

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**MAIKON ANDRÉ WILGES MAKIMORE**

**GERENCIAMENTO DA POTÊNCIA EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS APLICADOS  
EM CONVERSORES MULTINÍVEIS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA**

**Alegrete  
2018**

**MAIKON ANDRÉ WILGES MAKIMORE**

**GERENCIAMENTO DA POTÊNCIA EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS APLICADOS  
EM CONVERSORES MULTINÍVEIS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Giovani Guarienti Pozzebon

**Alegrete  
2018**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

M235g Makimore, Maikon André Wilges

Gerenciamento da potência em painéis fotovoltaicos aplicados em conversores multiníveis conectados à rede elétrica / Maikon André Wilges Makimore.

69 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2018.

"Orientação: Giovani Guarienti Pozzebon".

1. Gerenciamento da Potência em Painéis Fotovoltaicos. 2. Rastreamento da Máxima Potência. 3. Energia Solar Fotovoltaica. 4. Eletrônica de Potência. 5. Conversores Multiníveis. I. Título.

MAIKON ANDRE WILGES MAKIMORE

GERENCIAMENTO DA POTÊNCIA EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS APLICADOS EM CONVERSORES  
MULTINÍVEIS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Eletrônica de Potência

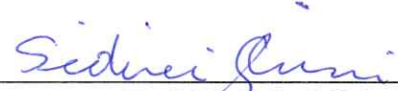
Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 29 de junho de 2018.

Banca examinadora:




---

Prof. Dr. Giovanni Guanienti Pozzebon  
Orientador



---

Prof. Dr. Sidinei Ghissoni  
UNIPAMPA



---

Prof. Dr. Guilherme Sebastião da Silva  
UNIPAMPA

*Dedico este trabalho à minha mãe  
Claudete e ao meu padrasto Marcos.*

## Resumo

Este trabalho de conclusão de curso apresenta um estudo sobre o gerenciamento da potência em painéis fotovoltaicos como fontes primárias de conversores multiníveis conectados à rede elétrica, desenvolvido através de simulações no software PSIM. Primeiramente, é modelado um arranjo fotovoltaico com uma configuração 3x3 de painéis série-paralelo, utilizando como referência os dados do módulo fotovoltaico do modelo *Kyocera KD210GX-LPU*. Após, é feito o dimensionamento dos componentes de um conversor CC-CC não isolado do tipo *Boost*, de modo a elevar os níveis de tensão entregues pelo arranjo fotovoltaico proposto. O conversor funciona com um algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) integrado ao seu controle. Dentre os métodos existentes de MPPT, optou-se por desenvolver um algoritmo baseado no método de Perturbação e Observação (P&O), o qual foi implementado e simulado dentro de um bloco específico do PSIM (C Blocks). Por fim, o sistema fotovoltaico desenvolvido é integrado a um sistema multinível já projetado que funciona conectado à rede elétrica, substituindo uma fonte de corrente que representava tal conjunto. Assim, por meio de simulações, foi possível verificar a interação dos sistemas fotovoltaico e multinível, transferindo para a rede a máxima potência instantânea gerada pelos painéis.

Palavra-Chave: painel fotovoltaico, conversores boost, conversores multinível, MPPT, Perturba e Observa.

## **ABSTRACT**

This work presents a study about the power management in photovoltaic panels as primary sources of multilevel converters connected to the grid, developed through simulations in the PSIM software. Firstly, a photovoltaic arrangement with a 3x3 configuration of series-parallel panels is modeled using the data of the photovoltaic module of the Kyocera KD210GX-LPU model. Afterwards, the components of a non-isolated Boost DC-DC converter are dimensioned in order to raise the voltage levels delivered by the proposed PV array. The converter operates with a maximum power point tracking algorithm (MPPT) integrated with its control. Among the existing MPPT methods, it was decided to develop an algorithm based on the Perturbation and Observation (P&O) method, which was implemented and simulated within a specific block of the PSIM (C Blocks). Finally, the developed photovoltaic system is integrated with an already designed multilevel system that works connected to the power grid, replacing a current source that represented such a set. Thus, through simulations, it was possible to verify the interaction of photovoltaic and multilevel systems, transferring to the grid the maximum instantaneous power generated by the panels.

Keywords: photovoltaic panel, boost converters, multilevel converters, MPPT, Perturb and Observe.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Síntese dos níveis de irradiação por região .....	19
Figura 2 - Célula de silício monocristalino .....	20
Figura 3 - Célula de silício policristalino .....	21
Figura 4 - Módulo de silício amorfo .....	21
Figura 5 - Sistema fotovoltaico isolado (Off-Grid).....	22
Figura 6 - Sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica.....	23
Figura 7 - Sistema fotovoltaico centralizado conectado à rede elétrica.....	24
Figura 8 - Sistema Híbrido.....	25
Figura 9 - Conexão de células em paralelo.....	26
Figura 10 - Conexão de células em série.....	27
Figura 11 - Configuração do arranjo fotovoltaico com diodos de bloqueio e by-pass.....	27
Figura 12 - Modelo elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica. ....	28
Figura 13 - Curvas I-V e P-V. ....	30
Figura 14 - Alteração na curva I-V do módulo fotovoltaico devido a variação de irradiação a uma temperatura constante.....	31
Figura 15 - Alteração na curva I-V do módulo fotovoltaico devido a variação de temperatura a uma irradiação constante.....	32
Figura 16 - Circuito elétrico do conversor Boost.....	33
Figura 17 - Variação da tensão de saída em função da razão cíclica. ....	34
Figura 18 - Quatro casos possíveis para alteração do PMP. ....	37
Figura 19 - Fluxograma do método P&O.....	38
Figura 20 - Curvas I-V do módulo fotovoltaico KD210GX-LPU, com variação da temperatura.....	42



Figura 21 - Curvas I-V do módulo fotovoltaico KD210GX-LPU, com variação da irradiação.....	42
Figura 22 - Inserção de parâmetros utilizando o modelo físico do PSIM. ....	43
Figura 23 - Configuração do sistema fotovoltaico. ....	45
Figura 24 - Curvas I-V e P-V do arranjo fotovoltaico simulado com irradiação de 1000 W/m <sup>2</sup> e temperatura de 25°C. ....	46
Figura 25 - Circuito simulado no PSIM utilizando uma fonte de tensão quadrada. ...	50
Figura 26 - Formas de onda da Potência de Referência do PV e da Potência com MPPT com entrada quadrada. ....	50
Figura 27 - Imagem aproximada das Formas de onda da Potência de Referência do PV e da Potência com MPPT com entrada quadrada. ....	51
Figura 28 - Imagem aproximada das Formas de onda da Potência de Referência do PV e da Potência com MPPT com entrada quadrada. ....	51
Figura 29 - Tensão do painel fotovoltaico com entrada quadrada.....	52
Figura 30 - Corrente do painel fotovoltaico com entrada quadrada.....	52
Figura 31 - Formas de onda da Potência com MPPT com Potência na Carga com entrada quadrada. ....	53
Figura 32 - Forma de onda da Corrente no Indutor com entrada quadrada.....	53
Figura 33 - Razão Cíclica com entrada quadrada. ....	54
Figura 34 - Circuito contendo entrada senoidal para variação lenta da irradiação....	54
Figura 35 - Formas de onda da Potência de Referência do PV e da Potência com MPPT com entrada senoidal. ....	55
Figura 36 - Tensão do painel com entrada senoidal. ....	55
Figura 37 - Corrente do painel com entrada senoidal. ....	56
Figura 38 - Formas de onda da Potência com MPPT com Potência na Carga com entrada senoidal. ....	56
Figura 39 - Forma de onda da Corrente no Indutor com entrada senoidal.....	57
Figura 40 - Razão Cíclica com entrada senoidal.....	57
Figura 41 - Circuito contendo entrada em rampa para variação rápida e contínua da irradiação.....	58

Figura 42 - Formas de onda da Potência de Referência do PV e da Potência com MPPT com entrada rampa. ....	58
Figura 43 - Tensão do painel com entrada rampa.....	59
Figura 44 - Corrente do painel com entrada rampa.....	59
Figura 45 - Formas de onda da Potência com MPPT com Potência na Carga com entrada rampa. ....	60
Figura 46 - Forma de onda da Corrente no Indutor com entrada senoidal.....	60
Figura 47 - Razão Cíclica com entrada rampa. ....	61
Figura 48 - Diagrama representando a disposição experimental das fontes CC, elementos passivos e do conversor multinível conectado à rede de distribuição.....	62
Figura 49 - Formas de onda da potência de referência do painel com a potência através do MPPT, em watts, e as tensões nos capacitores $C_A$ e $C_B$ do sistema multinível , em p.u.. ....	63
Figura 50 - Formas de onda da potência de referência do painel com a potência através do MPPT em watts; tensão e corrente entregue para a rede com a tensão no link CC do módulo A - dadas em p.u.....	64
Figura 51 - Formas de onda da potência de referência do painel com a potência através do MPPT, as tensões nos capacitores $C_A$ e $C_B$ e a razão cíclica. ....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações do módulo <i>Kyocera KD210GX-LPU</i> .....	41
Tabela 2 – Painel fotovoltaico <i>Kyocera</i> simulado .....	44
Tabela 3 – Parâmetros do arranjo fotovoltaico.....	45
Tabela 4 – Especificações do projeto do conversor Boost.....	47

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BOOST	Conversor elevador de tensão
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
I-V	Corrente por tensão
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
P&O	Perturbação e Observação
PMP	Ponto de Máxima Potência
P-V	Potência por tensão
PV	<i>Photovoltaic</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RCC	<i>Ripple Correlation Control</i>
STC	<i>Standart Test Conditions</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	Justificativa	16
1.2	Objetivos	16
1.3	Organização do Trabalho	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>18</b>
2.1	Radiação solar	18
2.2	Radiação solar no Brasil	18
2.3	Efeito fotovoltaico	20
2.4	Célula fotovoltaica	20
2.5	Conexões do sistema fotovoltaico	22
2.5.1	Sistema fotovoltaico isolado (Off- Grid)	22
2.5.2	Sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica (On-Grid)	22
2.5.3	Sistema fotovoltaico centralizado conectado à rede elétrica	23
2.5.4	Sistema Híbrido	24
2.6	Sistema fotovoltaico	25
2.6.1	Módulo fotovoltaico	25
2.6.1.1	Modelo elétrico de uma célula fotovoltaica	27
2.6.1.2	Parâmetros Elétricos	29
2.6.1.3	Curva I-V	29
2.6.1.4	Influência das variações ambientais nos PV	30
2.7	Conversores Estáticos CC-CC não isolados	32
2.7.1	Conversor BOOST	33
2.8	Rastreamento do Ponto de Máxima Potência	34
2.8.1	Principais Métodos de MPPT	35
2.8.1.1	Algoritmos de MPPT Baseados em Modelo	35
2.8.1.2	Algoritmos de MPPT Baseados em Treinamento	36
2.8.1.3	Algoritmos de MPPT Heurísticos	36
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>41</b>
3.1	Metodologia	41
3.1.1	Conjunto fotovoltaico modelado no PSIM	43
3.1.2	Painel fotovoltaico simulado	44

3.1.3 Modelagem do Conversor CC-CC BOOST .....	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	49
4.1 Simulações e análise dos resultados .....	49
4.2 Interação do sistema fotovoltaico com sistema multinível .....	61
4.2.1 Simulações no PSIM utilizando o sistema fotovoltaico como fonte de energia para o sistema multinível .....	62
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	66
REFERÊNCIAS .....	68

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente a sociedade em geral está passando por um período em que a demanda de energia elétrica é cada vez maior, em virtude do crescente consumo de energia da população. Este consumo teve um crescimento exponencial com o início da Revolução Industrial do século XVIII, quando se desenvolveu a máquina a vapor utilizando a queima de combustíveis fósseis para a geração de energia. Desde então, devido ao aumento gradativo populacional no mundo, aliado aos crescentes avanços tecnológicos nas últimas décadas que cada vez mais transformam os padrões de consumo de nossa sociedade, houve um enorme aumento na demanda de energia, e para que se consiga suprir esta demanda, faz-se o uso desenfreado de combustíveis fósseis como o carvão mineral, o gás natural e principalmente o petróleo, os quais acabam definindo a matriz energética mundial.

Em dias atuais, ter a grande parcela dessa matriz energética fortemente baseada na produção de energia a partir de fontes não renováveis, traz consigo dois grandes questionamentos sobre o atual modelo energético. Um deles refere-se ao inevitável esgotamento das reservas de combustíveis fósseis, sendo insustentável em diferentes esferas como a ambiental, econômica e social (MOÇAMBIQUE, 2012). O outro diz respeito à questão ambiental, pois os resíduos originados da queima destes combustíveis, extremamente poluentes, contribuem diretamente para a degradação do meio ambiente, como por exemplo, o efeito estufa, agente responsável pelo aquecimento global, gerando assim um grande debate no mundo todo para que os países busquem através de ações e medidas, a redução das emissões de gases poluentes na atmosfera.

Dentro deste cenário, cada vez mais os países tem se empenhado em buscar novas políticas energéticas que possam diversificar sua matriz de energia, procurando investir por meio de pesquisa e desenvolvimento e, também, incentivos fiscais, formas de geração de energia limpa, que causem pouco ou nenhum dano ao meio ambiente, ou seja, fazendo o uso de energias alternativas e renováveis.

Entende-se por energia renovável, toda energia advinda de processos e recursos naturais inesgotáveis, isto é, que estão em constante regeneração na natureza. As principais fontes renováveis de energia são a energia hidráulica, solar, eólica, biomassa, geotérmica e maremotriz. Dentre estas, pode-se destacar a fonte solar fotovoltaica, que vem crescendo frente as demais energias renováveis,

detendo para si 48% de todo investimento mundial em energia sustentável nos últimos anos, de modo que, no Brasil, o setor teve uma alta de 10% em relação a 2016. O país também recentemente alcançou 1 gigawatt (GW) em projetos operacionais conectados na matriz elétrica, através da energia fotovoltaica (ABSOLAR, 2018), e deve até 2024, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), ter em torno de 1,2 milhão de geradores de energia solar instalados em casas e empresas, o que irá representar cerca de 15% da matriz energética brasileira.

### **1.1 Justificativa**

Investir na geração de energia solar fotovoltaica tem se mostrado cada vez mais viável, pois o Brasil possui um grande potencial para geração fotovoltaica, apresentando ótimos níveis de irradiação anual, principal requisito para a viabilidade do sistema. Também é preciso destacar a diminuição acentuada do preço dos módulos solares fotovoltaicos, onde teve uma queda de mais de dez vezes nos últimos dez anos (Pereira et al, 2017). Frente a isso, pode-se perceber um setor que a cada dia se mostra mais promissor e necessário, em virtude da matriz brasileira ser amplamente baseada na energia de origem hidráulica, onde a construção de novas usinas vem esbarrando cada vez mais na dificuldade de aquisição de licenças ambientais, devido aos impactos sociais e ambientais causados pelo represamento dos rios para a construção de barragens, assim também como a questão da falta de chuvas e o baixo nível dos reservatórios, sendo então preciso recorrer ao despacho das usinas termoelétricas que elevam o custo da energia.

### **1.2 Objetivos**

Os objetivos deste trabalho consistem em obter um algoritmo de controle e rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) do sistema fotovoltaico a ser aplicado como fonte primária de um sistema de conversores multiníveis, utilizando o método de Perturbação e Observação. Por se tratar de uma aplicação específica, pretende-se dimensionar o arranjo e projetar os elementos do conversor CC/CC conectado ao arranjo, bem como estabelecer a melhor taxa de variação da razão cíclica e frequência de atualização do algoritmo de modo a não prejudicar a capacidade de controle do sistema multinível.



### 1.3 Organização do Trabalho

O presente trabalho está disposto em 5 capítulos:

O capítulo 2 apresenta uma revisão de literatura sobre painéis solares fotovoltaicos, com suas formas de arranjos dos módulos fotovoltaicos, características elétricas e também suas curvas características influenciadas por fatores ambientais. Do mesmo modo, é realizado um estudo sobre as características e o funcionamento do conversor CC-CC não isolado do tipo BOOST, assim também como o que há na literatura sobre os métodos de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT).

No capítulo 3 o trabalho buscou modelar um arranjo fotovoltaico com a configuração 3x3 painéis série-paralelo utilizando os dados de placa do módulo fotovoltaico do modelo *Kyocera KD210GX-LPU*. Em seguida é feito o dimensionamento dos elementos do conversor BOOST para que seja possível elevar os níveis de tensão entregues pelo gerador fotovoltaico. Após isto, é desenvolvido um algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) baseado no método de Perturbação e Observação (P&O) integrado ao controle do conversor proposto.

Já no capítulo 4 são apresentadas e descritas as simulações realizadas através do software PSIM de todo o sistema fotovoltaico para que se demonstre a eficiência do algoritmo de MPPT. O capítulo também contém as simulações referentes à interação do sistema fotovoltaico proposto com o sistema multinível já desenvolvido no trabalho de (POZZEBON, 2013), de forma a substituir a fonte de corrente utilizada em seu trabalho para representar o conjunto de painéis fotovoltaicos.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as considerações finais deste trabalho de conclusão de curso.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Radiação solar**

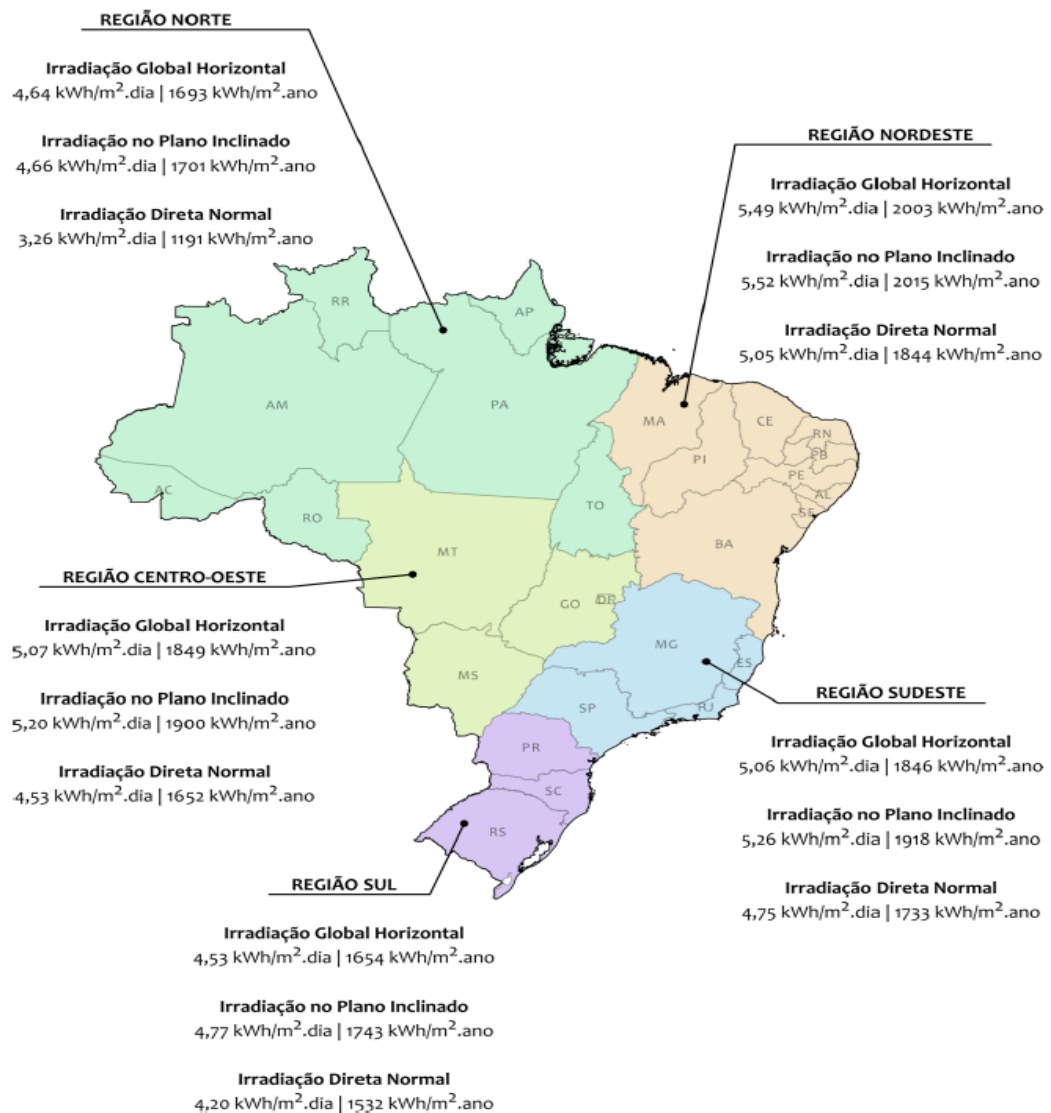
Responsável por possibilitar praticamente toda e qualquer vida na Terra, a radiação solar é considerada uma fonte de energia inesgotável, que emite cerca de  $1 \times 10^{18}$  kWh de energia solar anualmente sobre a Terra, quantidade esta que seria capaz de suprir em 10.000 vezes o consumo global de energia. À vista disso, é possível perceber o grande potencial desta fonte de energia, podendo ter um aproveitamento através de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia, por exemplo, a térmica e a elétrica, entre outras (CRESESB, 2006).

### **2.2 Radiação solar no Brasil**

O Brasil possui um grande potencial para explorar o uso da energia solar, pois mesmo apresentando características climáticas distintas nas diferentes regiões, nota-se uma boa uniformidade em relação à média anual de irradiação global, com altos níveis de irradiação solar. Dentre as cinco regiões brasileiras, a região nordeste é a mais privilegiada em relação ao potencial solar, apresentando um valor médio do total diário da irradiação global horizontal de  $5,49 \text{ kWh/m}^2$ , conforme mostra a Figura 1.

Em comparação com países como Alemanha, Itália, Portugal, Espanha e França, onde essa tecnologia já está bastante inserida, o Brasil dispõe de altos níveis de irradiação solar, assim também, como de uma baixa variabilidade de irradiação solar, mostrando assim, que o território brasileiro é extremamente favorável para a exploração desta fonte de energia, em virtude da grande disponibilidade deste recurso natural (Pereira et al., 2017).

Figura 1 - Síntese dos níveis de irradiação por região



Fonte: (Pereira et al., 2017)

### 2.3 Efeito Fotovoltaico

Observado primeiramente em 1839 pelo físico francês Edmond Becquerel, o efeito fotovoltaico é um fenômeno físico que ocorre através da transformação da energia existente na radiação luminosa em energia elétrica. Essa transformação só é possível de ser realizada em certos materiais semicondutores, que são capazes de absorver a energia contida nos fótons presentes na radiação luminosa incidente, e assim, ser transformada em eletricidade. Os materiais semicondutores têm as

ligações químicas de suas moléculas quebradas pela energia que absorvem. Desta forma, são liberadas cargas elétricas que podem ser utilizadas para a realização de trabalho. O material do qual são constituídos os dispositivos de conversão fotovoltaica, tem o efeito fotovoltaico como uma propriedade física intrínseca (ZILLES, 2012).

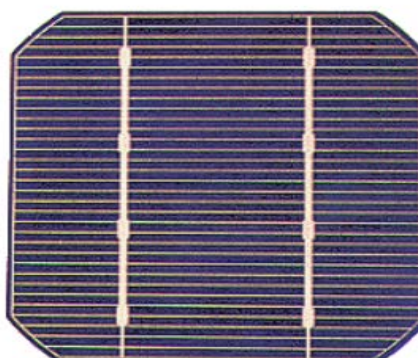
## 2.4 Célula Fotovoltaica

A geração de energia elétrica através da conversão de energia solar é feita usando um material semicondutor como elemento transformador, chamado de célula fotovoltaica ou célula solar. Os materiais semicondutores mais apropriados para a conversão da luz solar são os que produzem o maior produto corrente-tensão para a luz visível, uma vez que a grande parcela de energia entregue através dos raios de sol está contida na faixa visível do espectro (PINHO; GALDINO, 2014).

O desenvolvimento da tecnologia na produção de células e módulos fotovoltaicos pode ser classificado em três gerações (PINHO; GALDINO, 2014):

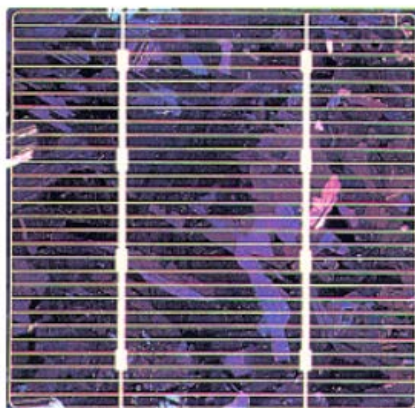
A primeira geração, que corresponde a mais de 85% das células no mercado, é dividida em duas cadeias produtivas: silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si), tecnologia consolidada e que representa o que há de mais eficiente disponível comercialmente. As Figuras 2 e 3 ilustram a primeira geração.

Figura 2 - Célula de silício monocristalino



Fonte: (CRESESB, 2006)

Figura 3 - Célula de silício policristalino



Fonte: (CRESESB, 2006)

A segunda geração, conhecida comercialmente como filmes finos, é separada em três cadeias produtivas, são elas: silício amorfo (a-Si), visto na Figura 4, disseleneto de cobre e índio (CIS) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe). A sua menor eficiência em relação à primeira geração, assim como fatores como sua vida útil e disponibilidade dos seus materiais, faz com que apresente uma menor participação no mercado.

Figura 4 - Módulo de silício amorfo



Fonte: BlueSol

Por último, a terceira geração, onde se encontra ainda em fase de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), testes e produção em pequena escala, é também dividida em três cadeias produtivas: célula fotovoltaica multijunção e célula fotovoltaica para concentração (CPV — Concentrated Photovoltaics), células sensibilizadas por

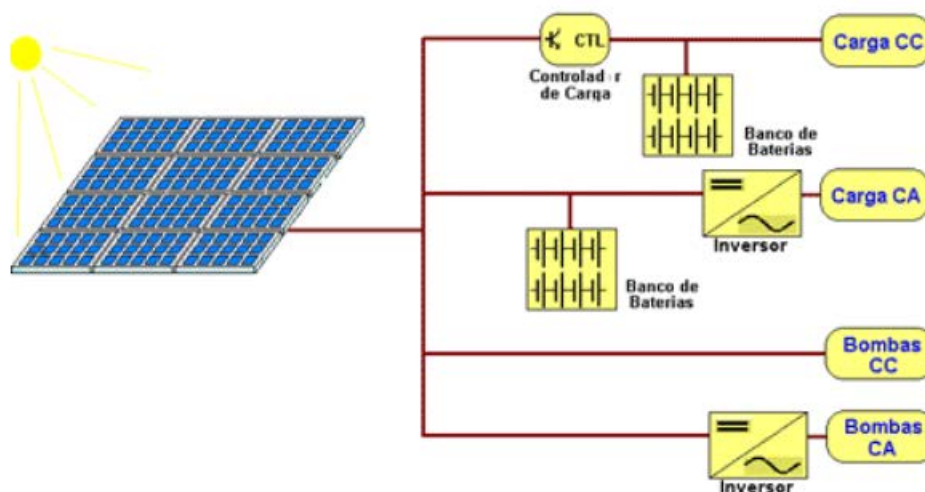
corante (DSSC – Dye-Sensitized Solar Cell) e células orgânicas ou poliméricas (OPV – Organic Photovoltaic). Apesar de estas tecnologias apresentarem um bom potencial quanto à produção de módulos com altas eficiências, seus custos em relação às demais ainda são um empecilho.

## 2.5 Conexões dos Sistemas Fotovoltaicos

### 2.5.1 Sistema Fotovoltaico Isolado (Off-Grid)

Um Sistema Fotovoltaico Isolado é aquele que não possui ligação com a rede de distribuição das concessionárias. Nesse sistema, é necessário o uso de um banco de baterias para o armazenamento de energia, de modo que nos períodos de pouca ou nenhuma radiação solar, ela deverá fornecer energia. A Figura 5 mostra os principais componentes que integram um sistema isolado, geralmente são: painel fotovoltaico, controlador de carga, banco de baterias e inversor (LAMBERTS et al.,2010).

Figura 5 - Sistema fotovoltaico isolado (Off-Grid)



Fonte: (CRESESB, 2006)

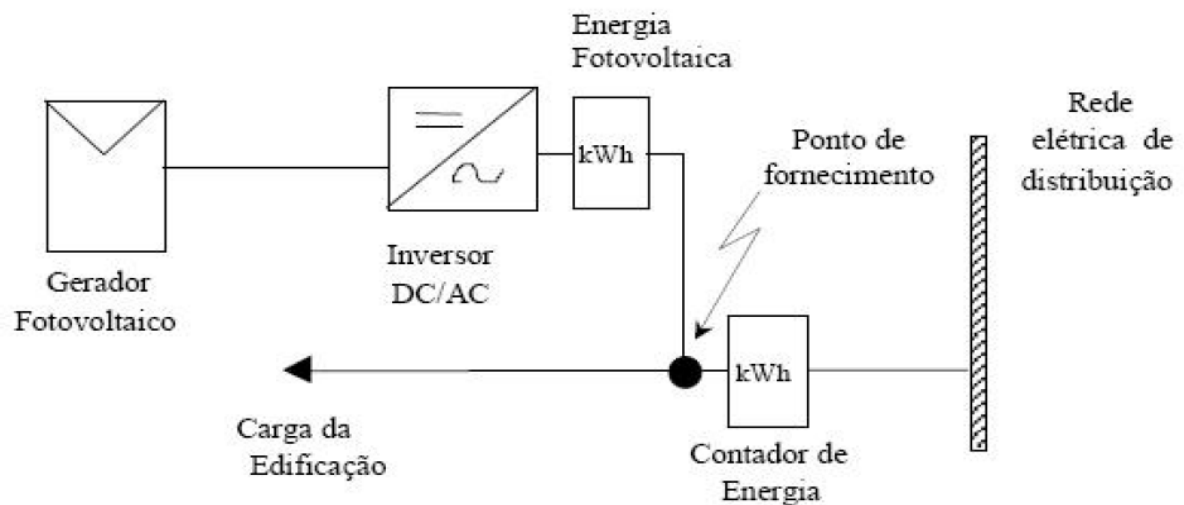
### 2.5.2 Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica (On-Grid)

Estes sistemas não necessitam de armazenamento de energia, uma vez que a energia gerada pelo sistema fotovoltaico é injetada diretamente à rede de

distribuição da concessionária, tornando-se assim uma fonte complementar ao sistema elétrico (PINHO; GALDINO, 2014).

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede podem ser divididos em duas configurações distintas: os sistemas fotovoltaicos distribuídos e os sistemas fotovoltaicos centralizados (JANNUZZI, 2009).

Figura 6 - Sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica.

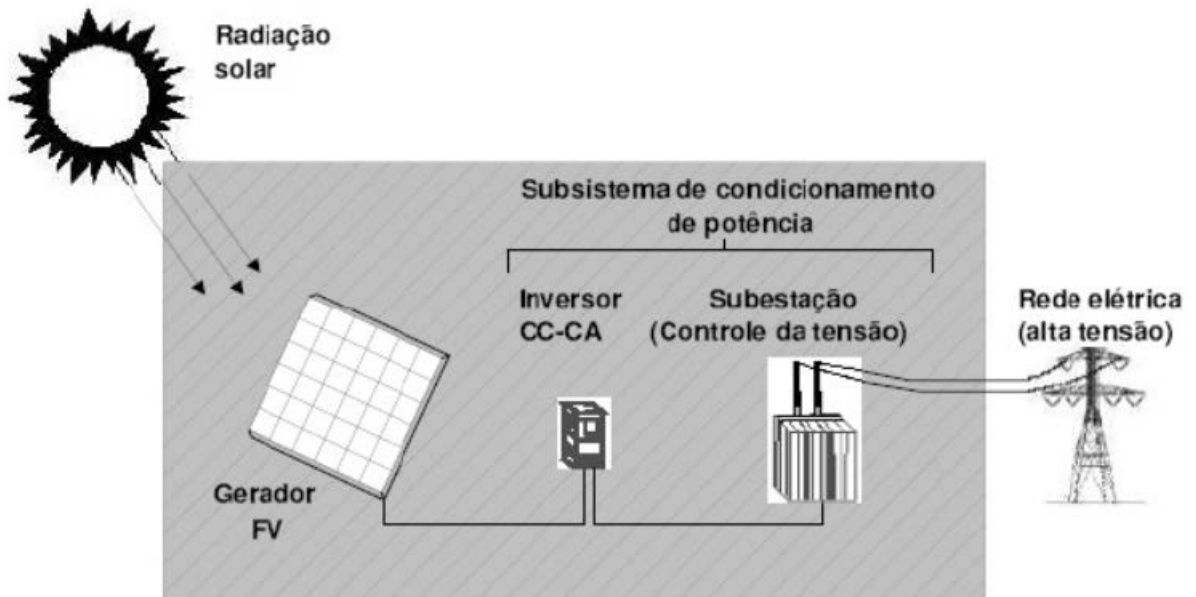


Fonte: (JANNUZZI, 2009)

### 2.5.3 Sistema Fotovoltaico Centralizado Conectado à Rede Elétrica

Sistemas centralizados conectados à rede atuam como uma usina central geradora convencional. Dessa forma, a fonte de alimentação através desse sistema não é associada com um cliente particular da eletricidade. Geralmente esse sistema é implantado em áreas distantes dos centros de consumo, requerendo assim, complexos sistemas de transmissão e distribuição tradicionais. A Figura 7 demonstra esse sistema (JANNUZZI, 2009).

Figura 7 - Sistema fotovoltaico centralizado conectado à rede elétrica.



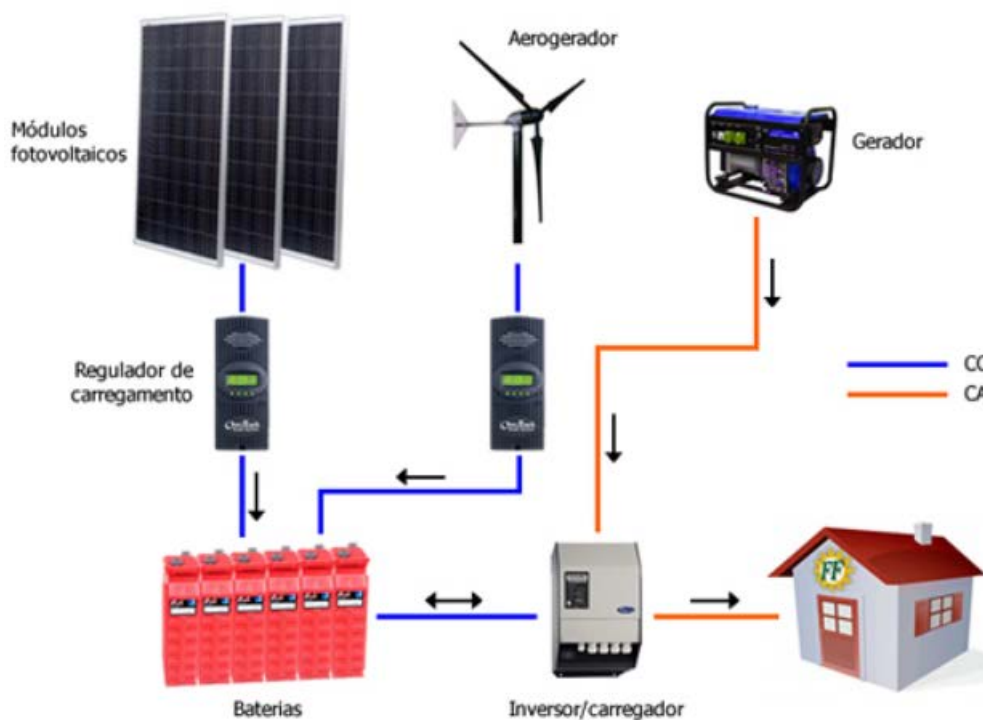
Fonte: (CÂMARA, 2011)

#### 2.5.4 Sistemas Híbridos

Um sistema fotovoltaico híbrido, não apresenta conexão com a rede convencional, operando em conjunto com outras fontes de geração de energia, tais como: turbinas eólicas, geração diesel, painéis fotovoltaicos, entre outras. Tem como maior vantagem fornecer energia, através de baterias, em dias de pouca ou nenhuma geração. Devido à integração das diferentes fontes de geração de energia, o sistema torna-se complexo na necessidade de otimizar o uso de energias. A Figura 8 ilustra o sistema (PEREIRA & OLIVEIRA, 2011; CRESESB 2006).



Figura 8 - Sistema Híbrido



Fonte: FF Solar

## 2.6 Sistema Fotovoltaico

Um sistema fotovoltaico é constituído basicamente por três partes: o arranjo dos módulos fotovoltaicos, responsável pela conversão da energia solar em elétrica; o de condicionamento de potência, composto pelo controlador de carga, inversor, conversor e seguidor do ponto de máxima potência; e por fim, o de armazenamento da energia gerada através de baterias ou outras formas de armazenamento (PINHO; GALDINO, 2014).

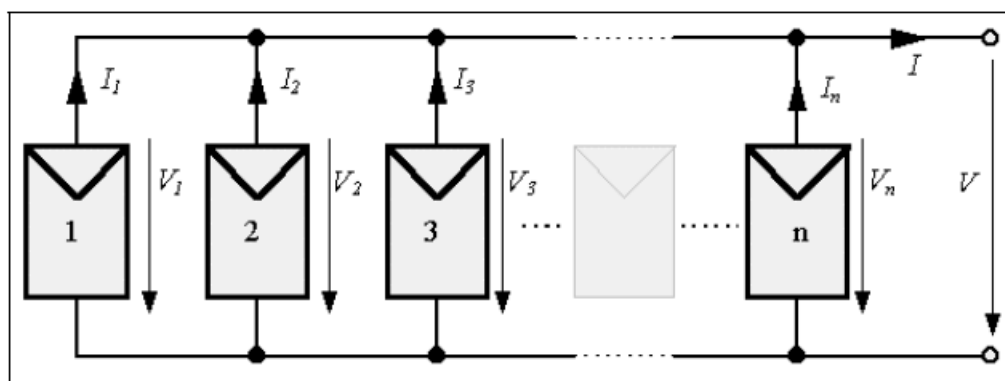
### 2.6.1 Módulo fotovoltaico

Considerado o elemento fundamental do sistema, é composto por um conjunto de células fotovoltaicas conectadas eletricamente entre si, pois isoladamente cada célula fornece níveis muito baixos de tensão e corrente.

A quantidade de células conectadas em um módulo, assim como seu arranjo, série ou paralelo, depende da tensão e corrente elétrica que se deseja obter do sistema.

Em paralelo, como mostra a Figura 9, este arranjo é muito pouco utilizado, a corrente resultante é definida pelo somatório das correntes de cada módulo e a tensão do módulo é a mesma tensão da célula. A corrente gerada pelo painel é contínua (CRESESB, 2006).

Figura 9 - Conexão de células em paralelo.

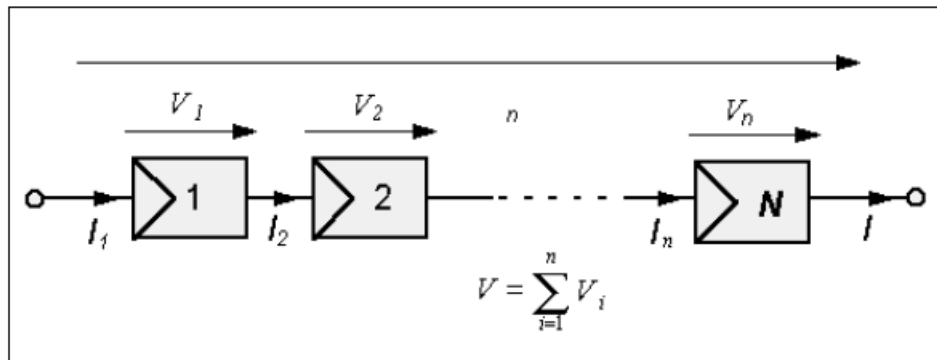


Fonte: (CRESESB, 2006)

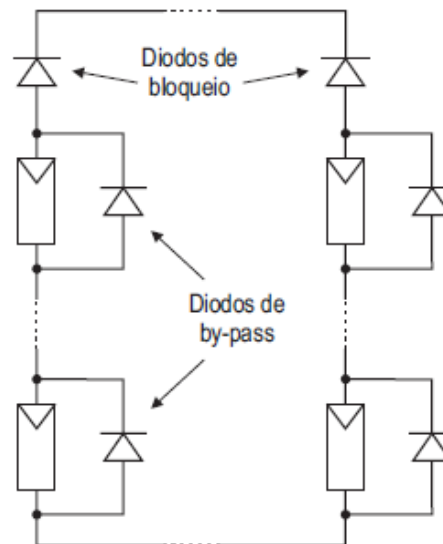
Já no arranjo em série, a mais utilizada de células fotovoltaicas em módulos, a corrente flui igualmente pelos dispositivos associados, e a tensão de saída é a soma das tensões individuais, conforme podemos ver na Figura 10. A desvantagem deste tipo de arranjo é que na ocorrência de uma menor incidência de luz em um dos dispositivos, prejudicará todo o sistema, pois a corrente fornecida fica limitada pelo dispositivo de menor corrente (VILLALVA et al., 2010).

Uma forma utilizada para contornar esse problema presente em grupos de painéis em série, chamados de cadeias (strings), é através da implantação de diodos de passagem (*bypass*) em cada um dos painéis. Sua função consiste em evitar que a corrente percorra o caminho do painel deficiente, além de proteger o mesmo contra uma possível tensão reversa aplicada em seus terminais. Outro elemento que também se faz necessário é o diodo de bloqueio, devendo ser utilizado quando houver uma ou mais cadeias conectadas em paralelo, onde cada cadeia irá possuir um diodo de bloqueio, a fim de que não percorra nos painéis uma corrente reversa (VILLALVA et al., 2010). A Figura 11 ilustra a implantação desses diodos no arranjo fotovoltaico.

Figura 10 - Conexão de células em série



Fonte: (CRESESB, 2006)

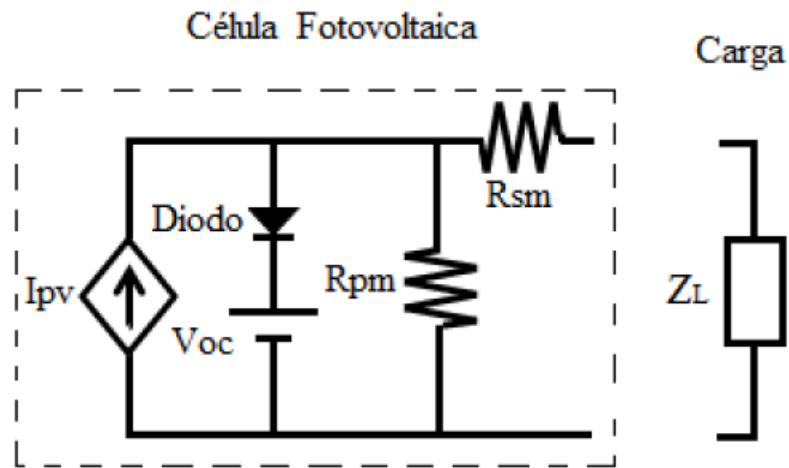
Figura 11 - Configuração do arranjo fotovoltaico com diodos de bloqueio e *by-pass*.

Fonte: (Azevedo, 2007)

### 2.6.1.1 Modelo elétrico de uma célula fotovoltaica

O modelo elétrico de uma célula fotovoltaica pode ser representado conforme mostra a Figura 12 (MINEIRO, 2004; VILELA, 2011). Este modelo visa demonstrar o circuito equivalente de uma célula fotovoltaica, de modo que a fonte de corrente controlada  $I_{pv}$  corresponde a corrente gerada através da irradiação solar que incide sobre a mesma, sendo calculada de forma proporcional a esta radiação. A resistência  $R_{pm}$  refere-se a perdas devido a resistência dos cristais de junção p-n que integram a célula. Já a resistência  $R_{sm}$  representa o contato metálico com a carga. Neste modelo, há uma fonte de tensão CC que tem a função de retratar a tensão de circuito aberto da célula ( $V_{oc}$ ) (MINEIRO, 2004; VILELA, 2011).

Figura 12 - Modelo elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica.



Fonte: (VILELA, 2011)

Devido  $R_{pm}$  geralmente possuir um valor maior que  $R_{sm}$ , é possível encontrar a corrente entregue à carga através da Equação 2.1.

$$I = I_{pv} - I_D \quad (2.1)$$

De modo que:

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{v}{m \cdot V_T}} - 1 \right) \quad (2.2)$$

Onde:

$I$  = Corrente de saída da célula fotovoltaica (A);

$I_{pv}$  = Corrente fotogerada (A);

$I_D$  = Corrente no diodo (A);

$I_0$  = Corrente inversa máxima de saturação do diodo (A);

$V$  = Tensão nos terminais da célula (V);

$V_T$  = Potencial térmico da célula (V) :  $V_T = (k \cdot T) / q$  ;

$k$  = Constante de Boltzmann ( $k = 1,38 \times 10^{-23}$ ) (J/K)

$T$  = Temperatura absoluta da célula (K);

$q$  = Carga elétrica do elétron ( $q = 1,6 \times 10^{-19}$ ) (C);

$m$  = Fator de idealidade do diodo (ideal  $m=1$ , real  $m>1$ ).

### 2.6.1.2 Parâmetros Elétricos

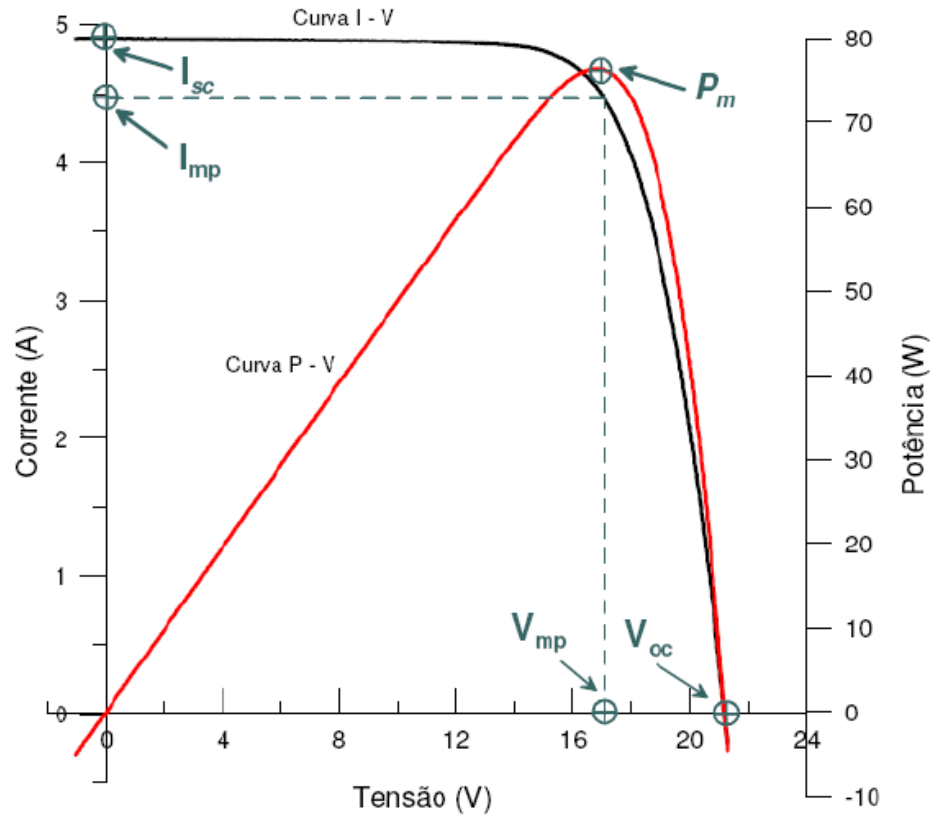
As células ou módulos fotovoltaicos possuem parâmetros elétricos fundamentais que os caracterizam, podendo estes, ser encontrados através das curvas I-V. Tais parâmetros são:

- a) Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ): é a tensão existente entre os terminais de uma célula fotovoltaica na ausência de fluxo de corrente elétrica, sendo esta a maior tensão gerada pela mesma.
- b) Corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ ): é a maior corrente que a célula fotovoltaica pode fornecer, obtida quando em seus terminais a tensão elétrica é igual a zero. A intensidade desta corrente está ligada a fatores como irradiância solar, área da célula, propriedades ópticas, sua distribuição espectral, assim também como a probabilidade de coleta dos pares elétron-lacuna formados (PINHO; GALDINO, 2014).

### 2.6.1.3 Curva I-V

Os módulos fotovoltaicos possuem a curva I-V, que representa as características elétricas não lineares de corrente-tensão, com base na tensão de circuito aberto e na corrente de curto-circuito específicos de cada um. Tais curvas são obtidas por meio de condições padronizadas como radiação de  $1000\text{W}/\text{m}^2$  e temperatura de  $25^\circ\text{C}$  e são fornecidas pelo fabricante. Por meio delas, é possível determinar uma potência, de acordo com a tensão e corrente nos pontos de máximo, como pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 - Curvas I-V e P-V.



Fonte: (GASPARIN, 2009)

#### 2.6.1.4 Influência das variações ambientais nos painéis fotovoltaicos.

##### *Variação da Irradiação*

A variação da intensidade de irradiação solar incidente sobre uma célula ou módulo fotovoltaico influencia diretamente em seu desempenho. Há uma proporcionalidade entre a irradiação e a corrente gerada pelo painel, de modo que quanto maior for a incidência de irradiação sobre ele, maior será a corrente gerada pelo mesmo, refletindo assim em um aumento da potência drenada. A variação da irradiação solar provoca poucas alterações na tensão de circuito aberto. Através da Equação 2.3, podemos relacionar a corrente de curto-circuito da célula com a irradiação incidente sobre a mesma (PINHO; GALDINO, 2014). A Figura 14 nos mostra os efeitos da variação de irradiação sobre o módulo fotovoltaico.

$$I_{SC} = I_{SC_{STC}} \times \frac{G}{1000} \quad (2.3)$$

De modo que:

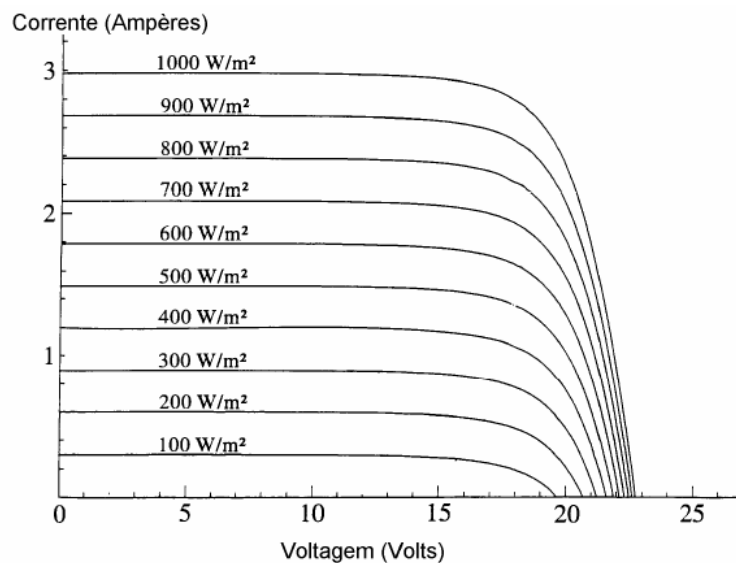
$I_{SC}$  (A) = corrente de curto-circuito do módulo, para uma irradiância  $G$  e uma temperatura de 25°C;

$I_{SC_{STC}}$  (A) = corrente de curto-circuito do módulo conforme *STC* (*Standard Test Conditions*);

$G$  ( $W/m^2$ ) = irradiância incidente sobre o módulo;

1000 ( $W/m^2$ ) = irradiação padrão conforme *STC*.

Figura 14 - Alteração na curva I-V do módulo fotovoltaico devido à variação de irradiação a uma temperatura constante.

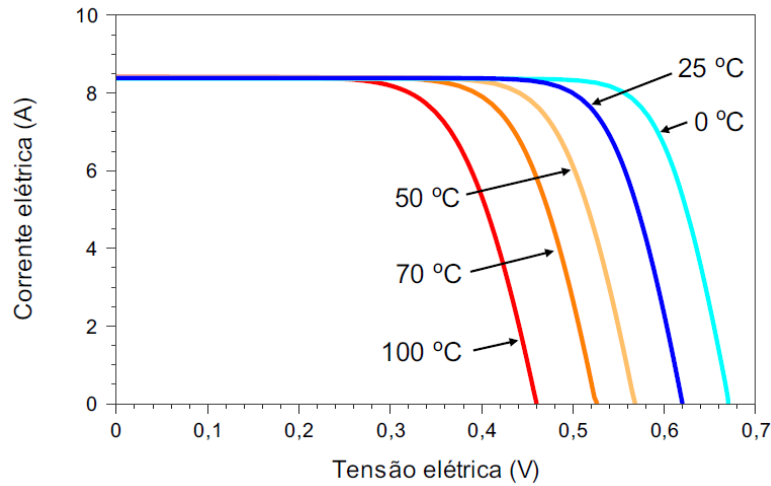


Fonte: (CRESESB, 2006)

### *Variação da temperatura*

Diferentemente da irradiação, a variação da temperatura pouco influencia na intensidade da corrente gerada pelo painel, o que não ocorre com a tensão que diminui consideravelmente com o aumento da temperatura da célula e, conseqüentemente, reduz a potência fornecida, como mostra a Figura 15.

Figura 15 - Alteração na curva I-V do módulo fotovoltaico devido à variação de temperatura a uma irradiação constante.



Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014)

## 2.7 Conversores Estáticos CC-CC não isolados

A geração de energia através de painéis fotovoltaicos é totalmente dependente de fatores climáticos como irradiação e temperatura, assim também como a carga efetiva nele conectada. Como não é possível termos domínio sobre as questões meteorológicas, o controle então é desenvolvido na variação da carga dinâmica vista pelo painel, podendo ser feito através do uso de conversores CC-CC (MOÇAMBIQUE, 2012).

Os conversores CC-CC são constituídos por dispositivos semicondutores de potência, transistores e diodos, que atuam no circuito como interruptores e, também, por elementos passivos, como indutores e capacitores, que permitem ter um controle sobre o fluxo de potência da fonte de entrada para uma fonte de saída (BARBI; MARTINS, 2000). São utilizados quando se procura obter uma tensão CC de saída de valor diferente da tensão CC de entrada, entregue por baterias ou painéis fotovoltaicos, podendo essa tensão de saída ser maior (conversor Boost), menor (conversor Buck) ou controlada para valores abaixo ou acima da tensão de entrada (conversor Buck-Boost). Nesses conversores, há uma grandeza fundamental, responsável pelo controle do fluxo de potência do conversor, que é a razão cíclica (D). Há também outro parâmetro que sempre está em função da razão cíclica: o



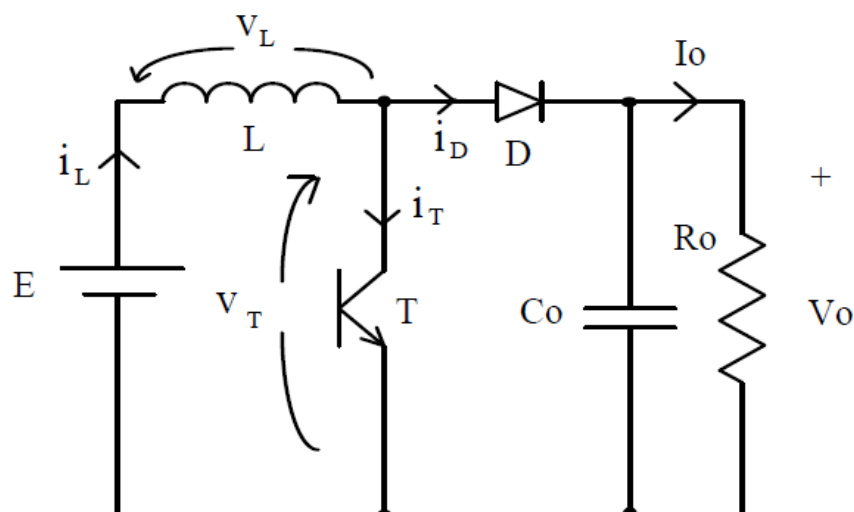
ganho estático ( $G$ ), encontrado através da razão da tensão de saída sobre a tensão de entrada (STEIN, 2012). Conversores CC-CC são fundamentais para um melhor rendimento de um sistema fotovoltaico, pois é possível implementar neles um sistema de controle que busca extrair do painel fotovoltaico a máxima potência que está sendo gerada, através de um mecanismo de controle chamado de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) (PINHO; GALDINO, 2014).

Existem diversas topologias de conversores CC-CC não isolados, como citado anteriormente, mas somente será dada ênfase ao conversor tipo Boost, pois é o conversor que será utilizado no presente trabalho.

### 2.7.1 Conversor Boost

O conversor Boost é um conversor CC não isolado elevador de tensão, caracterizado por ter uma tensão média de saída superior ou igual à tensão de entrada. É considerado relativamente simples, quando comparado a outros conversores, devido à pequena quantidade de elementos em seu circuito, contendo apenas um indutor, uma chave, um diodo e um capacitor. Possui uma indutância em série com a fonte de alimentação, fazendo com que a mesma haja como uma fonte de corrente. Em paralelo com a fonte de entrada e a saída, a chave é acionada periodicamente, de modo a elevar a tensão média de saída através da energia da fonte e do indutor (BARBI; MARTINS, 2000). O circuito elétrico do conversor Boost é visto na Figura 16.

Figura 16 - Circuito elétrico do conversor Boost.



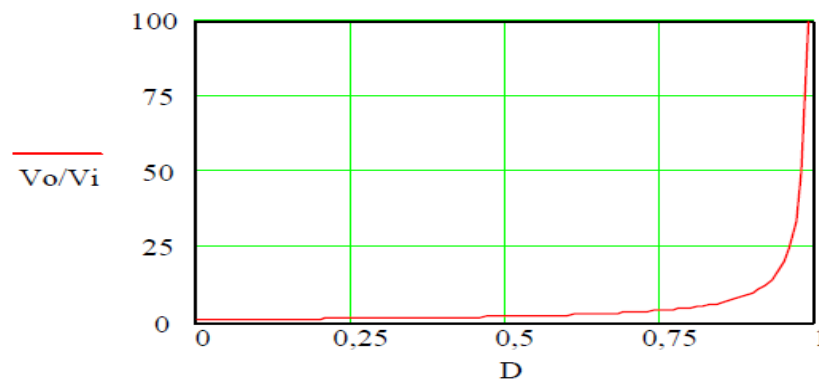
Fonte: (POMÍLIO, 2014)

No momento em que a chave (T) é acionada, a tensão da fonte de entrada (E) é aplicada ao indutor (L), fazendo com que o mesmo fique magnetizado e, também, que o diodo fique reversamente polarizado, pois  $V_o > E$ . O indutor depois de armazenar energia, irá entregá-la ao capacitor (C) e à carga no momento em que a chave é desligada (POMÍLIO, 2014). Como o circuito de saída apresenta um diodo conectado em série, o fluxo de potência é feito somente no sentido fonte-carga (LOPES, 2006).

A Equação 2.4 representa o ganho do conversor Boost em função da razão cíclica.

$$\frac{V_o}{E} = G = \frac{1}{1-D} \quad (2.4)$$

Figura 17 - Variação da tensão de saída em função da razão cíclica.



Fonte: (INEP, 2001).

## 2.8 Rastreamento do ponto de máxima potência

Os painéis fotovoltaicos quando comparados a outras formas de geração de energia apresentam uma menor eficiência de conversão. A eficiência do sistema está fortemente relacionada a fatores climáticos, como irradiação e temperatura. A corrente entregue pelo módulo fotovoltaico é diretamente proporcional à irradiação solar incidida sobre ele, sendo pouco influenciada pela temperatura. De maneira diferente se comporta a tensão, que decresce consideravelmente com o aumento da temperatura, diminuindo assim a potência gerada (PINHO; GALDINO, 2014).

Dessa forma, em uma célula, módulo ou painel fotovoltaico existe um ponto específico de operação para determinados valores de irradiação e temperatura em que a potência entregue é máxima, chamado de Ponto de Máxima Potência (PMP). Então para que o sistema opere nesse ponto, independente das variações

instantâneas de irradiação e temperatura, assim como na carga, utiliza-se técnicas de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) para que se procure continuamente o ponto de máxima potência. Estas técnicas consistem na implantação de algoritmos de controle no conversor que recebe a energia gerada dos módulos fotovoltaicos, e tem como função rastrear o ponto de operação em que a potência drenada do painel é máxima, ou seja, o ponto da curva I-V em que o produto I-V é máximo. O uso destas técnicas pode proporcionar um ganho de energia através do módulo de 15 a 30% (STEIN, 2012; CAVALCANTI et al., 2007).

### **2.8.1 Principais Métodos de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*)**

A seguir serão abordados os principais algoritmos usados para o rastreamento do ponto de máxima potência, porém deve-se destacar que a utilização de tais algoritmos é destinada a aplicação em situações em que o conjunto fotovoltaico apresenta apenas um máximo de potência. Sabe-se que na prática esta situação geralmente não ocorre em sistemas fotovoltaicos reais constituídos por conjuntos de painéis fotovoltaicos. Contudo, tais métodos são usados como referência para o desenvolvimento de métodos de MPPT onde existem situações não homogêneas de operação e, apesar de serem considerados relativamente simples, a sua implantação é muito importante para o aumento da eficiência em sistemas onde não ocorram efeitos de sombreamento parcial (VILLALVA et al., 2010).

No que se refere aos métodos para o desenvolvimento de algoritmos de controle em conversores CC, diversos trabalhos já foram demonstrados e simulados. No entanto, podem ser divididos em três principais classes: algoritmos baseados em modelo, algoritmos baseados em treinamento e algoritmos MPPT heurísticos (MOÇAMBIQUE, 2012).

#### **2.8.1.1 Algoritmos de MPPT Baseados em Modelo**

Para o desenvolvimento desses algoritmos, há a necessidade de um modelo matemático para que se possa fazer o cálculo da tensão ou corrente do ponto de máxima potência, assim como os métodos de aproximação do PMP em relação às características do painel fotovoltaico. Nesta classe, existem métodos que podem ser desenvolvidos de uma maneira mais simples, por exemplo, o método de Fração da

tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) e o método da Fração da corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ), onde experimentalmente é determinada uma constante de proporcionalidade entre o PMP e o  $V_{oc}$  ou  $I_{sc}$ . Há também métodos mais complexos como o método linear de coordenadas reorientadas

### **2.8.1.2 Algoritmos de MPPT baseados em Treinamento.**

Nesta classe se encontram métodos que dependem do uso de microcontroladores ou processadores digitais de sinais para sua realização, tornando sua aplicação mais custosa em relação às demais técnicas. São considerados métodos com uma maior rapidez e exatidão, como também, não necessitam de um conhecimento minucioso do sistema fotovoltaico, nem de uma descrição rigorosa para obtenção de modelos matemáticos. Estão contidos neste grupo, algoritmos que se baseiam em inteligência artificial, por exemplo, por redes neurais ou lógica *fuzzy*.

### **2.8.1.3 Algoritmos de MPPT Heurísticos**

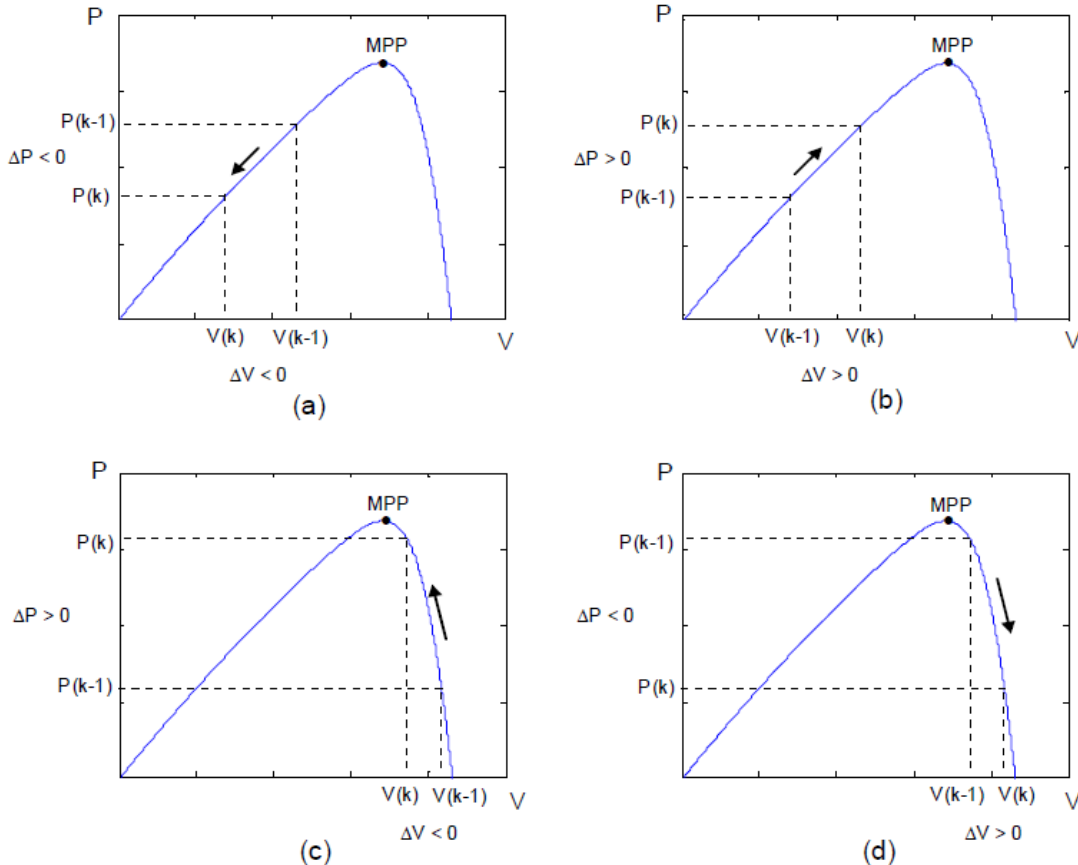
Aqui se encontram os métodos em que o desenvolvimento do algoritmo depende das medidas de tensão e corrente obtidos do painel fotovoltaico, para que então se decida qual procedimento se adote com relação à variável de controle, ou seja, prover um aumento ou diminuição da mesma. Como vantagem aos demais métodos, dispensa um conhecimento prévio das características do painel. Nesta classe, há métodos bastante dispendiosos, como a técnica baseada no controle da correlação da ondulação do chaveamento do conversor (*RCC, Ripple Correlation Control*). No entanto, nesta classe se encontram dois dos métodos mais utilizados em MPPT, considerados simples, mas bastante confiáveis, o método de Condutância Incremental e o método de Perturbação e Observação, o qual será analisado de forma mais detalhada, devido a sua escolha para a realização deste trabalho.

#### *Método Perturbação e Observação (P&O)*

Considerado um dos métodos mais utilizados de MPPT, devido a sua fácil implementação e bom desempenho, o método de Perturbação e Observação

consiste, como o próprio nome indica, causar uma perturbação na tensão operante nos terminais do arranjo fotovoltaico em um dado sentido, para então observar qual o comportamento da sua potência de saída. Caso a potência aumente, a perturbação deverá ser mantida no mesmo sentido, senão deve-se perturbar o sistema no sentido contrário. Este procedimento se repete periodicamente, inclusive quando o ponto de máxima potência (PMP) é encontrado, fazendo então com que a tensão operante oscile ao redor do PMP em regime permanente, diminuindo assim a sua eficiência. Uma forma de atenuar esta oscilação é diminuindo o tamanho da perturbação, entretanto aplicar perturbações muito pequenas, acabam tornando o processo de rastreamento do PMP mais lento, prejudicando sua eficiência nos momentos em que houver mudanças climáticas bruscas. Abaixo são mostrados quatro casos possíveis para se alterar a potência em um conjunto fotovoltaico, sob uma determinada condição climática, conforme pode ser vista na Figura 18 (SEGUEL, 2009).

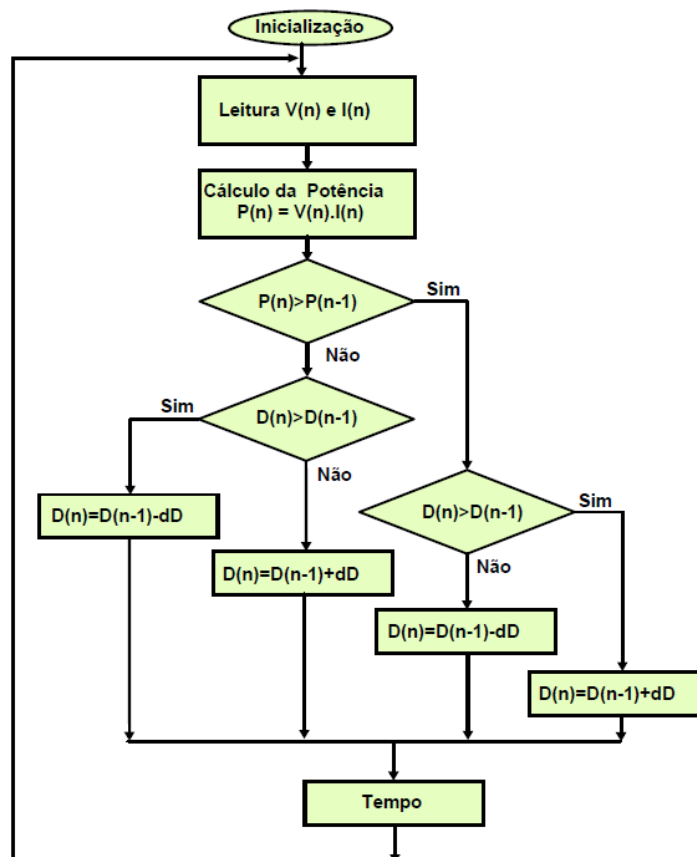
Figura 18 - Quatro casos possíveis para alteração do MPP.



Fonte: (SEGUEL, 2009)

Este método de MPPT também permite utilizar a razão cíclica de um conversor CC-CC como variável de controle. De modo similar ao que ocorre com a tensão operante nos terminais do painel, busca-se fazer a leitura de tensão e corrente para se calcular a potência em um determinado instante  $k$ , e então seja possível comparar com o valor de potência fornecido no instante  $k-1$ , encontrando uma variação de potência  $\Delta P = P_K - P_{K-1}$ . Conforme o sinal do valor  $\Delta P$  encontrado, age-se sobre a razão cíclica do conversor, em busca de variações positivas de potência ( $\Delta P > 0$ ). Dessa forma, depois de alterar a razão cíclica do conversor, caso consiga uma variação da potência maior que zero, continua-se alterando a razão cíclica com o mesmo sentido, podendo ser aumentada ou diminuída, dependendo de como foi a última perturbação. Caso seja obtido  $\Delta P < 0$  após variar a razão cíclica, deve-se alterá-la no sentido contrário ao anterior. Através dessas modificações na razão cíclica, consegue-se alterar a tensão de saída e, conseqüentemente, alterar a potência extraída do conjunto fotovoltaico pelo conversor, conforme ilustra a Figura 19 (STEIN, 2012).

Figura 19 - Fluxograma do método P&O.



Fonte: (PACHECO, 2012)

### *Método da Tensão Constante*

Considerado um método simples de ser implementado, em razão da necessidade de análise de apenas um parâmetro, este método busca fazer com que o módulo fotovoltaico trabalhe com uma determinada tensão escolhida como referência, ou seja, a tensão encontrada no ponto de máxima potência. Assim, procura-se acompanhar a tensão gerada pelo módulo fotovoltaico com relação à tensão de referência, de modo a atuar no conversor mudando sua razão cíclica, para que então se consiga encontrar a tensão do ponto de máxima potência. Sabe-se que o funcionamento dos painéis fotovoltaicos está intrinsecamente ligado a questões climáticas, onde fatores como variação de radiação e temperatura alteram significativamente sua eficiência. Para um melhor aproveitamento quanto à utilização deste método, devem-se buscar situações em que o painel não esteja exposto a grandes variações de temperatura, uma vez que as suas variações afetam profundamente a tensão do PMP, diferentemente da radiação que pouco interfere nesta questão (STEIN, 2012).

### *Método da Condutância Incremental*

Dentre os métodos baseados no princípio de perturbação e observação, é considerado como um dos mais eficazes, uma vez que seu desenvolvimento buscou suprir algumas limitações do método de P&O, buscando um melhor desempenho em regime permanente, como também uma resposta mais rápida quanto às variações repentinas de radiação solar (VILLALVA et al., 2010).

É baseado na derivada da curva P-V dos painéis fotovoltaicos. No ponto de máxima potência (PMP) a derivada é zero, à esquerda da curva é positiva, e à direita da curva é negativa.

O método baseia-se na elaboração de um algoritmo que compare a condutância

incremental,  $\frac{dI}{dV}$ , com a condutância instantânea  $\frac{I}{V}$ .

A localização do PMP é expressa pela Equação 2.5.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{d(I)}{dV} = 0 \quad (2.5)$$

O primeiro passo consiste em ler os valores atuais de tensão e corrente. Em seguida são calculadas as condutâncias para então se fazer a análise. Caso  $\frac{d(I)}{d(V)} = -\frac{I}{V}$ , o ponto de operação encontra-se exatamente no PMP. Na condição de a derivada ser positiva, estando ao lado esquerdo da curva, ou negativa, estando ao lado direito da curva, será feito então o ajuste da tensão de referência por meio do seu incremento ou decremento. Mesmo apresentando uma boa eficiência, o método acaba sendo menos utilizado do que o método de P&O, devido a um maior consumo de recursos no processamento dos seus cálculos, tornando assim mais complexa sua implementação (CALAÇA, 2016).



### 3 DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 Metodologia

Inicialmente para que este trabalho fosse desenvolvido, escolheu-se um módulo fotovoltaico para a modelagem do arranjo fotovoltaico no software PSIM. Desse modo, após uma análise das suas características, como suas curvas P-V e I-V, potência máxima nominal, tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito e também, seus coeficientes de temperatura, optou-se por escolher um módulo fotovoltaico do modelo *Kyocera KD210GX-LPU*. Os dados presentes no seu *datasheet* podem ser visualizados na Tabela 1.

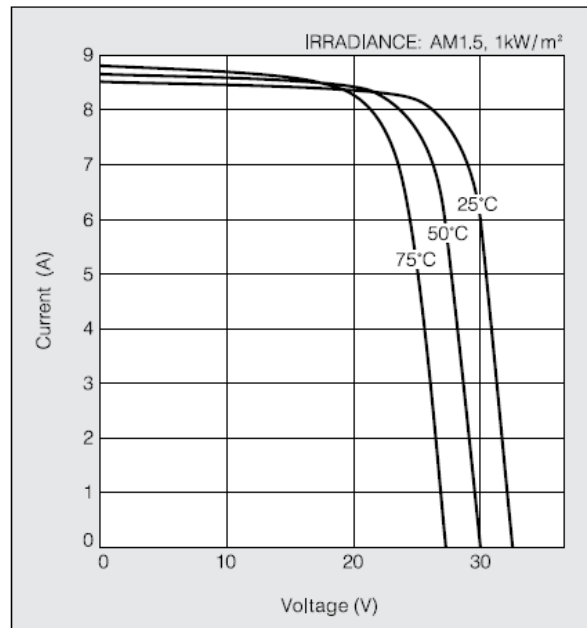
Tabela 1 – Especificações do módulo *Kyocera KD210GX-LPU*.

Grandeza	Valor
Número de Células	54
Potência Máxima Nominal	210 W
Tensão de Operação ( $V_{pmax}$ )	26.6 V
Corrente de Operação ( $I_{pmax}$ )	7.90 A
Tensão de Circuito Aberto ( $V_{ca}$ )	33.2 V
Corrente de Curto-Circuito ( $I_{cc}$ )	8.58 A
Coeficiente de Temperatura de $V_{ca}$	- 0.120 V/°C
Coeficiente de Temperatura de $I_{cc}$	$5.15 \times 10^{-3}$ A/°C

Fonte: (KYOCERA, 2018)

As curvas características do módulo fotovoltaico disponibilizadas pela empresa fabricante *Kyocera* podem ser vistas abaixo. Na Figura 20, é mostrado o gráfico correspondente às curvas I-V, onde é mantida uma irradiação constante de  $1000 \text{ W/m}^2$ , variando-se a temperatura.

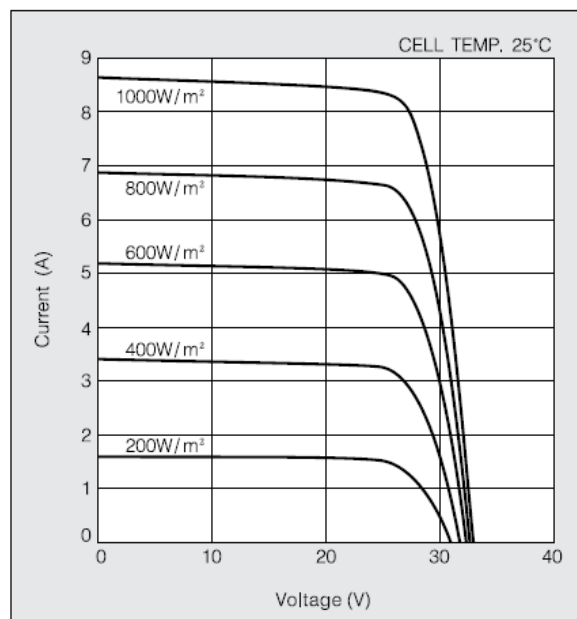
Figura 20 - Curvas I-V do módulo fotovoltaico KD210GX-LPU, com variação da temperatura.



Fonte: (KYOCERA, 2018)

Já na Figura 21, é mostrado o gráfico que corresponde às curvas I-V, onde é mantida uma temperatura constante de 25°C, variando-se os níveis de irradiação.

Figura 21 - Curvas I-V do módulo fotovoltaico KD210GX-LPU, com variação da irradiação.



Fonte: (KYOCERA, 2018)

### 3.1.1 Conjunto fotovoltaico modelado através do software PSIM.

O modelamento do painel fotovoltaico foi desenvolvido utilizando o software PSIM, sendo este uma importante ferramenta para a realização de simulações de circuitos elétricos. O software disponibiliza duas formas de elaboração de sistemas fotovoltaicos, sendo uma o modelo funcional (*functional model*), em que os parâmetros do painel vêm previamente definidos, e outro, o modelo físico (*physical model*), o qual foi utilizado para o desenvolvimento do trabalho, onde é possível inserir os parâmetros de um painel disponível comercialmente, sendo possível fazer simulações com diferentes condições de irradiação e temperatura. Neste modelo, o software possibilita visualizar a forma como ele interage com os dados nele inseridos, calculando novos parâmetros, assim como os valores das constantes utilizadas.

A Figura 22 mostra a interface do modelo físico, onde os diversos parâmetros podem ser alterados para o modelamento do arranjo fotovoltaico desejado.

Figura 22 - Inserção de parâmetros utilizando o modelo físico do PSIM.

The image shows a screenshot of the 'Solar Module (physical model)' dialog box in PSIM. The dialog has three tabs: 'Parameters', 'Other Info', and 'Color'. The 'Parameters' tab is active. The title bar reads 'Solar Module (physical model)' and there is a 'Help' button. The main area contains a list of parameters with input fields and 'Display' checkboxes. The parameters and their values are as follows:

Parameter	Value	Display
Name	SCP1	<input type="checkbox"/>
Number of Cells Ns	36	<input type="checkbox"/> ▼
Standard Light Intensity S0	1000	<input type="checkbox"/> ▼
Ref. Temperature Tref	25	<input type="checkbox"/> ▼
Series Resistance Rs	0.008	<input type="checkbox"/> ▼
Shunt Resistance Rsh	1000	<input type="checkbox"/> ▼
Short Circuit Current Isc0	3.8	<input type="checkbox"/> ▼
Saturation Current Is0	2.16e-8	<input type="checkbox"/> ▼
Band Energy Eg	1.12	<input type="checkbox"/> ▼
Ideality Factor A	1.2	<input type="checkbox"/> ▼
Temperature Coefficient Ct	0.0024	<input type="checkbox"/> ▼
Coefficient Ks	0	<input type="checkbox"/> ▼

Fonte: (PSIM, 2018).

### 3.1.2 Painel fotovoltaico simulado

Para a realização das simulações no software PSIM dos painéis fotovoltaicos, foram utilizados os dados presentes no *datasheet* do painel fotovoltaico do modelo *Kyocera KD210GX-LPU*, onde parâmetros como resistência shunt, fator de idealidade e banda de energia, que não constavam nos dados de placa do painel, foram usados os valores pré-definidos no software. As simulações foram feitas com os mesmos valores de temperatura e irradiação do *datasheet*, ou seja, com uma temperatura de 25°C e uma irradiação de 1000 W/m<sup>2</sup>. Os resultados da simulação do painel podem ser vistos na Tabela 2.

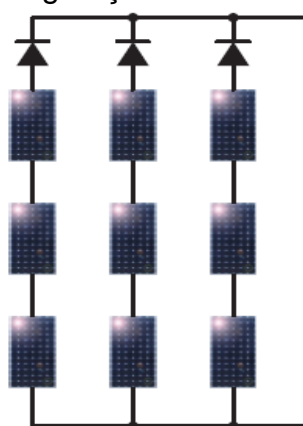
Tabela 2 – Painel fotovoltaico Kyocera simulado.

Grandeza	Valor
Número de Células	54
Potência Máxima Nominal	198.58 W
Tensão de Operação ( $V_{pmax}$ )	24.97 V
Corrente de Operação ( $I_{pmax}$ )	7.95 A
Tensão de Circuito Aberto ( $V_{ca}$ )	33.2 V
Corrente de Curto-Circuito ( $I_{cc}$ )	8.58 A
Corrente de saturação ( $I_s$ )	$1.93 \times 10^{-8}$ A
Resistência Série ( $R_s$ )	0.0090 $\Omega$
Resistência Shunt ( $R_{sh}$ )	1000 $\Omega$

Fonte: Autor

A configuração do gerador fotovoltaico proposto neste trabalho foi feita através de um arranjo 3x3 painéis, ou seja, nove painéis conectados em série-paralelo, conforme mostra a Figura 23.

Figura 23 - Configuração do sistema fotovoltaico.



Fonte: Autor

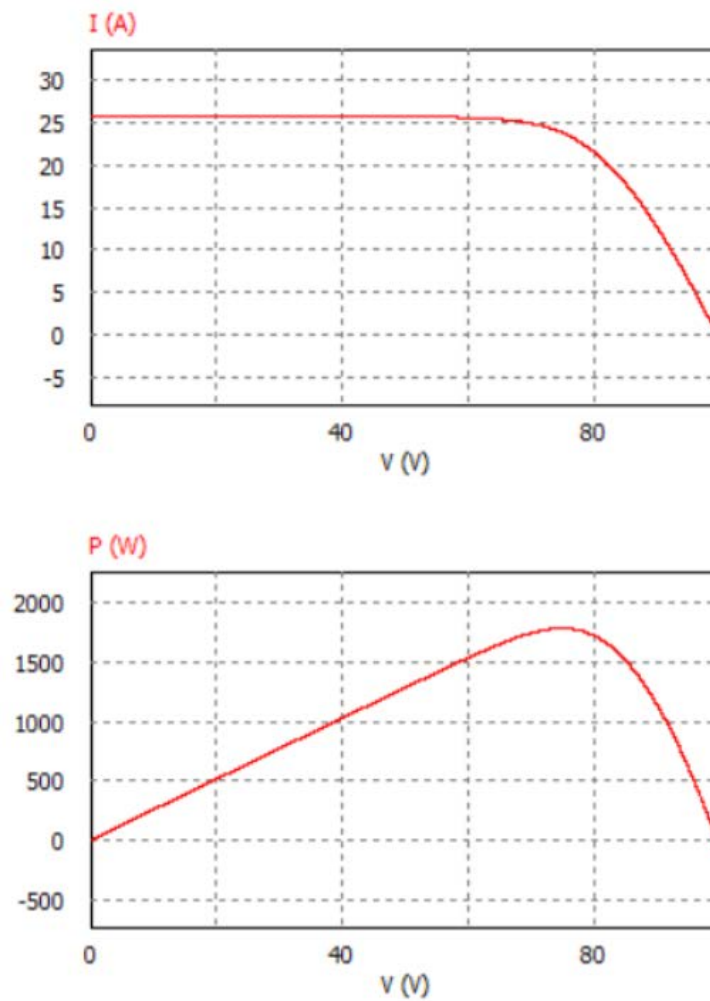
O resultado final dessas associações série-paralelo, por meio do modelo físico do PSIM (*physical model*), foi representado pelo software através de um único painel contendo os parâmetros equivalentes ao arranjo 3x3 do sistema fotovoltaico, com uma potência nominal instalada de 1890 W, como mostra a Tabela 3. A resistência shunt dos painéis resultou em 3000 ohms, em decorrência das três cadeias de painéis estarem conectadas em paralelo. Os parâmetros do painel resultante, simulados a uma temperatura de 25°C e irradiação de 1000W/m<sup>2</sup>, podem ser observados na Tabela 3. As curvas referentes a I-V e P-V do arranjo fotovoltaico 3x3 painéis são apresentadas na Figura 24.

Tabela 3 - Parâmetros do arranjo fotovoltaico.

Grandeza	Valor
Potência Máxima Nominal	1787.50 W
Tensão de Operação ( $V_{pmax}$ )	74.93 V
Corrente de Operação ( $I_{pmax}$ )	23.986 A
Tensão de Circuito Aberto ( $V_{ca}$ )	99.6 V
Corrente de Curto-Circuito ( $I_{cc}$ )	25.74 A
Corrente de saturação ( $I_s$ )	$5.78 \times 10^{-8}$ A
Resistência Série ( $R_s$ )	0.0030 $\Omega$
Resistência Shunt ( $R_{sh}$ )	3000 $\Omega$

Fonte: Autor

Figura 24 - Curvas I-V e P-V do arranjo fotovoltaico simulado com irradiação de  $1000 \text{ W/m}^2$  e temperatura de  $25^\circ\text{C}$ .



Fonte: Autor

### 3.1.3 Modelagem do conversor CC-CC BOOST

Para a realização do dimensionamento dos componentes do conversor, é necessário primeiramente determinar os valores de operação do mesmo. As especificações do projeto estão contidas na Tabela 4.

Tabela 4- Especificações do projeto do conversor Boost.

Grandeza	Valor
Potência Máxima Nominal ( $P_{max}$ )	1787.50 W
Tensão de Operação ( $V_{pmax}$ )	74.93 V
Corrente de Operação ( $I_{pmax}$ )	23.98 A
Tensão na Carga ( $V_c$ )	180 V
Ondulação Máxima da Tensão de Entrada ( $\Delta V_{in}$ )	0,2 %
Ondulação Máxima da Corrente no Indutor ( $\Delta i_L$ )	5 %
Frequência de Chaveamento ( $F_c$ )	15 kHz

Fonte: Autor.

De acordo com a Equação 3.1, pode se encontrar a razão cíclica do conversor.

$$D = 1 - \frac{74,83}{180} = 0,583 \quad (3.1)$$

Relacionando a potência nominal com a tensão de saída, conforme mostra a Equação 3.2, encontra-se a resistência de carga:

$$R = \frac{180^2}{1890} = 17,14 \Omega \quad (3.2)$$

A corrente média de saída é expressa pela Equação 3.3:

$$I_0 = \frac{180}{17,14} = 10,3A \quad (3.3)$$

Para o dimensionamento do capacitor de entrada do conversor, utilizou-se a Equação 3.4, a qual considera o valor da máxima ondulação de tensão de entrada (COELHO et al., 2008)(BARBI; MARTINS, 2006). Já para o capacitor de saída, empregou-se um capacitor de 1360 $\mu$ F, possuindo este o mesmo valor utilizado no trabalho de (POZZEBON, 2012).

$$C = \frac{I_0}{4 \cdot F_C \cdot \Delta V_{in} \cdot V_{in}} \quad (3.4)$$

Assim:

$$C = \frac{10,3}{4.15 \cdot 10^3 \cdot 0,002.75} = 1144\mu F \quad (3.5)$$

O projeto do indutor do conversor, foi realizado de acordo com a Equação 3.8 utilizando a corrente média do indutor, encontrada através da Equação 3.6, sendo empregado aqui a frequência de chaveamento do circuito (COELHO et al., 2008) (BARBI; MARTINS, 2006).

$$I_L = \frac{V_0 \cdot I_0}{V_{in}} \quad (3.6)$$

Dessa forma:

$$I_L = \frac{180 \cdot 10,3}{75} = 24,72A \quad (3.7)$$

$$L = \frac{V_i D}{F_C (\Delta i_L \cdot I_L)} \quad (3.8)$$

Logo:

$$L = \frac{75 \cdot 0,58}{15 \cdot 10^3 (0,05 \cdot 24,72)} = 2,35mH \quad (3.9)$$



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Simulações e análise dos resultados

As simulações no software PSIM foram realizadas utilizando os parâmetros definidos anteriormente nas Seções 3.1.2 e 3.1.3, para o arranjo dos painéis fotovoltaicos e também, para o conversor Boost.

O conjunto de painéis fotovoltaicos desenvolvido com uma configuração 3x3 painéis série-paralelo, fornece sinais de tensão e corrente em sua saída, que são captados por sensores de tensão e corrente. Esses sinais são recebidos por um bloco, onde foi implementado em linguagem C, o algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência, utilizando o método de Perturbação e Observação, sendo feita em seguida a comparação do seu sinal de saída com uma onda triangular com frequência fixada em 15kHz, de forma a atuar no IGBT do conversor Boost através de uma modulação PWM, fazendo com que então a razão cíclica seja diminuída ou aumentada, conforme o MPPT receba uma variação dos sinais de corrente e tensão oriundas do painel.

No MPPT foram definidos, os valores de 0,1 e 0,85, referentes aos limites mínimo e máximo, respectivamente, para a razão cíclica. O passo utilizado no seu incremento ou decremento foi de 0,01. A frequência de atualização do MPPT foi de 300 Hz.

As simulações foram realizadas utilizando três fontes de tensão distintas: quadrada, senoidal e triangular, de forma a testar as variações causadas pelos tipos de entrada de irradiação. Todos os casos foram simulados utilizando uma irradiação com variação de  $400\text{W/m}^2$  até  $700\text{W/m}^2$  e uma temperatura de  $25^\circ\text{C}$ .

Inicialmente as simulações foram feitas testando uma entrada através de uma fonte quadrada, para que se pudessem representar as variações bruscas de irradiação ao longo do dia, podendo atingir uma irradiação com valor máximo de  $700\text{W/m}^2$  e mínimo de  $400\text{W/m}^2$ , com uma temperatura de  $25^\circ\text{C}$ . A Figura 26 apresenta uma comparação entre a forma de onda da potência de referência do painel fotovoltaico, com a potência obtida através do algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência. Através do gráfico é possível observar que mesmo após mudanças bruscas dos níveis de irradiação, o algoritmo de MPPT se mostrou eficaz, pois conseguiu acompanhar as variações da potência.

Figura 25 - Circuito simulado no PSIM utilizando uma fonte de tensão quadrada.

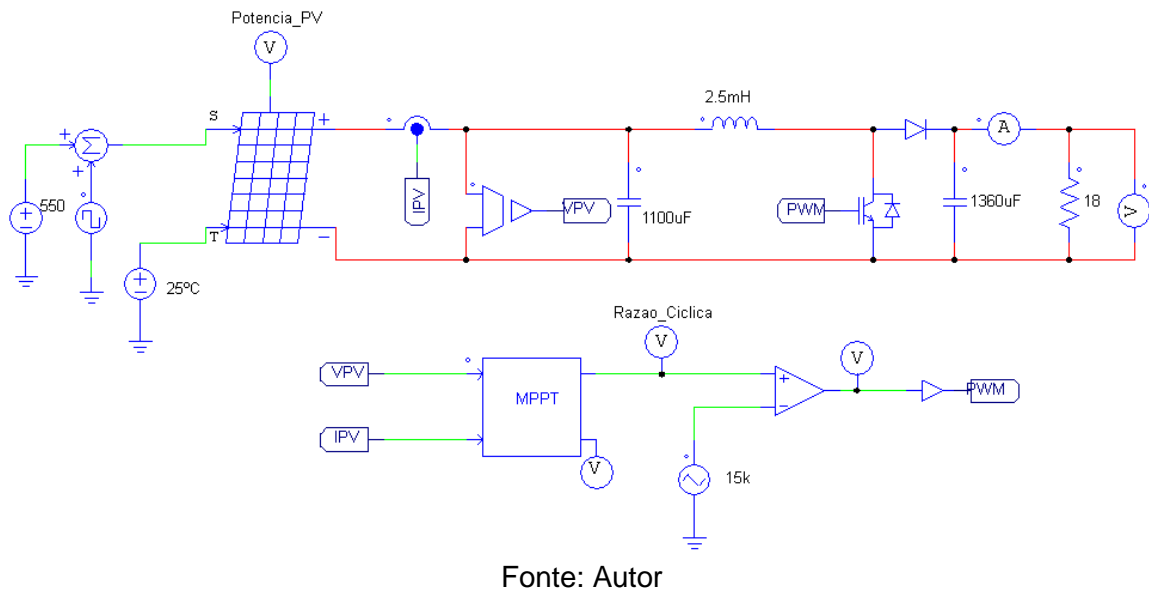
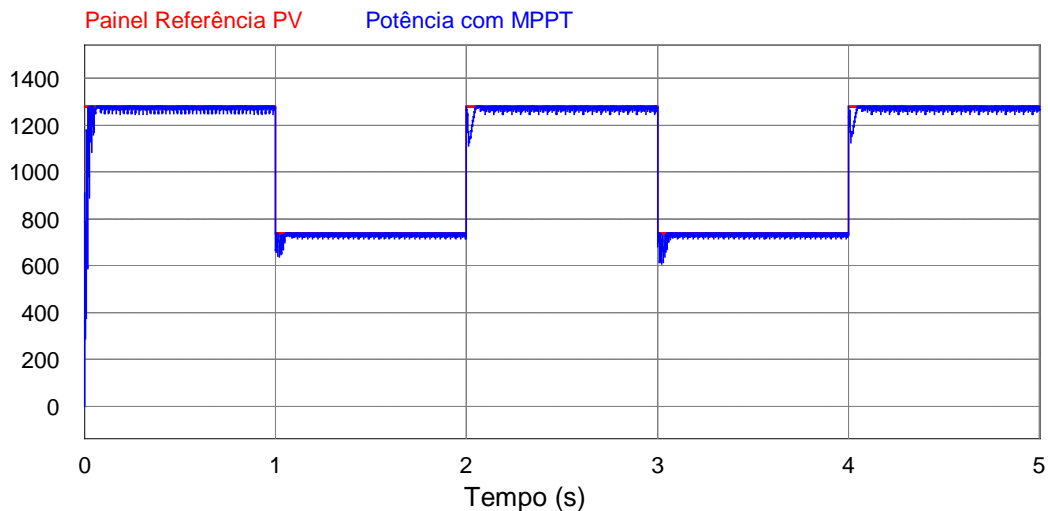


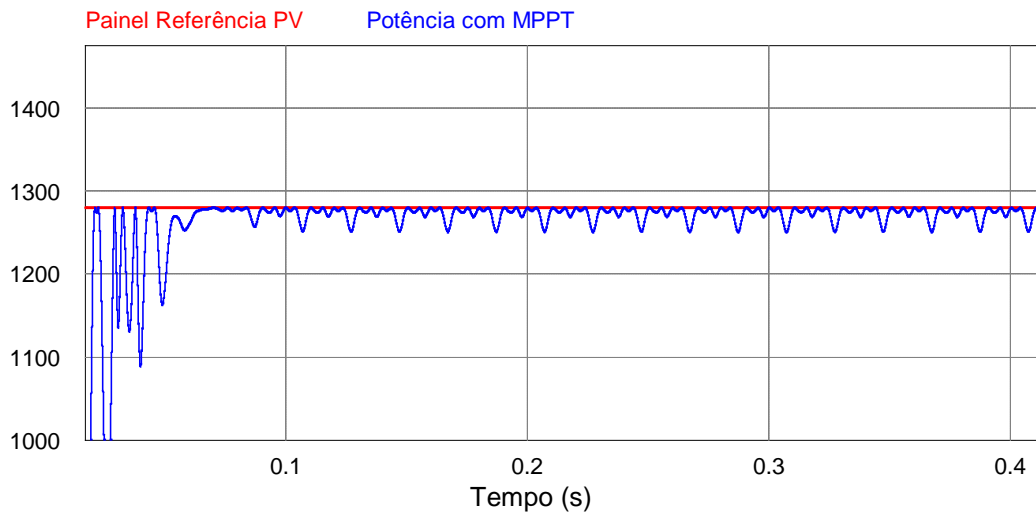
Figura 26 - Formas de onda da Potência de Referência do PV e da Potência com MPPT com entrada quadrada.



Fonte: Autor

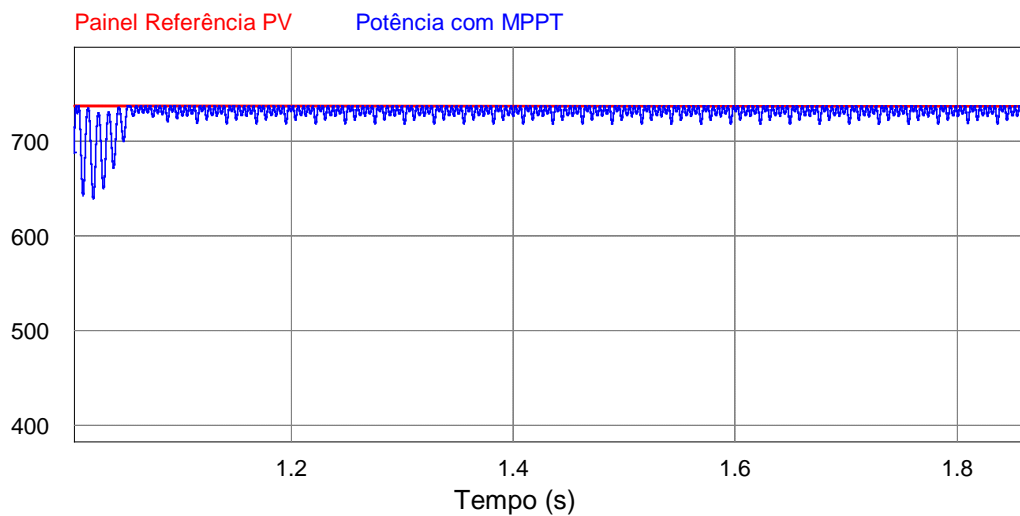
Nas Figuras 27 e 28 é possível observar de maneira mais aproximada a variação da potência através do método com a potência de referência do PV. A Figura 27 mostra uma variação de potência em regime de cerca de 29W quando a irradiação está no seu valor máximo. Na Figura 28, observa-se uma menor variação da potência em regime, variando cerca de 19 W, quando atingido o valor mínimo de irradiação.

Figura 27 - Imagem aproximada das Formas de onda da Potência de Referência do PV e da Potência com MPPT com entrada quadrada.



Fonte: Autor

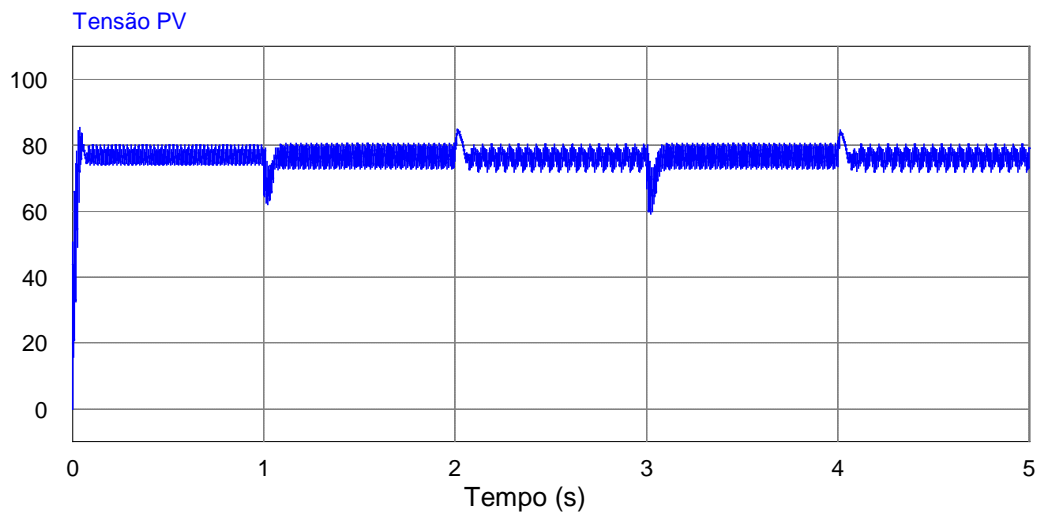
Figura 28 - Imagem aproximada das Formas de onda da Potência de Referência do PV e da Potência com MPPT com entrada quadrada.



Fonte: Autor

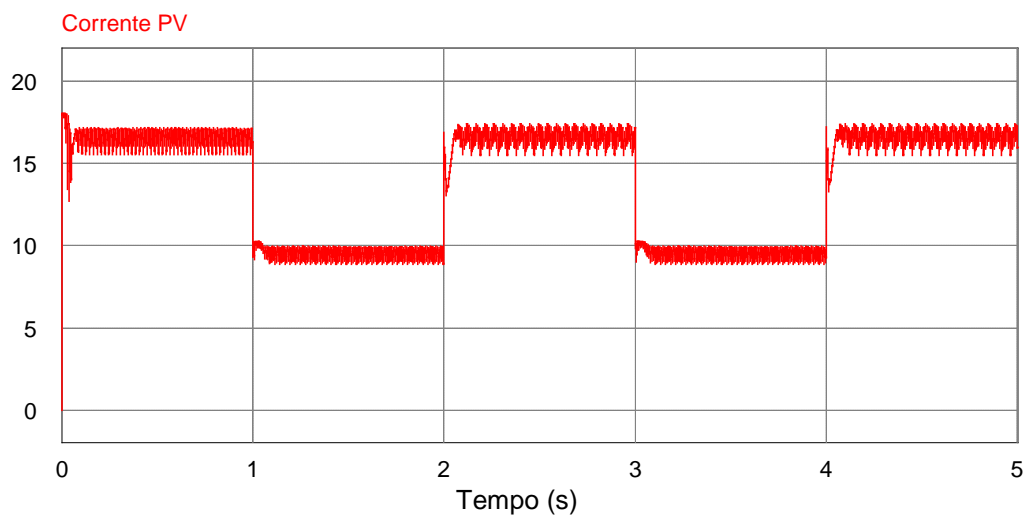
A Figura 29 mostra a forma de onda da tensão proveniente do painel, que alcançou um valor de pico de 85V, podendo ser observado que ela não sofreu grandes variações em função das mudanças bruscas de irradiação. Já na Figura 30 está exposta a forma de onda da corrente do painel, possuindo como valor máximo uma corrente de 18,01A. Através dela podemos observar uma queda acentuada na corrente, como era esperado, pois a mesma é mais suscetível na ocorrência de uma variação repentina de irradiação.

Figura 29 - Tensão do painel fotovoltaico com entrada quadrada.



Fonte: Autor

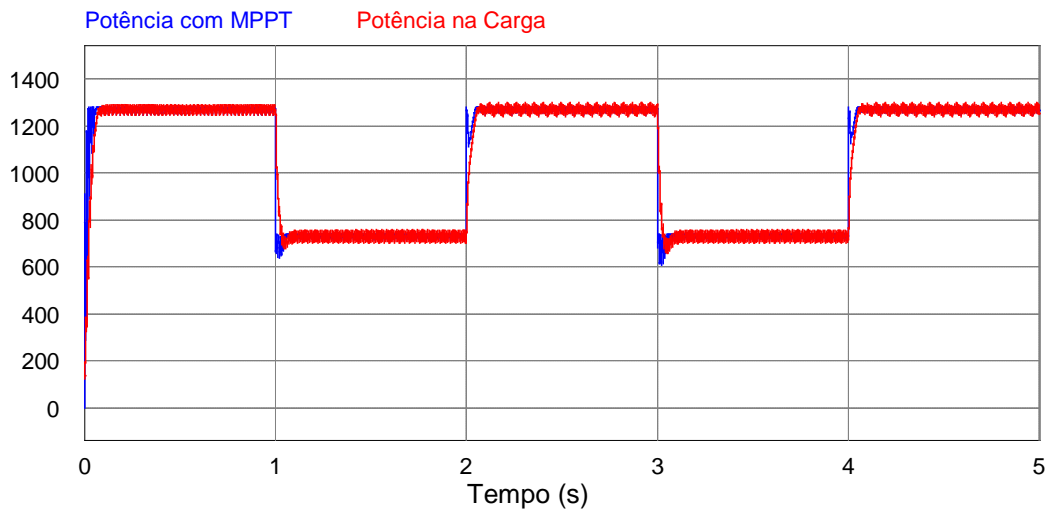
Figura 30 - Corrente do painel fotovoltaico com entrada quadrada.



Fonte: Autor

A relação da potência através do MPPT com a potência na carga pode ser vista na Figura 31, onde se observa que a potência na carga, que atinge uma potência máxima de 1295W, consegue seguir a potência com MPPT, porém com a ocorrência de oscilações em sua potência em regime, variando cerca de 38W em condições de maior irradiação e 44W em condições de menor irradiação.

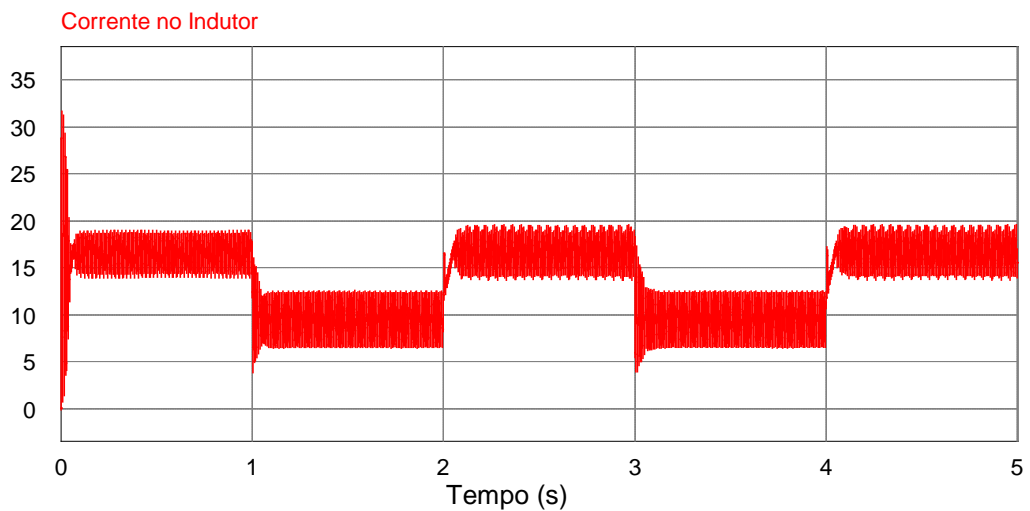
Figura 31 - Formas de onda da Potência com MPPT com Potência na Carga com entrada quadrada.



Fonte: Autor

Também é demonstrada a corrente no indutor, que tem uma corrente máxima de 31,66A, conforme mostra a Figura 32.

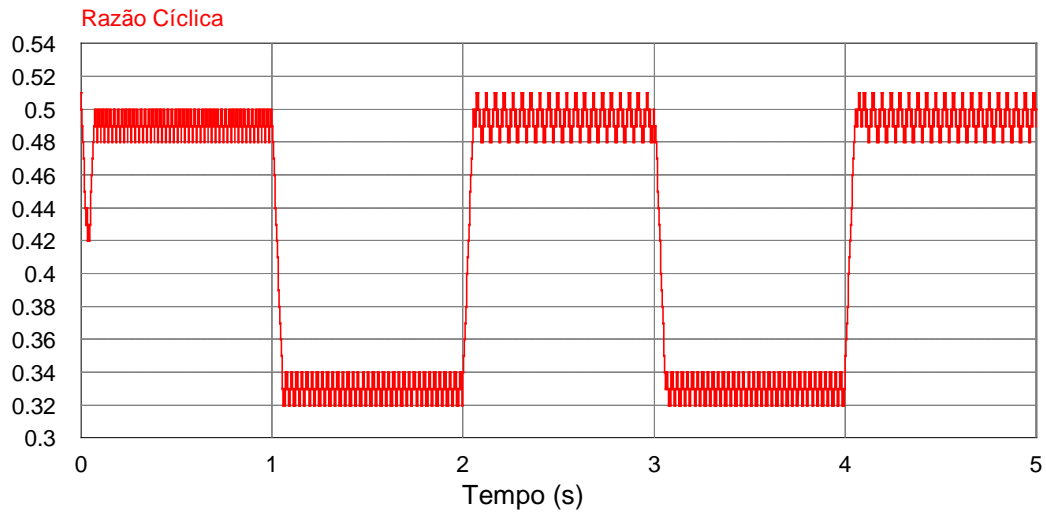
Figura 32 - Forma de onda da Corrente no Indutor com entrada quadrada



Fonte: Autor

Na Figura 33, é demonstrado o gráfico referente à razão cíclica, atingindo um valor máximo de 0,5 e mínimo de 0,32.

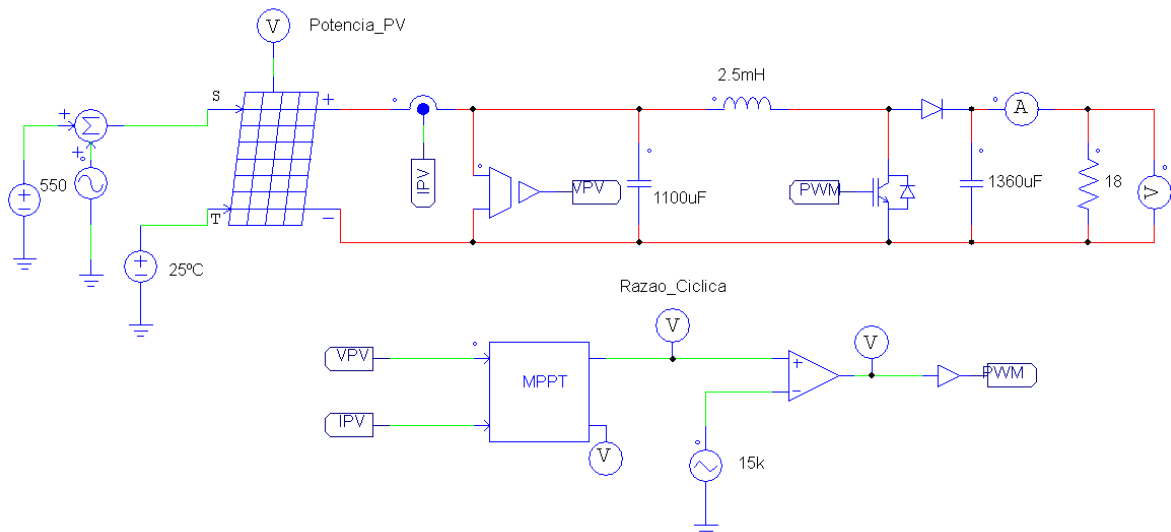
Figura 33 - Razão Cíclica com entrada quadrada.



Fonte: Autor

Posteriormente, foram realizadas simulações utilizando uma fonte de tensão senoidal, com o objetivo de representar uma mudança de irradiação de forma mais lenta e menos abrupta, ocorrendo assim uma variação de irradiação de  $400 \text{ W/m}^2$  a  $700 \text{ W/m}^2$ . A Figura 34 demonstra o circuito contendo a fonte de tensão senoidal.

Figura 34 - Circuito contendo entrada senoidal para variação lenta da irradiação.

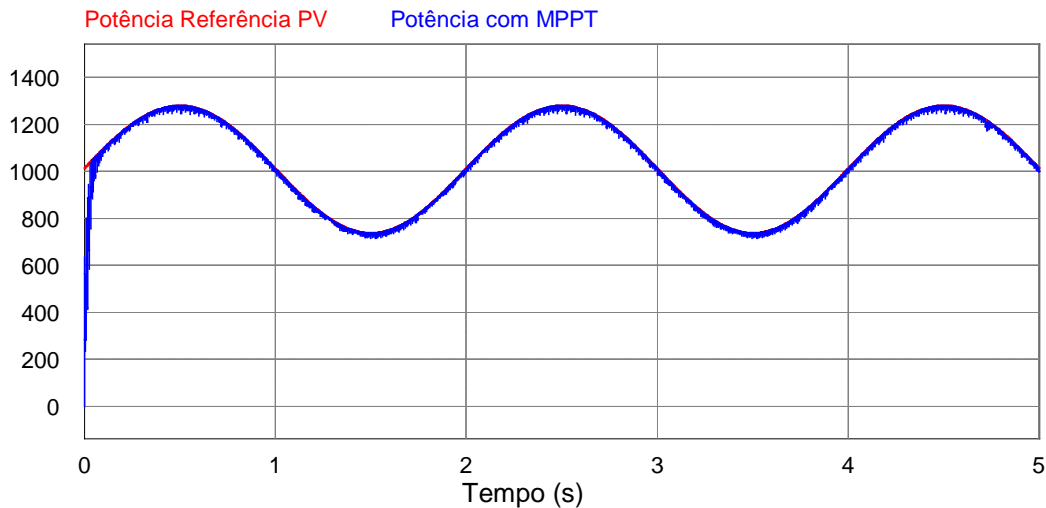


Fonte: Autor

Na Figura 35, está representado a forma de onda da potência de referência do painel com a forma de onda da potência com o MPPT, demonstrando que o

algoritmo de rastreamento obteve um desempenho satisfatório, entrando em regime em torno de 0,05 segundos.

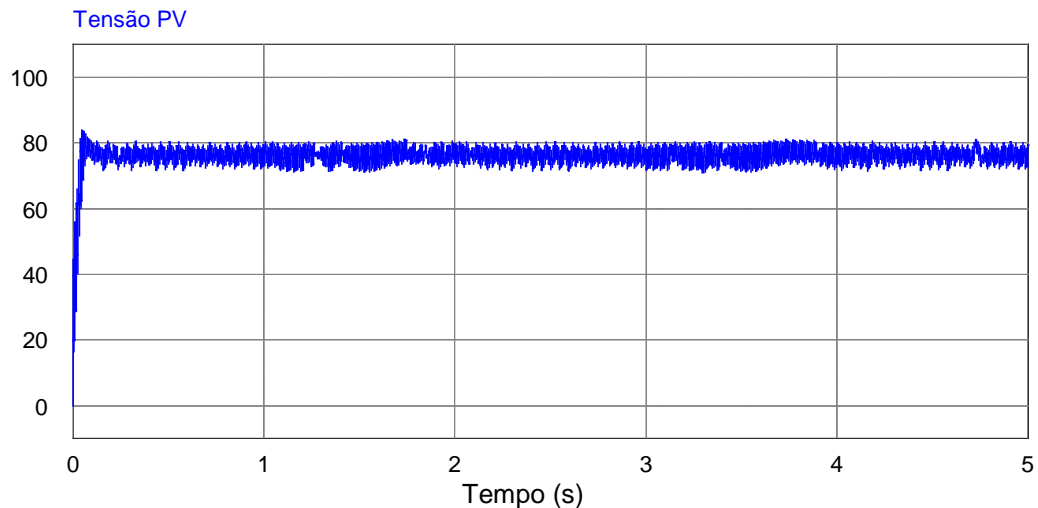
Figura 35 - Formas de onda da Potência de Referência do PV e da Potência com MPPT com entrada senoidal.



Fonte: Autor

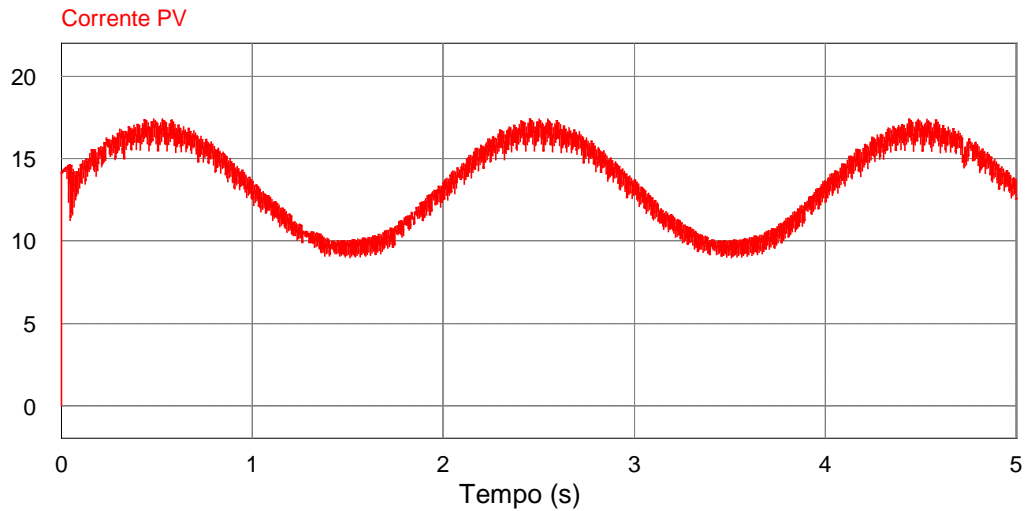
Os gráficos correspondentes a tensão e a corrente que compõem a potência com MPPT, ilustrado respectivamente nas Figuras 36 e 37, mostram novamente uma influência menor da variação de irradiação para a tensão do painel com valor máximo de 83,99V, ocorrendo oscilações em torno de 5V. Como visto anteriormente, a corrente sofre uma maior influência da variação de irradiação, sofrendo uma oscilação de 8,29A.

Figura 36 - Tensão do painel com entrada senoidal.



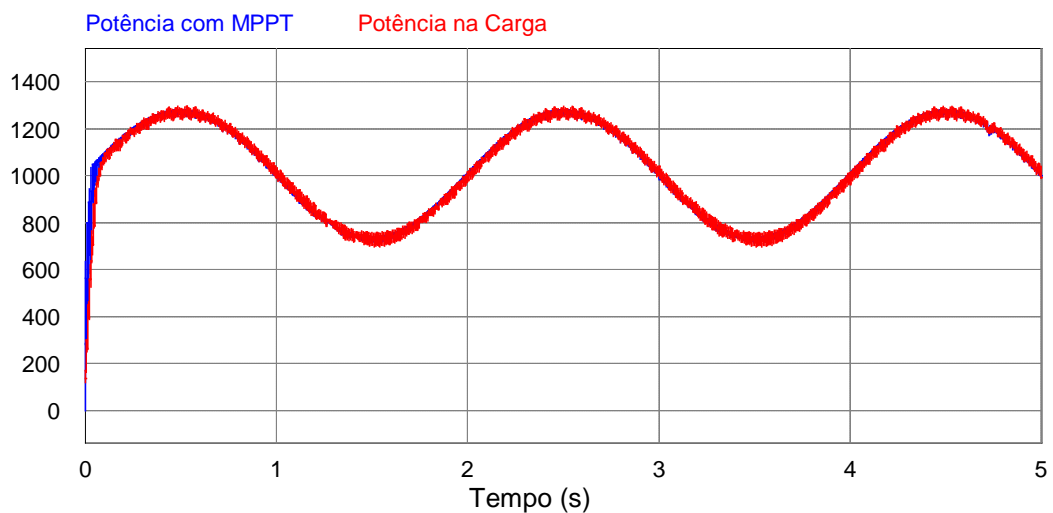
Fonte: Autor

Figura 37 - Corrente do painel com entrada senoidal.



Foi simulado novamente a relação da potência através do MPPT com a potência na carga, como mostra a Figura 38. A potência na carga, a qual atingiu um valor de 1295W de potência máxima, sofreu a maior oscilação em torno de 0,38W. Já a potência através do MPPT, cujo valor máximo atingido foi de 1279W, oscilou no mesmo ponto da potência na carga cerca de 0,22W.

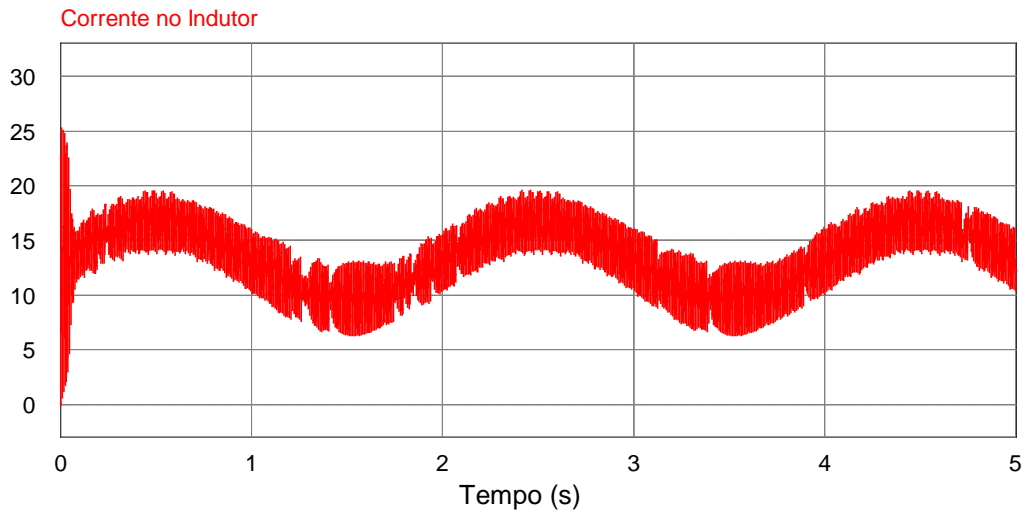
Figura 38 - Formas de onda da Potência com MPPT com Potência na Carga com entrada senoidal.



A corrente no indutor atinge 19,39A de corrente máxima no instante de maior irradiação, onde também se registrou uma oscilação em torno de 5,12A, como ilustra a Figura 39.



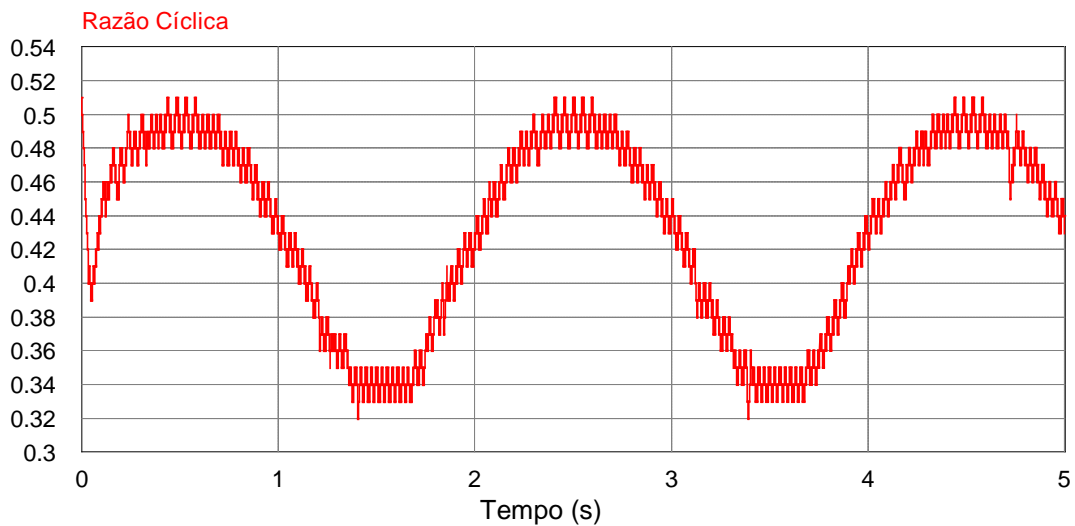
Figura 39 - Forma de onda da Corrente no Indutor com entrada senoidal.



Fonte: Autor

A razão cíclica obtida através de uma entrada senoidal, mostrada na Figura 40, obteve o valor máximo de 0,5 e mínimo de 0,32.

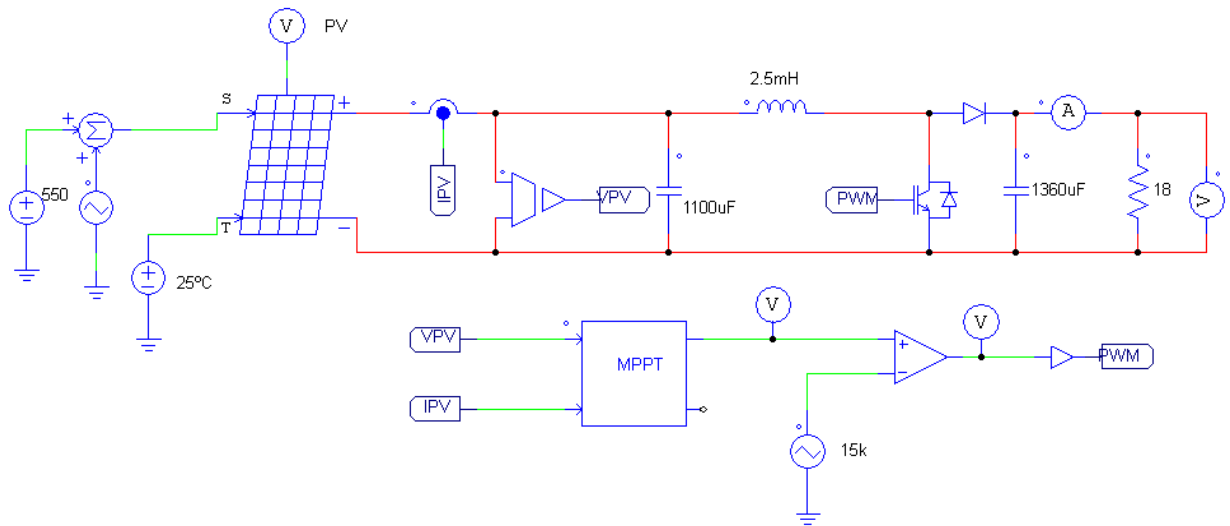
Figura 40 - Razão Cíclica com entrada senoidal.



Fonte: Autor

Por fim, simulou-se uma entrada em rampa através de uma fonte triangular, podendo ser vista na Figura 41, com a finalidade de representar um sombreamento contínuo com um aumento ou diminuição nos níveis de irradiação relativamente rápidos. A irradiação foi variada novamente de  $400\text{W/m}^2$  até  $700\text{W/m}^2$ .

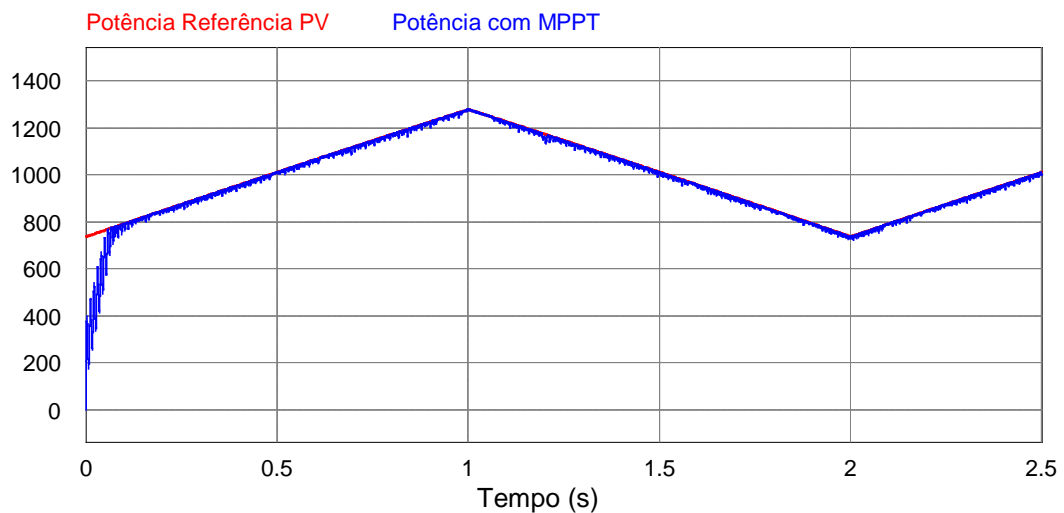
Figura 41 - Circuito contendo entrada em rampa para variação rápida e contínua da irradiação



Fonte: Autor

O gráfico presente na Figura 42 demonstra a relação entre a potência de referência do painel com a potência através do MPPT com entrada em rampa, mostrando que o algoritmo de MPPT leva em torno de 0,06 segundos para convergir com a potência de referência, de modo que com o aumento da irradiação, ocorre uma maior oscilação em torno de 28W, e no instante em que a irradiação começa decrescer, há uma oscilação em torno de 34 W.

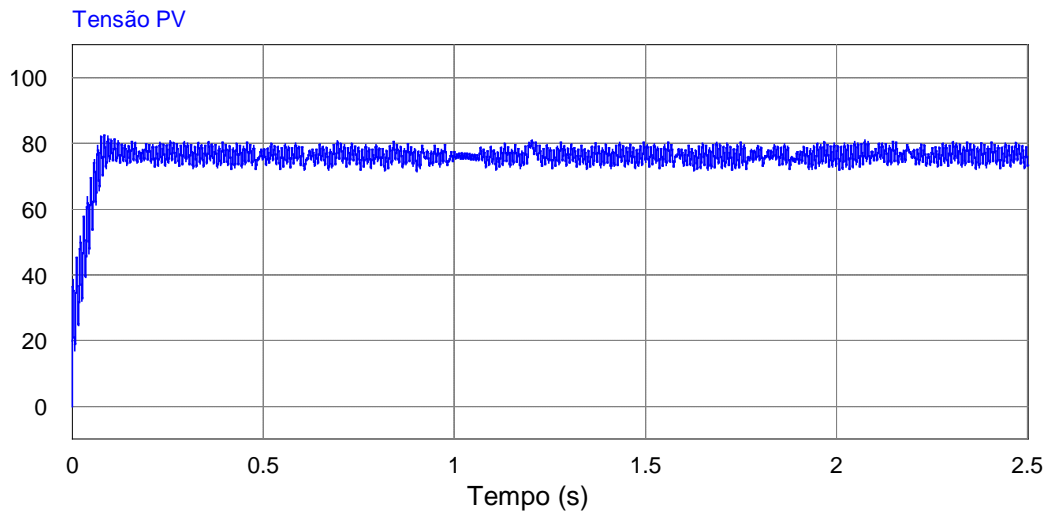
Figura 42 - Formas de onda da Potência de Referência do PV e da Potência com MPPT com entrada rampa.



Fonte: Autor

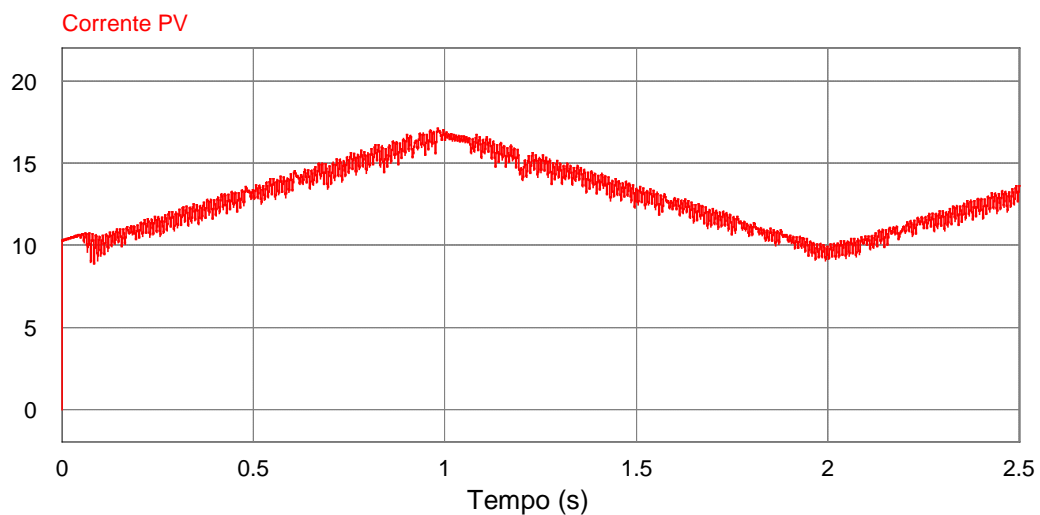
A tensão proveniente do painel, alcança um valor máximo de 82,55V, com oscilações em torno de 6V em regime. A Figura 43 demonstra as oscilações da tensão. Já a corrente do painel, como é visto na Figura 44, chega a um valor máximo de 17,12A em regime, sofrendo uma oscilação máxima de 2A.

Figura 43 - Tensão do painel com entrada rampa.



Fonte: Autor

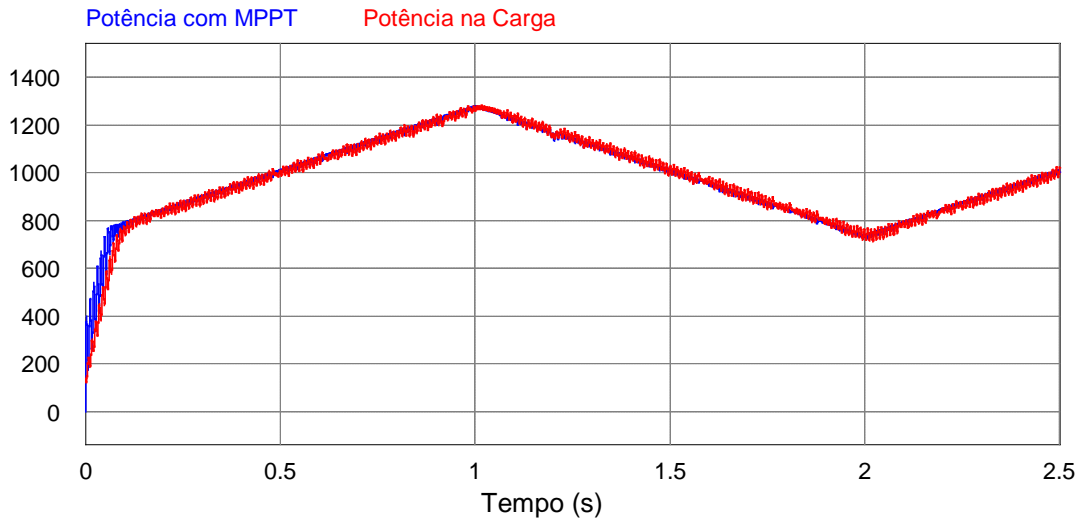
Figura 44 - Corrente do painel com entrada rampa.



Fonte: Autor

A Figura 45 que representa as formas de onda da potência com MPPT com relação à potência da carga, mostra que a potência máxima na carga é de 1269W, ocorrendo oscilações máximas de 42W.

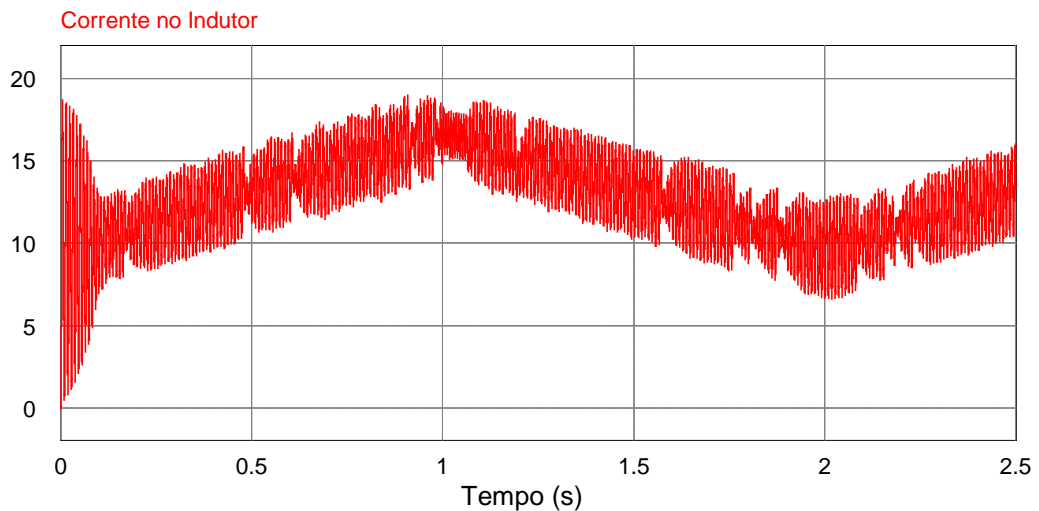
Figura 45 - Formas de onda da Potência com MPPT com Potência na Carga com entrada rampa.



Fonte: Autor

A corrente no indutor alcança um valor máximo de 18,99A, como mostra a Figura 46.

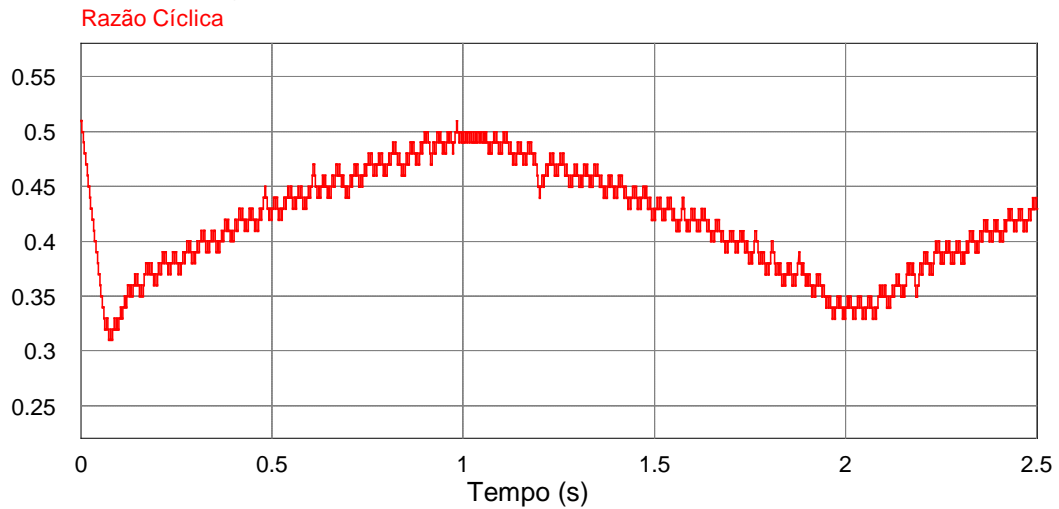
Figura 46 - Forma de onda da Corrente no Indutor com entrada senoidal.



Fonte: Autor

A razão cíclica com entrada rampa, vista na Figura 47, chega a um valor máximo de 0,5 e mínimo de 0,31.

Figura 47 - Razão Cíclica com entrada rampa.



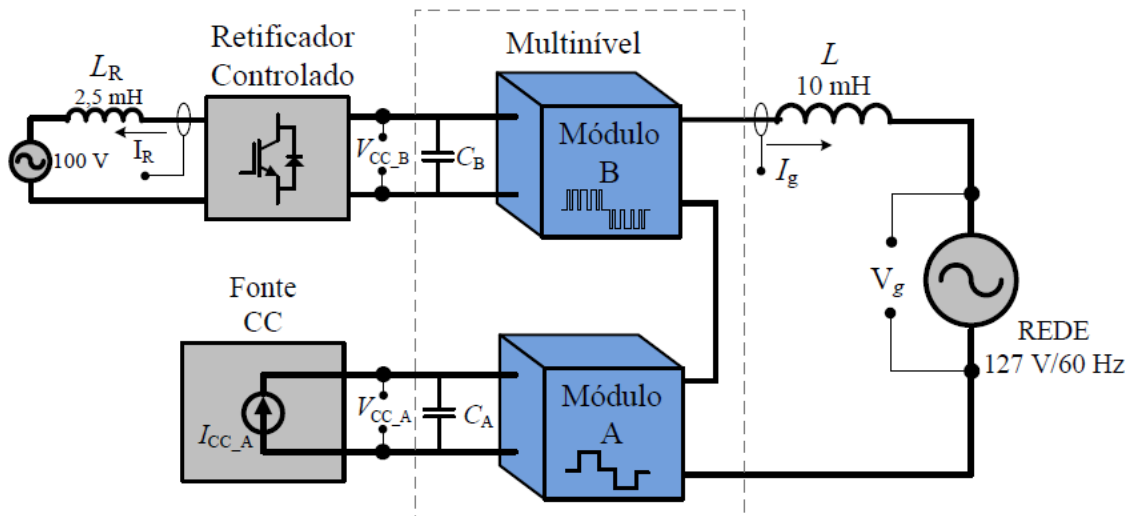
Fonte: Autor

## 4.2 Interação do sistema fotovoltaico desenvolvido com o sistema multinível.

Esse trabalho visa agregar ao trabalho de (POZZEBON, 2013), onde se representou o conjunto de painéis fotovoltaicos através de uma fonte de corrente, conforme demonstrado na Figura 48, responsável por fornecer a maior parte da potência aplicada em conversores multiníveis para a rede elétrica. Dessa forma, o presente trabalho buscou substituir a fonte de corrente CC por um conjunto de painéis fotovoltaicos, por meio de simulações, de modo a interagir com o sistema multinível já desenvolvido, transferindo assim a máxima potência instantânea gerada.

O trabalho desenvolvido por (POZZEBON, 2013), teve como objetivo construir um sistema multinível conectado à rede de distribuição para utilização de fontes alternativas de energia como fontes primárias, a partir das características dos conversores multinível, os quais apresentam um potencial de aplicabilidade em sistemas de geração distribuída. Em razão da possível variação de energia fornecida pelas fontes alternativas, o sistema multinível é integrado com sistemas armazenadores de energia, como capacitores.

Figura 48 - Diagrama representando a disposição experimental das fontes CC, elementos passivos e do conversor multinível conectado à rede de distribuição.



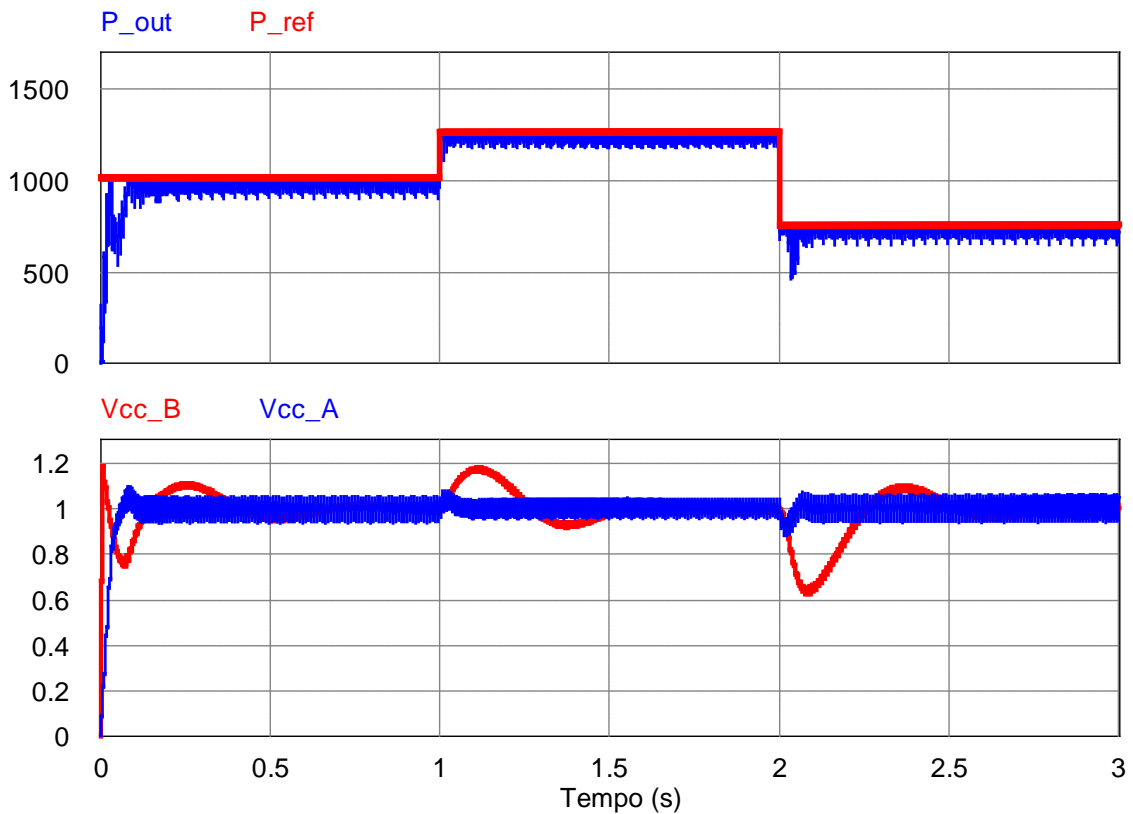
Fonte: (POZZEBON, 2013)

A topologia multinível empregada neste trabalho consiste em uma configuração com dois módulos inversores conectados em série, de modo que pelo menos um desses inversores funcione com uma modulação em baixa frequência, a fim de processar uma maior parcela da potência.

#### 4.2.1 Simulações no PSIM utilizando o sistema fotovoltaico como fonte de energia para o sistema multinível.

A Figura 49 apresenta a forma de onda da potência de referência do painel com relação à forma de onda da potência através do MPPT. Pode-se observar que o algoritmo de rastreamento obteve um bom desempenho, entrando em regime em aproximadamente 0,3s, acompanhando de forma eficaz a potência de referência, mesmo quando houve variações da potência no sentido de um aumento de irradiação, como também para um decréscimo. Com relação às tensões dos capacitores  $C_A$  e  $C_B$ , representados em p.u., observa-se que a tensão referente ao capacitor A quase não sofre oscilações nos momentos de variação da potência, diferentemente da tensão no capacitor B, que oscila até o instante de 2s, onde se manteve uma queda na potência para aproximadamente 750 W. Cabe ressaltar que a tensão no capacitor A – saída do *boost* – é controlada pelo Módulo A.

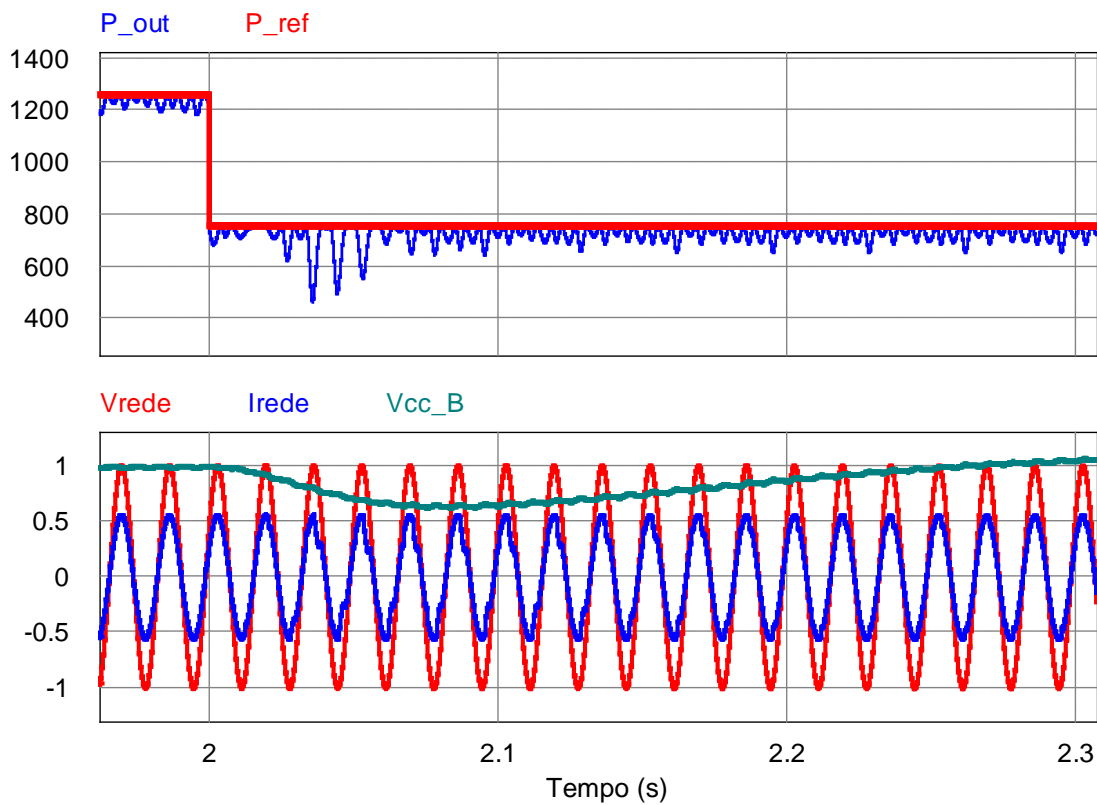
Figura 49 - Formas de onda da potência de referência do painel com a potência através do MPPT, em watts, e as tensões nos capacitores  $C_A$  e  $C_B$  do sistema multinível, em p.u.



Fonte: Autor

Analisando a Figura 50, é possível verificar que após uma transição brusca de potência fornecida pelo arranjo fotovoltaico, de aproximadamente 1250 W para aproximadamente 750 W, a tensão e a corrente fornecidas para a rede através do sistema multinível, estão em fase e não houve perturbações significativas na corrente injetada na rede a não ser uma pequena distorção ocasionada pela queda da tensão no link CC que compromete a capacidade de compensação do conversor.

Figura 50 - Formas de onda da potência de referência do painel com a potência através do MPPT em watts; tensão e corrente entregue para a rede com relação á tensão no link CC do módulo A – dadas em p.u.

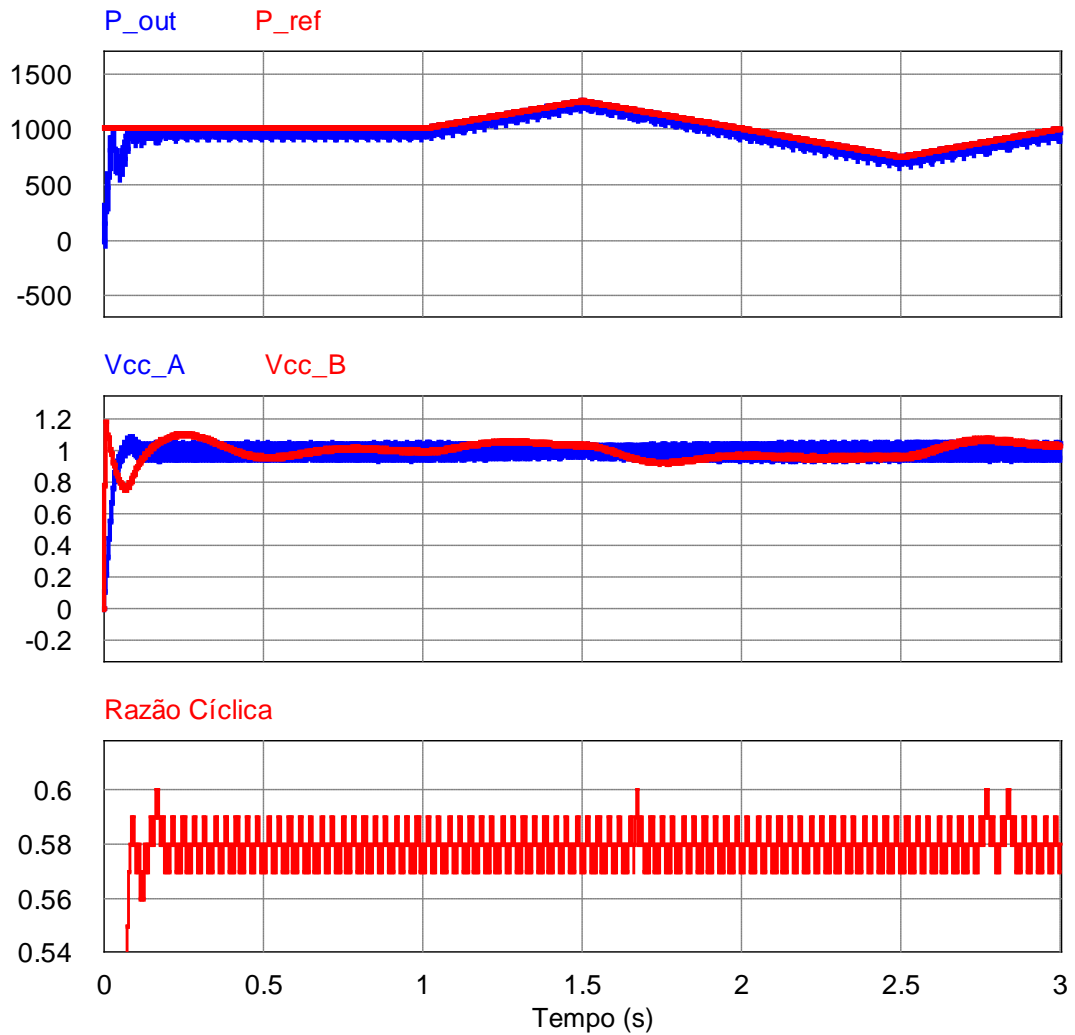


Fonte: Autor

Por fim, é demonstrada na Figura 51, uma variação da potência de forma mais lenta – em rampa – de forma menos brusca a partir do instante de 1s, onde se percebe que praticamente não houve variação na tensão de  $C_A$  e pouca variação na tensão de  $C_B$ . Observando a razão cíclica, mostrada no terceiro gráfico da Figura 51, nota-se que ela permanece em torno de 0,58. Isto mostra que o conversor *boost* está funcionando próximo ao ponto de operação de projeto, conforme Equação 3.1.



Figura 51 - Formas de onda da potência de referência do painel com a potência através do MPPT, as tensões nos capacitores  $C_A$  e  $C_B$  e a razão cíclica.



Fonte: Autor

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma forma de gerenciamento da potência em painéis fotovoltaicos utilizando um algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência, implementado em um conversor CC-CC não isolado do tipo BOOST, de forma a elevar os níveis de tensão provenientes dos painéis para então ser testado em um sistema multinível desenvolvido por (POZZEBON, 2013).

O arranjo fotovoltaico projetado consistiu em uma configuração de 3x3 painéis série-paralelo, que utilizou como referência os dados do painel fotovoltaico do modelo Kyocera KD210GX-LPU, de modo a fornecer uma potência nominal de 1890W. Com isso foi possível dimensionar os componentes do conversor, sendo então projetado para operar com uma tensão de 75V, com uma tensão em sua saída de 180V.

O algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência, desenvolvido através do método de Perturbação e Observação, apresentou um ótimo desempenho em todas as situações em que foi exposto. Na primeira situação foi simulada uma condição que representasse uma variação brusca nos níveis de irradiação, sendo feita através de uma entrada quadrada. Se verificou que mesmo após sofrer variações repentinas de irradiação entre  $400\text{W/m}^2$  a  $700\text{W/m}^2$ , a uma temperatura constante de  $25^\circ\text{C}$ , o método se mostrou eficiente, entrando em regime próximo a 0,05s, sofrendo uma queda de corrente de 7,22A, em virtude do painel se comportar como uma fonte de corrente, com uma oscilação máxima de 0,85A em regime, e a tensão oscilando cerca de 6,4V.

Outra situação foi simulada, através de uma entrada senoidal, para que se representasse uma variação de irradiação de forma mais lenta, usando os mesmos valores simulados na entrada quadrada. Novamente o algoritmo de rastreamento apresentou um bom desempenho, entrando em regime próximo aos 0,05s, mas sofrendo uma variação maior de corrente, cerca de 8,29A, em decorrência da mudança de irradiação, com 5V para a maior oscilação de tensão.

E a última situação testada, foi através de uma entrada rampa, nos mesmos parâmetros das anteriores, de modo a representar uma mudança rápida e contínua de irradiação, apresentou um ótimo desempenho, entrando em regime em 0,05s, com uma variação de tensão de 6V e 2A para a corrente.

Nas simulações referentes à interação do sistema fotovoltaico com o sistema multinível já desenvolvido, pode-se observar que o algoritmo de rastreamento também mostrou um bom desempenho nas diferentes situações em que foi exposto. Tanto nas variações bruscas, como também nas lentas, dos níveis de potência fornecidos, o algoritmo demonstrou uma resposta dinâmica bastante satisfatória com um erro em regime permanente pequeno. As tensões de  $C_A$  e  $C_B$  não sofreram grandes oscilações com as variações da potência, onde também foi possível verificar que a corrente entregue à rede está em fase com a tensão, sem grandes perturbações e sem alteração da potência fornecida para a rede mesmo com a alteração da potência gerada pelo sistema fotovoltaico.

O passo de 0,01 utilizado no algoritmo mostrou-se um bom valor de incremento ou decremento na variável de controle, no caso, a razão cíclica do conversor. O método se mostrou eficiente mesmo em condições em que a o nível de irradiação se alterava bruscamente, de modo a não perder o rastreamento do ponto de máxima potência, como também, apresentando um erro em regime permanente consideravelmente pequeno.

## REFERÊNCIAS

- ABSOLAR. Brasil amplia investimento em energia solar. 2017. Disponível em: <http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/brasil-amplia-investimentos-em-energia-solar.html>> Acesso em: 12 de mar. 2018. Citado na página 13.
- AZEVEDO, G. M. S. “Sistema de Conversão de Energia Fotovoltaica com Compensação Baseada em Corrente e Tensão”. Universidade Federal de Pernambuco, 2007. Citado na página 24.
- BARBI, I.; MARTINS, Denizar Cruz. Conversores CC-CC BÁSICOS NÃO ISOLADOS: 2º Ed, 377 f. Florianópolis, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 30, 31, 36, 48.
- CÂMARA, C. F. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. 2011. 68 f. Monografia - Curso de Formas Alternativas de Energia, Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011. Citado na página 21.
- COELHO, R. F. et al. Estudo dos conversores buck e boost aplicados ao rastreamento de máxima potência de sistemas solares fotovoltaicos. Florianópolis, SC, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 45, 46.
- CRESESB, CEPEL “Energia Solar Princípios e Aplicações”, Rio de Janeiro 2006. Citado 5 vezes nas páginas 15, 19, 21, 23, 29.
- CAVALCANTI, M. et al. Comparative study of maximum power point tracking techniques for photovoltaic systems. Eletrônica de Potência, 2007. Citado na página 33.
- CALAÇA, L. E. M. Projeto de um Conversor Multinível para Painéis Fotovoltaicos. Dissertação de mestrado. Universidade da Madeira-Portugal, 2016. Citado na página 38.
- GASPARIN, F. P. Desenvolvimento de um traçador de curvas características de módulos fotovoltaicos. 2009. 58f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Citado x vezes nas páginas. Citado na página 27.
- JANUZZI, G. DE M.; VARELLA, F. K. DE O. M.; GOMES, R. D. M. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede: Relatório final. Campinas, 2009. Citado na página 20.
- KYOCERA. Datasheet :KD210GX-LP.2018.Disponível em:<<https://www.kyocerasolar.com/dealers/product-center/archives/spect-sheets/KD210GX-LP.pdf?>> Citado 3 vezes nas páginas 14, 39, 42.
- LAMBERTS, R et al. Casa Eficiente: Consumo e Geração de Energia Volume 2. UFSC, 2010. Citado na página 19.

- LOPES, L. C. G. Sistema Experimental Fotovoltaico de Geração de Energia Elétrica Operando em Paralelo com a Rede Elétrica CA. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2006. Citado na página 31.
- MINEIRO, E. S. D. F. L. M. A. A. C. M. T. C. Photovoltaic System For Suply Public Illumination in Electrical Energy Demand Peak. Applied Power Electronics Conferenceand Exposition, 2004. Citado na página 24.
- MOÇAMBIQUE, N.E.M. "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. Universidade de São Paulo, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 12, 30, 33.
- PACHECO, J.P.P. "Otimização da energia gerada por painéis solares fotovoltaicos em sistemas isoladas da rede elétrica". Universidade Tecnológica Federal do Paraná.Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, 2009. Citado na página 36.
- Pereira et al. Atlas brasileiro de energia solar. 2 ed. São José dos Campos: INPE, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 13,16, 21.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL, 2014. Citado 7 vezes nas páginas 17,20,22,27,28,30,32
- POZZEBON, G. G. " Controle e Análise de Conversores Multiníveis Conectados em Redes de Distribuição para a Aplicação em Painéis Fotovoltaicos e Armazenadores de Energia". Universidade de São Paulo, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 14,45,60
- POMILIO, A. J. Eletrônica de Potência. Cap5. 2006. Citado na página 31.
- SEGUEL, J. I. L.; Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica. Belo Horizonte, 2009. Citado na página 35.
- STEIN, F. Conversão de energia solar fotovoltaica com rastreamento de máxima potência aplicado ao conversor boost. UDESC. Joinville, p. 78, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 30, 32, 36, 37.
- VILELA, A. O. R. Projeto e construção de um conversor boost controlado em modo de tensão. Universidade Federal de Viçosa, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 24, 25.
- VILLALVA, M. G. et al. Conversor eletrônico de potência trifásico para sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. 2010. Citado 3 vezes nas páginas 23, 33, 37.
- ZILLES, R.; MACEDO, W. N.; GALHARDO, M. A. B.; OLIVEIRA, S. H. F., 2012. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. 1. Ed. São Paulo: Oficina de Textos. V.1. 208p. Citado na página 17.