	ΔP_{max}	%	+/- 5		
Module efficiency	η_m	%	14.3	13.5	12.7
Voltage at P_{max}	V_{mp}	V	18.18	17.77	17.40
Current at P_{max}	I_{mp}	A	5.23	5.06	4.89
Open-circuit voltage	V_{oc}	V	22.5	22.0	21.53
Short-circuit current	I_{sc}	A	5.59	5.44	5.19

STC: 1000W/m² irradiance, 25°C cell temperature, AM1.5g spectrum according to EN 60904-3.
Average relative efficiency reduction of 5% at 200W/m² according to EN 60904-1.

Electrical parameters at Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)

Power output	P_{max}	W	76.96	72.91	68.86
Voltage at P_{max}	V_{mp}	V	16.75	16.38	16.03
Current at P_{max}	I_{mp}	A	4.20	4.06	3.92
Open-circuit voltage	V_{oc}	V	20.48	20.02	19.59
Short-circuit current	I_{sc}	A	4.47	4.35	4.15

NOCT: open-circuit module operation temperature at 800W/m² irradiance, 20°C ambient temperature, 1m/s wind speed.

THERMAL CHARACTERISTICS

Nominal operating cell temperature	NOCT	°C	46 +/- 2
Temperature coefficient of P_{max}	γ	%/°C	-0.45
Temperature coefficient of V_{oc}	β_{voc}	%/°C	-0.33
Temperature coefficient of I_{sc}	α_{sc}	%/°C	0.06

OPERATING CONDITIONS

Max. system voltage	50V _{oc}
Max. series fuse rating	10A
Limiting reverse current	Do not apply external voltages larger than Voc of the module
Operating temperature range	-40 to 85°C
Max. static load, front (e.g., snow and wind)	2400Pa
Max. static load, back (e.g., wind)	2400Pa
Max. hailstone impact (diameter / velocity)	25mm / 23m/s

CONSTRUCTION MATERIALS

Front cover (material / thickness)	low-iron tempered glass / 3.2mm
Cell (quantity / material / dimensions)	36 / multicrystalline silicon / 156mm x 104mm
Encapsulant (material)	ethylene vinyl acetate (EVA)
Frame (material / color / anodization color)	anodized aluminum alloy / silver / clear

- Due to continuous innovation, research and product improvement, the specifications in this product information sheet are subject to change without prior notice. The specifications may deviate slightly and are not guaranteed.
- The data do not refer to a single module and they are not part of the offer, they only serve for comparison to different module types.

Yingli Green Energy Holding Co. Ltd.

service@yinglisolar.com

Tel: 0086-312-8929802

YINGLISOLAR.COM

© Yingli Green Energy Holding Co. Ltd. | DS_YL095P-17b_23_EU_EN_201302_v02.3

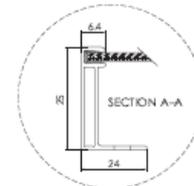
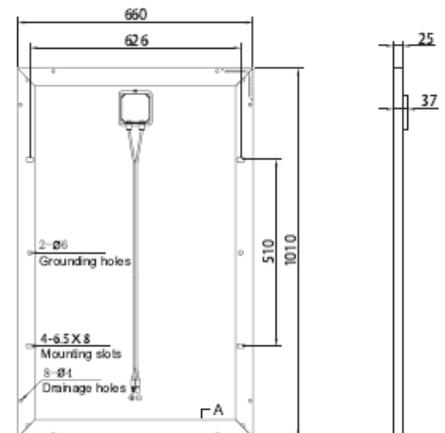
GENERAL CHARACTERISTICS

Dimensions (L / W / H)	1010mm / 660mm / 25mm
Weight	7.65kg

PACKAGING SPECIFICATIONS

Number of modules per box	6
Packaging box dimensions (L / W / H)	1040mm / 690mm / 210mm

Unit: mm



Warning: Read the Installation and User manual in its entirety before handling, installing, and operating Yingli Solar modules.

Our Partners:

