



UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-BRASILEIRA  
INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL  
CURSO ENGENHARIA DE ENERGIAS

MILTON LUIS FILIPE MUHONGO

**SIMULAÇÃO DE UM MICROINVERSOR APLICADO EM MICROGERAÇÃO  
DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA**

Redenção-CE

2021

MILTON LUIS FILIPE MUHONGO

**SIMULAÇÃO DE UM MICROINVERSOR APLICADO EM MICROGERAÇÃO  
DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia de Energias da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como pré-requisito para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia de Energias.

**Orientadora:** Prof.<sup>a</sup> Dra. Ligia Maria Carvalho Sousa Cordeiro.

Redenção-CE

2021

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira  
Sistema de Bibliotecas da UNILAB  
Catalogação de Publicação na Fonte.

---

Muhongo, Milton Luis Filipe.

M921s

Simulação de um microinversor aplicado em microgeração distribuída fotovoltaica / Milton Luis Filipe Muhongo. - Redenção, 2021.

76f: il.

Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2021.

Orientador: Profa. Dra. Ligia Maria Carvalho Sousa Cordeiro.

1. Energia solar. 2. Conversores de corrente elétrica. 3. Geração distribuída fotovoltaica. I. Título

CE/UF/BSP

CDD 621.3

---

MILTON LUIS FILIPE MUHONGO

**SIMULAÇÃO DE UM MICROINVERSOR APLICADO EM MICROGERAÇÃO  
DISTRIBUÍDA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia de Energias da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como pré-requisito para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia de Energias.

Aprovado em: 12 / 05 / 2021

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Ligia Maria Carvalho Sousa Cordeiro (Orientadora)

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

---

Prof. Dr. Juliano de Oliveira Pacheco

Universidade de Fortaleza (UNIFOR)

---

Me. Antônio Wallace Neres da Silva

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

A Deus, pelo dom da vida e garantia da sua existência, por nos dar capacidade para desenvolver ciência a fim de combater certas enfermidades, como a Covid-19 e outras.

“Devemos promover a coragem onde há medo, promover o acordo onde existe conflito, e inspirar esperança onde há desespero.”

Nelson Mandela

## AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares que muito trabalharam afincadamente e confiantes a fim de garantir que um dia eu me tornasse quem hoje sou e que ontem seguramente busquei.

À minha orientadora professora Dra. Ligia Maria Carvalho Sousa Cordeiro, por aceitar o convite de me conduzir nesta orientação e prestar-me grandes ensinamentos durante a graduação, nas diferentes disciplinas que certame foram enriquecedoras.

Ao professor Dr. Hermínio de Oliveira Filho por acreditar todo tempo em mim, e pela sua grande disposição em ser o meu maior auxílio em todo processo, de forma muito assertiva na construção deste trabalho, o qual compartilho o mesmo com a mais alta satisfação por concretizá-lo, e desejo construir pontes prosperas.

Aos meus companheiros (as) de jornada André, Joel, Lutuima, Lutonádio, Jeremias, Hernani, Gilson, G. Pembro, Sandro, Guilherme, Wander, Hilquias, Sebastião, Lunda e a minha querida Samara, pelas condições mentais e físicas por nós criadas durante a nossa passagem acadêmica a fim de suportar firmemente todos os desafios por ela imposta, que no final Deus e nossos ancestrais nos ajudaram a conduzir, e aos meus amigos, Teodoro, Loy, Mavuetta. A minha querida Florbela Cabingano por estar sempre ao meu lado.

À Universidade da integração internacional da Lusofonia afro-Brasileira (UNILAB) que tanto contribuiu para a minha formação acadêmica, humana e outros.

Ao meu pai Luis Domingos pelas noites e madrugadas de tabuadas, e não só, que certamente contribuíram muito para o meu aprendizado, E por ser minha referência.

À minha mãe Rosa Jose Filipe pela força única e peculiar que me conduziu bastante, com a sua calma abundante, inteligente, por ser uma mulher íntegra entre outras qualidades. Pela coragem de seguir na vida mesmo sem os seus pais (Cecília Bento e José Filipe) e nunca perder a sua maior capacidade que é a de amar.

Aos meus irmãos a quem desprendo todo o meu amor e confiança: Dominga, Domingo, Paulo, Francisco, Constância, Cubana, Emanuel.

À minha avô Maria Inês e sua família (Adriana Silveira, Carmelita, Mateus e outros) pessoas que sempre me prestaram muito amor, carinho e respeito.

Aos meus Tios Domingos Kimbuata, Walter F. Nzongo, Joaquim M., Mingo K., Gabriel K, Luisa M., Benvida K., Minga K., Augusta M.

À uma pessoa querida Maria C. Pires, pelo tempo de partilha, respeito e aprendizado mútuo.

Ao meu Prof. Mestre Ícaro Fontinele pelos aprendizados que me passou todas as vezes que busquei, e aqui vai o meu muito obrigado.

## RESUMO

Proposto neste trabalho a simulação de um microinversor aplicado em microgeração distribuída com 1,5kW de potência, baseado na estrutura de microinversor de duplo estágio, com o uso de dois conversores CC/CC *boost* de 0,75kW, com o objetivo de independentemente rastrear a máxima potência dos arranjos fotovoltaicos de forma que o estágio inversor possa transferir energia para a rede elétrica monofásica de baixa tensão. O primeiro estágio é formado por dois conversores *boost* que operam em paralelo, cada um com potência nominal de 750W e tendo como valores nominais de tensão de entrada e de saída, respectivamente, 40V e 350V. Para conexão à rede elétrica é utilizada a topologia CC/CA ponte completa monofásica (*full bridge*) com valores nominais de 220 V<sub>rms</sub>/60Hz. As especificações supracitadas são baseadas no modelo comercial de microinversor Hoymiles MI-1500. Em conjunto com o microinversor são utilizados quatro painéis fotovoltaicos do modelo Trina Framed 72-cell, de 40V / 375 W, com duas conexões em paralelo para cada conversor *boost*. Análise quantitativa e qualitativa dos conversores, bem como do exemplo de projeto são apresentados. Resultados de simulações são adequadamente discutidos, verificando-se o funcionamento do conversor proposto operando em regime permanente, através da análise das principais formas de ondas, além de resultados dinâmicos do microinversor operando com o rastreamento do ponto de máxima potência. Os valores de potência obtidos na simulação se mostraram consideravelmente próximos aos valores teóricos obtidos para o modelo do módulo fotovoltaico utilizado.

**Palavras-chaves:** Energia Solar, Conversores de corrente elétrica, Geração distribuída fotovoltaica.

## ABSTRACT

In this work, we propose the simulation of a microinverter applied in distributed microgeneration with 1.5kW of power, based on the structure of a double-stage microinverter, with the use of two 0.75kW DC / DC boost converters, with the objective of independently tracking the maximum power of the photovoltaic arrangements so that the inverter stage can transfer energy to the single-phase low voltage electrical network. The first stage is formed by two boost converters that operate in parallel, each with a nominal power of 750W and with nominal values of input and output voltage, respectively, 40V and 350V. For connection to the mains, a single-phase DC / AC bridge topology with nominal values of 220 Vrms / 60Hz is used. The aforementioned specifications are based on the Hoymiles MI-1500 microinverter commercial model. In conjunction with the microinverter, four 40V / 375 W model Trina Framed 72-cell photovoltaic panels are used, with two connections in parallel for each boost converter. Quantitative and qualitative analysis of the converters, as well as the example project are presented. Simulation results are properly discussed, verifying the operation of the proposed converter operating in a steady state, through the analysis of the main waveforms, in addition to dynamic results of the microinverter operating with the maximum power point tracking. The power values obtained in the simulation were considerably close to the theoretical values obtained for the model of the photovoltaic module used.

**Keywords:** Solar energy, Electric current converters, Distributed photovoltaic generation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - As áreas mais claras do mapa recebem maior quantidade de raio solar direto e são mais recomendadas para construção de concentradores solar térmico.....	20
Figura 2.2 - Diagrama de um Sistema fotovoltaico de geração centralizada.....	22
Figura 2.3 - Diagrama de uma célula fotovoltaica.....	24
Figura 2.4 - Modelo elétrico de uma célula fotovoltaica.....	25
Figura 2.5 - Curva de corrente e Tensão (I-V) .....	27
Figura 2.6 - Curva de potência e tensão (P-V) .....	28
Figura 2.7 - Efeito da mudança temperatura no gráfico I-V.....	29
Figura 2.8 - Efeito da mudança de temperatura no gráfico P-V .....	29
Figura 2.9 - Efeito da mudança de irradiação no I-V .....	30
Figura 2.10 - Efeito da mudança de irradiação na curva P-V.....	30
Figura 2.11 - Diferença entre, célula e módulo e arranjo FV. ....	31
Figura 2.12 - Modelo de ligação (a) Paralelo, (b) Série, (c) Misto .....	31
Figura 2.13 - Configuração (a) Módulos integrado, (b) <i>String</i> , (c) <i>Multistring</i> e (d) Inversor central .....	32
Figura 2.14 - Sistema FV conectado à rede através de um inversor monofásico com dois estágios de conversão.....	33
Figura 2.15 - Microinversor de dois estágios. ....	34
Figura 2.16 - Sistema composto por microinversor de dois estágios.....	35
Figura 2.17 - Microinversor de um estágio .....	35
Figura 2.18 - Desacoplamento de potência para estrutura de dois estágios.....	36
Figura 2.19 - Circuito de potência do conversor Boost ideal .....	36
Figura 2.20 - Circuito com a chave ligada do conversor boost modelo ideal.....	37
Figura 2.21 - Circuito com a chave desligada do conversor boost modelo ideal.....	38
Figura 2.22 - Tensão no indutor para chave ligada e desligada.....	39
Figura 2.23 - Corrente no indutor .....	39
Figura 2.24 - Gráfico do comportamento do conversor <i>boost</i> ideal e real.....	40
Figura 2.25 - Fluxograma do método perturbe e observe P&O.....	43
Figura 2.26 - Conversor CC/CA em Ponte H.....	44
Figura 2.27 - Sinal de saída do inversor com sua fundamental. ....	45
Figura 2.28 - Inversor em ponte completa com filtro de saída .....	46
Figura 2.29 - Inversor em ponte completa com filtro de saída .....	47
Figura 3.1 - Estrutura do modelo proposto.....	48
Figura 3.2 - Parâmetros do Módulo real ( <i>Psim</i> ) .....	49
Figura 4.1 - Esquemático para simulação dos valores dos módulos FV.....	54
Figura 4.2 - Curva de corrente do painel .....	55
Figura 4.3 - Curva de potência do painel.....	55
Figura 4.4 - Esquemático proposto para simulação no <i>Psim</i> .....	58
Figura 4.5 - Gráficos de correntes e tensão no indutor do conversor <i>boost</i> .....	59
Figura 4.6 - Gráfico de corrente e tensão na chave do conversor <i>boost</i> .....	59

Figura 4.7 - Gráfico de corrente e tensão no diodo do conversor <i>boost</i> .....	60
Figura 4.8 - Gráfico da tensão no capacitor.....	60
Figura 4.9 - Gráficos da corrente na chave do inversor em ponte H. ....	61
Figura 4.10 - Gráficos da Tensão na chave do inversor em ponte H. ....	61
Figura 4.11 - Corrente no indutor do Conversor CC/CA, em regime permanente .....	62
Figura 4.12 - Gráfico da tensão de saída do inversor, sem filtro $V_{ab}$ , e com o filtro $V_{FILTRO}$ . ....	62
Figura 4.13 - Gráfico da tensão e corrente de saída em fase .....	62
Figura 4.14 - Degrau de radiação .....	63
Figura 4.15 - Curva de potência do conversor <i>boost</i> para diferentes valores de radiação e temperatura de 25°C.....	64
Figura 4.16 - Curvas de tensão e corrente de entrada do <i>boost</i> para diferentes valores de radiação e temperatura de 25°C.....	65
Figura 4.17 - Curvas para radiação fixa e temperatura de 45°C, 25°C e 65°C.....	67
Figura 4.18 - Curva de potência de entrada do conversor <i>boost</i> para temperatura de 45°C, 25°C e 65°C.....	67
Figura 4.19 - Curvas de tensão e corrente de entrada do conversor <i>boost</i> para temperatura de 45°C 25°C e 65°C.....	68
Figura 4.20 - Gráfico das curvas de potências.....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Parâmetros do conversor .....	40
Tabela 2.2 - Sequência de Chaveamento do conversor em ponte H.....	44
Tabela 3.1 - Valores de projeto para fonte de entrada .....	48
Tabela 3.2 - Valores de especificações do microinversor comercial .....	49
Tabela 3.3 - Valores de projeto para conversor <i>boost</i> .....	50
Tabela 3.4 - Valores de projeto para inversor em ponte H.....	51
Tabela 4.1 - Valores simulado no <i>software Psim</i> .....	56
Tabela 4.2 - Valores para um módulo FV para condição de 1000W/m <sup>2</sup> e temperatura de 25°C.....	56
Tabela 4.3 - Valores simulado caso II item a P/2. ....	65
Tabela 4.4 - Caso II item a Erro (%) .....	66
Tabela 4.5 - Valores simulado caso II b) P/2.....	68
Tabela 4.6 - Caso II item b Erro (%) .....	69
Tabela 4.7 - Caso III. Potência e Erro (%) .....	69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência nacional de energia elétrica
AC	Corrente alternada
EPIA	Associação de indústria Fotovoltaicas Europeias
SEP	Sistema elétrico de potência
MPP	Ponto de máxima potência;
MPPT	Máximo power point Tracking
DC	Corrente Direta;
GD	Geração Distribuída
FV	Fotovoltaico
FF	Fator de Forma
P&O	Perturbe e observe;
P&D	Pesquisa e desenvolvimento
PWM	Modulação por largura de pulso
INPE	Instituto nacional de pesquisa espacial

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área do módulo
A	Ampere
a	Fator de idealidade da célula
C	Capacitância
D	Razão cíclica
G	Irradiação solar
$G_m$	Irradiação solar nominal
I	Corrente elétrica
$I_D$	Corrente Reversa de saturação do diodo
$I_{mp}$	Corrente de máxima Potência
$I_{pv}$	Corrente fotogerada
$I_{sc}$	Corrente de Curto Circuito
$I_L$	Corrente no indutor
K	Constante de Boltzmann
P	Potência
$N_s$	Numero de células
$R_s$	Resistência serie
$R_{sh}$	Resistência Shunt
T	Período
$T_{on}$	Tempo da chave ligada
$T_{off}$	Tempo da chave desligada
V	Tensão
$V_{CC}$	Tensão contínua
$V_L$	Tensão no indutor
$V_{mp}$	Tensão de máxima Potência
$V_{out}$	Tensão de saída
$\eta$	Eficiência
Rms	Raiz quadrática média

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	16
1.1 JUSTIFICATIVA .....	17
1.2 OBJETIVO .....	17
1.3 Objetivo geral .....	17
1.4 Objetivos específicos .....	18
1.5 METODOLOGIA .....	18
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 CONVERSÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA ATRAVÉS DE MICROINVERSORES.....	19
2.1.1 A ENERGIA SOLAR.....	19
2.1.2 TIPOS DE GERAÇÃO SOLAR .....	19
2.2 GERAÇÃO DISTRÍBUIDA.....	21
2.2.1 LEGISLAÇÃO .....	21
2.2.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS .....	22
2.3 SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO .....	23
2.3.1 COMPONENTES DO SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO.....	24
2.4 ASSOCIAÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS .....	30
2.5 SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE .....	32
2.6 MICROINVERSOR .....	33
2.7 TIPOS DE ESTÁGIO DE MICROINVERSOR .....	34
2.8 CONVERSOR <i>BOOST</i> .....	36
2.8.1 Princípio de funcionamento.....	37
2.9 ALGORITMO PARA RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS .....	42
2.9.1 P&O-Perturbe e observe.....	42

2.10	INVERSORES .....	43
2.10.1	PONTE COMPLETA.....	44
2.11	FILTRO DE SAÍDA ACOPLADO AO <i>FULL-BRIDGE</i> .....	45
3.	MODELO PROPOSTO E EXEMPLO DE PROJETO.....	48
3.1	PROJETO DO CONVERSOR <i>BOOST</i> .....	49
3.2	INVERSOR ( <i>Full bridge</i> ).....	51
3.3	AMOSTRAGEM E AQUISIÇÃO DE DADOS DOS CONVERSORES.....	52
4.	RESULTADO E DISCUSSÕES.....	54
4.1	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO .....	54
4.1.1	Resultados em regime permanente .....	57
5.	CONCLUSÃO .....	71
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA .....	72
7.	APÊNDICE A- ALGORITMO DE RASTREIO DA MÁXIMA POTÊNCIA .....	76

## 1. INTRODUÇÃO

A matriz elétrica brasileira apresenta-se como um modelo essencialmente hidrotérmico de potencial elevado com forte influência e predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários, composto pelas entidades de várias regiões do país como Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região do Norte (INPE, 2017).

Uma das desvantagens das usinas hidrelétricas, fora os impactos socioambientais provocados pelas grandes inundações, é a dependência de um regime de chuvas conforme foi constatado pelo apagão de 2001 (crise resultado de uma falha no planejamento elétrico brasileiro) (GAZOLI, 2011).

Embora esta permite uma alta expansão do potencial de geração a partir de duas formas: modernização e ampliação das usinas já existentes, instalação de geradores em represas onde não há geração, fora estes fatores a energia fornecida pelas hidrelétricas provém de um sistema intermitente que está sujeito ao regime de chuva da localidade em que se situa a usina, tornando-a uma fonte sem controlabilidade pelo homem (GAZOLI, 2011).

Sendo assim a opção pelo uso de outras fontes de geração de energias limpa e renováveis como a energia eólica e solar fotovoltaica, neste cenário surgem como alternativa para ajudar a aumentar a capacidade de geração de energia.

De acordo com Coelho (2008), a ampliação da tecnologia fotovoltaica, que aumenta exponencialmente desde a década de 70, pode se dar em razão de três aspectos distintos como: à melhora significativa dos materiais empregados na fabricação de células fotovoltaica. Que vem permitindo o aperfeiçoamento, não só em termos de eficiência de conversão, mas também em flexibilidade, peso e custos.

Outro aspecto é à busca incessante por fontes renováveis de energia que se adéquem às legislações vigentes, principalmente, nos tempos atuais, em que o apelo ecológico e as dificuldades na obtenção de licenças dos órgãos ambientais para construção de usinas de grande porte se fazem presente.

E a terceira questão que vem ajudando no desenvolvimento da tecnologia de geração fotovoltaica, é a evolução da eletrônica de potência, que é aplicada como ferramenta de processamento da energia fotogerada. Esta tem o objetivo de processar os níveis de tensão e corrente de entrada e ajusta-os para alimentar uma carga específica (COELHO, 2008).

Até fevereiro de 2011, o número de sistemas fotovoltaicos integrado com a rede elétrica em operação no Brasil apenas atingiu o valor de 51 unidades, dos quais, o maior número estava associado a projetos de P&D, com potência elétrica máxima instalada de 350kWp. Faz parte deste grupo os sistemas do convênio entre a UNICAMP, através do laboratório de Hidrogênio, e a CPFL com potência instalada de 7,5kWp, e o prédio de administração do IEE da USP, com potência instalada de 12kWp (ZILLES, 2001 apud GAZOLI, 2011).

Segundo a ANEEL (2019), em 2019 o Brasil ultrapassou a marca de 1GW de potência instalada no que diz respeito aos sistemas de micro e minigeração distribuída de eletricidade, sendo o resultado alcançado bastante motivado pela sua resolução normativa (REN) 482/2012, de 17 de abril de 2012, atualizada pela revisão REN 687/2015, de 24 de novembro de 2015, que garantiu as bases legais para que consumidores pudessem gerar sua própria energia e disponibilizar à rede sobre regime específico, discutido no subcapítulo 2.2 deste trabalho sobre geração distribuída.

Neste trabalho serão discutidos conceitos ligados à geração fotovoltaica, equipamento de conversão da radiação em eletricidade, modelagem e simulação de um modelo de microinversor baseado na estrutura de inversor em ponte H acoplado a dois conversores CC/CC do tipo *boost* com sistema de rastreamento de máxima potência independentes.

A necessidade de estudar o microinversor é devido às vantagens que o mesmo oferece para determinadas situações onde se busca uma maior eficiência do sistema.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A principal justificativa para a elaboração deste trabalho é a promoção do estudo de alguns dos mais variados conceitos ligados à eletrônica de potência aplicado à microgeração distribuída. Ajudar na facilitação e compreensão dos estudantes, sobre aspectos construtivos de um microinversor. Compreender o comportamento do conversor *boost* ideal com alto ganho como bloco CC/CC de um microinversor.

## 1.2 OBJETIVO

### 1.3 Objetivo geral

- Realizar simulação no *software Psim* do modelo de microinversor baseado na tecnologia em ponte H acoplado a dois conversores *boost* com

MPPTs independentes, aplicando parâmetros específicos e semelhantes a modelo de microinversor comercial.

#### 1.4 Objetivos específicos

- Revisão de alguns conceitos sobre circuitos e dispositivos eletrônico.
- Projetar o circuito de potência do microinversor.
- Estudar e simular os estágios CC/CC e CC/CA de um sistema de microgeração distribuída baseado em produção de energia solar fotovoltaica.
- Implementar um algoritmo rastreador do ponto de máxima potência (MPPT).
- Levantar a curva de potência máxima para módulos FVs.

#### 1.5 METODOLOGIA

A metodologia foi baseada inicialmente no estudo da revisão bibliográfica sobre os aspectos construtivos de um microinversor aplicado a sistemas fotovoltaico de baixa potência, seguida do estudo quantitativo e qualitativo do sistema proposto. Além disto são realizadas simulações computacionais usando o *software Psim*, a partir de um exemplo de projeto baseado em modelo comercial.

#### 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Capítulo 1: Traz uma breve introdução sobre energia e apresenta os objetivos gerais e específicos, a metodologia e mostra também a justificativa da elaboração deste trabalho.

Capítulo 2: Trata de uma breve discussão sobre os conceitos de energias solar, trazendo maior ênfase na energia solar fotovoltaica, apresentado alguns conceitos de microinversor tipos de estágios, conceitos de geração distribuída e legislação suas vantagens e desvantagens.

Capítulo 3: Apresenta o modelo proposto e exemplo de projeto, amostragem e aquisição de dados do conversor *boost*.

Capítulo 4: Apresenta os resultados da análise quantitativa e qualitativa do modelo proposto para simulação, ou seja, os valores calculados dos parâmetros do conversor CC/CC *boost* e do inversor *Full bridge* (conversor CC/CA), responsável pela inversão de tensão fornecida pelo *boost*.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Para uma maior harmonia e rigor científico a fim de propiciar o avanço em matérias de conhecimento é importante conhecer e reconhecer o que já feito por outros estudiosos (pesquisadores, empresas e outros) em seus mais variados trabalhos disponíveis em vários meios de acesso digital ou físico. Sendo esse a base que sustenta o conhecimento acadêmico.

A revisão da literatura tem como objetivo proporcionar um pouco deste, logo esta secção tem como foco apresentar as principais valências referente aos sistemas solar fotovoltaico com aplicação de microinversor, trazendo assim a importância fundamental de reforçar o processo de geração fotovoltaica e seus componentes.

### **2.1 CONVERSÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA ATRAVÉS DE MICROINVERSORES**

#### **2.1.1 A ENERGIA SOLAR**

O sol é um recurso natural inesgotável quando analisado dentro da escala terrestre de tempo, é um dos meios energéticos disponíveis, usado para o aproveitamento da energia na forma de calor e de luz, necessária para a evolução dos seres humanos. O sol é por si só a fonte originária da grande maioria das fontes de energia hoje conhecidas na terra (PINHO e GALDINO, 2014).

De acordo com Deinstmann (2009), na terra a energia solar é a responsável em garantir a existência do ciclo hidrológico da água, do ciclo do vento e de garantir a fotossíntese do mundo vegetal. Portanto, seguramente é possível identificar a importância do sol no processo de manutenção e garantia da vida terrestre.

No que diz respeito ao mecanismo de geração de energia elétrica, quando são construídas infraestrutura como parques eólicos, hidrelétricas e usinas solar, utiliza-se a energia do sol de modo indireto como fonte renovável (DIENSTMANN, 2009).

#### **2.1.2 TIPOS DE GERAÇÃO SOLAR**

Dentro dos sistemas de conversão de energia proveniente do sol é possível encontrar diversas formas de aproveitamento desta fonte, cuja à escolha na utilização de um ou de outro vai depender da natureza do projeto e das necessidades a qual ela se propõe a dar resposta, a radiação solar pode ser usada como fonte de energia térmica para aquecimento de fluidos para geração de potência mecânica, ou pode ser convertido de

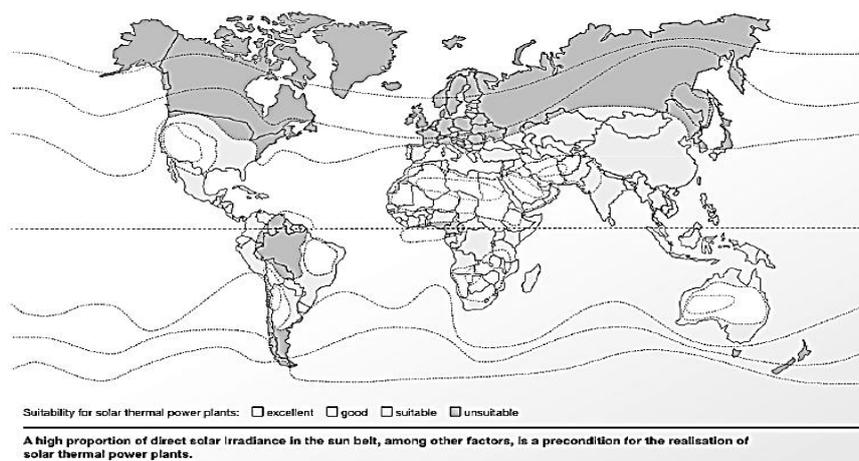
imediate em eletricidade por meio de efeito sobre matérias específicas, como termoelétrico e fotovoltaico (ANEEL, 2002).

Segundo Pereira (2017), estes modelos tecnológicos de geração de energia através do sol podem ser: sistemas de aquecimento solar de água, sistema solar fotovoltaico, e os concentradores solar. Dos quais neste trabalho dá-se maior ênfase aos sistemas fotovoltaicos por ser amplamente utilizado no Brasil e em vários outros países no mundo com forte projeção de crescimento, e por fazer parte da cadeia dos tópicos relacionados ao tema a discutir.

A tecnologia de concentradores solares é também bastante importante para o aproveitamento da energia fornecida pelo sol, porém esta demanda uma grande radiação solar para que o sistema possa atingir uma eficiência razoável, tendo em conta que para que se possa eficientemente concentrar a luz, é necessário a radiação direta e não a difusa, portanto, a pouca disponibilidade desta condição coloca limitações em alguns pontos do globo tornado em muitos casos não rentável a sua aplicação. Algumas localidades do mundo dispõem de grande potencial de irradiação solar direta e com alta intensidade (DIENSTAMNN, 2009).

Ainda segundo Dienstamnn (2009) através da Figura 2.1, áreas extensas de grande concentração da irradiação solar direta com valores maior que  $2.700 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$  encontram-se no norte do continente africano, no oeste do Estados Unidos, na Austrália, no oriente médio, ao noroeste da argentina e no Nordeste do Brasil.

Figura 2.1 - As áreas mais claras do mapa recebem maior quantidade de raio solar direto e são mais recomendadas para construção de concentradores solar térmico.



Fonte: Adaptado em Dienstamann (2009).

## 2.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Há algum tempo, várias nações do mundo vêm impulsionando o uso de energia através de fontes alternativas que não dependem dos combustíveis fósseis e que sejam de origem limpa.

De acordo com Gazoli (2013), as fontes renováveis têm uma valiosa contribuição para acudir a demanda crescente de eletricidade em vários países do mundo, garantindo o apoio na redução do uso de fontes poluidoras proveniente dos combustíveis fósseis. A utilização de sistemas fotovoltaicos distribuídos vem aumentando em vários países do mundo dos quais o Brasil se encontra. Esta forma de produção de eletricidade em comum com outros tipos de fontes renováveis contribuirá de forma significativa para as necessidades energéticas do mundo nas próximas décadas.

No Brasil, em 2003 a implantação do programa luz para todos através do ministério das minas e energias permitiu a implantação de um número significativo de sistemas fotovoltaicos que permitiu que comunidades passassem a consumir uma pequena quantidade de potência elétrica diária suficiente para agregar um conforto mínimo, outra hora inexistente para aquelas populações (GAZOLI, 2011).

### 2.2.1 LEGISLAÇÃO

No Brasil, a definição de geração distribuída (GD) surgiu com o artigo 14 do decreto lei nº 5.163, de 30 de julho de 2004 que define:

Para os fins deste Decreto, considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, incluindo aqueles tratados pelo art. 8º da Lei no 9.074, de 1995, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de empreendimento.

A resolução normativa da ANEEL nº 482 de 17 de abril de 2012:

“Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.” (ANEEL, 2012).

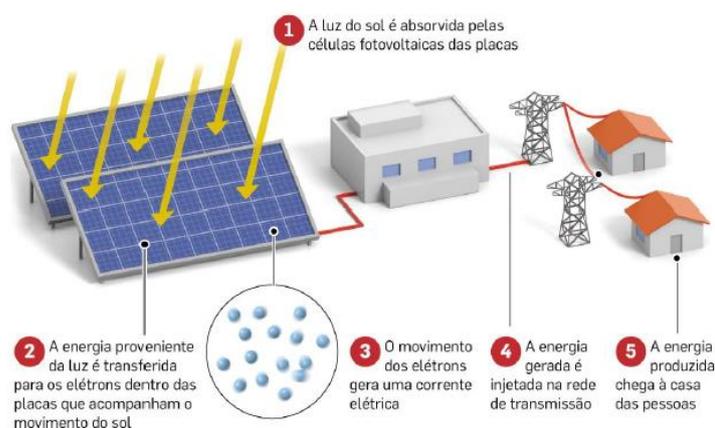
Logo com a inserção e vigência da resolução normativa supracitada, deu-se a possibilidade para que os consumidores pudessem gerar a sua própria energia elétrica através de fontes renováveis e cogeração, e o excedente ser disponibilizado à rede elétrica da distribuição local.

Este documento no seu Capítulo I, Art.1, relata as condições gerais de acesso à microgeração e minigeração distribuída, dentro daquilo que são os sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia.

Segundo a ANEEL (2017), a geração distribuída é o mecanismo de geração de energia elétrica que se diferencia do modelo de geração centralizada ou de usina de geração convencional, conforme exemplificado na Figura 2.2, este é instalado mais próximo da carga ou das unidades consumidoras, com a integração com a rede elétrica na forma de crédito.

Os sistemas de geração distribuída fundamentado em módulos fotovoltaicos são muito apropriados para aplicação em regiões com incidência da luz solar, onde os módulos fotovoltaicos têm como função converter a energia da luz em energia elétrica tornando assim um mecanismo direto de conversão da energia proveniente da radiação solar (OLIVEIRA, *et al.*, 2011).

Figura 2.2 - Diagrama de um Sistema fotovoltaico de geração centralizada



Fonte: Bastos (2017).

### 2.2.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS

Na geração distribuída o uso de sistemas fotovoltaicos oferece inúmeros ganhos como redução das perdas e dos custos para transmissão de energia elétrica, proporciona uma atenuação ou alívio das redes de transmissão e distribuição (GAZOLI, *et al.*, 2013).

De acordo com o PORTALSOLAR (2020), alguns benefícios da geração distribuída para o Brasil são:

- ✓ Diversificação da matriz energética;
- ✓ Evita a existência de perda por transmissão de energia;

- ✓ Equilíbrio de carga no sistema na rede de distribuição na fronteira com a rede básica;
- ✓ Matriz sustentável;
- ✓ Melhor aproveitamento dos recursos energéticos;
- ✓ Maior eficiência energética nos empreendimentos;

### 2.3 SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

A conversão fotovoltaica da energia solar parece ser uma das formas mais promissoras de satisfazer as necessidades crescentes de energia do futuro (FAHRENBRUCH, 1983).

Segundo Pinho e Galdino (2014), o fenômeno envolvido no uso direto da energia do sol para conversão de eletricidade (efeito fotovoltaico), foi inicialmente descrito pelo então físico francês Alexandre Edmond Becquerel, este efeito implica no surgimento de uma diferença de potencial nos terminais de uma célula eletroquímica em razão da incidência da luz.

Neste processo um fóton originário da radiação solar que carrega energia suficiente atinge um elétron da banda de valência, este movimenta-se da banda de valência para banda de condução formando uma lacuna, que se comporta como carga positiva, e nesta situação diz-se que o fóton criou um par elétron-lacuna (CASTRO, 2002).

Uma célula fotovoltaica composta por cristais de silício na forma pura, não produz energia eléctrica. Neste caso os elétrons passariam para a banda de condução, mas acabariam por se recombinar com as lacunas, não dando origem a qualquer corrente eléctrica (CASTRO, 2002).

Para que haja corrente eléctrica é necessário que exista um campo eléctrico, isto é, uma diferença de potencial entre duas zonas da célula. Através do processo conhecido como dopagem do silício, que consiste na introdução de elementos como boro e fósforo com o objetivo de alterar as propriedades eléctricas do silício. (CASTRO, 2002).

Com o processo de dopagem é possível criar duas camadas na célula: a camada tipo P (adição do boro no silício) e a camada tipo N (adição de fósforo no silício), que possuem, respectivamente, um excesso de cargas positivas e um excesso de cargas negativas, relativamente ao silício puro (CASTRO, 2002).

No efeito fotovoltaico após criado um campo eléctrico, dado pela dopagem do material, os elétrons na banda de condução que receberam a energia luminosa (e que estão localizado perto da zona de depleção), são acelerados pelo campo eléctrico. Sendo os

elétrons jogados para a camada N e as cargas positivas (lacunas) para a camada P, gerando assim diferença de potencial entre a camada N e P. Assim, na existência de uma carga nos terminais da célula FV, gera-se uma corrente elétrica. (OLIVEIRA, 2015).

A tecnologia fotovoltaica explora um recurso energético que existe em grande quantidade. Ao contrário de outras fontes de energia, um FV traz um valor significativo para questões ambientais, e pode ser instalado em quase qualquer lugar. (EPIA, 2011).

Grande parte dos sistemas solar fotovoltaico são instalados em residências, estabelecimentos de negócio nas áreas desenvolvidas.

O sistema *on-grid* (sistema conectado à rede) permite aos proprietários das instalações vender (no caso de alguns países da Europa) ou injetar e ser compensado, para o caso do Brasil com o modelo *net metering* (medição líquida), permitindo assim alimentar a rede com mais suplemento de energia limpa.

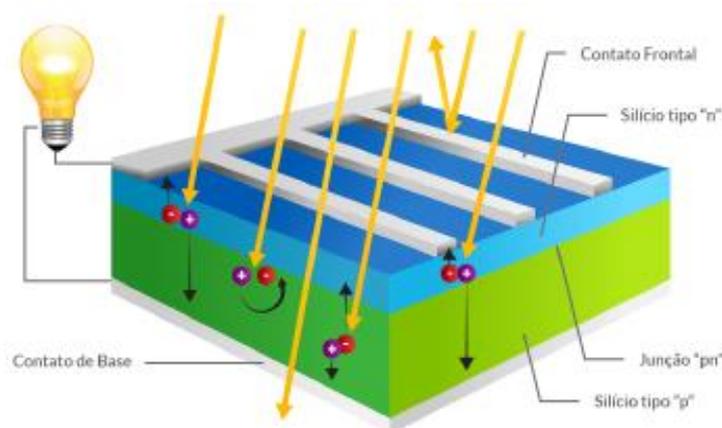
No caso de indisponibilidade do sol e conseqüente falta de geração do sistema fotovoltaico a rede passa a alimentar o sistema do cliente (EPIA, 2011).

## 2.3.1 COMPONENTES DO SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

### 2.3.1.1 Módulo Fotovoltaico

A célula fotovoltaica como pode ser observada na Figura 2.3, é um dispositivo muito importante no sistema fotovoltaico, sendo que este é o responsável pela conversão da radiação solar em eletricidade. A corrente gerada depende da intensidade da radiação e da área iluminada (PEREIRA, 2010).

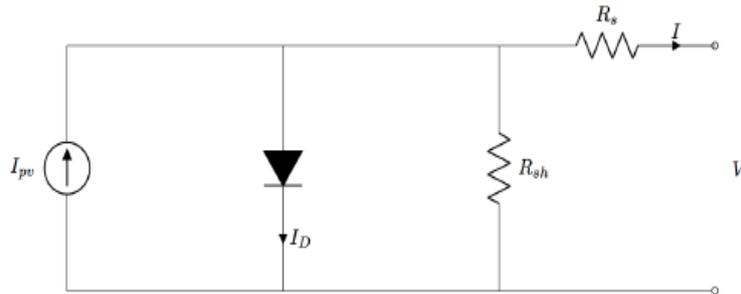
Figura 2.3 - Diagrama de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Bastos (2018)

Em termos de modelo matemático simplificado, uma célula fotovoltaica pode ser representada através do circuito elétrico equivalente da Figura 2.4, composto por um diodo que representa o tipo de junção P-N, a resistência do material é representada por  $R_s$ , e a resistência  $R_{sh}$  que está em paralelo e representa as impurezas e os defeitos na estrutura e uma fonte de corrente representado por  $I_{pv}$  que representa a corrente gerada devido a radiação da luz (MORAES, 2017).

Figura 2.4 - Modelo elétrico de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Sousa (2017).

Segundo Moraes (2017) e Sousa (2017), a corrente de saída pode ser determinada pela equação 1.2, o que permite também calcular outros parâmetros referente ao modelo de uma célula fotovoltaica. E recorrendo-se aos conceitos de análise de circuitos através do método da análise nodal é possível determinar as equações para o cálculo da corrente de saída  $I$ , corrente no diodo  $I_D$ , corrente fotogerada ou corrente fotoelétrica  $I_{pv}$ .

$$I = I_{pv} - I_D - I_{sh} \quad (1.2)$$

$I_{pv}$  – Corrente fotogerada (A).

$I_D$  – Corrente de saturação reversa do diodo (A).

$I_{sh}$  – Corrente que passa pela resistência shunt (A).

De acordo com Sousa (2017), através da equação de Shockley é possível calcular a corrente que passa através do diodo  $D$ , Equação 2.2 que é um diodo ideal:

$$I_D = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{q \times V_{oc}}{n \times k \times T}\right) - 1} \quad (2.2)$$

Em que  $I_{sh}$  que é a corrente que passa pela resistência shunt, e pode ser calculada através da Equação 3.2 como pode ser observado abaixo (MORAES, 2017).

$$I_{sh} = \frac{V + I \times R_S}{R_{sh}} \quad (3.2)$$

Por tanto de acordo com Sousa (2017), utilizando as Equações 2.2 e 3.2, disponíveis acima, e substituindo na Equação 1.2 é possível calcular a corrente de saída da célula fotovoltaica, conforme apresentado na Equação 4.2:

$$I = I_{pv} - I_D \left[ \exp \left( \frac{V + R_S I}{aV_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_S I}{R_{sh}} \quad (4.2)$$

Para Sousa (2017), a Equação 5.2 relaciona tensão e a temperatura e mostra outra dependência importante, entre os parâmetros que afetam diretamente o estudo do rastreamento do ponto de máxima potência, sendo que a um comportamento inversamente proporcional entre estas variáveis.

$$V_t = \frac{k \times T_{ac}}{q} \quad (5.2)$$

De acordo com Gazoli (2011), a corrente fotoelétrica ou corrente gerada  $I_{pv}$  devido à absorção da luz é um parâmetro de difícil determinação e pode ser obtida através da Equação 6.2. Nos *datasheets* dos painéis fotovoltaicos, fabricantes apenas fornecem a corrente de curto-circuito  $I_{sc}$  e não a  $I_{pv}$ .

$$I_{pv} = G \times \frac{I_{sc}}{G_n} \quad (6.2)$$

O valor da irradiação nominal é geralmente dado pelo fabricante e também visto na literatura como  $1000 \text{ W/m}^2$ .

A baixo pode ser identificado cada item das referidas equações do painel.

$T_{ac}$  – Temperatura de operação (K, °C).

$G$  – Irradiação solar da superfície ( $\text{w/m}^2$ ).

$G_n$  – Irradiação solar nominal ( $\text{w/m}^2$ ).

$q$  – Carga do elétron (C).

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

#### a) Equação de curto-circuito

Esta é calculado quando a tensão entre os terminais da saída é zero e informa a máxima corrente que a célula pode oferecer e pode ser determinado através da Equação 7.2 (SOUSA, 2017).

$$I_{sc} = I_{pv} - I_D \left[ \exp\left(\frac{R_s \cdot I_{sc}}{V_t \cdot a}\right) - 1 \right] - \frac{R_s I_{sc}}{R_{sh}} \quad (7.2)$$

**b) Equação para circuito aberto**

$$0 = I_{pv} - I_D \left[ \exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t \cdot a}\right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (8.2)$$

**c) Equação de máxima potência (MPP),  $V_{mpp}$ ;  $I_{mpp}$  :**

Esta equação permite calcular o ponto de máxima potência do painel, ou seja, o ponto na curva da Figura 2.5, onde ocorrer a melhor combinação entre corrente e tensão do painel FV. Este ponto é chamado de ponto de máxima potência (*maximum power point* – MPP), onde a corrente neste ponto é dada pela Equação 9.2 (SOUSA, 2017).

$$I_{mpp} = I_{pv} - I_D \left[ \exp\left(\frac{V_{mpp} + R_s I_{mpp}}{V_t \cdot a}\right) - 1 \right] - \frac{V_{mpp} + R_s I_{mpp}}{R_{sh}} \quad (9.2)$$

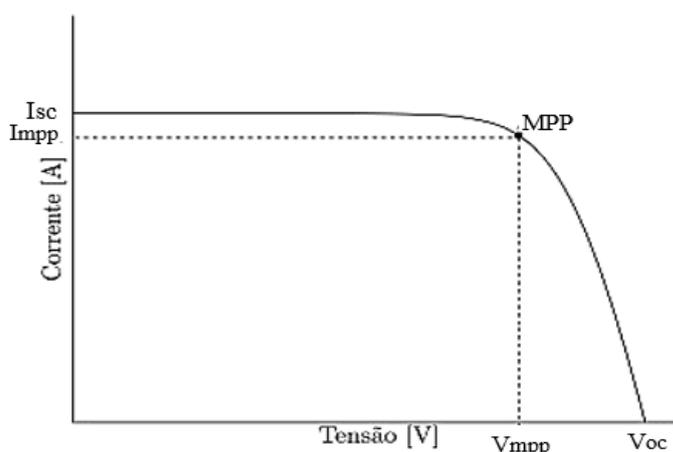
A corrente fotogerada ( $I_{pv}$ ) e a corrente de saturação reversa do diodo ( $I_D$ ) são itens que estão entrelaçados, ou seja, suas alterações estão ligadas a fatores como mudança de clima, como aumento ou redução de temperatura e irradiação solar (MORAES, 2017).

Cada item encontrado na equação de I, pode ser visto abaixo.

$V_t$  – Tensão térmica (V).

$a$  – Fator de idealidade do diodo.

Figura 2.5 - Curva de corrente e Tensão (I-V)



Fonte: Adaptado de Sousa (2017).

O gráfico I-V da Figura 2.5, permite visualmente observar que quando a célula atinge a corrente de curto-circuito  $I_{sc}$ , a tensão  $V_{oc}$  é nula, e quando a mesma está em

circuito aberto, a corrente é zero o que leva em ambos os casos a potência a se tornar também zero (SOUSA, 2017).

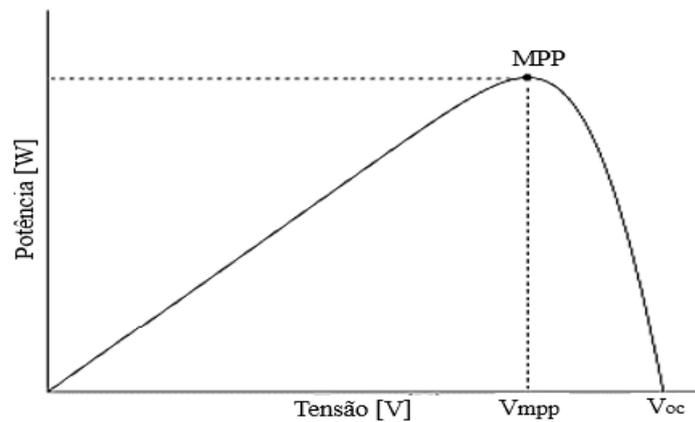
#### d) Fator de preenchimento

Um parâmetro bastante importante que permite avaliar o desempenho de uma célula é o fator de preenchimento, que auxilia a perceber o quanto a célula esteja a operar próximo do valor ideal, ou seja este é um valor que é obtido através da relação entre a máxima potência do painel idealizada e a máxima real que o painel pode operar (SOUSA, 2017).

O fator de preenchimento Equação 10.2 é calculado por meio da razão entre o produto da tensão máxima e a corrente máxima  $V_{mpp}I_{mpp}$ , e a tensão de circuito aberto vezes a corrente de curto-circuito  $V_{oc}I_{sc}$  como mostra a Equação 10.2. Para Chaar (2011, Apud SOUSA, 2017), o fator de preenchimento é um parâmetro importante na avaliação do desempenho da célula FV, sendo que este localiza-se no intervalo de 0,6 a 0,8 para células de silício e ajuda no cálculo da eficiência da célula fotovoltaica como destacado na Equação 11.2 disponível abaixo.

$$FF = \frac{V_{mpp}I_{mpp}}{V_{oc}I_{sc}} \quad (10.2)$$

Figura 2.6 - Curva de potência e tensão (P-V)



Fonte: Adaptado de Sousa (2017).

#### 2.3.1.2 Eficiência

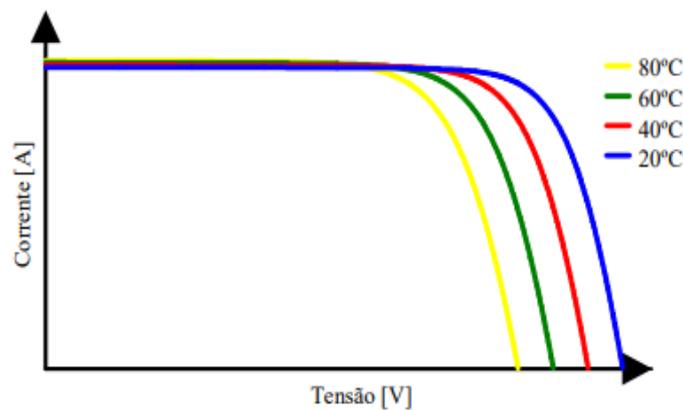
Este parâmetro observado na Equação 11.2, depende da irradiação absorvida  $G$  que atinge o painel e da área total  $A$ , em que a luz atinge (SOUSA, 2017).

$$\eta = \frac{FF \cdot (V_{oc}I_{sc})}{A \cdot G} \quad (11.2)$$

Alterações climáticas como o aumento de temperatura e de irradiação podem modificar o comportamento da curva de corrente e tensão. Ou seja, o aumento de temperatura provoca nas células uma redução na tensão e um leve aumento de corrente, o que pode ser verificado no gráfico da figura 2.7 (OLIVEIRA, 2015).

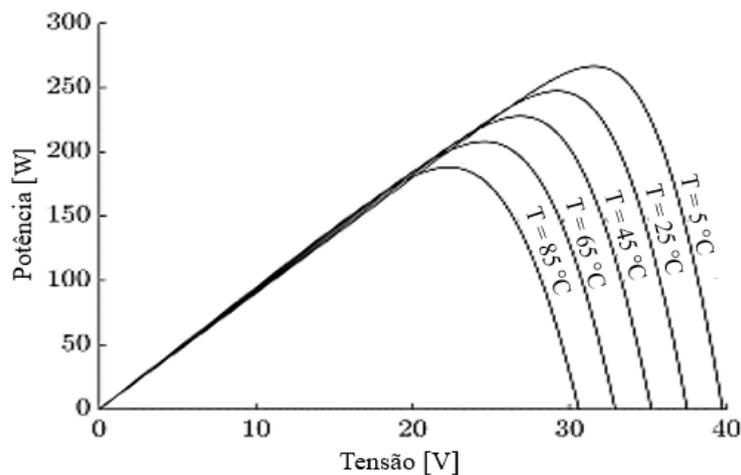
Para Sousa (2017), este comportamento também influencia na potência gerada promovendo uma redução de potência, como observado na Figura 2.8, que para valores de temperatura maior menor será a potência.

Figura 2.7 - Efeito da mudança temperatura no gráfico I-V



Fonte: Oliveira (2015).

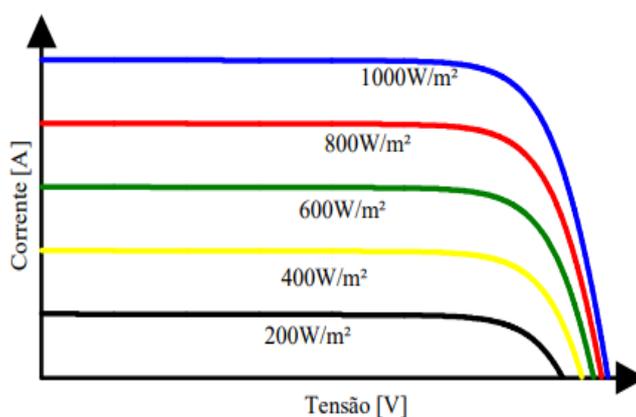
Figura 2.8 - Efeito da mudança de temperatura no gráfico P-V



Fonte: Adaptado de Sousa (2017).

Já a variação da irradiação tem um grande efeito sobre a corrente gerada pelas células, ou seja, um aumento de irradiação significa um aumento significativo na corrente, conforme observado na Figura 2.9 (OLIVEIRA, 2015).

Figura 2.9 - Efeito da mudança de irradiação no I-V



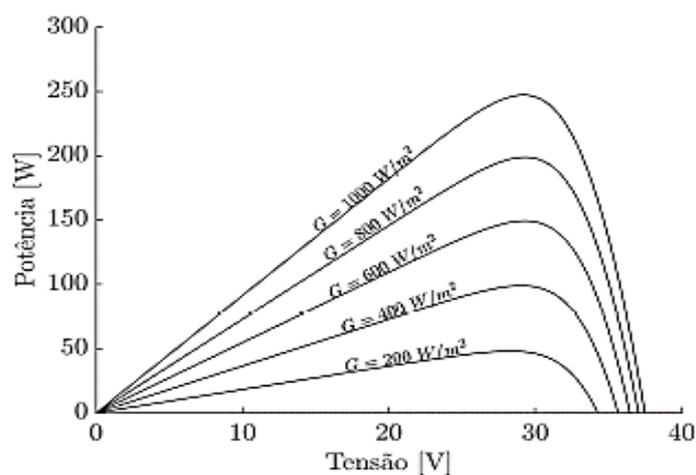
Fonte: Oliveira (2015).

No gráfico da Figura 2.10, é possível observar o comportamento da potência em função da variação da irradiação, o que se percebe que para valores maiores de irradiação haverá uma maior potência (SOUSA, 2017).

## 2.4 ASSOCIAÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

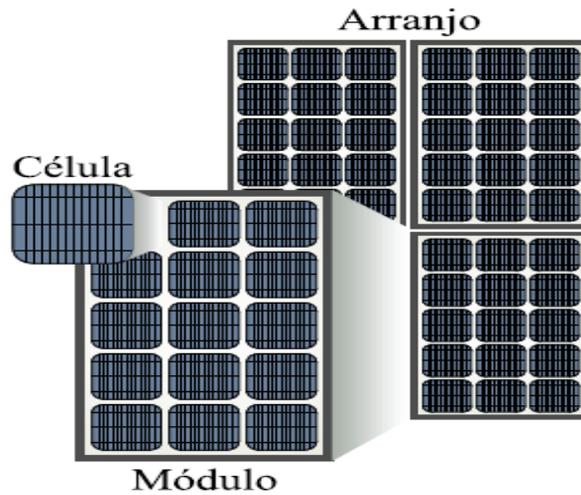
Devido à pouca capacidade das células individualmente poder fornecer uma potência maior e consequentemente um aumento da energia gerada, células fotovoltaicas são combinadas para formar um módulo fotovoltaico, que por sua vez quando combinados formam um arranjo FV como observado na Figura 2.11. Estes arranjos podem estar em série ou paralelo (COELHO, 2013).

Figura 2.10 - Efeito da mudança de irradiação na curva P-V



Fonte: Sousa (2017).

Figura 2.11 - Diferença entre, célula e módulo e arranjo FV.



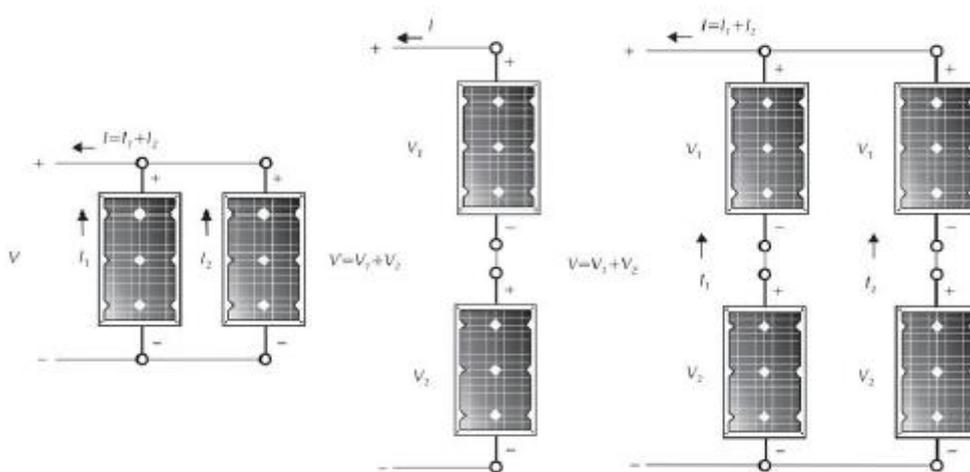
Fonte: Knabben, (2017).

Nas conexões em paralelo conectam-se todos os terminais de mesma polaridade, dessa forma todos os módulos terão valores de tensão iguais, porém as suas correntes diferentes, (VILLALVA 2015; apud BASTOS, 2018).

Ainda de acordo com Villalva (2015 apud, BASTOS, 2018), nas conexões em série, conectam-se os terminais de polaridades negativa de um, no positivo de outro de modo que a corrente que flui por todos os painéis seja igual, porém as tensões diferentes em cada modulo. Todas estas observações podem ser vistas na Figura 2.12.

Neste trabalho, por questão de projeto, adotou-se a configuração dos painéis em paralelo com objetivo de adquirir na saída do arranjo, como tensão equivalente a mesma de cada painel.

Figura 2.12 - Modelo de ligação (a) Paralelo, (b) Série, (c) Misto



Fonte: Adaptado de Bastos (2018)

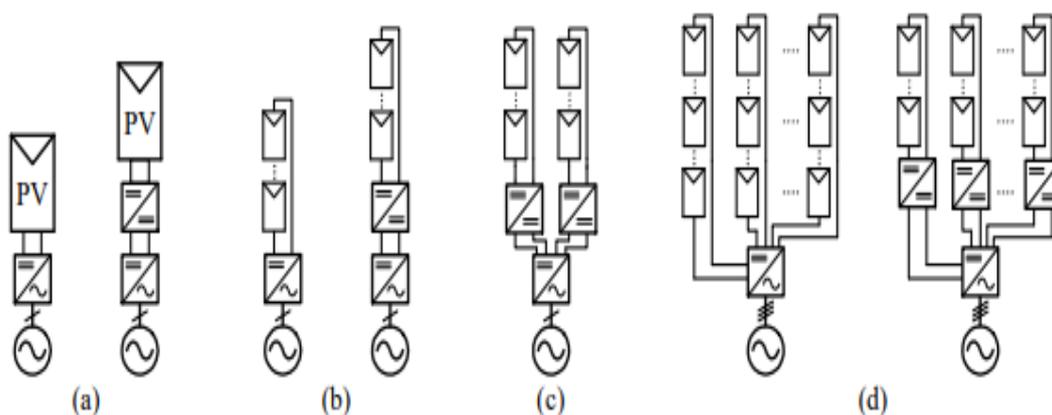
## 2.5 SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

O sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição de energia elétrica tem em sua composição pelo menos dois componentes principais que são, os módulos este que realizam a conversão da luz do sol em energia elétrica e os inversores cuja sua função primordial é converter a corrente contínua gerada pelos módulos em alternada, de forma mais geral outros componentes fazem parte do sistema, a exemplo de: proteção elétrica, de monitoramento e comunicação (GAZOLI, 2013).

Os sistemas fotovoltaicos apresentam diferentes ou variadas classificações definidas pelas disposições dos conversores e dos painéis, sendo que para todas as topologias, os componentes que constituem o sistema fotovoltaico integrado com a rede são os mesmos: painéis fotovoltaicos, estruturas de fixação, inversor, cabo de conexão, e medidor de fluxo de energia elétrica bidirecional (MARANGONI, 2012).

O medidor de fluxo bidirecional, tem a finalidade de realizar o registro da energia consumida da rede da distribuidora, e a fornecida para a mesma. Os sistemas FV podem apresentar quatro principais configurações como: Módulo integrado, Inversor central, *String*, *Multistring* que podem ser observados na figura 2.13 (MARANGONI, 2012).

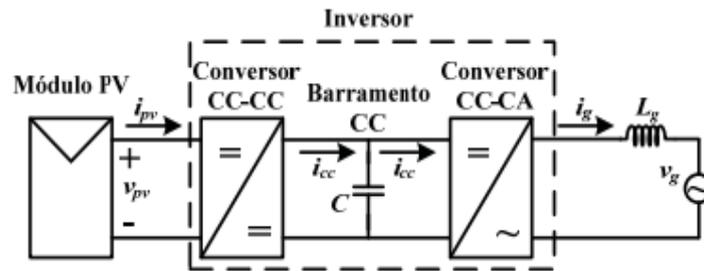
Figura 2.13 - Configuração (a) Módulos integrado, (b) *String*, (c) *Multistring* e (d) Inversor central



Fonte: Marangoni (2012).

O mecanismo que possibilita a integração da fonte (os painéis FV) com a rede é o inversor para o caso da Figura 2.14, destacada abaixo opera em dois estágios, dos quais no primeiro o conversor CC/CC realiza a regulação do nível de tensão e no segundo estágio conversor CC/CA opera realizando a inversão do sinal contínuo em alternada (GAZOLI, 2013).

Figura 2.14 - Sistema FV conectado à rede através de um inversor monofásico com dois estágios de conversão.



Fonte: Gazoli (2013).

## 2.6 MICROINVERSOR

O microinversor solar da Figura 2.15, é um dispositivo utilizado em operações fotovoltaicas com a finalidade de converter a corrente contínua gerada por um ou mais módulos fotovoltaicos em corrente alternada com fim de injetar a rede elétrica (KNBBEN, 2017).

Estes diferenciam-se dos convencionais inversores central, em razão da quantidade maior de módulos conectados: enquanto inversores centrais convertem a energia proveniente da associação de vários módulos fotovoltaicos, microinversores processam a energia oriunda de uma quantidade menor de módulos (KNBBEN, 2017).

Em muitas situações inversores centrais garantem eficiência muito baixa, em cenários onde existe sombreamento ou perdas pelo fato da estrutura de instalação (telhado) apresentar diferentes características, como diferentes orientações e inclinação.

### Vantagens

De acordo com Moraes (2017) e Portal Solar (2020), algumas vantagens do uso de microinversor em relação aos inversores de *strings* (central) é a possibilidade de trabalhar em baixa tensão de 110V ou 240V (menos risco para integrador) enquanto que os inversores *on grid* centrais operam na faixa de 300V até 800V.

Outras vantagens do microinversor:

- ✓ Rastreamento individual do ponto de máxima potência de cada painel e consequente aumento do rendimento;
- ✓ Permite o monitoramento de desempenho dos painéis de forma individual;
- ✓ O sistema se torna menos vulnerável devido a sombreamentos, pois a redução da potência fica restrita ao microinversor cujo painel está sombreado, e não no sistema completo;
- ✓ Fácil expansão do sistema, podendo ser realizada painel a painel.

E como uma das desvantagens associado ao uso de microinversor, é o alto custo, o que para algumas situações envolvendo grandes projetos, pode ser tornar inviável.

## 2.7 TIPOS DE ESTÁGIO DE MICROINVERSOR

Em muitas aplicações onde se deseja implementar um conversor CC/CC de painéis fotovoltaico, as topologias de um e dois estágio são bastante encontradas.

No caso dos microinversores de dois estágios como ilustrado nas Figuras 2.14 também na Figura 2.15 deste capítulo, eles são constituídos de um primeiro estágio CC/CC na entrada que tem como base fornecer um alto ganho, elevando e disponibilizando uma alta tensão CC advinda do painel, isso para um nível maior se comparado ao valor de pico da rede e ainda recorrer ao rastreamento do ponto de máxima potência do módulo FV. (OLIVEIRA, 2015; MORAES, 2017).

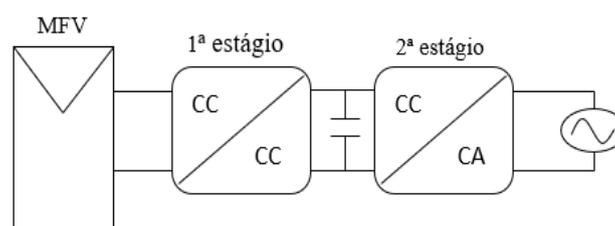
No estágio seguinte, o conversor CC/CA é responsável por realizar o controle de tensão do barramento CC, e de fornecer a rede ou ao SEP (sistema elétrico de potência) toda energia gerada, levando em consideração os parâmetros de qualidade e segurança de energia, garantindo uma operação adequada e desejada pelas concessionárias de energia (OLIVEIRA, 2015; MORAES, 2017).

Ainda de acordo com Moraes (2017), para que o módulo possa operar de forma desejada e interessante no ponto de máxima potência, é importante que se recorra ao desacoplamento de potência entre ambos os estágios adicionando um capacitor no barramento CC.

### Vantagens e Desvantagens

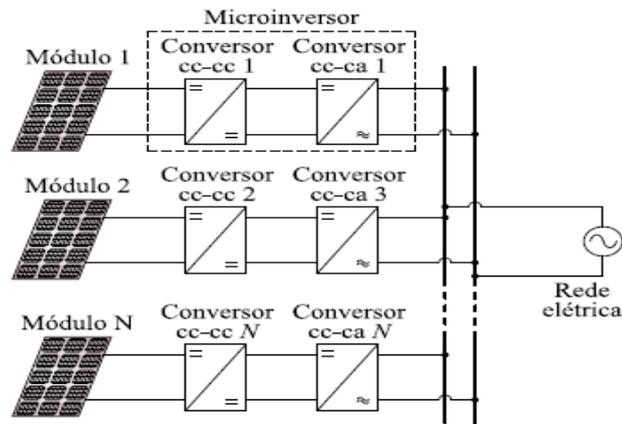
Para Junior (2011) e Oliveira (2015), a principal vantagem da estrutura de dois estágios é a independência de controle entre os estágios, e como desvantagem neste tipo de estrutura, há maior quantidade de componentes de armazenamento e semicondutores, este combinado com a alta frequência de operação do estágio inversor pode acarretar em redução na eficiência do conversor.

Figura 2.15 - Microinversor de dois estágios.



Fonte: Próprio autor.

Figura 2.16 - Sistema composto por microinversor de dois estágios

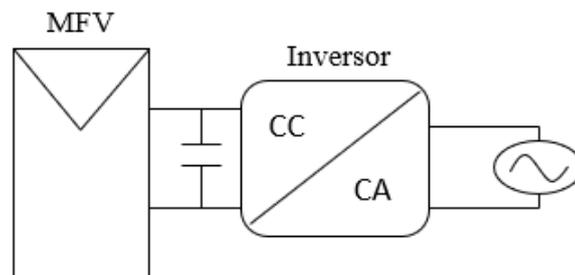


Fonte: Adaptado de Knabber (2017).

Para este trabalho foi escolhida a configuração de dois estágios cujo bloco CC/CC antecede o bloco inversor CC/CA e com estratégia de controle menos complexa.

Segundo Brito (2017, apud MORAES, 2017), na topologia de um estágio Figura 2.17, há maior complexidade e melhoria na eficiência, diferente da topologia de dois estágios. Porém observa-se também através da Figura 2.17, que no microinversor de apenas uma etapa não há demanda de uma fase CC/CC, o que exige que o conversor CC/CA deve comportar um alto ganho estático, promover a captura do ponto de máxima potência e disponibilizar o suprimento de energia a rede elétrica.

Figura 2.17 - Microinversor de um estágio

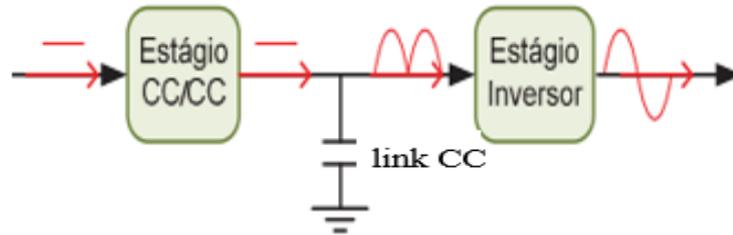


Fonte: Próprio autor.

A desvantagem desta estrutura (de um estágio) é que sua estratégia de controle se torna um pouco mais complexa, demanda maior processamento quando comparado ao de dois estágios. (JUNIOR, 2011).

Para Junior (2011), no modelo de somente um estágio inversor, disposto na Figura 2.17, o mesmo não consegue manter a potência alternada pulsante na rede ao mesmo tempo que a potência constante CC no painel. Já para o modelo de dois estágios o capacitor de link CC, é o que realiza esta operação como visto na Figura 2.18.

Figura 2.18 - Desacoplamento de potência para estrutura de dois estágios



Fonte: Adaptado de Junior (2011).

Apesar de essencial e necessário o uso de capacitor de desacoplamento em paralelo com o painel FV no caso de um estágio, este por si só também representa uma desvantagem para esse microinversor devido ao fato deste capacitor precisar ser de alta capacitância (se comparado ao usado no sistema de dois estágios) o que exige a escolha de capacitores eletrolíticos, este que reduz a vida útil do conversor e demanda maior manutenção (JUNIOR, 2011).

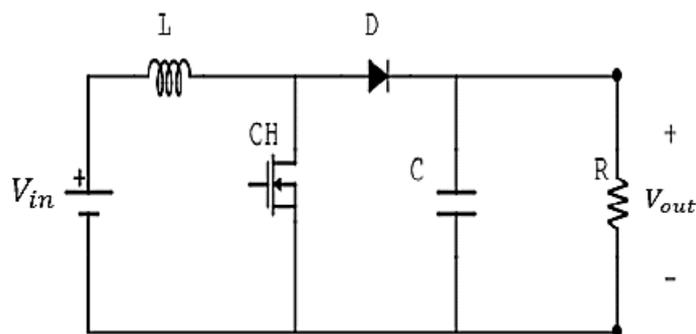
## 2.8 CONVERSOR *BOOST*

O conversor *boost* observado na Figura 2.19, é um circuito eletrônico de natureza CC/CC, sua característica básica é a capacidade de elevar o nível de tensão de entrada, fornecendo na sua saída um valor maior, através de comutação periódica de uma chave eletrônica. (HART, 2012).

Segundo Barbi (2006 apud TENÓRIO 2017), este dispõe de um indutor em série com a fonte de tensão, que leva o indutor a operar como uma fonte de corrente.

Este pertence ao grupo de conversores do tipo CC/CC classificado como conversor CC/CC de modo chaveado, também chamado de fonte chaveada dos quais pode-se destacar os conversores *buck* (abaixador), *buck-boost* (abaixador e também elevador) e outros (HART, 2012).

Figura 2.19 - Circuito de potência do conversor Boost ideal



Fonte: Tenório (2017).

### 2.8.1 Princípio de funcionamento

Quando a chave eletrônica representada pelo transistor CH do conversor *boost* é ligado, a tensão  $V_{in}$  é fornecida ao indutor representado por L, que por sua vez este vai acumular energia através do campo magnético. Nesta condição o diodo D estará bloqueado, ou seja, reversamente polarizado logo a tensão de entrada será igual a de saída.

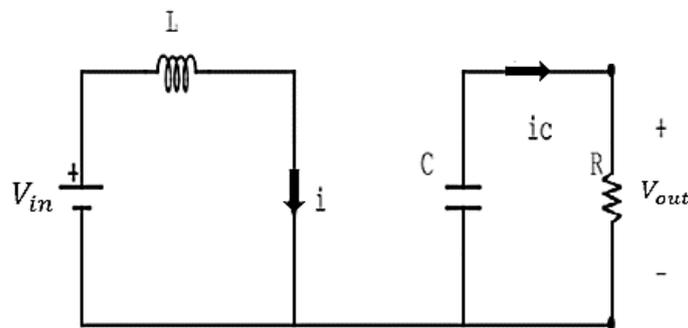
O circuito equivalente é apresentado na Figura 2.20 bem como as principais equações para a etapa de operação supracitada, podem ser observadas na Equação 12.2 até à Equação 14.2.

$$V_L = V_{in} \quad (12.2)$$

$$V_D = -V_{out} \quad (13.2)$$

$$T_{on} = DT_s \quad (14.2)$$

Figura 2.20 - Circuito com a chave ligada do conversor boost modelo ideal.



Fonte: Adaptado de Tenório (2017).

No instante em que a chave eletrônica CH desligar, o diodo estará diretamente polarizado e a tensão no indutor será a diferença entre as tensões de entrada e a tensão de saída do conversor. A Figura 2.21 mostra o circuito equivalente e as principais equações para esta etapa de operação são apresentadas na Equação 15.2 até a Equação 17.2.

De forma análoga para chave desligada temos que:

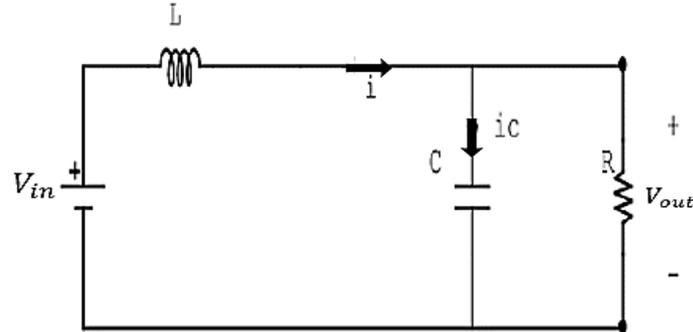
$$V_L = V_{in} - V_{out} \quad (15.2)$$

$$V_D = -V_L + V_{in} - V_{out} \quad (16.2)$$

$$T_{off} = (1 - DT_s) \quad (17.2)$$

Outras equações importantes que resultam da análise do conversor *boost*, para determinação de parâmetros com: potências, correntes de saída, corrente no indutor, indutância, capacitância e outros são apresentados no tópico sobre parâmetros.

Figura 2.21 - Circuito com a chave desligada do conversor *boost* modelo ideal.



Fonte: Adaptado de Tenório (2017).

A partir da análise de operação do conversor *boost* determina-se que a tensão no indutor é igual a tensão de entrada, ou seja,  $V_L = V_{in}$  no caso de condição de chave ligada, e para o caso de chave desligada o valor de tensão vista no indutor será  $V_L = V_{in} - V_{out}$ .

No caso em que considera o sistema operado em regime permanente no modo de condução contínua (MCC), o valor da tensão vista no indutor do conversor *boost* modelo ideal, após um ciclo de chaveamento é zero o que pode ser observado na Equação 18.2 disponíveis abaixo (TENÓRIO, 2017).

$$\int_0^{T_s} V_L dt = \int_0^{T_{on}} V_L dt + \int_{T_{on}}^{T_s} V_L dt = 0. \quad (18.2)$$

$$V_{ton} + (V_{in} - V_{out})(T_s - T_{on}) = 0. \quad (19.2)$$

$$(T_s - T_{on}) = T_{off}. \quad (20.2)$$

Segundo Coelho (2013), no modo de condução continua o ganho ideal do conversor *boost*,  $G$  depende apenas da razão cíclica, como mostra a Equação 21.2. Relaciona as tensões de saída e de entrada do conversor *boost*.

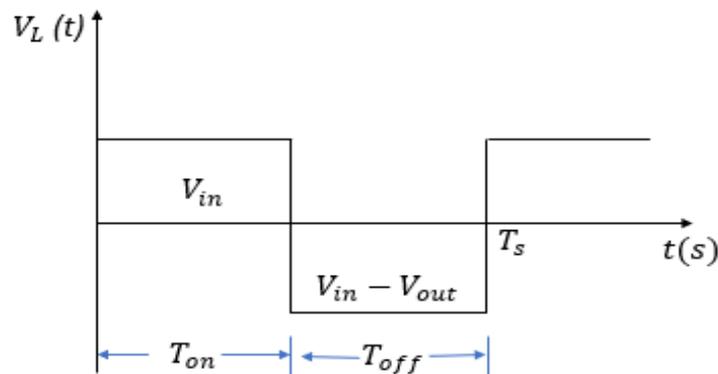
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{T_s}{T_{off}} = \frac{1}{1 - D} = G \quad (21.2)$$

De acordo com Tenório (2017) e analisado a Equação 21.2, se a razão cíclica ( $D$ ) for igual a 1, a tensão de saída irá para infinito ou seja  $V_{out} = \infty$ , como pode ser observado no gráfico das curvas do conversor *boost* Figura 2.24, para curva ideal.

No instante em que a razão cíclica for zero, ou seja, no início o valor do ganho estático do conversor *boost* ideal assume um valor acima de zero (TENÓRIO, 2017).

Através da Figura 2.22, é possível observar a forma de onda da tensão no indutor para o conversor *boost*, no instante em que a chave se encontra ligada  $T_{on}$  e desligada  $T_{off}$ .

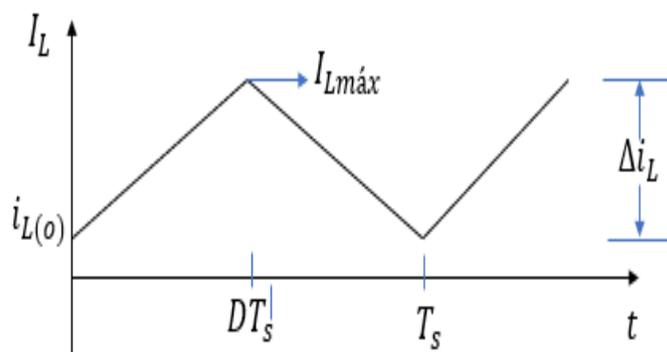
Figura 2.22 - Tensão no indutor para chave ligada e desligada



Fonte: Próprio autor.

De acordo com Hart (2012) e observado a Figura 2.23 que representa o gráfico do comportamento da corrente no indutor no modo de condução contínua, verifica-se que no instante de tempo zero este já dispõe de um certo valor de corrente inicial. O valor da corrente no indutor não atinge o nível de zero.

Figura 2.23 - Corrente no indutor



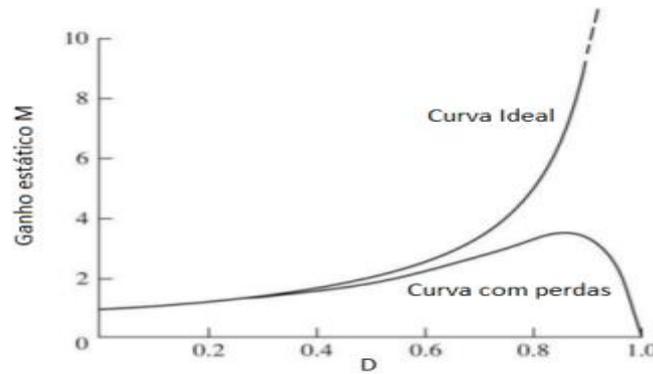
Fonte: Próprio autor.

Na prática o gráfico do conversor *boost* real, considerando as perdas devido à não idealidade dos componentes que constituem o conversor *boost* como: resistências no indutor, chave, capacitor e diodo obedece a Figura 2.24, (curva com perdas) que para valores de razão cíclica muito elevada o ganho do conversor vai para zero (SHIAVON 2019).

No caso deste trabalho, sendo que se considera um conversor *boost* modelo ideal para simulação, e que obedece a curva ideal da Figura 2.24, logo a questão do conversor

*boost* operar com alto valor de razão cíclica para atingir um alto ganho não representa um problema.

Figura 2.24 - Gráfico do comportamento do conversor *boost* ideal e real



Fonte: Shiavon (2019).

A Tabela 2.1 apresenta de forma organizada os parâmetros do conversor *boost*, com as suas respectivas unidades.

Tabela 2.1 - Parâmetros do conversor

Parâmetros	Unidades
Potência de saída ( $P_o$ )	W
Potência de entrada ( $P_{in}$ )	W
Tensão de Saída ( $V_{out}$ )	V
Tensão de entrada ( $V_{in}$ )	V
Ondulação de corrente ( $\Delta_L$ )	%
Ondulação de Tensão ( $\Delta V$ )	%
Frequência de chaveamento ( $f$ )	Hz
Rendimento ( $\eta$ )	%

Fonte: Próprio autor.

Os valores de potência de entrada e de saída são determinados através da Equação 22.2 e a Equação 24.2, e dependem dos valores de corrente e tensão.

$$P_{out} = \frac{V_{out}^2}{R} \quad (22.2)$$

$$P_{out} = V_{out}I_{out} \quad (23.2)$$

$$P_{in} = V_{in}I_{in} \quad (24.2)$$

De acordo com Hart (2012), através do processo de ligar e desligar a chave eletrônica, a taxa a qual a corrente varia no indutor é constante, o que permite dizer que a corrente aumenta de forma linear num instante.

As equações que descrevem a variação de corrente para as duas etapas de chaveamento para o modo de condução contínua são descritas na Equação 26.2 e na Equação 28.2 (TENÓRIO, 2017).

Chave ligada

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_{in}}{L} \quad (25.2)$$

$$\Delta i_{L(ligada)} = \frac{V_{in}DT}{L} \quad (26.2)$$

Chave desligada

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_{in} - V_{out}}{L} \quad (27.2)$$

$$\Delta i_{L(desligada)} = \frac{(V_{in} - V_{out})(1-D)T}{L} \quad (28.2)$$

A Equação 29.2 descreve a corrente que passa pelo indutor, e as Equações 30.2 e 31.2 descrevem a corrente máxima e mínima no indutor (TENÓRIO, 2017).

$$I_L = \frac{V_{out}I_{out}}{V_{in}} \quad (29.2)$$

$$I_{máx} = I_L + \frac{\Delta_L}{2} \quad (30.2)$$

$$I_{min} = I_L - \frac{\Delta_L}{2} \quad (31.2)$$

Indutância e Capacitância

O cálculo da indutância é dado pela Equação 32.2, cujo valor mínimo pode ser calculado através da Equação 33.2, e a capacitância é descrita através da Equações 34.2.

$$L = \frac{V_{in}D}{f\Delta i_L} \quad (32.2)$$

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2R}{2f} \quad (33.2)$$

$$C = \frac{I_0 D}{(\Delta V) f} \quad (34.2)$$

De acordo com Hart (2012), a ondulação de tensão no capacitor é dada pela Equação 35.2, e depende da frequência de chaveamento da razão cíclica, da resistência e da capacitância do conversor. Para o caso do projeto foi considerado que todos os componentes são ideais.

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf} \quad (35.2)$$

## 2.9 ALGORITMO PARA RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Durante os estudos do módulo fotovoltaico observou-se que o valor de saída do painel não é linear, apresenta dependência direta da radiação e da temperatura, por este fato é necessário adoção de técnica para promover o melhor desempenho do módulo para as diferentes condições de operação.

Sendo assim recorre-se a estratégia denominada rastreamento do ponto de máxima potência, ou seja, MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). Este procedimento ajuda a garantir que o sistema no caso o painel opere na sua máxima potência, promovendo assim um melhor aproveitamento energético do sistema. (MORAES, 2017). Ainda segundo o autor o MPPT trata-se de um algoritmo otimizador implementado para gestão do conversor CC/CC responsável por promover a conexão entre o conjunto de módulos e a carga.

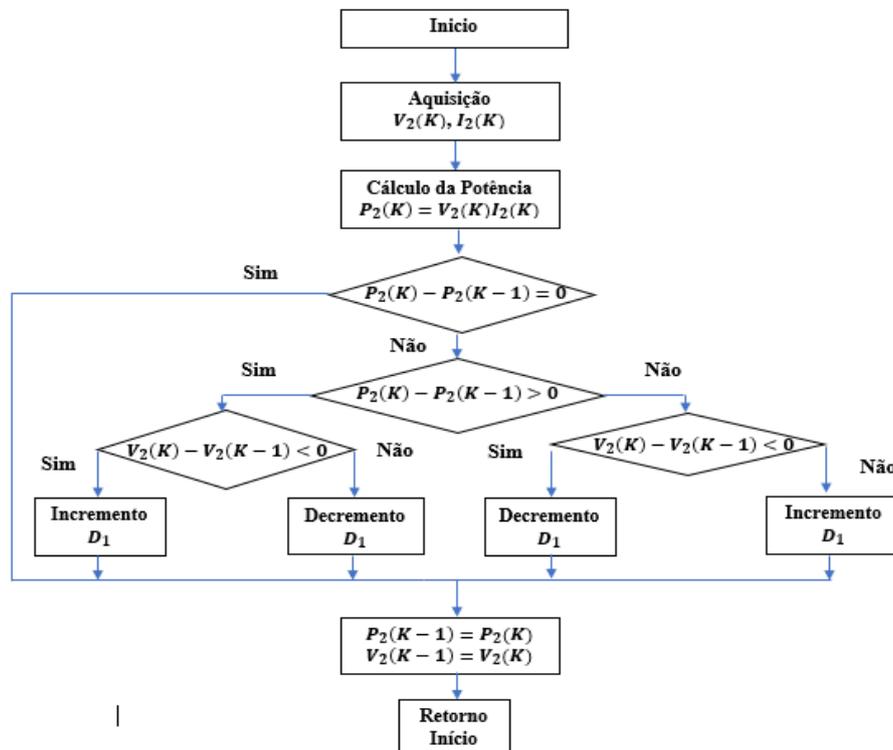
Existe disponível na literatura diversos tipos de algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência que são baseados em metodologias distintas, porém todos com o mesmo fim de otimizar a atividade dos painéis através do controle do conversor. Pode-se destacar alguns como: razão cíclica constante, tensão constante, fração da tensão de circuito aberto, fração da corrente de circuito aberto, e o método *perturbe & observe* (P&O) este que será abordado neste trabalho.

### 2.9.1 P&O-Perturbe e observe

Este método pode apresentar algumas variações na forma como as variáveis são apresentadas, porém, sua base de operação é perturbando a tensão na saída do painel e verificando a potência de saída, através da alteração da razão cíclica do conversor CC/CC (TENÓRIO, 2017 e OLIVEIRA, 2018).

O código opera variando a razão cíclica para aumentar ou diminuir a tensão. A Figura 2.26 mostra o fluxograma para a implementação deste algoritmo. (OLIVEIRA, 2018).

Figura 2.25 - Fluxograma do método perturbe e observe P&O



Fonte: Adaptado de Oliveira (2018)

Apesar de bastante eficiente esta metodologia pode trazer grandes oscilações no caso de menor radiação, não apresenta uma boa resposta em caso de mudança brusca de radiação o que pode levar à escolha inicial de uma direção menos favorável para atualização do ponto de operação do sistema. A escolha do passo ( $\Delta V$ ) deve ser feito de forma cuidadosa e assertiva, sendo que o seu tamanho definirá o quão variante o algoritmo será no ponto de máxima potência, sendo que para valores menores de ( $\Delta V$ ) o algoritmo será menos oscilantes e conseqüentemente terá menos poder de rapidez no rastreamento do MPP (FILALI; LAADISSI; ZAZI, 2016 e MORAES, 2017).

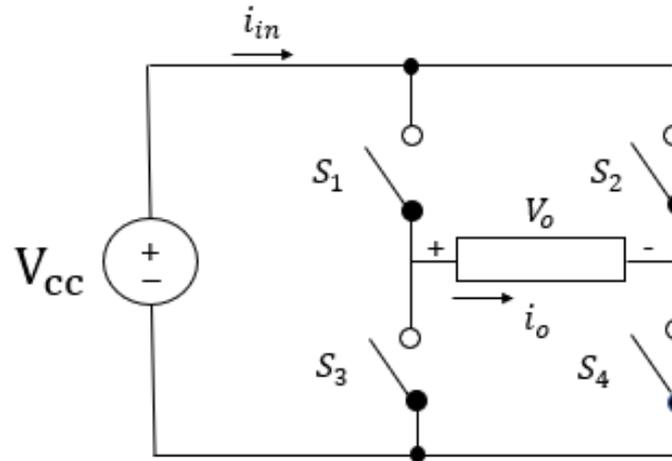
## 2.10 INVERSORES

Segundo Hart (2012) inversores são circuitos que convertem sinais de tensão e corrente CC em CA. Os inversores comportam várias aplicações como: Fonte de alimentação sem interrupção as chamadas UPS, funcionamento de aparelhos CA através de baterias de automóveis e acionamento de motores CA ajustáveis a rotação.

### 2.10.1 PONTE COMPLETA

Este circuito eletrônico Figura 2.26, de estrutura simples é projetado para fornecer uma saída CA através de uma componente CC na sua entrada, por meio de fechamento e abertura de chaves eletrônicas em sequência adequada. Dos quais a tensão de saída pode ter vários níveis como  $+V_{cc}$ ,  $-V_{cc}$ , e zero. (HART, 2012).

Figura 2.26 - Conversor CC/CA em Ponte H



Fonte: Adaptado de Hart (2012)

Neste tipo de topologia de conversor CC/CA (bloco inversor), o sequenciamento correto das chaves é um parâmetro indispensável, que deve ser feito de forma adequada para evitar que ocorra um curto-circuito na fonte de entrada, o que Hart (2012) chama de falha de disparo direto. Caso chaves que não podem estar ligadas ao mesmo tempo estejam, para evitar esse problema deve haver elemento de controle do tempo de chaveamento.

Na Tabela 2.2, pode-se observar o sequenciamento de chaves para os diferentes níveis de tensão.

Tabela 2.2 - Sequência de Chaveamento do conversor em ponte H

Chave	Tensão
$S_1$ e $S_4$	$+V_{cc}$
$S_2$ e $S_3$	$-V_{cc}$
$S_1$ e $S_2$	0
$S_3$ e $S_4$	0

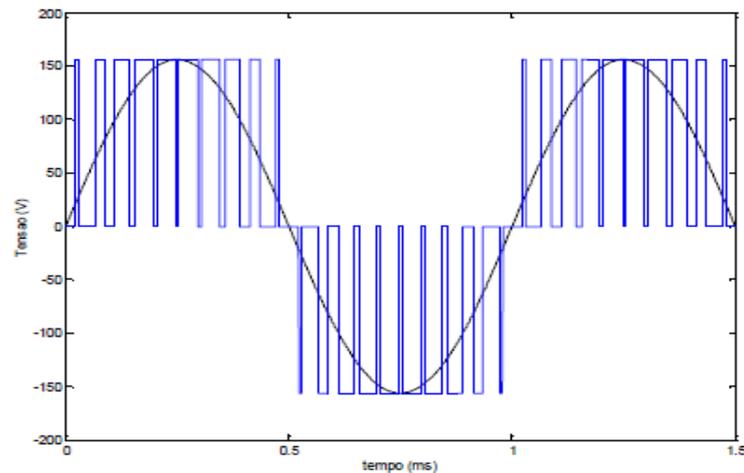
Fonte: Adaptado de Hart (2012)

A estratégia de chaveamento que permite que de primeira as chaves  $S_1$  e  $S_4$  estejam de forma síncrona ligadas e após o desligamento destas, as chaves  $S_3$  e  $S_2$  sejam ligadas

é a que garante que a carga possa perceber um valor de tensão e corrente alternada (para Figura 2.26) não senoidal e sim quadrada o que para algumas aplicações pode ser desejado (FERRONI, 2018).

Na Figura 2.27 é possível observar os gráficos das formas de onda da tensão de saída do inversor e sua fundamental em ponte H.

Figura 2.27 - Sinal de saída do inversor com sua fundamental.



Fonte: Rossi (2011).

## 2.11 FILTRO DE SAÍDA ACOPLADO AO *FULL-BRIDGE*

O uso de filtros para promover atenuação do conteúdo harmônico presente na forma de onda gerada pelo inversor (conversor CC/CA) em ponte completa é um parâmetro importante, em caso de busca por um valor de tensão e corrente senoidal para o fornecimento a carga e a rede elétrica o que se poderia configurar como uma melhor qualidade de energia (ROSSI, 2011).

Ainda de acordo com Rossi (2011), com uma onda quadrada é possível através de filtros produzir uma tensão senoidal, porém para cargas maiores isso exigiria filtros com dimensões muito maiores o que inviabilizaria o projeto, logo com modulação PWM senoidal obtém-se uma forma de onda com conteúdo harmônico bem menor facilitando a atuação do filtro acoplado na saída do inversor.

Sendo assim, aplica-se filtros passa baixa para eliminar os harmônicos de alta frequência do sinal de saída e permitir que seja disponível apenas a fundamental, que se trata de uma senoide com a mesma frequência da tensão da moduladora.

O filtro LC da Figura 2.28 é estruturado sobre dois elementos apenas. O que leva a sua operação e implementação ser bastante simples, onde o dispositivo em paralelo, no

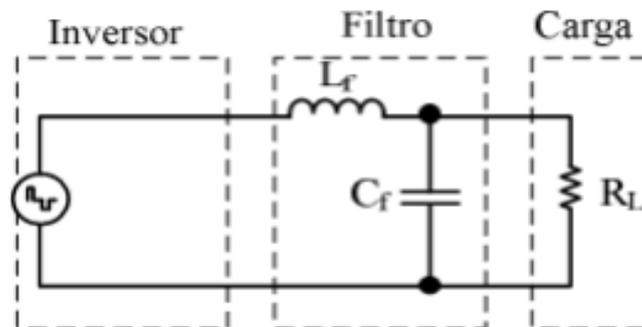
caso o capacitor apresenta baixa impedância tornando um caminho para as componentes harmônicas de alta frequência disponível na saída, e o indutor colocado em série tem a função de filtrar os harmônicos da tensão (ROSSI, 2011).

A escolha correta dos componentes que serão utilizados no projeto do filtro é um parâmetro bastante importante, sendo este o responsável pelo alto volume e peso do microinversor (EREDNICKI, PAULO e SANTOS, 2007 apud MACENA, GUIRAU, MARCATO, 2015).

O filtro LC da Figura 2.28, possui maior vantagem em relação ao L, porque permite melhor atenuar os componentes harmônico devido à presença do capacitor, porém a uma desvantagem neste, segundo Cha, H. e Vu, T. K., (2010 apud MORAES, 2017), sua geometria, que faz com que o capacitor esteja em paralelo com a rede fazendo com que a frequência de ressonância dependa da impedância da rede o que não se deseja nas aplicações.

Outro ponto é a necessidade de adição de um coeficiente de amortecimento seja passivo ou ativo já que o mesmo amplifica sinais, que a frequência se aproxima da frequência de ressonância (CHA, H. e VU, T. K., 2010 apud MORAES 2017).

Figura 2.28 - Inversor em ponte completa com filtro de saída



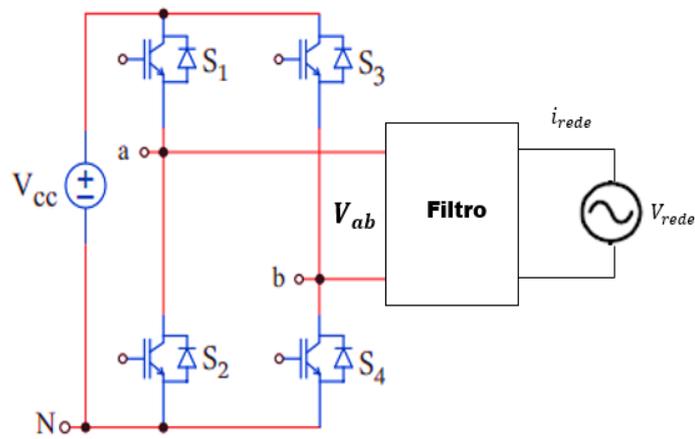
Fonte: Macena, Guinau, Marcato (2015).

Considerando a carga puramente resistiva como pode ser visto na Figura 2.28, a relação entre a tensão de saída e de entrada fornece a impedância equivalente como observado na Equação 36.2 (MACENA, GUINAU, MARCATO, 2015).

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Z_{eq}}{Z_1 + Z_{eq}} \quad (36.2)$$

A Figura 2.29, apresenta um inversor ponte completa (conversor CC/CA) com um filtro de saída, que está conectado à rede elétrica.

Figura 2.29 - Inversor em ponte completa com filtro de saída



Fonte: Adaptado de Bacon et al., (2011).

A frequência de operação do filtro de saída para modulação SPWM unipolar deve ser o dobro da frequência de chaveamento dos transistores, para que a tensão de saída possa se aproximar o máximo da tensão disponível na rede elétrica.

De acordo com Rossi (2011), o cálculo dos parâmetros do projeto do filtro LC segue as equações abaixo, onde a capacitância  $C$  pode ser calculada através da Equação 37.2 e a indutância  $L$  pela Equação 38.2, sendo  $f_c$  a frequência de corte e  $R$  a resistência.

$$C = \frac{1}{4\pi\xi f_c R} \quad (37.2)$$

$$L = \frac{1}{2\pi f_c^2 C} \quad (38.2)$$

O fator de amortecimento  $\xi$  é dado através da Equação 39.2, e a frequência angular de oscilação  $\omega_o$  é calculado através da Equação 40.2, e depende da indutância e da capacitância do filtro.

$$\xi = \frac{1}{2R_L} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (39.2)$$

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (40.2)$$

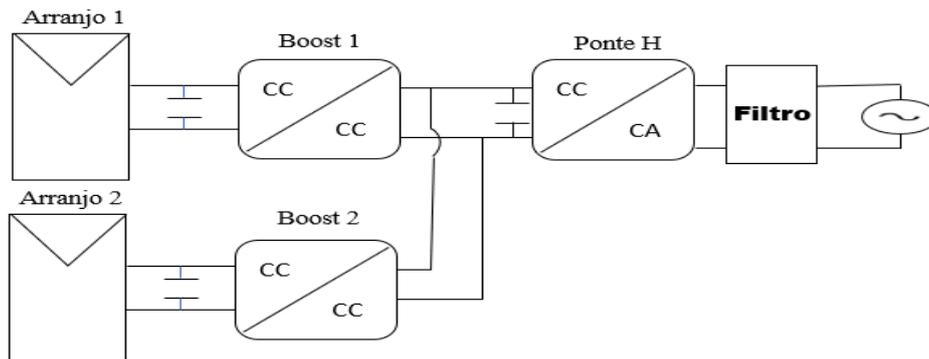
De acordo os autores Macena, Guinau, Marcato (2015), a frequência de corte  $f_c$  do filtro, também é conhecida com frequência de ressonância e é dado em Hz.

### 3. MODELO PROPOSTO E EXEMPLO DE PROJETO

Após revisão da literatura, o modelo proposto foi traçado e pode ser visto na Figura 3.1 a sua representação na forma simplificada para simulação.

O esquemático é composto de dois conversores CC/CC *boost* em paralelo que juntos formam o bloco CC/CC e um conversor CC/CA responsável por inverter o sinal de contínuo em alternado, e um filtro responsável por reduzir o conteúdo harmônico.

Figura 3.1 - Estrutura do modelo proposto



Fonte: Próprio autor.

A análise foi feita utilizando conceitos de circuitos elétrico e eletrônico a fim de identificar os valores de resistência, indutância cujo os respectivos valores podem ser observados neste capítulo 3.

No caso da Tabela 3.1, observa-se os valores de projeto que são superiores aos valores reais disponibilizados pelo *software Psim*. Ou seja, os valores simulados são menores que os disposto no *datasheet* do painel.

Tabela 3.1 - Valores de projeto para fonte de entrada

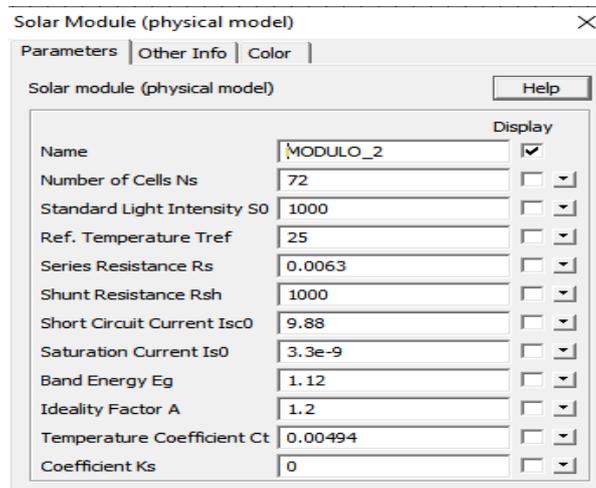
Módulo solar Trina-Solar	
$P_{mpp}$	375W
$V_{mpp}$	40V
$I_{mpp}$	9,37A
$V_{oc}$	48,5V
$I_{sc}$	9,88A
$N_s$	72 células

Fonte: Próprio autor.

A Figura 3.2 ilustra os parâmetros do módulo aplicado no *software Psim*, usando um exemplo de módulo físico onde foram aplicados os valores reais disposto no *datasheet*

do painel da Trina solar, a fim de analisar os valores reais e os simulados, o que de certa forma por alguma limitação do Psim os valores simulados se mostraram inferiores.

Figura 3.2 - Parâmetros do Módulo real (*Psim*)



Fonte: Próprio autor.

Assumindo que o projeto é de um microinversor de potência  $P=1500W$ , tendo como fonte de entrada um arranjo fotovoltaico que fornece ao conversor *boost* um valor de  $V_{in} = 40V$  e disponibiliza na saída uma tensão CC de  $V_{cc} = 350V$ .

Os dois conversores CC/CC supracitados são projetados considerando as especificações de painéis do fabricante Trina-Solar de 72 células monocristalino nas condições NOCT que pode ser verificado em Tabela 3.1. O projeto do microinversor foi baseado no modelo comerciais do fabricante Hoymiles cujas especifica-se encontra-se na Tabela 3.2, sendo que este suporta até 4 painéis e tem dois MPPT, para cada dois painéis.

Tabela 3.2 - Valores de especificações do microinversor comercial

Microinversor Hoymiles MI-1500	
P	1500W
$V_i$	36~48V
$I_i$	11,5A
$V_o$	220V
f	60HZ

Fonte: Próprio autor.

### 3.1 PROJETO DO CONVERSOR *BOOST*

A Tabela 3.3 apresenta os valores de projeto do conversor CC/CC, cujo valor de tensão de entrada é de 40V, com objetivo de ter na saída do conversor *boost* um valor de tensão 350V.

Como observado também na Tabela 3.3, foi considerado o *ripple* de corrente  $\Delta I_L = 10\%$  e  $\Delta V = 1\%$  e 4 módulos em paralelo sendo que o microinversor suporta até 4 módulos.

Tabela 3.3 - Valores de projeto para conversor *boost*

<b>Parâmetros</b>	<b>valores</b>
Potência de saída ( $P_o$ )	1500W
Tensão de entrada ( $V_{in}$ )	40V
Tensão de saída ( $V_o$ )	350V
Variação de corrente ( $\Delta I_L$ )	10%
Variação de Tensão ( $\Delta V$ )	1%
Frequência de chaveamento ( $f$ )	20kHz

Fonte: Próprio autor.

O valor da resistência é dado pela Equação 3.1, sendo que a corrente de saída do conversor CC/CC através da Equação 3.2.

$$R = \frac{V_o^2}{P} = 82\Omega \quad (3.1)$$

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} = 4,29A \quad (3.2)$$

A corrente que circula pelo indutor é dada pela Equação 3.3, sendo este valor para 4 painéis. Em cada indutor do conversor CC/CC *boost* passa metade de  $I_L$ .

$$I_L = \frac{4 * P_{in}}{V_{in}} = 37,5A \quad (3.3)$$

O resultado da razão cíclica do conversor CC/CC *boost* projetado é dado através da Equação 3.4.

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_o} = 0,8857 \quad (3.4)$$

Para Silva (2010 apud Junior, 2004) o valor da capacitância de entrada (entre o conversor CC/CC e o módulo FV) pode ser determinado através da Equação (3.5).

$$C_{IN} = \frac{LI_L \Delta I_L}{V_{in} \Delta V_{in}} = 4,14mF \quad (3.5)$$

Os valores de Indutância e capacitância são vistos nas Equações 3.6 e 3.7, sendo valores mínimos necessário para operação do conversor CC/CC.

$$L = \frac{V_{in}D}{f\Delta i_L} = 472,4\mu H \quad (3.6)$$

$$C = \frac{I_oD}{(\Delta V)f} = 54,3\mu f \quad (3.7)$$

A Equação 3.8 e a Equação 3.9 mostram os resultados do tempo em que a chave do conversor *boost* fica ligado e desligado.

$$T_{on} = DT = 44,3\mu s \quad (3.8)$$

$$T_{off} = (1 - D)T = 5,715\mu s \quad (3.9)$$

### 3.2 INVERSOR (*Full bridge*)

O valor da tensão senoidal que deve ter na saída ( $V_{out}$ ) do conversor CC/CA (bloco inversor) é dado pelo valor de 220V  $R_{ms}$ . O pico da tensão eficaz, é dado através da Equação 3.10.

A tensão de saída do conversor CC/CA depende de um parâmetro denominado de índice de modulação, sendo que os sistemas de modulação operam em valores baixos de tensão devido ao fato de serem elementos de controle.

A relação entre os valores da tensão da portadora (triangular)  $V_{trin} = 2V$ , observado na Tabela 3.4, e da inversora  $V_{inv} = 1,776V$  é determinado pela Equação 3.15.

Tabela 3.4 - Valores de projeto para inversor em ponte H

<b>Parâmetros</b>	<b>valores</b>
Potência de saída ( $P_o$ )	1500W
Tensão de entrada ( $V_{in}$ )	350V
Tensão de pico saída ( $V_{out}$ )	311V
Tensão Portadora ( $V_{trin}$ )	2V
Frequência de chaveamento ( $f$ )	20kHz

Fonte: Próprio autor.

Para que o conversor CC/CA seja capaz de fornecer um valor de tensão de saída eficaz de 220V, o mesmo deve operar com uma tensão máxima de 311V, cujo valor calculado é observado na Equação 3.10:

$$V_{out} = V_{ef}\sqrt{2} = 311,12V \quad (3.10)$$

A resistência de carga do conversor CC/CA é calculada através da Equação 3.11 e depende da potência de saída.

$$R = \frac{V_{ef}^2}{P} = 32,3\Omega \quad (3.11)$$

A Equação 3.12, descreve o índice de modulação, cujo valor pode ser observado na Equação 3.13.

$$V_{out} = m \times V_{cc} \quad (3.12)$$

$$m = \frac{311V}{350V} = 0,888 \quad (3.13)$$

O valor da tensão da moduladora senoidal e da portadora triangular deve obedecer a relação apresentada na Equação 3.14.

$$V_{trin} \geq V_{sen} \quad (3.14)$$

Para o controle das chaves dos conversores foi aplicado modulação por largura de pulso senoidal, cujo o valor de tensão da fonte senoidal é observado na Equação 3.15 e através do índice de modulação é calculado o valor da tensão triangular.

$$V_{sen} = mV_{trin} = 1,776V \quad (3.15)$$

No caso da modulação por largura de pulso o valor de pico da senoide não deve ultrapassar o pico do sinal da portadora triangular.

### 3.3 AMOSTRAGEM E AQUISIÇÃO DE DADOS DOS CONVERSORES

Para o caso das simulações foi usado um tempo de amostragem de 1 $\mu$ s e um tempo total de 1,6s, e incremento da razão cíclica utilizado no algoritmo de MPPT, foi de 9ms. O tempo de amostragem foi implementado ajustando o segurador ZOH (segurador de sinal de amostragem) em 100Hz.

Este ajuste foi feito com objetivo de garantir um tempo necessário para que a potência do conversor se estabilize antes de uma nova perturbação promovida pelo algoritmo de MPPT.

Outros dispositivos utilizados durante a simulação foram os sensores de corrente e tensão usados na entrada do conversor *boost*, para realização da aquisição de dados referente a tensão e corrente, e que foram mantidos com ganho unitário.

Também foram utilizados filtros de primeira ordem com ganho unitário e frequência de corte de 2kHz, entre o segurador ZOH e os sensores de corrente e tensão, cujo objetivo é de reduzir os ruídos inerente ao sistema devido ao chaveamento do conversor *boost*.

O valor da frequência de corte deste filtro é uma década a baixo da frequência de chaveamento do conversor *boost*.

A corrente de pico do inversor é dada pela Equação 3.16 é calculado através do produto da potência do inversor vezes a raiz de dois, dividido pela tensão eficaz.

$$I_p = \frac{\sqrt{2P}}{V_{ef}} = 9,64A \quad (3.16)$$

Também foi utilizado um sensor de corrente no indutor do inversor cujo o valor do ganho é dado pela Equação 3.17, e relaciona o índice de modulação e a corrente de pico.

$$G = \frac{m}{I_p} = 0,092 \quad (3.17)$$

## 4. RESULTADO E DISCUSSÕES

### 4.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Neste capítulo, será apresentado três casos de simulação composto por: caso I, caso II, e caso III. Também será apresentado uma situação de análise das formas de onda dos conversores em regime permanente. Para cada situação terá uma breve explicação.

#### Caso I

Neste caso I, será traçado a curva de potência versus a tensão, assim como a curva de corrente versus a tensão do módulo fotovoltaico.

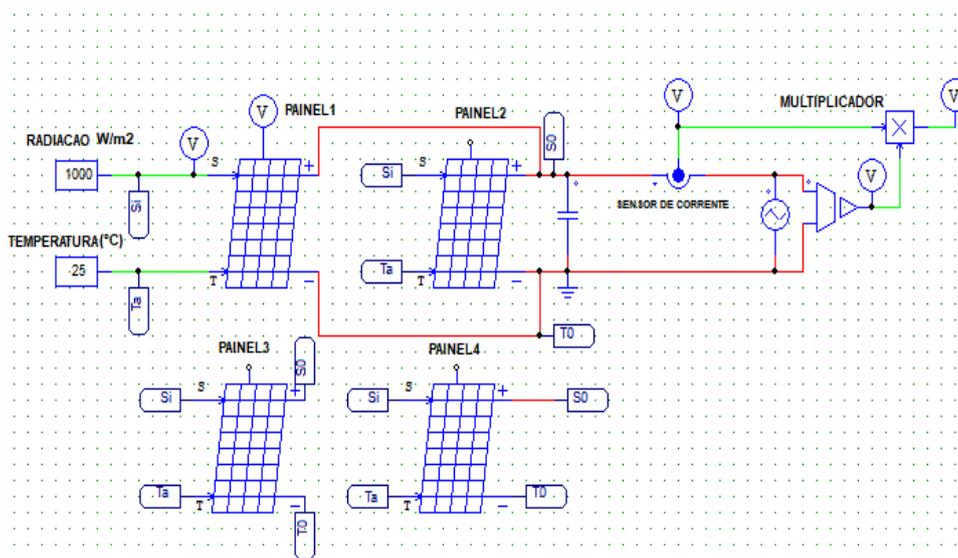
##### a) Curva de potência do painel FV

Um procedimento essencial para compreender o comportamento do módulo fotovoltaico do sistema é traçar a curva de potência e tensão e a curva de corrente e tensão, para valores de radiação solar e temperatura fixados em  $1000 \text{ W/m}^2$  e  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Para análise adotou-se a ferramenta do *Psim* nomeado *calculate I-V curve*, que permite gerar os dados referente à potência, tensão e corrente no ponto de máxima potência quando aplicada as informações do modelo de painel FV.

Na Figura 4.1, é apresentada a estrutura do esquemático adotada para a simulação dos valores teóricos de máxima potência, seja de um painel individual como também para um arranjo FV composto de dois ou quatro painéis, onde a fonte triangular em paralelo com o arranjo tem a função de permitir o rastreamento da curva  $V \times I$  do painel, forçando a variação da tensão do mesmo.

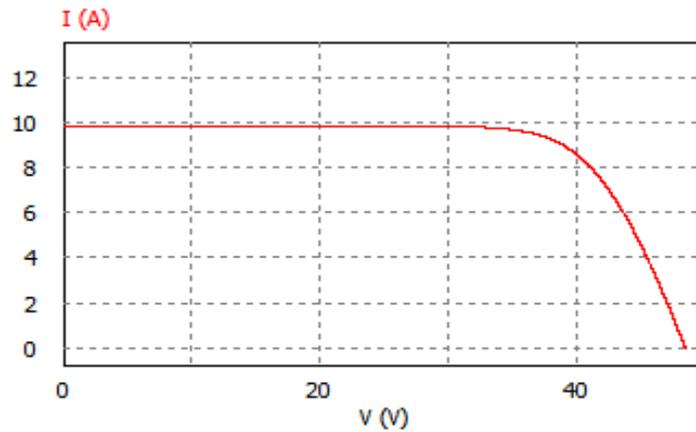
Figura 4.1 - Esquemático para simulação dos valores dos módulos FV.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 4.2 é observado o valor máximo de corrente e tensão de um painel FV, cujo os valores encontra-se detalhados na Tabela 4.1.

Figura 4.2 - Curva de corrente do painel

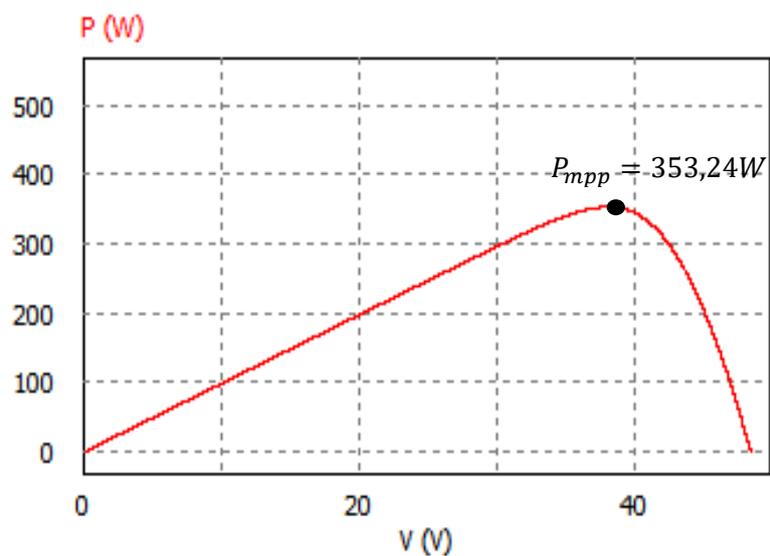


Fonte: Próprio autor.

Na Figura 4.3 é possível observar a curva de potência versus tensão, que também é resultado da implementação da ferramenta *calculate I-V curve*.

Através da Figura 4.3, que detalha a curva de potência e tensão do painel fotovoltaico, percebe-se, que o valor do ponto de máxima potência é inferior a 375W e a tensão é inferior a 40V, os valores detalhados encontram-se na Tabela 4.1 cuja potência no ponto de MPP de um painel é de 353,24W e tensão 38,10V.

Figura 4.3 - Curva de potência do painel



Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 4.1 é possível verificar os valores reais (de um painel apenas), para os respectivos parâmetros do painel FV resultado da implementação da ferramenta *calculate*

I-V *curve*. A Tabela 4.1 também desta os valores de tensão de curto aberto e de corrente de circuito aberto cujo valor é inferior a 10A.

Tabela 4.1 - Valores simulado no *software Psim*

1-Módulo simulado	
$P_{mpp}$	353,24W
$V_{mpp}$	38,10V
$I_{mpp}$	9,27A
$V_{oc}$	48V
$I_{sc}$	9,88A

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 4.2 são apresentados os valores simulado de um módulo fotovoltaico nas condições padrão de teste, onde a radiação é de 1000 W/m<sup>2</sup> e temperatura de 25°C

Tabela 4.2 - Valores para um módulo FV para condição de 1000W/m<sup>2</sup> e temperatura de 25°C

Valores do modulo fotovoltaico			
100 W/m <sup>2</sup>		200 W/m <sup>2</sup>	
$P_{mpp}$	34,06W	$P_{mpp}$	70,12W
$V_{mpp}$	36,62V	$V_{mpp}$	37,70V
$I_{mpp}$	0,93A	$I_{mpp}$	1,86A
300 W/m <sup>2</sup>		400 W/m <sup>2</sup>	
$P_{mpp}$	106,90W	$P_{mpp}$	143,26W
$V_{mpp}$	38,18V	$V_{mpp}$	38,41V
$I_{mpp}$	2,80A	$I_{mpp}$	3,73A
500 W/m <sup>2</sup>		600 W/m <sup>2</sup>	
$P_{mpp}$	179,41W	$P_{mpp}$	214,88W
$V_{mpp}$	38,50V	$V_{mpp}$	38,51V
$I_{mpp}$	4,66A	$I_{mpp}$	5,58A
700 W/m <sup>2</sup>		800 W/m <sup>2</sup>	
$P_{mpp}$	250,37W	$P_{mpp}$	285,09W
$V_{mpp}$	38,46V	$V_{mpp}$	38,37V
$I_{mpp}$	6,51A	$I_{mpp}$	7,43A
900 W/m <sup>2</sup>		1000 W/m <sup>2</sup>	
$P_{mpp}$	319,30W	$P_{mpp}$	353,23W
$V_{mpp}$	38,24V	$V_{mpp}$	38,09V
$I_{mpp}$	8,35A	$I_{mpp}$	9,27A

Fonte: Próprio autor.

Seguindo estas referências de valores, o conversor CC/CC *boost* foi modelado e simulado dentro dos valores do *datasheet* do microinversor e projetado, conforme o capítulo anterior.

Sendo assim, cada conversor CC/CC fornece ao conversor CC/CA  $P_{mpp} = 706,48\text{W}$ , o que leva ao arranjo completo em paralelo disponibilizar uma potência total no ponto de máxima potência de até  $P_{mpp} = 1412,96\text{W}$  devido a própria limitação de potência disponibilizada por cada painel acoplado ao sistema.

#### 4.1.1 Resultados em regime permanente

As simulações para análise em regime permanente foram realizadas para as condições de radiação de  $1000\text{W/m}^2$  e temperatura de  $25\text{ }^\circ\text{C}$ .

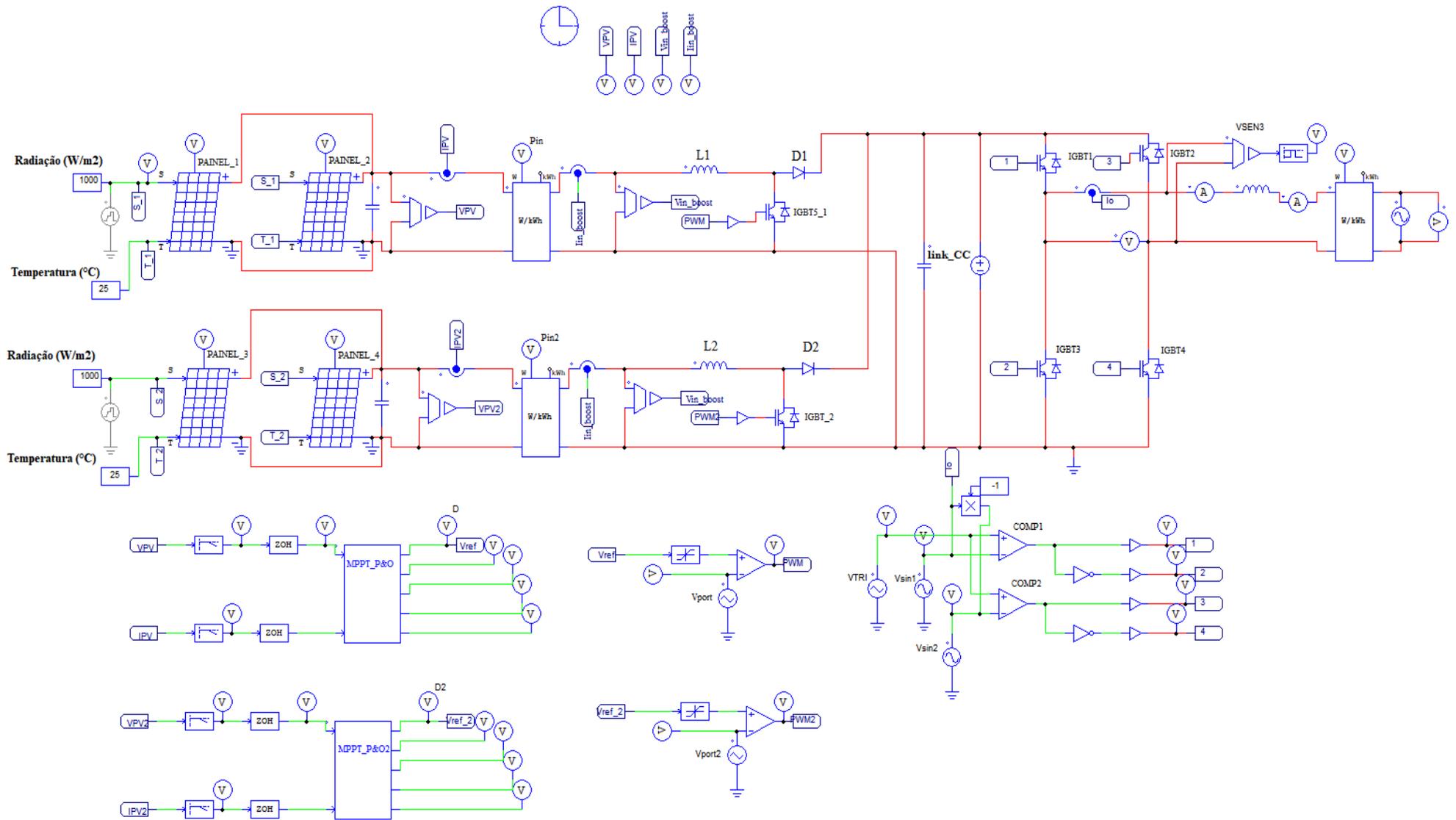
Um detalhe importante a ser mencionado, é que para análise do detalhamento das formas de onda do conversor CC/CC *boost*, e do conversor CC/CA o procedimento é realizado na escala de tempo muito pequena, quando comparado ao procedimento de análise do funcionamento do MPPT.

Na Figura 4.4 é apresentado o esquemático proposto para simulação e análise das forma de onda em regime permanente.

Sendo assim, as formas de onda do microinversor para o valor nominal de operação, são destacados dentro deste tópico, sobre regime permanente onde a Figura 4.5 apresenta os gráficos de corrente e tensão no indutor, dos quais o gráfico azul representa a corrente no indutor, porém filtrada.

Um ponto importante a destacar é o uso do filtro para os valores de corrente e tensão de entrada no bloco C (bloco de implementação do algoritmo de MPPT), a fim de reduzir as ondulações inerentes do conversor *boost*.

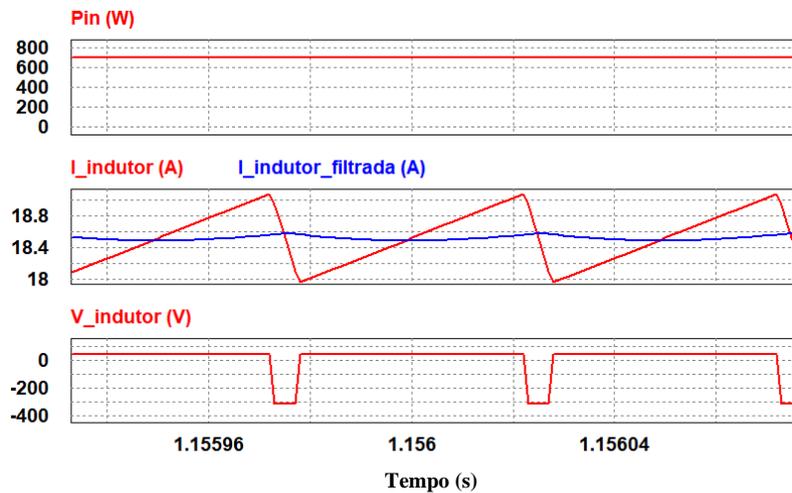
Figura 4.4 - Esquemático proposto para simulação no *Psim*



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 4.5 o valor médio da corrente e tensão no indutor foi de 18,53A e 38,10V que são valores muito próximos do valor teórico disponível na Tabela 4.3 para potência de 706,19W de um conversor *boost* apenas.

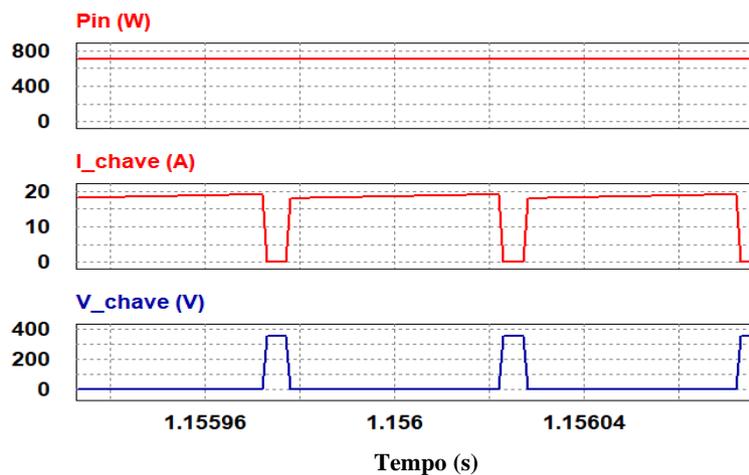
Figura 4.5 - Gráficos de correntes e tensão no indutor do conversor *boost*



Fonte: Próprio autor.

Seguindo a lógica da Figura 4.5, na Figura 4.6 são descatacados os gráficos da tensão e corrente na chave do conversor *boost*, quando este estar a operar na região próxima de máxima potência. Para esta situação da Figura 4.6 os valores médios de corrente e tensão na chave foram de 16,62A e 35,95V, com valor de pico da tensão de 350V, e eficaz de 110,68V.

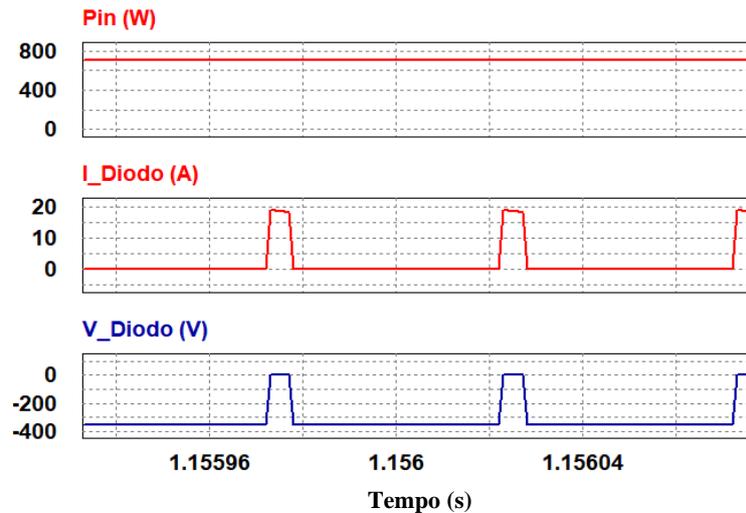
Figura 4.6 - Gráfico de corrente e tensão na chave do conversor *boost*



Fonte: Próprio autor.

Na sequencia, a Figura 4.7 mostra os gráficos de corrente e tensão no diodo e a Figura 4.8, mostra os gráficos para corrente e tensão no capacitor de saída CC, este que representa a conexão entre o conversor *boost* e o inversor em ponte completa.

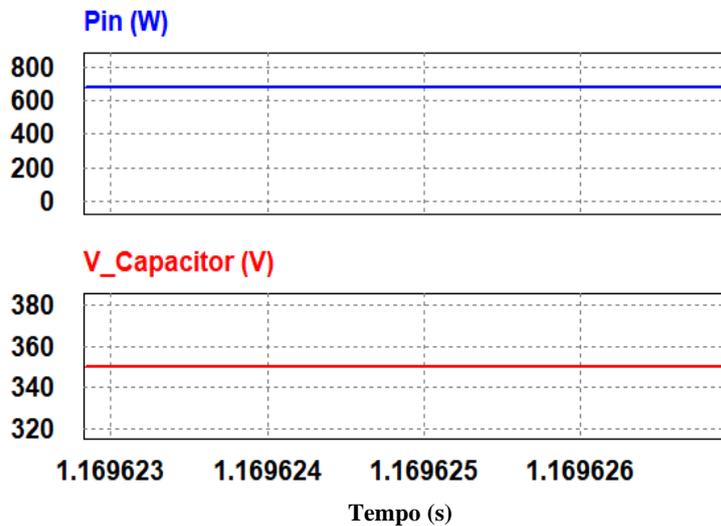
Figura 4.7 - Gráfico de corrente e tensão no diodo do conversor *boost*



Fonte: Próprio autor.

Devido a não existência do controle da tensão no barramento CC ou seja na saída do conversor CC/CC e entrada do conversor CC/CA a tensão no barramento CC é mantida constante com valor de 350V, através de uma fonte constante a fim de garantir a estabilidade do conversor CC/CC, cujo valor da tensão neste barramento pode ser observado no gráfico da Figura 4.8 para o caso de potência máxima.

Figura 4.8 - Gráfico da tensão no capacitor



Fonte: Próprio autor.

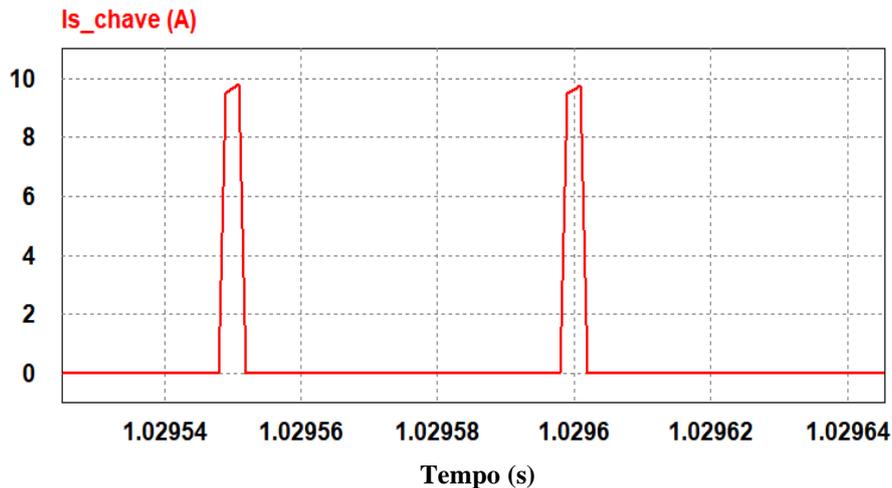
Em seguida foram realizadas as mesmas análises das formas de onda dos componentes do Inversor, ou seja, do conversor CC/CA.

Analisando os gráficos de corrente e tensão em umas das chaves, no indutor de saída, e também a tensão na saída do filtro passa baixa disponível no simulador (*Psim*), e que foi utilizado para identifica a componente fundamental da tensão de saída do

conversor CC/CA. Usa-se o filtro passa baixa com objetivo de reduzir o conteúdo harmônico de alta frequência e mostrar na saída um valor eficaz próximo ou igual a 220V.

A Figura 4.9 mostra a corrente na chave do inversor em regime permanente, cujo valor da corrente no pico da senoide é 9,81A com valor eficaz de 2,13A.

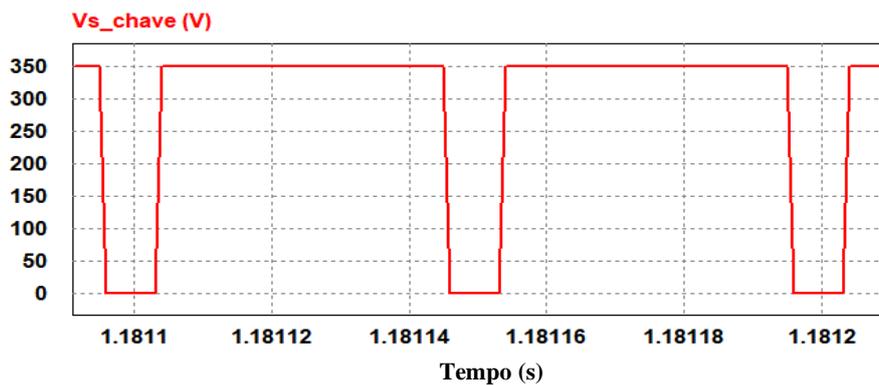
Figura 4.9 - Gráficos da corrente na chave do inversor em ponte H.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 4.10, é representado o gráfico da tensão na chave eletrônica do inversor, no mesmo intervalo de mediação da corrente na chave, onde pode-se notar que no instante em que a corrente circula pela chave a tensão sobre esta chave é nula e vice versa. O esforço de tensão na chave é igual a tensão de entrada do inversor, ou seja, 350V.

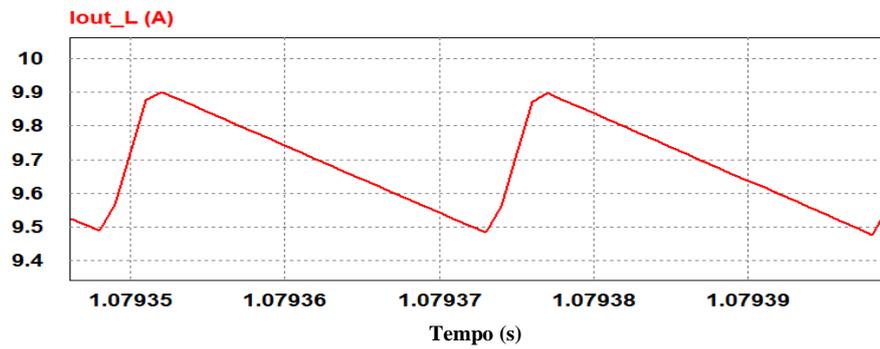
Figura 4.10 - Gráficos da Tensão na chave do inversor em ponte H.



Fonte: Próprio autor.

E na Figura 4.11 é representado o gráfico da corrente de saída no indutor do inversor, para situação de regime permanente, do qual o esforço de corrente no pico da senoide é de 9,90A, com valor eficaz de 9,68A.

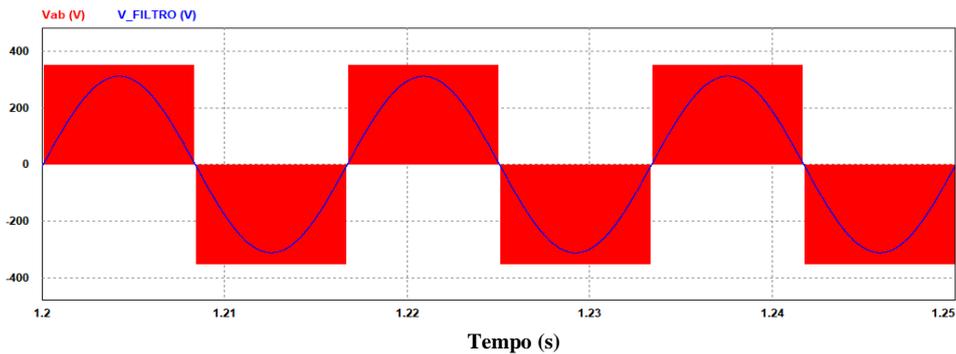
Figura 4.11 - Corrente no indutor do Conversor CC/CA, em regime permanente



Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.11 representa os gráficos da tensão de saída do inversor (conversor CC/CA) em ponte completa, dos quais  $V_{ab}$  representa a tensão alternada com formato quadrado anterior ao filtro indutivo, e com amplitude de 350V, em modulo.  $V_{Filtro}$  representa a tensão na saída do inversor com o uso do filtro passa baixa, com amplitude e valor eficaz igual a 311,83V, e  $220,5V_{rms}$ , respectivamente.

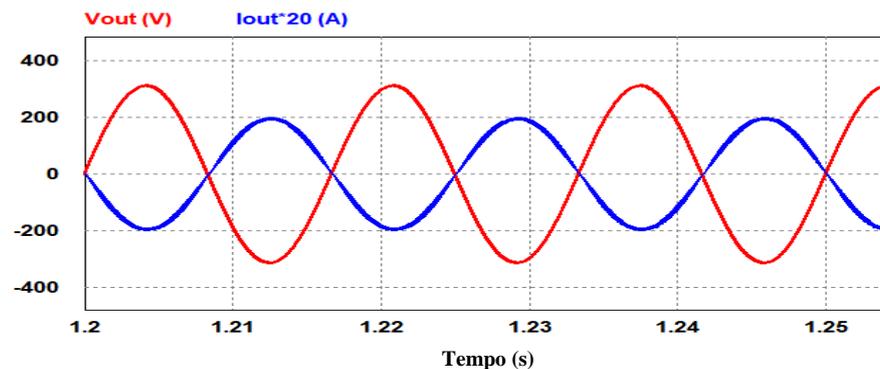
Figura 4.12 - Gráfico da tensão de saída do inversor, sem filtro  $V_{ab}$ , e com o filtro  $V_{FILTRO}$ .



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 4.13 é possível observar a tensão de saída e a corrente de saída cujo valor eficaz é de 6,76A em período de rede, dos quais para melhor visualização a corrente é multiplicada de vinte vezes.

Figura 4.13 - Gráfico da tensão e corrente de saída em fase



Fonte: Próprio autor.

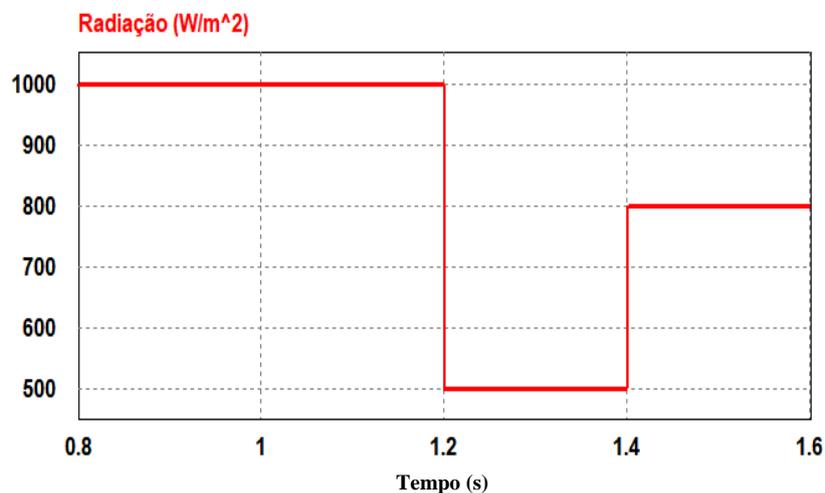
## Caso II

No caso II, no item “a”, será analisado a influência da mudança de radiação com temperatura fixa, sobre a tensão e corrente do módulo fotovoltaico. E para o item b, será analisado a influência da mudança de temperatura com radiação fixa, sobre a tensão e corrente do módulo.

### a) Temperatura Fixa e variação da radiação

Nesta etapa para se avaliar a atuação do conversor *CC/CC boost*, face a aplicação do algoritmo de MPPT, o procedimento baseou-se em fixar o valor da temperatura em 25 °C e aplicar ao sistema um perfil dinâmico de radiação como apresentado na Figura 4.14, sendo os valores 1000 W/m<sup>2</sup> 500 W/m<sup>2</sup> 800 W/m<sup>2</sup>.

Figura 4.14 - Degrau de radiação

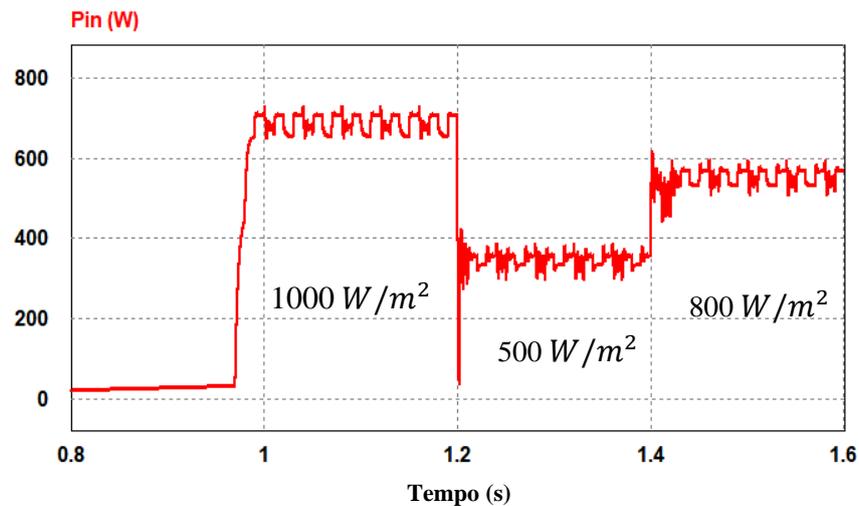


Fonte: Próprio autor.

O comportamento da potência pode ser identificado na Figura 4.15, com tudo é possível constatar os diferentes níveis de potência na entrada do conversor *boost* para cada degrau de radiação com o método perturbe e observe (P&O), o que permite analisar para cada situação os valores de erro relativo, entre a potência simulada e a teórica.

Sendo que para a Figura 4.15 pode-se perceber que a maior potência ocorrer no intervalo de maior radiação, ou seja, de 1000 W/m<sup>2</sup> e temperatura de 25°C. Este intervalo começa aproximadamente em 1s e termina em 1,2s de tempo.

Figura 4.15 - Curva de potência do conversor *boost* para diferentes valores de radiação e temperatura de 25°C



Fonte: Próprio autor.

Quando o valor da razão cíclica do conversor CC/CC varia o comportamento dinâmico do conversor CC/CC *boost* também altera, e a tensão e a corrente na saída do painel também com estas alterações.

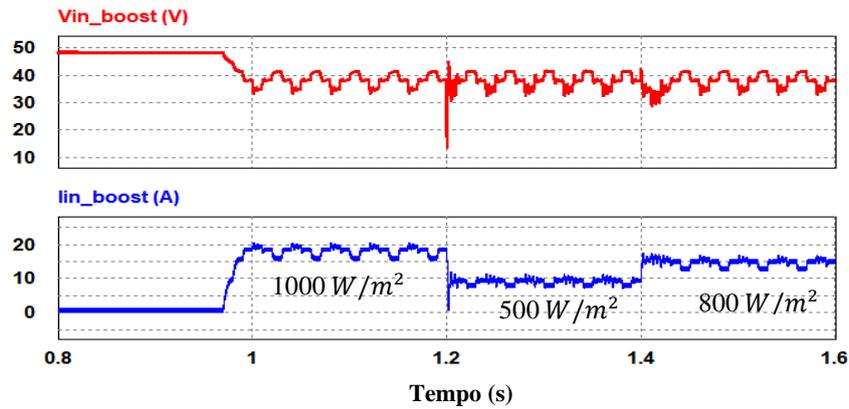
No caso do painel fotovoltaico, segundo Silva (2010 apud SÁ, 2004) este quando esta a operar na máxima potência pode se comportar como uma fonte de corrente ou de tensão, sendo o primeiro comportamento não interessante para o conversor CC/CC *boost*, visto que se este for alimentado por uma fonte de corrente constante, a tensão na saída será reduzida a medida que a razão cíclica aumentar.

De acordo com Silva (2010 apud SÁ, 2004), para evitar isso adiciona-se a capacitância de entrada, que garante que este opere como fonte de tensão e não de corrente.

Os valores do ponto de máxima potência referentes aos gráficos das Figuras 4.15 e 4.16 podem ser constatados na Tabela 4.3.

Conforme esperado e observado a Figura 4.16, percebe-se que a mudança de radiação tem maior influência sobre a corrente de entrada, e a maior corrente acontece no intervalo de maior radiação, ou seja,  $1000 W/m^2$ .

Figura 4.16 - Curvas de tensão e corrente de entrada do *boost* para diferentes valores de radiação e temperatura de 25°C



Fonte: Próprio autor.

Devido a esses valores de ondulação adotou-se como metodologia de medição os valores médios de potência e de tensão para todas as situações afim de atenuá-las e comparar com os valores teórico dos painéis sem a implementação da estrutura proposta. Portanto, os valores de corrente, tensão e potência obtidos nas Figuras 4.15 e 4.16 são apresentados na Tabela 4.3 a comparação entres os valores simulado e teórico, considerando apenas para um conversor CC/CC, do microinversor uma vez que ambos possuem as mesmas especificações e operam de maneira similar.

Tabela 4.3 - Valores simulado caso II item a P/2.

<b>P&amp;O</b>	<b>1000W/m<sup>2</sup></b>	<b>Teórico</b>
P <sub>mpp</sub>	690,51W	P <sub>mpp</sub> 706.19W
V <sub>mpp</sub>	38,15V	V <sub>mpp</sub> 38,09V
I <sub>mpp</sub>	18,10A	I <sub>mpp</sub> 18,54A
<b>P&amp;O</b>	<b>500W/m<sup>2</sup></b>	<b>Teórico</b>
P <sub>mpp</sub>	349,07W	P <sub>mpp</sub> 358,44W
V <sub>mpp</sub>	38,15V	V <sub>mpp</sub> 38,50V
I <sub>mpp</sub>	9,15A	I <sub>mpp</sub> 9,31A
<b>P&amp;O</b>	<b>800W/m<sup>2</sup></b>	<b>Teórico</b>
P <sub>mpp</sub>	556,99W	P <sub>mpp</sub> 570,18W
V <sub>mpp</sub>	38,15V	V <sub>mpp</sub> 38,37V
I <sub>mpp</sub>	14.60A	I <sub>mpp</sub> 14,86A

Fonte: Próprio autor.

O cálculo do erro foi feito baseado na Equação 4.1 e os seus valores para cada situação de radiação representados nas Tabelas 4.4.

$$E_{\text{erro}}(\%) = \frac{(P_{\text{exata}} - P_{\text{aproximado}})}{P_{\text{exata}}} \times 100\% \quad (4.1)$$

Tabela 4.4 - Caso II item a Erro (%)

<b>P&amp;O</b>	1000W/m <sup>2</sup>	<b>E<sub>erro</sub>(%)</b>
P <sub>mpp</sub>		2,2
V <sub>mpp</sub>		0,1
I <sub>mpp</sub>		2,3
<b>P&amp;O</b>	500W/m <sup>2</sup>	<b>E<sub>erro</sub>(%)</b>
P <sub>mpp</sub>		2,6
V <sub>mpp</sub>		1,1
I <sub>mpp</sub>		3,7
<b>P&amp;O</b>	800W/m <sup>2</sup>	<b>E<sub>erro</sub>(%)</b>
P <sub>mpp</sub>		2,3
V <sub>mpp</sub>		0,5
I <sub>mpp</sub>		1,7

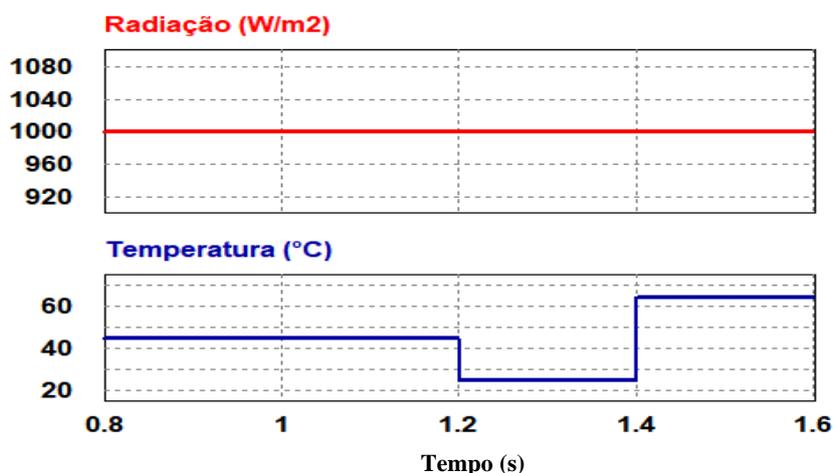
Fonte: Próprio autor.

Sabendo que os valores adotados como referência para medição e análise são valores médios, os valores de erro  $E_{\text{erro}}(\%)$  são relativamente aceitáveis quando comparado aos valores teóricos no ponto de máxima potência. Portanto desta seção foi possível observar e concluir que quanto menor a potência processada pelo conversor *CC/CC boost* maior será o erro.

b) Radiação Fixa e variação da temperatura

Para uma radiação de 1000 W/m<sup>2</sup> e temperatura em grau Celsius variando nos valores de 45°C, 25°C, e 65°C, como na Figura 4.17, que mostra o gráfico da radiação fixada e a temperatura variando no tempo.

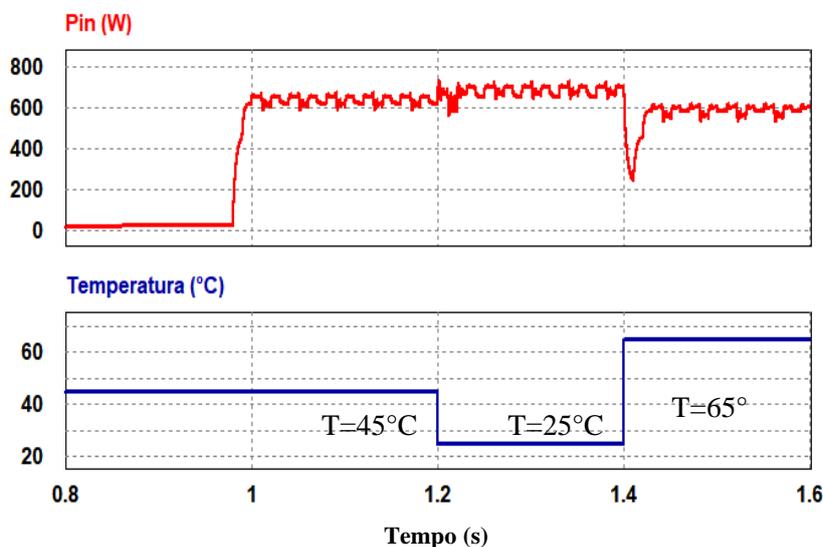
Figura 4.17 - Curvas para radiação fixa e temperatura de 45°C, 25°C e 65°C



Fonte: Próprio autor.

Comparando os valores de potência para cada valor de temperatura observa-se através dos gráficos da Figura 4.18, que para valores maiores de temperatura a potência de entrada do conversor *boost* é reduzida, e que a maior potência ocorre na região de menor temperatura, ou seja, 25°C. esse comportamento se dá devido a relação inversa entre a temperatura e potência.

Figura 4.18 - Curva de potência de entrada do conversor *boost* para temperatura de 45°C, 25°C e 65°C

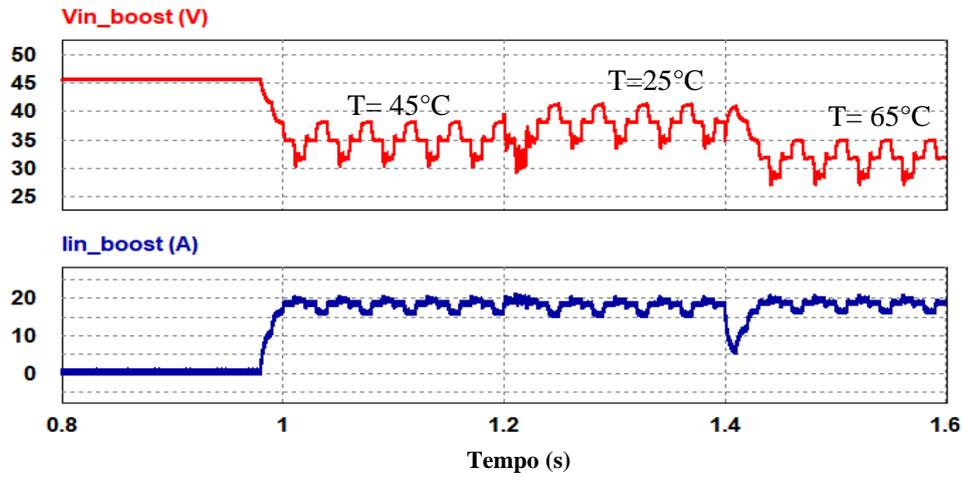


Fonte: Próprio autor.

Na Figura 4.19, verifica-se que ao passo que a temperatura vai variando a tensão de entrada do conversor CC/CC *boost* também varia, ou seja, na região de maior temperatura a tensão de saída dos painéis e entrada do conversor CC/CC *boost* é menor.

E a corrente mantém-se praticamente com leves alterações em função do aumento da temperatura, porém no tempo 1,4s com uma queda rápida em função da mudança brusca de temperatura que varia de 25°C para 65°C, e rapidamente essa se estabiliza.

Figura 4.19 - Curvas de tensão e corrente de entrada do conversor *boost* para temperatura de 45°C 25°C e 65°C



Fonte: Próprio autor.

Através da Tabela 4.5 é possível verificar que na temperatura maior, ou seja, em  $T=65^{\circ}\text{C}$  o conversor CC/CC operar com a menor potência  $P=606,72\text{W}$ , o que vai de encontro com a literatura para valores de radiação fixa e temperatura variando no tempo.

Tabela 4.5 - Valores simulado caso II b) P/2.

<b>P&amp;O</b>	<b>T = 45°C</b>		<b>Teórico</b>
$P_{mpp}$	643,3W	$P_{mpp}$	657.04W
$V_{mpp}$	35,00V	$V_{mpp}$	35,42V
$I_{mpp}$	18,38A	$I_{mpp}$	18,55A
<b>P&amp;O</b>	<b>T = 25°C</b>		<b>Teórico</b>
$P_{mpp}$	688,11W	$P_{mpp}$	706,19W
$V_{mpp}$	37,54V	$V_{mpp}$	38,09V
$I_{mpp}$	18,33A	$I_{mpp}$	18,54A
<b>P&amp;O</b>	<b>T = 65°C</b>		<b>Teórico</b>
$P_{mpp}$	578,28W	$P_{mpp}$	606,72W
$V_{mpp}$	32,80V	$V_{mpp}$	32,76V
$I_{mpp}$	17,63A	$I_{mpp}$	18,52A

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 4.6, mostra os valores de erro para o caso de radiação fixa em  $1000\text{W}/\text{m}^2$  e temperatura variando, em que quanto maior a temperatura maior é o erro de potência.

Tabela 4.6 - Caso II item b Erro (%)

<b>P&amp;O</b>	T = 45°C	<b>Erro</b> (%)
P <sub>mpp</sub>		2,0
V <sub>mpp</sub>		1,1
I <sub>mpp</sub>		0,9
<b>P&amp;O</b>	T = 25°C	<b>Erro</b> (%)
P <sub>mpp</sub>		2,5
V <sub>mpp</sub>		1,4
I <sub>mpp</sub>		1,1
<b>P&amp;O</b>	T = 65°C	<b>Erro</b> (%)
P <sub>mpp</sub>		4,6
V <sub>mpp</sub>		0,1
I <sub>mpp</sub>		4,8

Fonte: Próprio autor.

### Caso III

Na Tabela 4.7, são apresentados os valores de potência para um dos dois conversores CC/CC *boost*, que contém um arranjo composto por dois módulos em paralelo. E também são destacados os valores teóricos de máxima potência para dois módulos, o que permitiu realizar o cálculo do erro entre os valores simulado com aplicação do MPPT e os valores teórico sem a implementação da estrutura proposta.

Tabela 4.7 - Caso III. Potência e Erro (%)

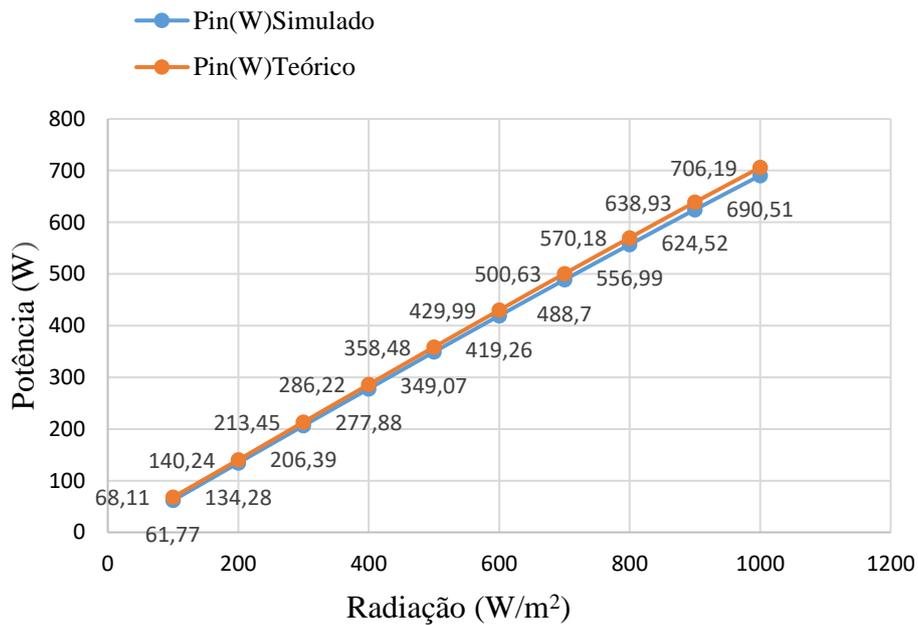
Radiação(W/ m <sup>2</sup> )	Pin(W)Simulado	Pin(W)Teórico	<b>Erro</b> (%)
100	61,77	68,11	9,3
200	134,28	140,24	4,2
300	206,39	213,45	3,3
400	277,88	286,22	2,9
500	349,07	358,48	2,6
600	419,26	429,99	2,5
700	488,7	500,63	2,4
800	556,99	570,18	2,3
900	624,52	638,93	2,3
1000	690,51	706,19	2,2

Fonte: Próprio autor.

Para se fazer uma avaliação gráfica do quão os valores simulados encontram-se próximos dos teóricos, foi traçado um gráfico de potência versus radiação, de ambos, considerando para um os valores simulados e para o outro os valores teóricos para um passo de radiação de 100 W/m<sup>2</sup> até 1000 W/m<sup>2</sup>.

Da Figura 4.20, percebe-se que os valores teóricos e simulados são bastante similares conforme observado na Tabela 4.7, e que o método aplicado para rastreamento da máxima potência dos painéis FV apresenta resultado significativo.

Figura 4.20 - Gráfico das curvas de potências.



Fonte: Próprio autor.

A estrutura completa do algoritmo de rastreamento da máxima potência implementado no bloco C, que foi usado para simulação pode ser verificado no apêndice A deste trabalho.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o estudo de construção de um microinversor baseado em dois conversores CC/CC *boost* responsáveis por gerar um ganho de tensão, e recorrer ao rastreamento da máxima potência disponível em um arranjo fotovoltaico, e disponibilizar o sinal CC a um conversor CC/CA ponte H, responsável por inverter o sinal em CA e injetar a energia a rede elétrica.

Foram analisando os valores de potência simulado resultado da implementação do modelo proposto e os valores teórico que resultam da não implementação do modelo.

Para este trabalho os resultados de potência simulado se mostram bastante similares aos valores teóricos de potência, com erros relativamente baixos, o que valida o método aplicado para o rastreamento da máxima potência.

Na prática em sistemas reais devido a não idealidade do conversor *boost*, e considerando as resistências associadas aos componentes como indutor, chave, capacitor e diodo durante a etapas de condução, podem surgir problemas se considerar esse conversor *boost* com ganho e razão cíclica elevado, porque se isto não ser considerado na prática o valor da tensão pode subir e depois cair, sem atingir o ganho desejado.

Portanto compreende-se que na prática conversores *boost* com alto ganho vão acarretar em razão cíclica muito elevada e devido as próprias limitações da topologia não será possível alcançar um ganho de tensão desejado.

Contudo alguns trabalhos futuros podem ser desenvolvidos afim de trazer melhorias e dar continuidade a este trabalho.

### Trabalhos futuros

- 1 Realizar esta mesma simulação considerando outra estrutura de conversor *boost* (não tradicional) de alto desempenho com baixa razão cíclica, disposto na literatura para atenuar as perdas.
- 2 Desenvolver um sistema de controle e regulação da tensão no barramento CC que conecta os estágios CC/CC do CC/CA afim de manter a tensão no barramento CC além do circuito de sincronização e o regulador da corrente injetada na rede.
- 3 Implementar o sistema de aquisição de dados com o projeto de condicionamento de sinais das variáveis de corrente e tensão utilizadas no MPPT e no sistema de controle do microinversor.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil)(ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**, Brasília, 2002. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro\\_atlas.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf). Acesso em: 08/03/2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil) (ANEEL). **Plano de dados Abertos 2016-2017**, Disponível em : [https://www.aneel.gov.br/documents/656835/15191504/DD\\_IG\\_1\\_10.pdf/f4abc8a9-a37a-d11f-5389-448470f77bae](https://www.aneel.gov.br/documents/656835/15191504/DD_IG_1_10.pdf/f4abc8a9-a37a-d11f-5389-448470f77bae) . Acesso em: 16/abril/2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil) (ANEEL). **Brasil ultrapassa marca de 1GW em geração distribuída .2019**, Disponível em: <https://bit.ly/3iRkzwQ> .Acesso em: 10/04/2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil) (ANEEL) **Resolução normativa 482/2012**.
- BACON, V. *et al.*, Análise Comparativa das Técnicas SPWM e SVM Aplicadas a um Inversor de Tensão Trifásico. **UNOPAR Cient. Exatas Technol.** Londrina, v. 10, n. 1, p. 5-14, Nov.2011.
- BARBI, I. Eletrônica de Potência. 6a. ed.: Edição do Autor, 2006.
- BASTOS.W.S. **Estudo de Caso de um Projeto Fotovoltaico Integrado à Edificação**. Monográfica, Universidade Federal da Paraíba Centro de Energias Alternativas e Renováveis Departamento de Engenharia Elétrica. 2017. Paraíba-PB,
- BRASIL. **Decreto-Lei nº 5.163, de 30 de Julho de 2004**. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/ato2004-2006/2004/decreto/d5163compilado.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2004-2006/2004/decreto/d5163compilado.htm)
- CASTRO, R.M.G. **Energias Renováveis e Produção Descentralizada: Introdução a energia Fotovoltaica**. Universidade técnica de Lisboa. Instituto Superior Técnico. 2002.
- COELHO, R. F. **Concepção, análise e implementação de uma microrede interligada à rede elétrica para alimentação de cargas cc a partir de fontes renováveis**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/107127> . Acesso em: 16/02/2021
- DIENSTMANN, G. **Energia Solar uma comparação de Tecnologia**. 2009. 92. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/24308>. Acesso em: 19 mar. 2020.
- European Photovoltaic Industry Association Greenpace. **Solar Generation 6-Executive Summary**.Disponível em:[http://pvtrin.eu/assets/media/PDF/Publications/Other%20Publications/36.SolarGeneration6\\_\\_2011.pdf](http://pvtrin.eu/assets/media/PDF/Publications/Other%20Publications/36.SolarGeneration6__2011.pdf). Acesso em: 19/04/2020.

FAHRENBRUCH, A. L; BUBE, R. H. **Fundamentals of Solar Cells: Photovoltaic solar energy conversion.** California: Academic Press, 1983. Disponível em:[https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=eh7H-9cz-IoC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Fundamentals+of+Solar+Cells.+Academic+Press&ots=wj6ahf5aEx&sig=X2l3Z6\\_emdZWNijFHtODi5JnOzQ#v=onepage&q=Fundamentals%20f%20Solar%20Cells.%20Academic%20Press&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=eh7H-9cz-IoC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Fundamentals+of+Solar+Cells.+Academic+Press&ots=wj6ahf5aEx&sig=X2l3Z6_emdZWNijFHtODi5JnOzQ#v=onepage&q=Fundamentals%20f%20Solar%20Cells.%20Academic%20Press&f=false)

FILALI, A; LAADISSI, E; ZAZI, M. PSIM and MATLAB Co-Simulation of Photovoltaic System using  $\text{---P}$  and  $\text{O}$  and  $\text{---}$ Incremental Conductance MPPT. **(IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications**, Rabat, Vol. 7, No. 8, p.1-5, 2016. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/307598655\\_PSIM\\_and\\_MATLAB\\_Co-Simulation\\_of\\_Photovoltaic\\_System\\_using\\_P\\_and\\_O\\_and\\_Incremental\\_Conductance\\_MPPT](https://www.researchgate.net/publication/307598655_PSIM_and_MATLAB_Co-Simulation_of_Photovoltaic_System_using_P_and_O_and_Incremental_Conductance_MPPT) . Acesso: 24/10/2020.

GAZOLI, J. R. **Micro inversor monofásico para sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica.** 2011. 204 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/259012>>. Acesso em: 18 fev. 2020.

GAZOLI, J. R. Microinversor integrado ao módulo fotovoltaico para sistemas conectados à rede elétrica utilizando controlador ressonante. **Revista Eletrônica de Potência** - SOBRAEP Brazilian Journal of Power Electronics, vol. 18, no. 2, 2013.

HART, D. W. **Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos.** Porto Alegre, RS: AMGH, 2012.

HOYMILES. MICROINVERTER MI-1200/MI-1500. Disponível em: <https://www.hoymiles.com/> .

INSTITUTO BRASILEIRO DE PESQUISA ESPACIAL (Brasil) (INPE). **Atlas Brasileiro de Energia Solar**, São Jose dos Campos-São Paulo. 2017. Disponível em: <http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34P/3PERDJE> . Acesso em: 21/05/2020.

JUNIOR, L. G. **Inversores Integrados Monofásicos Aplicados em Sistemas Fotovoltaicos com Conexão à Rede de Distribuição de Energia Elétrica.** Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de Conhecimento: Automação, 2011.

KNABBEN, G. C. **Microinversor fotovoltaico não isolado de dois estágios.** 2017. Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico- Programa de pós-graduação em Engenharia elétrica, Florianópolis, 2017. Disponível em: [file:///C:/Users/milto/Downloads/347155%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/milto/Downloads/347155%20(1).pdf) . Acesso em: 17/05/2020.

MACENA, W. GUIRAU, B. MARCATO, F. (2016). **Circuito microinversor aplicado a sistemas fotovoltaicos autônomos.** Monografia-Universidade de São Francisco-curso de Engenharia elétrica. Campinas-SP. 2015. Disponível em: [file:///C:/Users/milto/Downloads/TCC\\_USF\\_EngEltrica\\_G1.pdf](file:///C:/Users/milto/Downloads/TCC_USF_EngEltrica_G1.pdf)

MARAGONI, F. **Inversores monofásico para conexão de sistema fotovoltaico a rede**. 2017. Dissertação (Mestrado)-Universidade Tecnológica Federal do Paraná-Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Paraná. Disponível em: [http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/bitstream/1/404/1/PB\\_PPGEE\\_M\\_Marangoni,%20Filipe\\_2012.pdf](http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/bitstream/1/404/1/PB_PPGEE_M_Marangoni,%20Filipe_2012.pdf). Acesso em: 18/07/2020.

MORAES, C.G.S. **Projeto e implementação de um microinversor grid-tied com boost quadrático para desacoplamento de potência e controle de mppt**. Monografia- Universidade Federal de Mato Grosso do Sul- Programa de graduação em Engenharia elétrica. Campo grande. 2017.

OLIVERIRA, F.M. **Rastreamento da máxima potência em arranjos fotovoltaicos sob efeito de sombreamento parcial baseado no método de otimização por enxame de partículas**. Dissertação- Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procopio.2015. Disponível em:[https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/3211/1/CP\\_PPGEE\\_M\\_Oliveira%20C%20Fernando%20Marcos%20de\\_2015.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/3211/1/CP_PPGEE_M_Oliveira%20C%20Fernando%20Marcos%20de_2015.pdf) . Acesso em: 19/07/2020.

OLIVEIRA.R.N.M. **Conversor cc-cc pwm bidirecional trifásico com três portas e isolado em alta frequência para aplicação em sistemas fotovoltaicos**. Dissertação- Universidade Federal do Ceará-centro de tecnologia, Fortaleza. 2018. Disponível em: [file:///C:/Users/milto/Downloads/2018\\_dis\\_rnmoliveira%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/milto/Downloads/2018_dis_rnmoliveira%20(2).pdf). Acesso em: 02/04/2021.

PORTALSOLAR. **Geração Distribuída-GD**. 2020. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/geracao-distribuida-de-energia.html?gclid=EAIaIQobChMik-LjrPaJ6gIVE4GyCh0GZwLPEAAAYASAAEgKQ-vD BwE> . Acesso em: 16/05/2020.

PORTALSOLAR. **Efeito fotelétrico X efeito fotovoltaico- O que são e quais as diferenças** Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/efeito-fotovoltaico-x-efeito-fotoeletrico-o-que-sao-quais-diferencas> . Acessado em: 26/07/2020.

PORTALSOLAR. **Micro inversor solar grid tie**. 2020 Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/micro-inversor-solar-grid-tie.html> . acesso em 02/07/2020.

PINHO, J. T.; GALDINHO, M. A. “**Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**”. CEPTEL – CRESESB, Rio de Janeiro, março de 2014.

PEREIRA, B. E. L. **Análise de viabilidade econômica de implantação de um sistema de geração energia elétrica através de painéis fotovoltaico em sítio aeroportuário**. 2017. 54 f. Monografia (Especialização) - Curso de Pós-graduação em Eficiência Energética Aplicada Aos Processos Produtivo, Universidade Federal de Santa Maria, Novo Hamburgo, 2017.

PEREIRA, D.V.S. **Conversor cc-cc boost com mppt alimentado por painéis fotovoltaico para aplicação em geração distribuída**. Monografia à Universidade Federal do Ceará- Graduação em Engenharia elétrica, Fortaleza, 2010. Disponível em: <http://www.dee.ufc.br/anexos/TCCs/2010.2/DANTE%20VICTOR%20SHIMODA%20PEREIRA.pdf> . Acesso em: 03/03/2021.

POWERSIM. PSIM, User's Manual. 2020. Disponível em:  
<https://www.powersimtech.com/wp-content/uploads/2021/01/PSIM-User-Manual.pdf> .  
Acesso em: 27/02/2021.

ROSSI, C. **Inversor de frequência modulação senoidal pwm unipolar**. Monografia-  
Universidade Estadual de Londrina. Curso de Graduação em Engenharia elétrica,  
Londrina, 2011.

SOUSA, Y. R. **Estudo do Rastreamento de máxima potência-MPPT- Em sistemas de geração fotovoltaica**. Monográfica-Universidade de Brasília- UnB. Engenharia de energias, Brasília 2017.

SILVA, F.S.F. **Sistema fotovoltaico para iluminação e alimentação de pequenos equipamentos em corrente contínua**. Dissertação- Universidade Federal do Ceará-  
centro de tecnologia, Fortaleza. 2010. Disponível em:  
<http://www.gpec.ufc.br/trabalhos/SISTEMA%20FOTOVOLTAICO%20PARA%20ILUMINA%C3%87%C3%83O%20E%20ALIMENTA%C3%87%C3%83O.pdf> .Acesso em: 01/04/2021.

SCHIAVON, G. L. **Conversor de alto ganho auto grampeado baseado no conversor boost half bridge integrado**. Universidade tecnológica federal-UTFPR do paraná departamento de engenharia elétrica. Ponta grossa, 2019. Disponível em:  
[http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16494/1/PG\\_DAELE\\_2019\\_2\\_02.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16494/1/PG_DAELE_2019_2_02.pdf) . Acesso em: 01/04/2021.

TRINA SOLAR. **FRAMED 72-CELL MODULE (1500V)**. 2017. Disponível em:  
[www.trinasolar.com](http://www.trinasolar.com).

TENÓRIO, A. N. **Simulação de um Conversor Boost para rastreamento de máxima potência em sistemas fotovoltaicos**. 2017. Monografia -Universidade de Brasília, Engenharia de Energias, Brasília. Disponível em:  
<https://bdm.unb.br/bitstream/10483/20201/1/2017AndersonNunesdeOliveiraLimaTen%C3%B3rio.pdf>. Acessado em: 18/07/202

## 7. APÊNDICE A- ALGORITMO DE RASTREIO DA MÁXIMA POTÊNCIA

### // Declaração das Variáveis

```
static float vp, vp_a, ip, ip_a;  
static float pv, pv_a;  
static float d, d_a;  
float k=0.9e-2;
```

### //Construção do algoritmo

```
vp=x1, ip=x2;  
pv=vp*ip;  
  
if(pv!=pv_a){  
    //início: laço P==Pa  
    if(pv>pv_a){  
        //início: laço P>Pa  
        if(vp>vp_a){  
            //início: laço V>Va quando P>Pa  
            d = d-k  
        }  
        //fim: laço V>Va quando P>Pa  
        else {  
            //início: laço V<Va quando P>Pa  
            d=d+k;  
        }  
        //fim: laço V<Va quando P>Pa  
    }  
    //fim: laço P>Pa  
    //início: else 2  
    else {  
        if(pv<pv_a){  
            //início: laço P<Pa  
            if(vp>vp_a){  
                //início: laço V>Va quando P<Pa  
                d=d+k;  
            }  
            //fim: laço V>Va quando P>Pa  
            else {  
                //início: laço V<Va quando P<Pa  
                d=d-k;  
            }  
            //fim: laço V<Va quando P<Pa  
        }  
        //fim: laço P<Pa  
        //fim: else 2  
    }  
    //fim: laço P==Pa  
    if (d<0){  
        d=0;  
    }  
    if(d>0.98){  
        d = 0.98;  
    }  
y1= d;  
  
y2= pv;  
  
y3= pv_a;  
  
y4=vp; y5=vp_a; vp_a=vp; pv_a=pv;
```