



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ANTÔNIO AUGUSTO ARAGÃO

**PROJETO E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À
REDE**

SOBRAL

2022

ANTÔNIO AUGUSTO ARAGÃO

PROJETO E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. DSc. Isaac Rocha Machado

SOBRAL

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A671p Aragão, Antônio Augusto.
PROJETO E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE / Antônio Augusto Aragão. – 2022.
67 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral, Curso de Engenharia Elétrica, Sobral, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Isaac Rocha Machado.

1. Conversor CC/CA Monofásico. 2. MPPT. 3. PLL. 4. Conversor Boost. I. Título.

CDD 621.3

ANTÔNIO AUGUSTO ARAGÃO

PROJETO E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. DSc. Isaac Rocha Machado

Aprovado em 15/07/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. DSc. Isaac Rocha Machado (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. DSc. Adson Bezerra Moreira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. MSc. Larissa Souza Pereira
Enel - CE

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar devo agradecer ao nosso senhor Jesus Cristo por me dar força e coragem, todos os dias, para enfrentar e superar os desafios que a vida me trouxe e ainda traz. Pela graça de Nossa Senhora que me dá conforto com seu carinho e amor materno. Em seguida à minha família por me compreender e me aceitar pela pessoa que sou, e por diversas vezes me perdoar pelas falhas humanas, principalmente ao meu Pai e sua Mãe, minha Avó, Dona Lúcia que me apoiou diante de tantas lutas.

Agradeço aos Mestres do Centro Espírita Beneficente União do Vegetal, em especial ao Mestre José Gabriel da Costa por clarear meu caminho com a Luz de Deus, e ao Mestre Fábio Diniz, que me incentivou a prosseguir estudando, abrindo assim minha mente e meu coração para um caminho de vitórias.

Quero agradecer a todos os Mestres da Universidade Federal do Ceará que fizeram parte desse caminho árduo que é aprender essa profissão. Agradeço ao professor Isaac Machado pela paciente orientação e pela compreensão. Agradeço ao professor Éber de Castro Diniz pelas dicas profissionais muito importantes, e a todos os outros professores também.

E finalmente aos colegas que sempre estiveram juntos fortalecendo a amizade e o companheirismo, mostrando que devemos nos unir para conquistar nossos objetivos.

“Que darei eu ao Senhor, por todos os benefícios que me tem feito?”

Salmos, Capítulo 116, Versículo 12.

RESUMO

Além de outros benefícios, o sol fornece uma energia irradiada que pode ser convertida em energia elétrica útil por intermédio de módulos fotovoltaicos (FV). Para que esta energia se torne útil na maioria das cargas e aparelhos eletrônicos, a potência FV, em forma de tensão e corrente contínua deve ser transformada em tensão e corrente alternada atendendo aos requisitos da rede de distribuição local. Na grande maioria das topologias de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, o primeiro estágio de transformação da energia elétrica é realizado por um conversor CC/CC, que faz a elevação no nível da tensão dos módulos, e, ao mesmo tempo, promove o rastreamento da máxima potência fotovoltaica (*Maximum Power Point Tracking - MPPT*). Para isso, o algoritmo *MPPT* deve computar em tempo real a melhor razão cíclica de trabalho do conversor CC/CC para que a máxima potência injetada no barramento CC. Num segundo estágio de conversão da energia elétrica, um conversor CC/CA possibilita que a energia injetada no barramento CC possa ser escoada para uma rede CA com tensão e frequência fixas. O conversor CC/CA é composto por dispositivos chaveados (transistores com diodos em antiparalelo) que atuam para que a corrente CA injetada seja muito aproximadamente senoidal e em sincronia com a tensão da rede. Para que isso seja possível é necessário que uma parte do controle desempenhe a função de detectar a frequência e fase da tensão da rede. Um controle malha fechada, comumente conhecido por *Phase Locked Loop – PLL* desempenha esta função. Este trabalho apresenta detalhes de projeto, simulação e dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado a uma rede elétrica monofásica, além de conceitos fundamentais para compreensão dos algoritmos de controle, rastreamento e de sincronia com a rede elétrica.

Palavras Chave: Conversor CC/CA Monofásico, MPPT, PLL, Conversor Boost.

ABSTRACT

In addition to other benefits, the sun provides radiated energy that can be converted into useful electrical energy through photovoltaic (PV) modules. For this energy to become useful in most loads and electronic devices, the PV power in the direct voltage and current forms must be transformed into alternating voltage and current forms, meeting the requirements of the local power grid distribution. In the vast majority of grid-connected photovoltaic system topologies, the first stage of electrical energy transformation is carried out by a DC/DC converter, which increases the voltage of the PV modules, and, at the same time, promotes the maximum photovoltaic power tracking (Maximum Power Point Tracking - MPPT). For this, the MPPT algorithm must compute in real time the optimum duty cycle of the DC/DC converter for the maximum power injected in the DC bus. In a second stage of electrical energy conversion, a DC/AC converter allows the energy injected in the DC bus to be transferred to an AC power grid with fixed voltage and frequency. The DC/AC converter is composed of switched devices (transistors with antiparallel diodes) that act so that the injected AC current is very approximately sinusoidal and in sync with the grid voltage. For this to be possible, it is necessary that a part of the control performs the function of detecting the frequency and phase of the grid voltage. A closed loop control, commonly known as Phase Locked Loop – PLL performs this function. This work presents details of design, simulation and dimensioning of a single phase grid-connected photovoltaic system, as well as fundamental concepts for understanding the control, tracking and synchronization algorithms with the electrical grid.

Key-Words: Sigle-Phase DC/CA Converter, MPPT, PLL, Boost Converter.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: A Energia solar teve início no século XIX e veio evoluindo até os dias de hoje. Fonte: Portal Solar.....	14
Figura 2: Matriz de Energia Elétrica brasileira no ano de 2021. Fonte: Site do Operador Nacional do SIN	16
Figura 3: Evolução da geração solar no SIN. Fonte: Site do Operador Nacional do SIN.....	16
Figura 4: Diagrama de blocos que representa os componentes básicos do sistema.....	20
Figura 5: Representação da disposição das células fotovoltaicas em um módulo que compõe o arranjo fotovoltaico. Fonte: Engehall Renováveis.....	21
Figura 6: Curvas de corrente e tensão para cada nível de irradiação solar. Fonte: CANADIAN, Datasheet [11]	22
Figura 7: Aba selecionada para inserir informações do módulo à esquerda, representação do módulo à direita.	22
Figura 8: Janela onde são inseridos os dados retirados da folha de dados do módulo.....	23
Figura 9: Radiação solar obtida em áreas com irradiação solar alta em um dia ensolarado.....	23
Figura 10: Irradiação solar simulada durante 10 segundos no PSIM. Fonte: Autor.....	24
Figura 11: Exemplo de ondulação da corrente na saída do conversor CC/CC.....	25
Figura 12: Modelo de conversor <i>Boost</i> adotado neste trabalho.....	25
Figura 13: Exemplo de um PWM projetado no <i>PSIM</i> com razão cíclica de 0.5.....	26
Figura 14: Sinal de onda triangular sendo comparado com o sinal CC, em azul (cima). Sinal de onda resultante da operação do comparador (baixo). Fonte: Autor.....	27
Figura 15: Bloco C do <i>PSIM</i> com entradas de tensão e corrente medidas nos terminais do módulo, e saída sendo o valor de razão cíclica que servirá de entrada do comparador que faz a modulação PWM do conversor <i>Boost</i>	28
Figura 16: Fluxograma do algoritmo MPPT; Fonte: CAIO MORAES [15]	28
Figura 17: Gráfico Tensão vs. Potência de um módulo de 200W de MP. Fonte: Grundemann, WAGNER [8]	29
Figura 18: Conversor <i>Boost</i> no formato adotado neste projeto.....	33
Figura 19: Gráficos mostrando as formas de onda de tensão e corrente de saída dos módulos e potência dos resultados obtidos nas simulações do teste I.....	35

Figura 20: Gráficos mostrando as formas de onda de tensão corrente de saída e potência obtidas nas simulações do teste II.....	36
Figura 21: Gráficos mostrando as formas de onda de tensão corrente de saída e potência obtidas nas simulações do teste III.....	37
Figura 22: Gráficos mostrando as formas de onda dos resultados obtidos nas simulações do teste IV	38
Figura 23: Retificador Monofásico. Fonte: Antenor Pomilio [17]	40
Figura 24: Simplificação da sincronização com a rede da concessionária.....	40
Figura 25: Exemplo de um PWM projetado no <i>PSIM</i> com razão cíclica alternando em forma de onda senoidal.....	41
Figura 26: Sinal de onda triangular sendo comparado com o sinal senoidal em azul (cima). Sinal de onda resultante da operação do comparador (baixo).....	41
Figura 27: Exemplo de um PWM projetado no <i>PSIM</i> com dupla saída.....	42
Figura 28: <i>Phase Detector</i> , (CLAUDIO H. SANTOS, 2013).....	44
Figura 29: Sinal construído a partir da amplitude do sinal e da frequência aplicados na equação 2.28.....	45
Figura 30: Diagrama de blocos do <i>Dynamic Fourier Analysis</i> [10].....	47
Figura 31: Diagrama de blocos do <i>Original Signal Reconstruction Block</i> [10].....	48
Figura 32: Diagrama de blocos do PL; Fonte: Claudio H.G. Santos [10].....	49
Figura 33: Módulo acoplado ao diodo e ao capacitor de 30nF.....	50
Figura 34: Topologia do conversor CC/CC adotado neste projeto.....	50
Figura 35: Conexão específica entre a saída do conversor Boost e a entrada do conversor CC/CA.....	51
Figura 36: Bloco OSR com sinal de saída conectado ao controlador PI que resulta no sinal do PWM.....	52
Figura 37: Irradiação Solar simulada no <i>PSIM</i>	53
Figura 38: Forma de onda da corrente de saída do conversor CC/CA no período(vermelho), forma de onda da tensão da rede da concessionária (azul). Fonte: Autor.....	53
Figura 39: Forma de onda da corrente de saída do conversor CC/CA em regime transitório, (vermelho), em comparação com a forma de onda da tensão da rede, 60Hz(azul).....	54

Figura 40: Forma de onda da corrente de saída do conversor CC/CA, (vermelho), em comparação com a forma de onda da tensão da rede, 60Hz(azul). Fonte: Autor.....	54
Figura 41: Espectro de frequência da corrente de saída do conversor CC/CA, (vermelho), em comparação com tensão da rede, 60Hz(azul). Fonte: Autor.....	55
Figura 42: Gráfico que faz a comparação entre a irradiação incidente nos módulos e a potência que é gerada pelo arranjo. Fonte: Autor.....	55
Figura 43: Gráfico que mostra o nível de tensão no barramento CC na saída do conversor boost. Fonte: Autor.....	55
Figura 44: Simulação de uma irradiação padrão com um sombreamento em um determinado período. Fonte: Autor.....	56
Figura 45: Gráfico que faz a comparação entre a irradiação incidente nos módulos e a potência que é gerada pelo arranjo. Fonte: Autor.....	56
Figura 46: Corrente de saída do inversor em vermelho, forma de onda da rede, em azul no teste com sombreamento. Fonte: Autor.....	57
Figura 47: Gráfico que mostra o nível de tensão no barramento CC na saída do conversor <i>boost</i> no teste com sombreamento; Fonte: Auto r.....	57
Figura A1: Circuito completo; Fonte: Autor	62
Figura A2: Algoritmo utilizado na aba de função <i>Variable/Function Definitions</i> do Bloco C do PSIM	64
Figuras A3: Algoritmo utilizado na aba de função <i>RunSimUser Function</i> do Bloco C do PSIM.....	64
Figura A4: Algoritmo utilizado no SCILAB para dimensionar filtro LC com frequência de corte 484 Hz	65
Figura A5: Folha de dados Canadian CS6U-325P; Fonte: <i>Canadian Solar</i>	66

LISTA DE ABREVIACÕES

PSIM: Sigla utilizada para abreviar o nome do programa *Power Simulations*;

CC: Corrente Contínua;

CA: Corrente Alternada;

SIN: Sistema Interligado Nacional;

ONS: Operador Nacional do SIN;

MPPT: Maximum Power Point Tracking – Rastreador de Ponto de Máxima Potência;

PWM: Pulse-Width Modulation – Modulação Por Largura de Pulso;

PLL: Phase Locked Loop – Laço de Fase Fechado;

PI: Controlador Proporcional Integrador;

SFV: Sistema Fotovoltaico;

DFA: Dynamic Fourier Analysis Block - Bloco de Análise Dinâmica de Fourier;

OSR: Original Signal Reconstruction Block - Bloco de Reconstrução do Sinal Original;

PD: Phase Detector Block - Bloco de Detecção de Fase;

P-N: Junção de um semicondutor compreendida entre os polos positivo e negativo.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores dos componentes para o arranjo de 2 módulos em série.....	33
Tabela 2: Previsão e Resultados do Teste I	33
Tabela 3: Valores dos componentes para o arranjo de 4 módulos em série.....	34
Tabela 4: Resultados do Teste II.....	35
Tabela 5: Valores dos componentes para o arranjo de 4 módulos em paralelo	36
Tabela 6: Resultados do Teste III.....	36
Tabela 7: Valores dos componentes para configuração 2x2	37
Tabela 8: Resultados do Teste IV	37

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1	ORIGEM E PANORAMA GERAL	14
1.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
1.3	MOTIVAÇÕES E OBJETIVOS	18
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	19
2.	COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO	20
2.1	A CÉLULA E O MÓDULO FOTOVOLTAICO.	20
2.2	CONVERSOR <i>BOOST</i>	24
2.2.1	MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO - PWM	26
2.2.2	ALGORITMO MPPT P&O	27
2.2.2.1	Estrutura do Algoritmo	27
2.2.3	DIMENSIONAMENTO DO CIRCUITO DE POTÊNCIA	29
2.2.3.1	Desenvolvimento do método.	30
2.2.3.2	Testando o método.	33
2.3	CONVERSOR CC/CA	39
2.3.1	PWM SENOIDAL	41
2.3.2	REDE DA CONCESSIONÁRIA	42
2.3.3	DISPOSITIVO PLL – PHASE LOCKED LOOP	42
2.4	INTRODUÇÃO AO PROJETO	49
2.5	CONECTANDO O CONVERSOR CC/CC AO CONVERSOR CC/CA	50
3.	RESULTADOS E SIMULAÇÕES.	53
4.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	58
	REFERÊNCIAS	60
	APÊNDICE – ESQUEMA DO CIRCUITO COMPLETO	62
	ANEXO	66

1. INTRODUÇÃO

1.1 ORIGEM E PANORAMA GERAL

A origem da energia solar deu-se em 1839, após a pesquisa do físico francês Alexandre Edmond Becquerel, que descobriu o efeito fotovoltaico, e com a criação da primeira célula fotovoltaica em 1883, por Charles Fritts [1].

Em 1922, Albert Einstein recebe o Prêmio Nobel pela descoberta do efeito fotoelétrico. Ele acreditava que um raio de luz não seria apenas uma onda contínua percorrendo o espaço, mas, sim, uma forma de geração de energia. A partir disso, foram realizados estudos a respeito trazendo essa nova maneira de ver a luz.

Só em 1954, Daryl Chapin, engenheiro da época, juntamente com colaboradores, do Bell Laboratory, nos Estados Unidos da América, publicaram o primeiro artigo sobre células solares em silício, ao mesmo tempo em que registraram a patente de uma célula com uma eficiência de 4.5% [2].

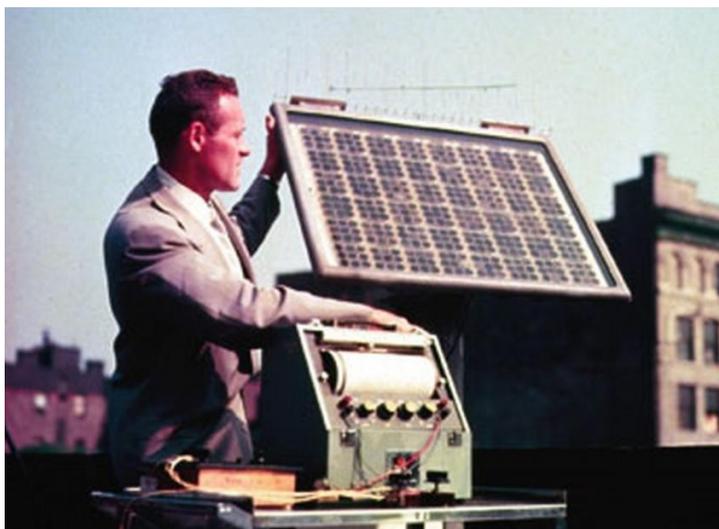


Figura 1: A Energia solar teve início no século XIX e veio evoluindo até os dias de hoje. Fonte: Portal Solar.

Calvin Fuller foi o químico que desenvolveu, pela primeira vez, o processo de dopagem do silício. Gerald Pearson, um físico contemporâneo de Fuller, estabilizou as placas de silício a partir de reações químicas produzidas pelo contato de uma junção P-N semicondutora, com as placas mergulhadas em lítio, podendo observar um comportamento fotovoltaico nas placas analisadas. Nessa mesma época, procurava-se uma fonte de energia alternativa para as baterias usadas em redes telefônicas remotas. A primeira célula solar moderna foi apresentada em 1954.

Tinha apenas dois centímetros quadrados de área e uma eficiência de 6%, gerando 5mW de potência elétrica. [3].

De lá para cá, nesse meio tempo, a energia solar vem se desenvolvendo de maneiras extraordinárias. Por exemplo, as células, que a princípio tinham 6% de eficiência de conversão, chegam atualmente a superar os 30% em seu mais alto nível. Em consequência disso, ela foi ganhando espaço e no ano de 1999 a capacidade fotovoltaica total instalada no mundo ultrapassa os 1000 Megawatts de potência, para ter noção, a hidrelétrica de Itaipu tem atualmente 1350 MW de geração [4].

Nos dias atuais a geração fotovoltaica está ganhando espaço no mercado e consequentemente nos telhados das casas das pessoas. Percebe-se um aumento constante na comercialização desses equipamentos que tem a proposta de gerar energia elétrica através da irradiação da luz solar. Esse tipo de sistema é bastante útil, não só para pessoas que moram distante das redes de distribuição, mas também para aqueles que têm suas residências conectadas à rede.

No Brasil a geração de energia elétrica é composta por uma matriz bem diversificada constituída principalmente por usinas hidrelétricas. Segundo o ONS – Operador Nacional do Sistema Interligado Nacional – a matriz de energia elétrica do Brasil tem 2,63% de geração vinda de energia fotovoltaica, representando 4.557MW de energia gerada. Isso ainda é pouco se comparado com a geração termelétrica que possui 21,68% da matriz. Pode ser observado, na figura 2, que embora a fonte de energia eólica tenha crescido, juntamente com a solar, em 2021 ainda não ultrapassam a quantidade de energia gerada pelas fontes não renováveis [4].

Segundo a BP Energy Outlook, tradicional periódico que divulga dados a respeito da área de geração e consumo da energia no planeta, as projeções para as fontes renováveis em escala mundial, são de que essas energias irão corresponder a aproximadamente 40% do desenvolvimento de consumo de energia até o ano de 2040 [5]. Dessa forma cada sistema instalado além de resultar em economia para o proprietário, resulta em um benefício ao meio ambiente reduzindo as emissões de dióxido de carbono na atmosfera, já que devido a essa nova fonte de geração associada ao sistema evita-se a necessidade de solicitar a religação das usinas termelétricas, e consequentemente reduz o custo de energia para os demais usuários da rede já que quando estas usinas são ligadas, tarifas adicionais são cobradas.

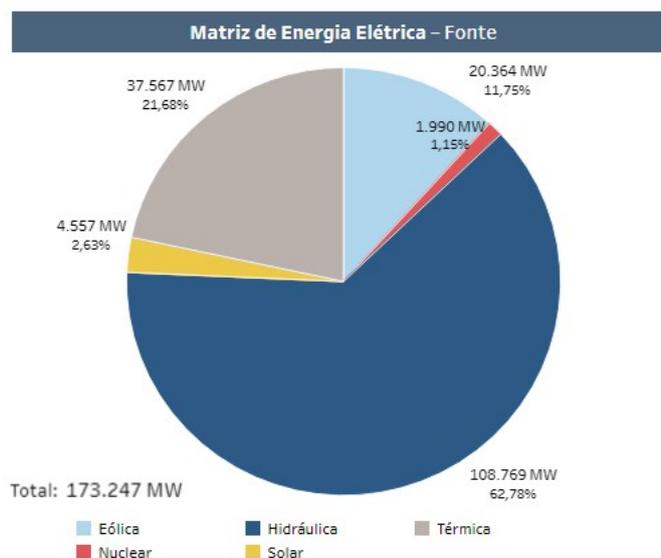


Figura 2: Matriz de Energia Elétrica brasileira no ano de 2021. Fonte: Site do Operador Nacional do SIN.

Está sendo realizada uma transição que trará benefício a todos os envolvidos, gerando empregos, renda, economia e sustentabilidade. Essa evolução pode ser constatada no gráfico da figura 3 que mostra a capacidade instalada de geração de usinas solar no SIN, em MW, versus o período, em meses, entre janeiro de 2017 e dezembro de 2021:

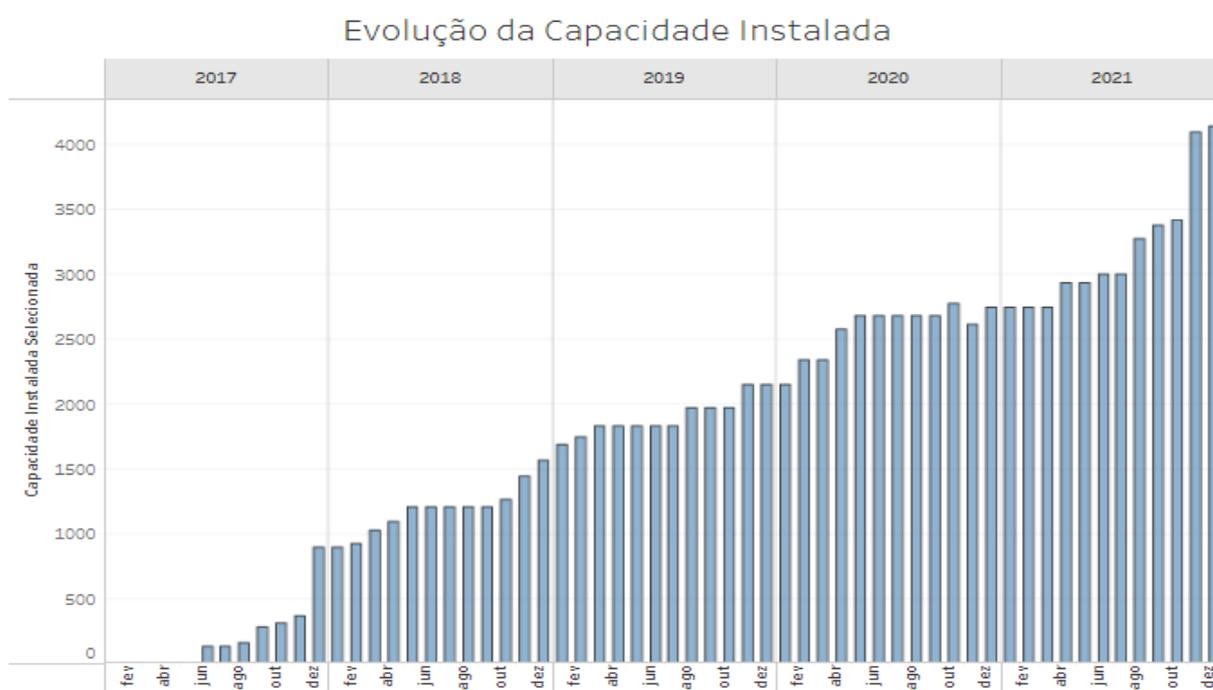


Figura 3: Evolução da geração solar no SIN. Fonte: Site do Operador Nacional do SIN.

Essa forma de geração ainda traz alguns ônus como, por exemplo a redução das perdas de energia na transmissão e distribuição, melhora do nível de tensão no período de carga pesada e a postergação de investimentos de expansão da rede de distribuição.

Seguindo essa tendência, ocorre um movimento em prol da realização dessa diversificação da matriz energética, determinado a incentivar as pessoas a gerarem sua própria energia de maneira limpa e sustentável e com a ressalva de que, para o futuro proprietário de um sistema fotovoltaico, isso é um investimento a médio/longo prazo com retorno garantido.

Dentre essas empresas, muitas delas são responsáveis pelos projetos de instalação, manutenção e divulgação que compõem os integradores. Outras se comprometem a fabricar dispositivos que farão parte do sistema como, por exemplo, os módulos e os inversores. Tudo isso compõe uma grande quantidade de pessoas que trabalham focadas em promover a melhor qualidade de geração para que a geração se dê de forma segura e eficiente.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse trabalho tem como base algumas literaturas e conhecimentos que serão de suma importância. Dentre eles estão livros e trabalhos de mestres e estudantes que visam esclarecer um pouco mais a respeito do que será colocado em pauta. Algumas dessas literaturas são clássicas e conhecidas no meio acadêmico outras não.

Uma das técnicas utilizada para o dimensionamento, que será apresentado nos capítulos posteriores, não foi retirada de literatura e sim de um método experimental que o autor do método usou para encontrar as equações. Dessa maneira serão exibidos testes e resultados para validar a eficácia desse método [6].

Alguns livros renomados foram fundamentais na construção deste trabalho, especificamente os que possuem conhecimentos a respeito de conversores CC/CC e conversores CC/CA que foram examinados e retirados de literaturas clássicas. Entre os conhecimentos observados está o comportamento de um conversor *BOOST* e algumas características básicas de funcionamento de um conversor CC/CA [7][8].

Alguns sites foram escolhidos por serem fontes confiáveis de informação, um deles é o site do Operador Nacional do SIN, já citado anteriormente, nele contém dados atualizados da Geração e Demanda de todo o Sistema Interligado Nacional. Outro site que está sendo bastante

utilizado no que se diz respeito ao compartilhamento de informações é o *YouTube* que contém uma vasta gama de conhecimentos disponíveis de maneira acessível e prática.

Alguns trabalhos foram utilizados como base para os demais posicionamentos a respeito dos componentes do sistema projetado. Um deles representou um papel importante na compreensão do algoritmo utilizado no dispositivo rastreador de máxima potência que é associado ao conversor *Boost*. Neste trabalho o autor apresenta como o algoritmo MPPT funciona, seus aspectos fundamentais, estrutura e faz uma comparação entre os métodos Perturbe e Observe e Indutância Incremental [9].

Entre outros recursos utilizados como referências para este documento está em destaque também um trabalho que disserta a respeito de um projeto de um conversor *boost* para aplicação em geração fotovoltaica com monitoramento remoto pela internet, nele o autor apresenta a construção de um protótipo funcional, que tem como objetivo fazer o monitoramento das informações do sistema (tensão, corrente e temperatura) e transmiti-los via internet [10].

Além das literaturas já mencionadas está incluso um artigo que desenvolve um dispositivo que realiza a sincronia entre a energia de saída do conversor CC/CA, com a energia da rede elétrica, contribuindo significativamente para que o projeto esteja dentro dos padrões de qualidade de energia. Esse artigo utiliza-se do conhecimento de Séries de Fourier para realizar uma detecção das componentes harmônicas da rede da concessionária para reproduzir uma corrente de saída para o conversor CC/CA que esteja em sincronia com ela [11].

1.3 MOTIVAÇÕES E OBJETIVOS

Esse trabalho de conclusão de curso tem como motivação principal realizar um compilado de informações que estão relacionadas a um assunto em que se há uma necessidade de ser considerado e documentado com a finalidade de servir como base de estudo para os demais estudantes, que, interessados em realizar trabalhos nesta área, tenham acesso a esse conteúdo de maneira acessível e bem explicada.

Para que haja compreensão do que vai ser descrito, o estudante que estiver lendo e examinando este documento, deve ter uma boa base de conhecimentos em eletrônica de potência além de conhecer os conceitos básicos de linguagem de programação e algoritmos computacionais e ter domínio do programa que será utilizado nas simulações (PSIM).

O objetivo principal deste trabalho consiste em apresentar o desenvolvimento de um projeto de um dispositivo capaz de realizar a transformação da energia gerada dos módulos fotovoltaicos em corrente contínua, para uma energia em forma de corrente alternada para o barramento em sincronia com a energia da rede de distribuição. Para isso serão discutidos os seguintes processos:

- dimensionamento de componentes;
- construção da estrutura do algoritmo MPPT;
- método de sincronismo com a rede elétrica;
- resultados e simulações do projeto;

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

As informações descritas neste documento estão dispostas de maneira a proporcionar ao leitor a compreensão do que foi realizado e dos resultados das simulações. Dessa forma serão apresentados inicialmente alguns conceitos fundamentais no Capítulo 2, que descreve os seguintes itens:

- Funcionamento dos módulos fotovoltaicos;
- Funcionamento do Conversor CC/CC (*BOOST*);
- O tipo de modulação PWM utilizada;
- Estrutura do Algoritmo MPPT;
- Dispositivo PLL baseado em Séries de Fourier;
- Características da Rede Elétrica;

Em todo o desenvolvimento do Capítulo 2 serão acrescentadas algumas informações de suma importância para que o leitor venha a ter entendimento prático de como aplicar esses conhecimentos dentro do programa escolhido para simulação, *PSIM*¹.

Em seguida, no Capítulo 3, serão exibidos os resultados obtidos nas simulações. De forma que sejam bem compreendidos e mostrando, no Capítulo 4, espaços onde há a possibilidade de uma melhoria, encaminhando o leitor para trabalhos futuros que propiciem a evolução do projeto.

¹ Foi utilizada para esse trabalho a versão do simulador *PSIM for Students* (disponível para estudantes).

2. COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

Neste Capítulo será dissertado a respeito de alguns conceitos fundamentais para uma boa compreensão do trabalho como um todo, conceitos ligados aos painéis fotovoltaicos e suas características básicas, também conceitos relacionados aos métodos utilizados durante o processo de dimensionamento dos conversores eletrônicos que fazem a conexão do sistema fotovoltaico (SFV) à rede elétrica.

A composição do SFV projetado pode ser observada no diagrama da figura 4, seguindo o fluxo de potência, da esquerda para a direita:

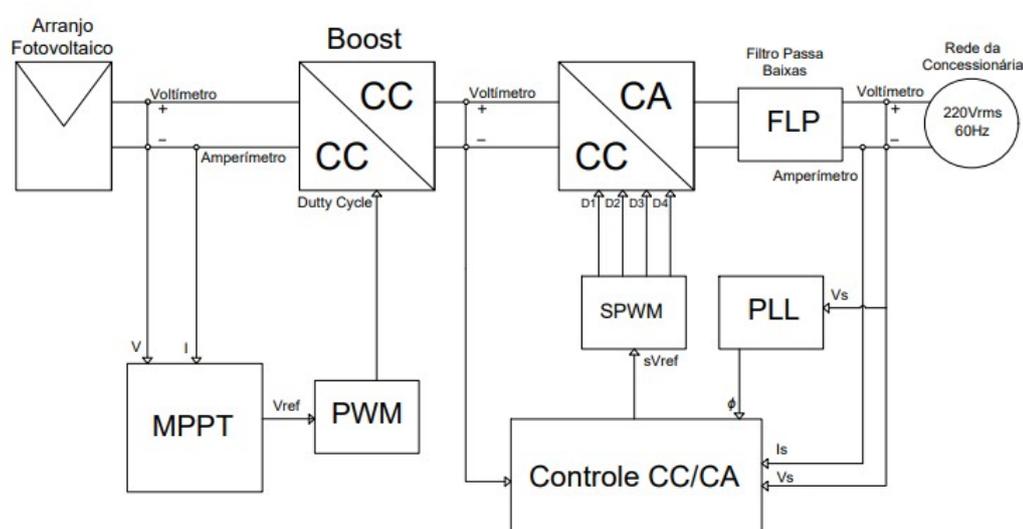


Figura 4: Diagrama de blocos que representa os componentes básicos do sistema; Fonte: Autor.

Cada um desses blocos vai ser detalhado ao longo das próximas sessões. Com esse modelo é possível realizar um projeto completo de um dispositivo que transforma a energia da luz do sol, primeiramente, em corrente contínua nos módulos, e em seguida essa energia é transformada em corrente alternada, em sincronia com a rede de distribuição de energia elétrica.

2.1 A CÉLULA E O MÓDULO FOTOVOLTAICO.

A célula fotovoltaica é o elemento básico para conversão de energia da luz solar em energia elétrica, a mesma pode ser descrita como uma junção P-N, ou barreira de potencial, especialmente projetada para geração.

A Figura 5 mostra como o arranjo é formado pelos módulos que são compostos pelas células fotovoltaicas. Um módulo fotovoltaico consiste em várias células conectadas em série e

em paralelo, com o intuito de fornecer níveis de tensão e de corrente para máxima potência, um conjunto de módulos compõem um “painel solar”.

Neste trabalho, um dos alvos de interesse é determinar o comportamento da tensão e da corrente nos terminais do conjunto de módulos durante o processo de geração fotovoltaica. Essas grandezas podem ser analisadas de forma satisfatória com o modelo que existe no programa computacional *PSIM – Power Simulation*.

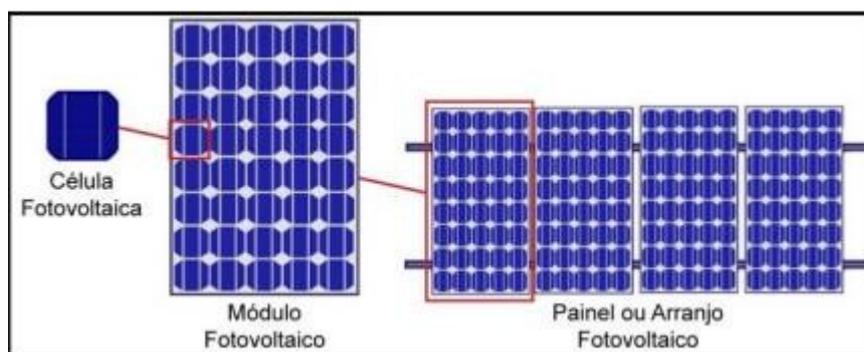


Figura 5: Representação da disposição das células fotovoltaicas em um módulo que compõe o arranjo fotovoltaico.

Fonte: Engehall Renováveis.

Na Figura 6 são mostrados os comportamentos das curvas $I \times V$ (tensão versus corrente) do módulo fotovoltaico de acordo com o modelo baseado na folha de dados do modelo CS6U-320P da marca Canadian [12]. Foram traçadas curvas para diferentes valores de radiação solar à esquerda e para diferentes valores de temperatura à direita. Observa-se que as curvas apresentam diferentes valores para pontos de tensão e corrente para cada nível de radiação solar e temperatura. É possível notar que o aumento da irradiação eleva o valor da corrente apesar de exercer pouco efeito na tensão entre os terminais do módulo. O ponto de operação de máxima potência, ou MPP, do inglês *Maximum Power Point*, é localizado nas proximidades do joelho das curvas. Um dos focos deste trabalho é encontrar uma maneira em que o módulo, ou arranjo de módulos, trabalhe nessas áreas de máxima potência independentemente da quantidade de irradiação solar que esteja incidindo sobre eles.

No programa de simulação que será utilizado o modelo computacional do módulo tem algumas características que devem ser consideradas. Os dados relacionados ao modelo escolhido devem ser especificados no menu: *Utilities > Solar Module* (Figura 6), essa aba dá acesso a uma janela (Figura 7) onde são inseridas as informações essenciais para que o programa funcione de

acordo com as especificações do modelo físico do módulo escolhido, essas informações se encontram na folha de dados do módulo já mencionado, ver Anexo - figura A2.

Com essas informações é possível observar que esse módulo apresenta 72 células por placa, 320 Watts de potência máxima para máxima irradiação, que foi estabelecida neste trabalho como 1000 W/m^2 . Nota: o Sol pode facilmente ultrapassar os 1000 W/m^2 de radiação, mas para simplificar os cálculos iremos adotar este valor como sendo irradiação máxima.

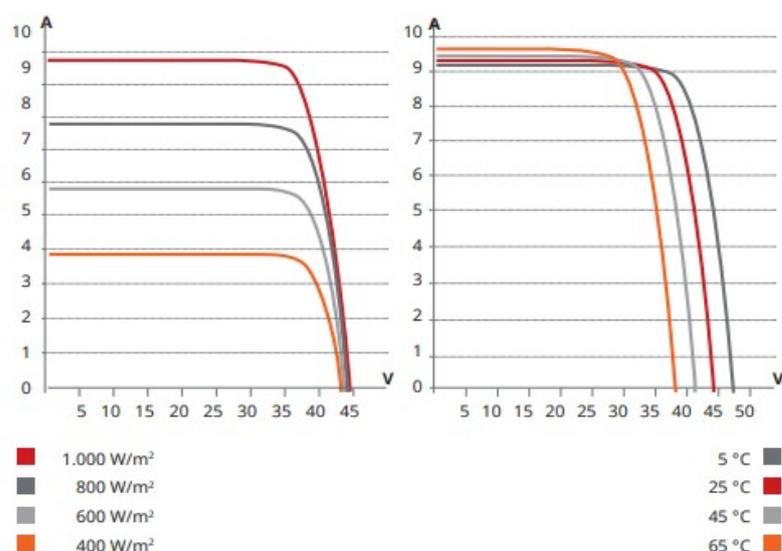


Figura 6: Curvas de corrente e tensão para cada nível de irradiação solar e temperatura. Fonte: CANADIAN, Datasheet [12].

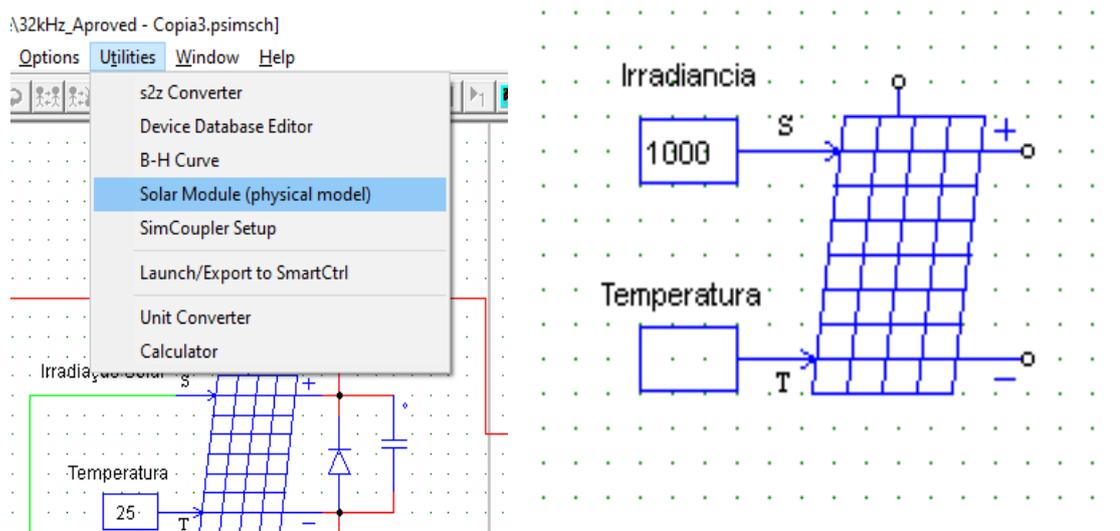


Figura 7: Aba selecionada para inserir informações do módulo à esquerda, representação do módulo à direita.

É necessário que após a inserção dos dados do módulo nos seus locais específicos da janela da figura 8 seja realizado o cálculo da curva de potência clicando no botão selecionado da figura. Dessa maneira irão aparecer duas curvas que representam o comportamento de Corrente vs. Tensão e Potência vs. Tensão do módulo em operação, em seguida devem ser copiados os parâmetros para o módulo no botão: *Copy PSIM Parameters* (figura 8).

Na figura 9 é mostrado um gráfico trazendo a distribuição de irradiação solar, em W/m^2 , durante o período compreendido entre 5 horas da manhã e 8 e meia da noite, obtido na região metropolitana de Curitiba no dia 13 de janeiro de 2017 [13].

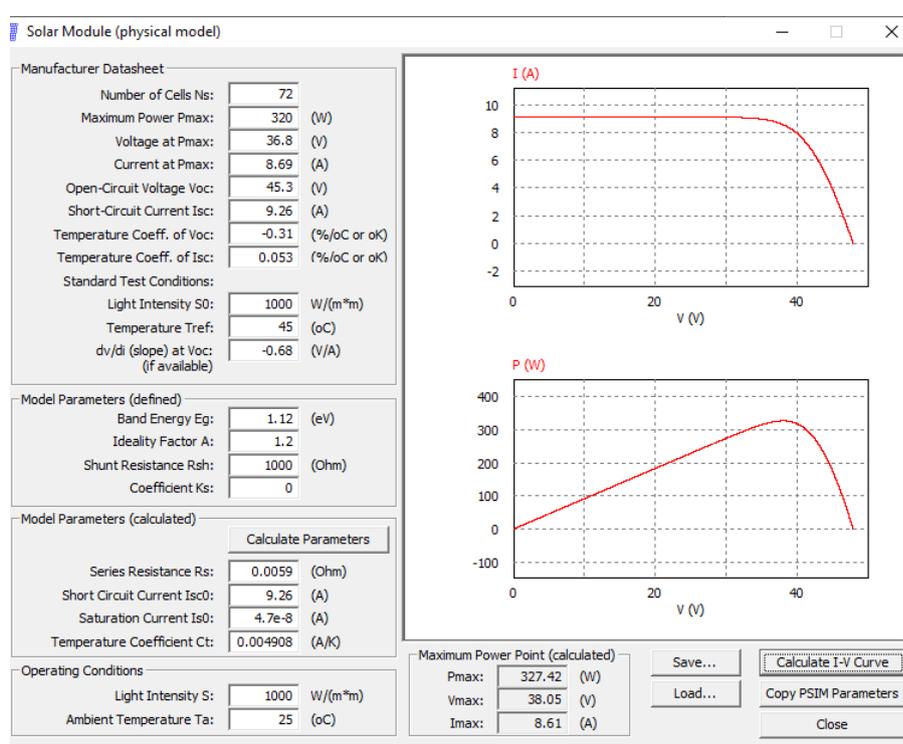


Figura 8: Janela onde são inseridos os dados retirados da folha de dados do módulo;

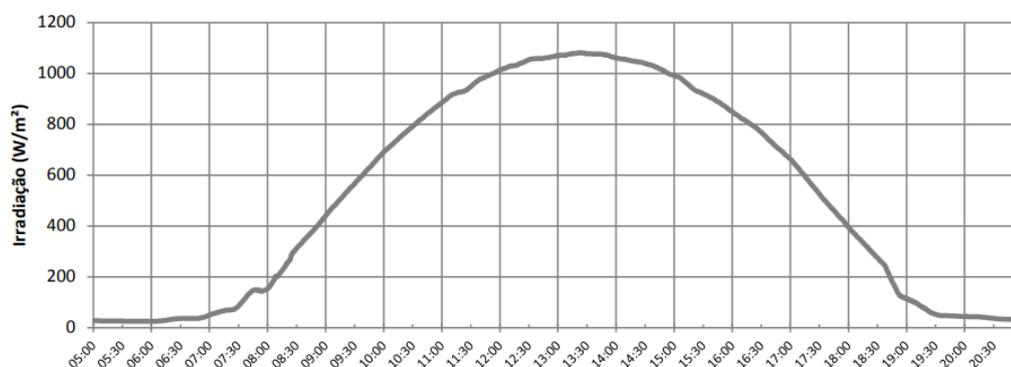


Figura 9: Radiação solar obtida em áreas com irradiação solar alta em um dia ensolarado.[12]

Será utilizada uma fonte senoidal com valor médio de 600 W/m^2 e valor de pico a pico de 400 W/m^2 que fará uma simulação de como o sol varia sua radiação durante um dado período, de 10 a 11 horas de duração, por exemplo. Nesse caso foi utilizado um período base de 10 segundos. Períodos superiores demandam um tempo de simulação demasiado e se tornam, no momento, inviáveis para serem realizados. Como pode ser observada, na figura 10, a variação da irradiação nesse projeto se dará entre 200 e 1000 W/m^2 , em um ciclo durante 10 segundos, simulando a variação pela movimentação do sol, durante o dia.

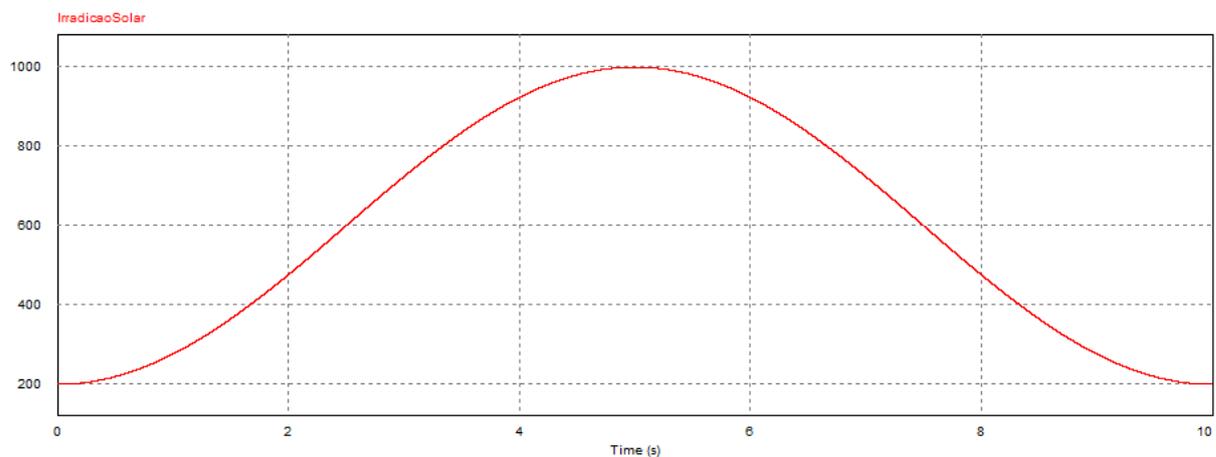


Figura 10: Irradiação solar simulada durante 10 segundos no PSIM. Fonte: Autor.

Deve-se deixar claro que para esse projeto será estabelecida uma temperatura fixa de 45°C para os testes de simulações. É necessário observar que a temperatura determina uma variação na produção de potência do sistema. Para fases futuras uma variação de temperatura deverá ser considerada, para uma execução mais precisa do projeto e tornar viável a criação de um protótipo funcional.

2.2 CONVERSOR *BOOST*

O conversor *Boost* (conversor amplificador) é um conversor que transforma tensão contínua na sua entrada em tensão contínua com um valor mais alto em sua saída, mantendo o nível de potência da entrada. Neste trabalho será usado um modelo ideal do *PSIM*, o que significa que todo o dispositivo não apresentará perdas.

Esse dispositivo é composto por uma fonte CC na entrada com um indutor acoplado no qual é armazenada uma determinada quantidade de energia inicial em forma de campo magnético, figura 12. Essa energia é transmitida à carga na medida em que o dispositivo comutador permanece desligado. Quando a chave é novamente ligada, de maneira periódica, uma

determinada quantidade de energia é armazenada no indutor [8] completando assim um ciclo. A equação (2.1) define a relação entre tensão de entrada e de saída:

$$V_o = \frac{V_s}{1 - D} \quad (2.1)$$

Onde V_o é a tensão de saída, V_s é a tensão da fonte e D é o *duty cycle*, ou razão cíclica. A corrente de saída de um conversor elevador normalmente tem uma variação, comumente denominada *ripple*, essa ondulação deve se manter com valores mínimos para que a carga receba uma distribuição de potência média estável durante o período.

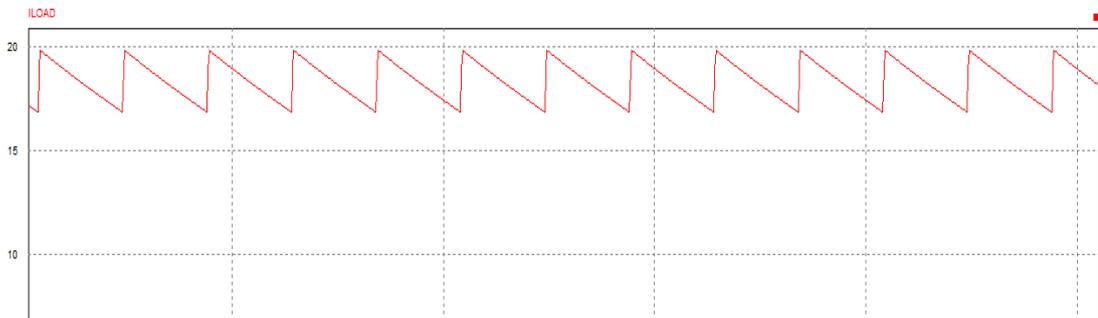


Figura 11: Exemplo de ondulação da corrente na saída do conversor CC/CC. Fonte: Autor.

A topologia de conversor CC/CC adotado neste trabalho terá o formato apresentado na figura 12, cujo módulo será substituído por um arranjo de 4 módulos.

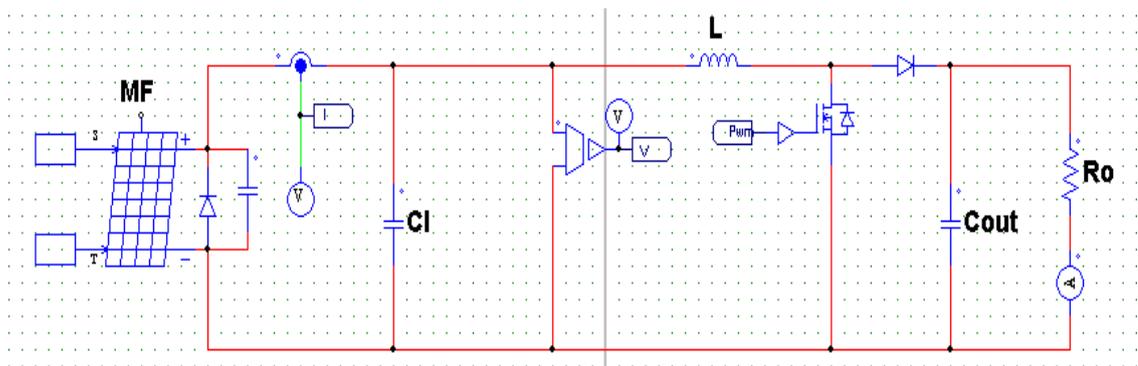


Figura 12: Modelo de conversor *Boost* adotado neste trabalho;

2.2.1 MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO - PWM

A modulação PWM – *Pulse Width Modulation*, é bastante aplicada na eletrônica, principalmente no acionamento de fontes chaveadas. Além desta utilização a técnica também pode ser usada no controle de velocidade de motores, controle de luminosidade e controle de servomotores e outras aplicações.

Um dispositivo digital como um microcontrolador pode trabalhar com entradas e saídas que possuem apenas dois estados. Assim, é possível usá-lo facilmente para controlar a saída de potência de um conversor CC/CC *boost*, controlando a largura do pulso PWM conectado à entrada do dispositivo comutador, por exemplo.

Para o conversor *boost* deste trabalho o pulso que controla o chaveamento terá uma frequência de 32 kHz (essa frequência foi escolhida por estar acima da faixa audível do ser humano). Para se ter uma geração de pulso com *duty cycle*, ou razão cíclica, com valor: **0.5**, por exemplo, pode ser usada a seguinte configuração no PSIM, com uma fonte de tensão CC, uma fonte triangular e um comparador:

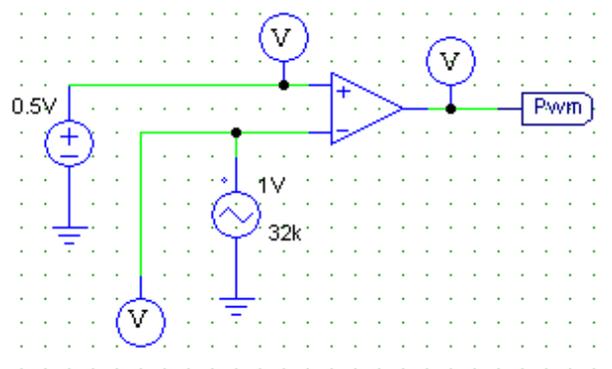


Figura 13: Exemplo de um PWM projetado no *PSIM* com razão cíclica de 0.5.

Razão cíclica de 0,5 significa dizer que a chave permanecerá ligada em 50% do tempo de cada período. Esse resultado vem da operação feita pela comparação da tensão triangular do gerador de frequências com a tensão CC de 0,5 V [8].

Cada vez que o sinal da fonte CC for maior que o sinal do gerador de frequências, a saída do comparador vai ser um sinal maior do que zero (figura 14), nesse exemplo é 1 (estado ligado da chave). Dessa forma observa-se na saída do comparador um sinal que representa nível lógico 1 em 50% do tempo a cada período [8]. Será explicado na próxima seção o algoritmo que irá controlar qual valor deve ser inserido na entrada positiva do comparador.

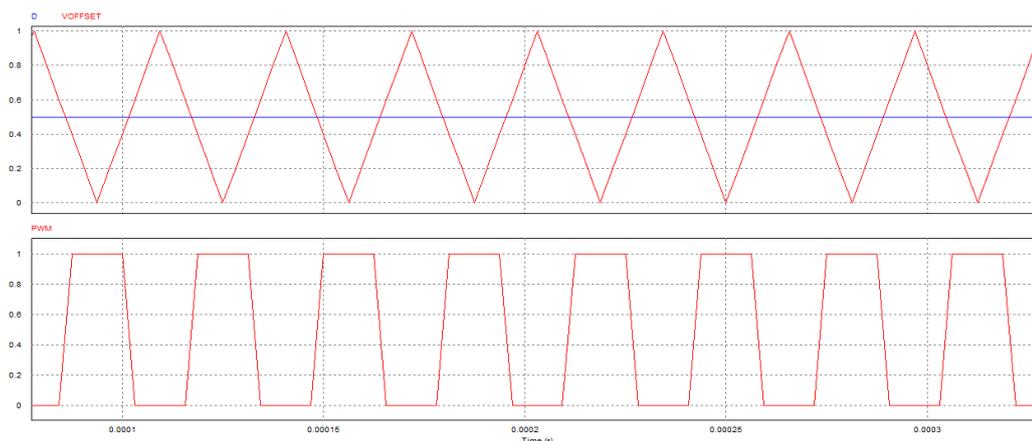


Figura 14: Sinal de onda triangular sendo comparado com o sinal CC, em azul (cima). Sinal de onda resultante da operação do comparador (baixo). Fonte: Autor.

2.2.2 ALGORITMO MPPT P&O

A literatura atual apresenta diversos tipos de algoritmos de MPPT que variam, principalmente em: complexidade, número de sensores requeridos, velocidade de convergência, custo, eficácia e implementação de hardware, são eles: Perturba e Observa, Condutância incremental, Controlador com Lógica Fuzzy, entre outros. Devido a essa diversidade de algoritmos vários trabalhos foram realizados com a intenção de comparar os resultados [15]. Não será realizado, neste trabalho, testes e experimentos nesse sentido. Será explicado apenas como o algoritmo escolhido funciona e quais seus pontos positivos e negativos. É necessário deixar claro que em vista de uma possível fabricação de um protótipo, esse algoritmo deverá ser melhorado e/ou substituído devido às adaptações às variações de radiação solar e temperatura. Para fins de estudo e projeto esse algoritmo é consistente.

2.2.2.1 Estrutura do Algoritmo

O código, que será simulado em um bloco de programação de linguagem C no PSIM (figura 15), segue o fluxograma da próxima página e consiste em verificar os valores de tensão e corrente nos terminais do módulo fotovoltaico, realizar o cálculo da potência e verificar se essa potência é maior ou menor que a potência do passo anterior. O ajuste da razão cíclica é feito de acordo com a diferença entre a tensão do ciclo atual e a do ciclo passado.

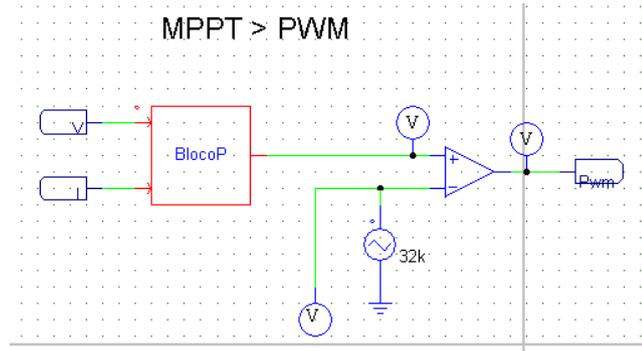


Figura 15: Bloco C do *PSIM* com entradas de tensão e corrente medidas nos terminais do módulo, e saída sendo o valor de razão cíclica que servirá de entrada do comparador que faz a modulação PWM do conversor *Boost*.

Como exibido no fluxograma, é possível ver que o algoritmo usa os valores de potência e de tensão do ciclo atual para modificar o valor da tensão de referência. Lembrando que o conversor *boost* trabalha com a equação (2.1) [8].

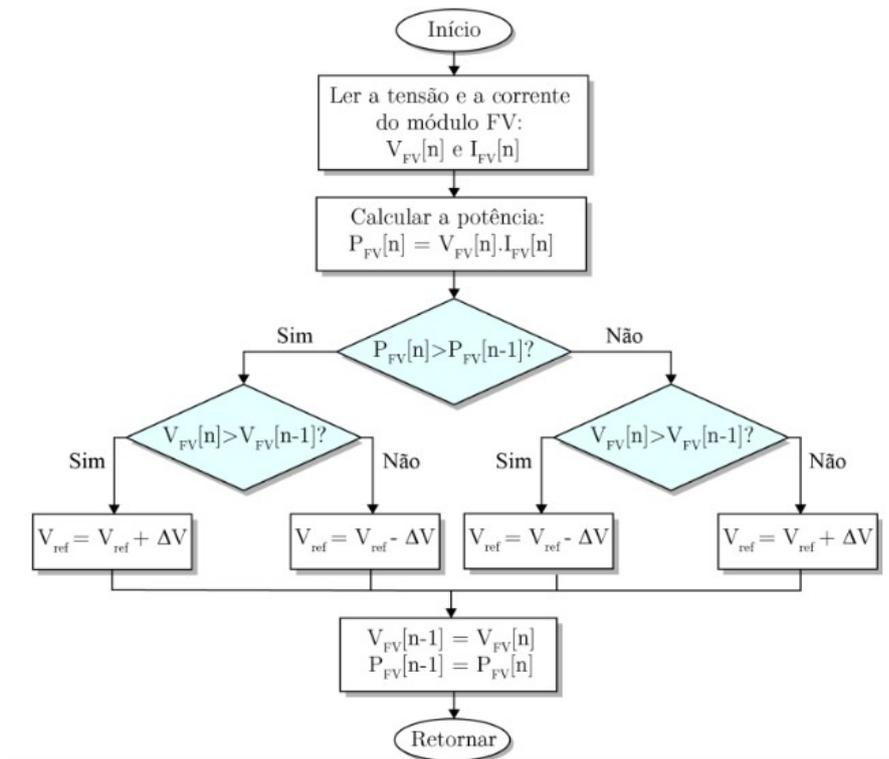


Figura 16: Fluxograma do algoritmo MPPT; Fonte: CAIO MORAES [15].

O que em suma quer dizer que quanto maior o valor da razão cíclica, maior a tensão de saída do conversor em Volts. Dessa maneira o algoritmo MPPT realiza a leitura da potência e se ela for maior que a potência do ciclo anterior e a tensão atual for maior que a tensão do ciclo anterior ele deduz que se ele aumentar a razão cíclica (D), existe uma grande chance de que no próximo ciclo a potência seja maior que a potência atual [9]. No entanto, se for observado que a

potência atual é maior que a anterior e a tensão atual medida nos terminais do módulo é inferior à anterior isso induz o algoritmo a reduzir a razão cíclica, reduzindo mais a tensão de saída para que a potência venha a crescer. Até que o algoritmo chega a um ponto de máxima potência, conhecido como MPP. Pode ser observado no gráfico de Tensão vs. Potência dos módulos, figura 17. O algoritmo na íntegra está disponível no Anexo, figuras A3 e A4.

Como já mencionado antes, existem outros métodos na literatura, uns melhores que outros. Apesar de muito eficiente, este método não responde bem quando há sombreamento parcial em apenas alguns módulos, podendo escolher inicialmente uma direção incorreta para atualização do ponto de operação do sistema e ficar preso em um ponto de máxima potência local ao invés de um global como se deseja.

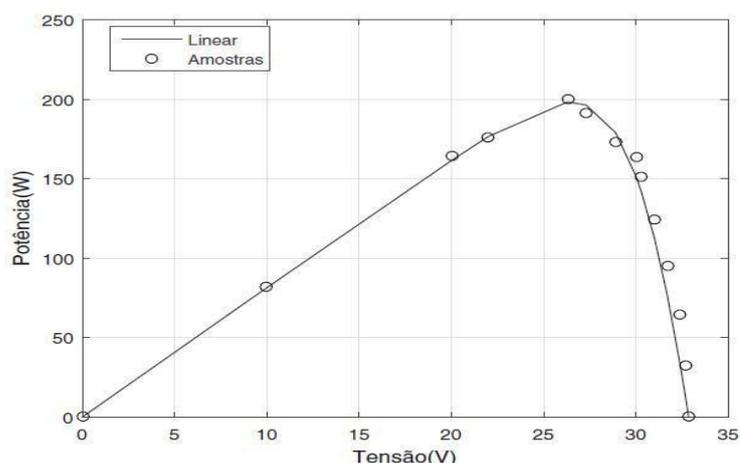


Figura 17: Gráfico Tensão vs. Potência de um módulo de 200W de MP. Fonte: Grundemann, WAGNER [9].

2.2.3 DIMENSIONAMENTO DO CIRCUITO DE POTÊNCIA

O método de dimensionamento tem a finalidade de calcular os valores de cada componente individualmente, utilizando parâmetros encontrados por equações definidas pelo criador desse método [6]. Ahsan Mehmood recebeu o grau da Universidade Nacional de Ciências e Tecnologia (NUST), Islamabad, Paquistão, em 2016, ele é graduado em engenharia eletrônica pelo Instituto Ghulam Ishaq Khan de Ciências e Tecnologia de Engenharia (GIKI), Swabi, Paquistão, em 2020. Seus interesses de pesquisa incluem o projeto de métodos de detecção de falhas para sistemas solares fotovoltaicos, rastreamento de ponto de potência máxima (MPPT), algoritmos e detecção de condições de sombreamento parcial.

Em um de seus vídeos, publicados no site de compartilhamento de vídeos (*YouTube*), com o título: “*How to design boost converter for photovoltaic system?*”, datado de 6 de maio de

2021, propõe uma maneira de dimensionar os valores exatos dos componentes de um conversor elevador associado a um sistema fotovoltaico controlado por algoritmo rastreador de máxima potência. Os testes realizados em sequência mostrarão como esse método é eficaz.

2.2.3.1 Desenvolvimento do método.

Em primeiro lugar devem ser consideradas as seguintes equações relacionadas aos valores que se deseja encontrar [6]:

$$C_{in} = \frac{(4 \cdot V_{Max Pot} \cdot D_+)}{\Delta V_i \cdot R_r \cdot f} \quad (2.2)$$

$$C_{out} = \frac{(2 \cdot V_{out+} \cdot D_+)}{\Delta V_o \cdot R_o \cdot f} \quad (2.3)$$

$$L = \frac{(V_{Min Pot} \cdot D_-)}{2 \cdot \Delta I_o \cdot f} \quad (2.4)$$

Onde:

- C_{in} é o valor do capacitor de entrada do conversor.
- C_{out} é o valor do capacitor de saída do conversor.
- L é o valor do indutor.

Cada uma das variáveis que compõem essas equações é necessária para que sejam encontrados os valores dos componentes do conversor. As variáveis são definidas e encontradas cada uma com seu método específico definido pelo passo-a-passo descrito a seguir:

1º Passo: Deve-se atentar a configuração escolhida para os módulos para definir a tensão, e a corrente, de entrada para máxima e mínima potência. Para o projeto deste trabalho será escolhido um arranjo de 2x2 módulos de potência nominal (máxima) já definida de 320W. Cada módulo do modelo escolhido tem corrente nominal para máxima potência de 8.69A, e tensão de 36.80V, esses dados são facilmente obtidos na folha de dados do modelo do módulo (verificar Anexo).

Com essas informações, para máxima potência (radiação de 1000W/m²), o arranjo terá:

$$V_{Max Pot} = 2 \times 36,80V = 73,6 V \quad (2.5)$$

$$I_{Max Pot} = 2 \times 8,69 V = 17,38 A \quad (2.6)$$

$$P_{Max Pot} = 320 \times 4 = 1280 W \quad (2.7)$$

Por outro lado, o arranjo terá valores de tensão e corrente para mínima potência (definida radiação mínima de $50\text{W}/\text{m}^2$):

$$V_{Min Pot} = V_{Max Pot} \times 0,9 = 66,24V \quad (2.8)$$

$$P_{Min Pot} = P_{Max Pot} \times 0,05 = 64W \quad (2.9)$$

$$I_{Min Pot} = \frac{P_{Min Pot}}{V_{Min Pot}} = 0,97 A \quad (2.10)$$

É interessante notar que pelo gráfico contido na figura 6 os valores de tensão decrescem em uma taxa menor do que os valores de corrente quando a irradiação é reduzida. Aplicando uma regra de proporcionalidade pode estimar-se uma taxa de 5 por cento de decréscimo de potência para uma irradiação de $50\text{ W}/\text{m}^2$ [6].

2º Passo: Devem ser estabelecidos os parâmetros básicos do projeto: Frequência de chaveamento do *Boost*, Variações percentuais de tensão e corrente desejadas. Para esse projeto foram definidos os seguintes parâmetros:

- Frequência de chaveamento: **32kHz**
- Variação de tensão de saída: **0.001** ou **0.1%**
- Variação de corrente de saída: **0.05** ou **5%**

3º Passo: Agora devem ser encontrados os valores de resistência relativa do arranjo para cada situação, de máxima ($1000\text{ W}/\text{m}^2$) e mínima irradiação solar ($50\text{ W}/\text{m}^2$), para isso:

$$R_{Max Pot} = \frac{V_{Max Pot}}{I_{Max Pot}} = \frac{73,6}{17,38} = 4,23\Omega \quad (2.11)$$

$$R_{Min Pot} = \frac{V_{Min Pot}}{I_{Min Pot}} = \frac{66,24}{0,97} = 68,56\Omega \quad (2.12)$$

A resistência de saída do conversor já pode ser encontrada nessa etapa do processo com a equação (2.13) [6]:

$$R_{Out} = R_{Min Pot} * 2,5 \quad (2.13)$$

$$R_{Out} = 171,4 \Omega$$

4° Passo: Encontrar os valores de razão cíclica para máxima e mínima potência (D):

$$D_+ = 1 - \sqrt{\frac{R_{Max Pot}}{R_{Out}}} = 0,84 \quad (2.14)$$

$$D_- = 1 - \sqrt{\frac{R_{Min Pot}}{R_{Out}}} = 0,37 \quad (2.15)$$

Nota: esses valores, são valores de base para uma faixa de operação. Já que para valores superiores a 0,6 de razão cíclica, não são recomendados para um conversor elevador.

5° Passo: Nesse passo serão encontrados os valores de tensão e de corrente de saída do conversor para máxima e mínima irradiação:

$$V_{out+} = \frac{V_{Max Pot}}{(1 - D^+)} = 468,23 V \quad (2.16)$$

$$I_{out+} = \frac{468,23V}{171,4\Omega} = 2,73 A \quad (2.17)$$

$$V_{out-} = \frac{V_{Min Pot}}{(1 - D^-)} = 104,73 V \quad (2.18)$$

$$I_{out-} = \frac{104,73V}{171,4\Omega} = 0,61 A \quad (2.19)$$

6° Passo: Encontrar as variações (*ripple*) de tensão e corrente para cada situação.

$$\Delta V_i = dV \cdot V_{Max Pot} = 0,001 \cdot 76,1 = 0,0736 V \quad (2.20)$$

$$\Delta V_o = dV \cdot V_{Max Pot} = 0,001 \cdot 490,02 = 0,468 V \quad (2.21)$$

$$\Delta I_o = dl \cdot I_{out-} = 0,05 \cdot 0,61 = 0,0305 A \quad (2.22)$$

Onde:

- ΔV_i é a variação de tensão de saída.
- ΔV_o é a variação de tensão de saída.
- ΔI_o é a variação de corrente de saída.

7º Passo: Encontrar um valor para o que é denominado de Resistência Refletida a partir da resistência de saída e da razão cíclica de máxima potência [6]:

$$R_r = R_o \cdot (1 - D_+^2) = 49,65 \Omega \quad (2.23)$$

8º Passo: Finalmente é possível com essas informações encontrar os valores das capacitâncias de entrada e de saída e da indutância, para o arranjo escolhido (2x2), utilizando as equações 2.2, 2.3 e 2.4 e os valores encontrados nos passos anteriores:

$$C_{in} = \frac{(4 \cdot V_{Max Pot} \cdot D_+)}{\Delta V_i \cdot R_r \cdot f} = 0,0017869 F$$

$$C_{out} = \frac{(2 \cdot V_{out+} \cdot D_+)}{\Delta V_o \cdot R_o \cdot f} = 0,0002588 F$$

$$L = \frac{(V_{Min Pot} \cdot D_-)}{2 \cdot \Delta I_o \cdot f} = 0,0104847 H$$

Portanto, o dispositivo elevador de tensão obtido pelo método acima descrito é exibido na figura 18:

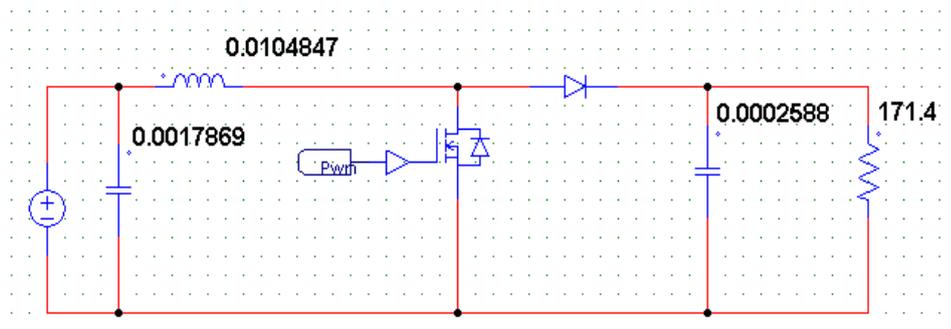


Figura 18: Conversor *Boost* no formato adotado neste projeto;

Para o dispositivo final será retirado o resistor acoplado na saída porque não será necessária a permanência dele no esquema. Por conseguinte, pode-se considerar que a fonte descrita na figura 18 está na verdade representando o arranjo fotovoltaico.

2.2.3.2 Testando o método.

Serão exibidos neste tópico alguns resultados de testes realizados com os valores obtidos pelo método apresentado. Foram realizados alguns ensaios no *PSIM* com valores para diferentes configurações de painéis fotovoltaicos. Dessa maneira pôde-se reconhecer o método como um

meio confiável de realizar o dimensionamento de um conversor *Boost* conectado a um sistema fotovoltaico.

O teste consiste em analisar os valores de máxima potência obtidos com o conversor trabalhando com auxílio do algoritmo MPPT Perturba e Observa e verificar a sua eficácia quando comparamos a máxima potência esperada com os resultados obtidos. Foram realizados testes com 4 combinações diferentes de arranjos fotovoltaicos, a temperatura de 45°C e irradiação de 1000 W/m², são elas:

- I. 2 módulos em série;
- II. 4 módulos em série;
- III. 4 módulos em paralelo;
- IV. Configuração 2x2 (adotada para o projeto);

Teste I: Seguem, na tabela 1, os valores dos componentes obtidos pelo método, nessa configuração com a ajuda de um programa de computador:

Tabela 1: Valores dos componentes para o arranjo de 2 módulos em série.

L	0,0209694 H
Cin	0,0008935 F
Cout	0,0001294 F
Rout	342,79 Ω

A tabela 2 mostra, para uma irradiação (máxima) de 1000 W/m², os resultados previstos para tensão de saída do conversor CC/CC, ondulações de tensão e de corrente e potência máxima obtidas pelo algoritmo.

Os valores dos *ripples* de corrente e de tensão de saída foram encontrados por meio de um simples cálculo observando as curvas da figura 19, medindo os valores de variação e dividindo-os pelos valores médios.

Tabela 2: Previsão e Resultados do Teste I

(1000w/m ²)	Previsão	Resultados
P _{máx}	640 W	602 W
ΔV _o	0,10%	0,7%
ΔI _o	5%	0,5%
V _o MP	468 V	453 V

Seguem também os resultados em forma de gráfico mostrando o desempenho do dispositivo dimensionado para essa configuração específica, valores de tensão e corrente de saída e potência máxima obtida com um tempo menor que 40 ms.

Nesse ponto do teste observa-se que para a configuração proposta para o teste I o módulo alcança uma potência de MPP estável equivalente à aproximadamente 95% da prevista. Esse valor é aceitável já que a potência prevista é obtida com relação a temperatura de 25°C, e a temperatura dos módulos está configurada em 45°C.

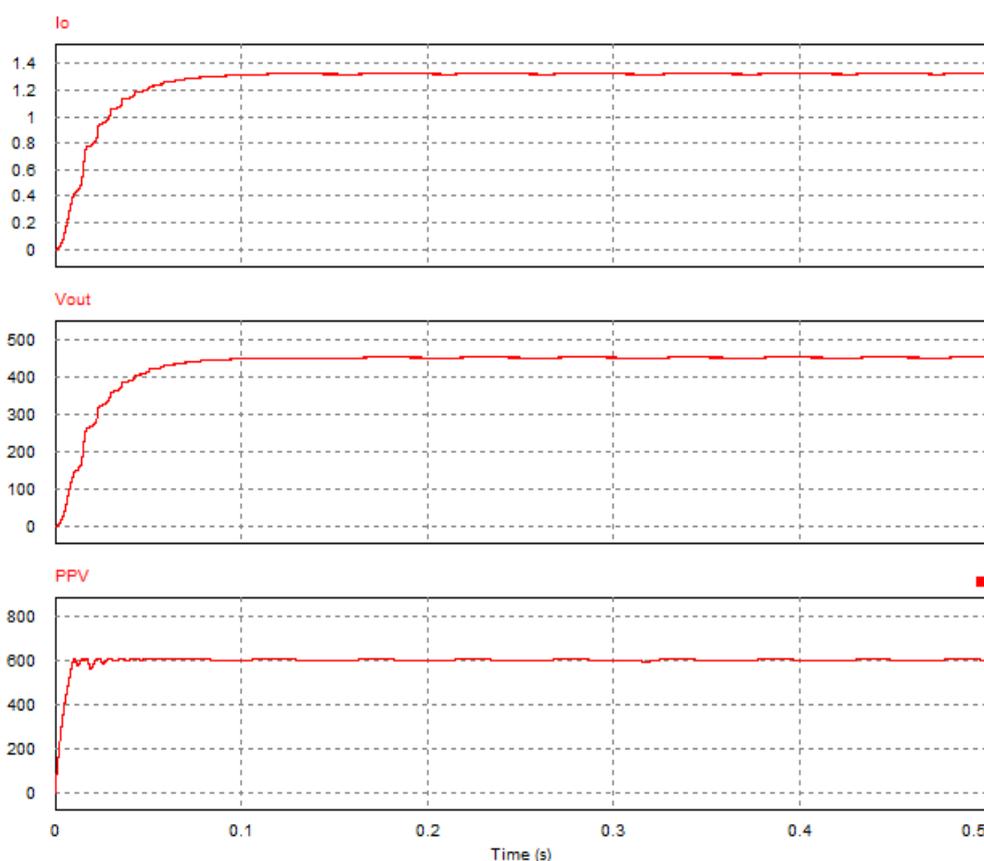


Figura 19: Gráficos mostrando as formas de onda de corrente e tensão de saída dos módulos e potência dos resultados obtidos nas simulações do teste I.

Teste II: Seguem, na tabela 3, os valores dos componentes obtidos pelo método, nessa configuração:

Tabela 3: Valores dos componentes para o arranjo de 4 módulos em série.

L	0,0419389 H
Cin	0,0004467 F
Cout	0,0000647 F
Rout	685,584 Ω

A tabela 4 mostra os resultados obtidos no teste II e em seguida, na figura 20, são exibidos os resultados da simulação do PSIM, para a configuração de 4 módulos em série:

Tabela 4: Resultados do Teste II

(1000w/m ²)	Previsão	Resultados
P _{máx}	1280 W	1204,6 W
ΔV_o	0,1%	0,05%
ΔI_o	5%	4,5%
V _o MP	936,47 V	907,71 V

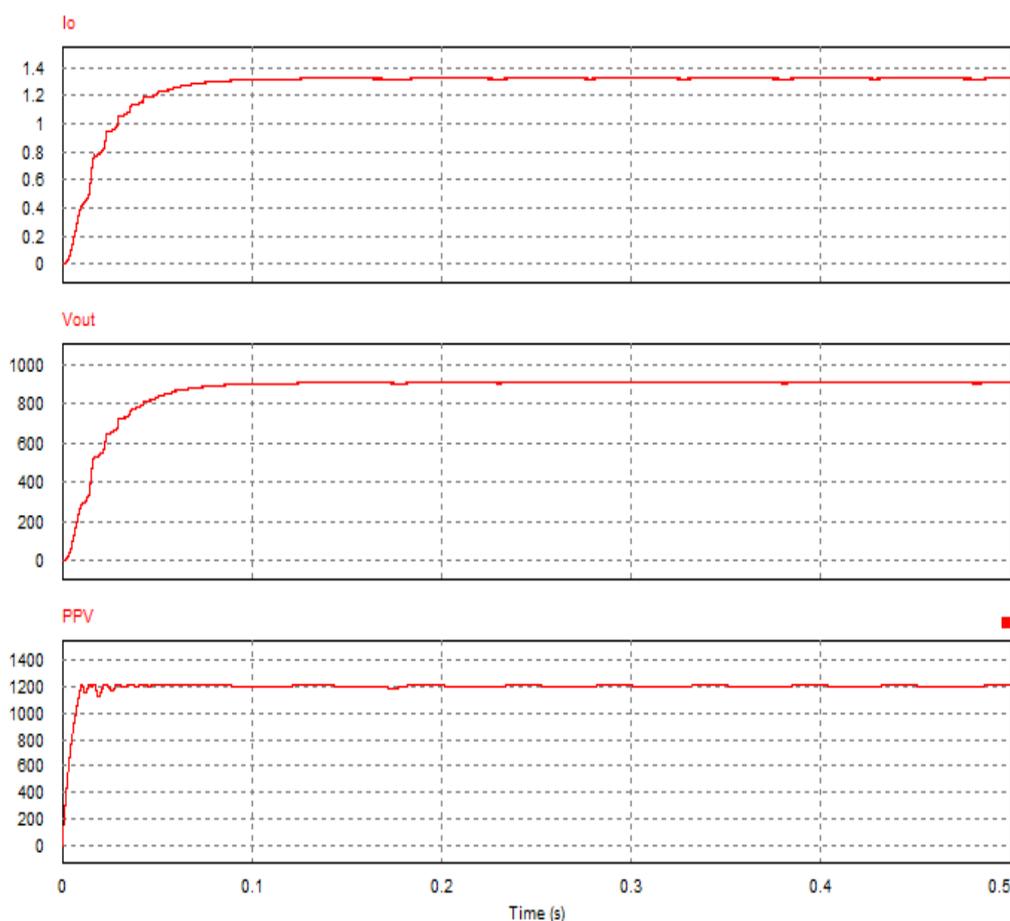


Figura 20: Gráficos mostrando as formas de onda de tensão corrente de saída e potência obtidas nas simulações do teste II;

Para o teste II, é possível notar que a potência obtida em regime permanente equivale a 94% da potência prevista. Nota-se também, na tabela 4, valores de ondulação, tanto de tensão quanto de corrente de saída abaixo dos valores previstos pelo método.

Teste III: Seguem, na tabela 5, os valores dos componentes obtidos pelo método, nessa configuração:

Tabela 5: Valores dos componentes para o arranjo de 4 módulos em paralelo.

L	0,0026212 H
Cin	0,0071478 F
Cout	0,0010352 F
Rout	42,849 Ω

A tabela 6 mostra os resultados obtidos no teste III e em seguida, na figura 21, são exibidos os resultados da simulação do PSIM, para a configuração de 4 módulos em paralelo:

Tabela 6: Resultados do Teste III

(1000w/m ²)	Previsão	Resultados
P _{máx}	1280 W	1215,4 W
ΔV_o	0,10%	1,7%%
ΔI_o	5%	1,87%
V _o Máx	234,11 V	227,9 V

Vale lembrar que os valores de tensão e de corrente exibidos tanto na tabela 6 como nos gráficos da figura 21, são obtidos na saída do conversor CC/CC, enquanto a potência observada é a potência dos terminais dos módulos.

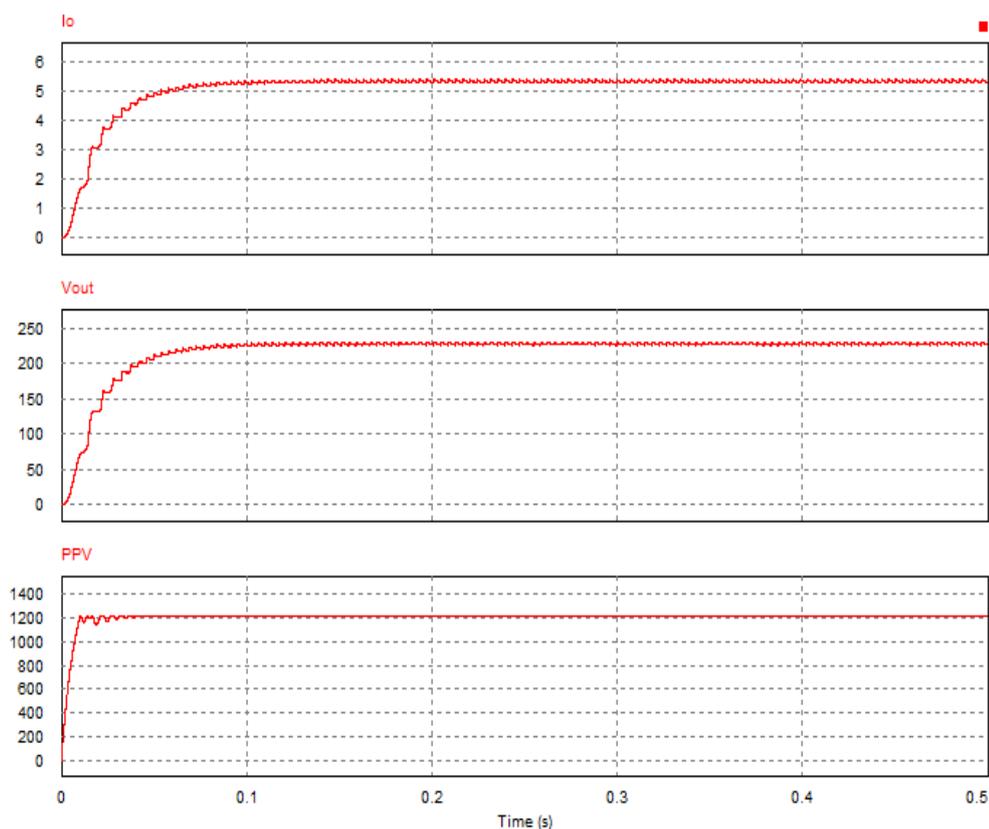


Figura 21: Gráficos mostrando as formas de onda de corrente e tensão de saída e potência obtidas nas simulações do teste III.

Teste IV: A tabela 7 mostra os valores dos componentes do conversor boost obtidos no teste IV e em seguida, na tabela 8 são mostrados os valores previstos de potência, *ripple* de tensão e de corrente de saída e tensão de saída e os valores obtidos no teste IV. Na figura 22, são exibidos os resultados da simulação do PSIM, para a configuração de 2 módulos em paralelo com 2 módulos em série:

Tabela 7: Valores dos componentes para configuração 2x2.

L	0,0104847 H
Cin	0,0017869 F
Cout	0,0002588 F
Rout	171,4 Ω

Tabela 8: Resultados do Teste IV

(1000w/m ²)	Previsão	Resultados
P _{máx}	1280 W	1205 W
ΔV_o	0,10%	0,5%
ΔI_o	5%	0,4%
V _o Máx	468,24V	472,70 V

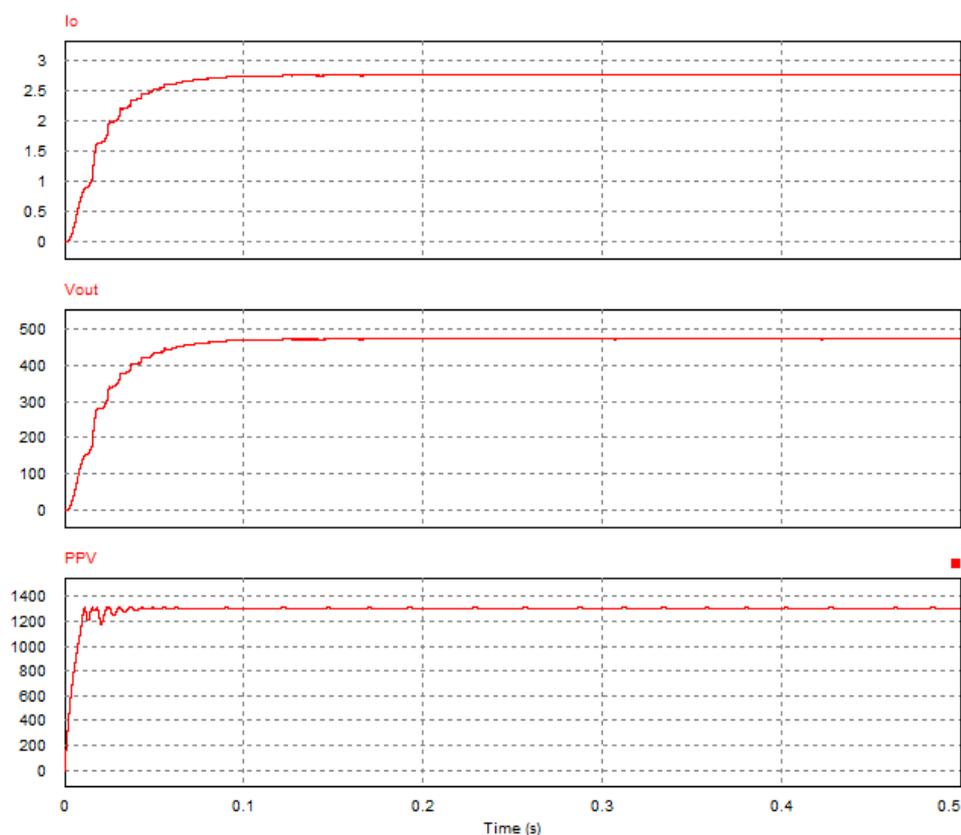


Figura 22: Gráficos mostrando as formas de onda de corrente, tensão e potência dos resultados obtidos nas simulações do teste IV.

Tendo em vista os resultados dos testes I, II, III e IV, fica comprovada a eficácia deste método de dimensionamento dos componentes de um conversor *boost* quando operando conectado a um arranjo fotovoltaico e associado a um dispositivo rastreador de máxima potência. Esse método é, portanto, validado, já que pelos resultados obtidos se aproximarem significativamente dos previstos. Deve-se lembrar que, o que foi testado nessa seção foi a eficácia do método de dimensionamento dos componentes e não o tipo do algoritmo MPPT escolhido.

O modelo escolhido para o projeto foi o do teste IV composto por 4 módulos em um arranjo 2x2.

2.3 CONVERSOR CC/CA

Para que um sistema fotovoltaico seja capaz de injetar potência no sistema de distribuição de energia elétrica da concessionária local, se faz necessário um dispositivo conversor (CC/CA) que faz a transformação da energia elétrica vinda dos módulos de corrente contínua para alternada. Normalmente, a energia que é gerada pelo sistema que não é utilizada na unidade consumidora é injetada na rede.

Os dispositivos eletrônicos que são usados atualmente estão cada vez mais sofisticados. Alguns microinversores já populares no mercado se baseiam no princípio de funcionamento do conversor CC/CA [7].

Para o funcionamento do conversor são necessárias chaves eletrônicas (MOSFETs), pequenos semicondutores que fazem o chaveamento de potência quando acionados por um sinal externo, no caso, um gerador de pulsos PWM senoidal. Um filtro, composto por um indutor e um capacitor, na saída irá tratar a energia para que não entre ruídos de alta frequência na rede que trabalha a 60Hz com variação aceitável mínima de ± 0.1 Hz.

A qualidade da energia da rede da concessionária não deve ser comprometida. A rede elétrica apresenta dois elementos essenciais que devem ser considerados para que seja injetada uma energia de boa qualidade. Esses dois elementos são: **frequência** e **fase**. Em análise geral a corrente que será injetada na rede deverá estar na mesma frequência e na mesma fase que a corrente e tensão da rede. Para que isso seja possível, existe o dispositivo de sincronismo que será apresentado nas seções posteriores.

O retificador escolhido será do tipo monofásico pela sua simplicidade e seu poder didático para estudos iniciais. Quando se fala dos “microinversores” utilizados em sistemas fotovoltaicos,

os conversores CC/CA embutidos, em grande maioria tendem a ser monofásicos. Isso é bem comum, pois com o crescimento do mercado fotovoltaico, mais unidades consumidoras estão aderindo a essa tecnologia, tendo em vista que uma adesão de um dispositivo trifásico fica mais custosa e às vezes desnecessária.

Os dispositivos seccionadores são controlados por um dispositivo PWM, figura 23, que criará um sinal senoidal que irá liberar corrente na medida em que a razão cíclica comandar. Essa razão cíclica será um sinal também senoidal. Essa razão cíclica será obtida pela diferença entre o sinal que é reconstruído pelas informações de frequência e fase obtidas da rede e a corrente injetada no barramento da rede, essa operação é realizada por um controlador Proporcional Integrador (PI). Dessa maneira se a rede oscilar o dispositivo vai reconhecer essa variação de frequência, ou de fase, e vai sincronizar a corrente injetada, modificando a razão cíclica, com essas informações atualizadas, seguindo o fluxograma da figura 24.

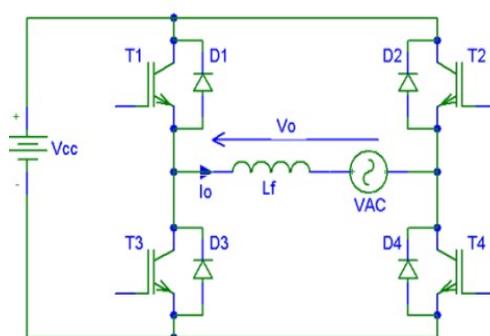


Figura 23: Conversor CC/CA. Fonte: Antenor Pomilio [17].

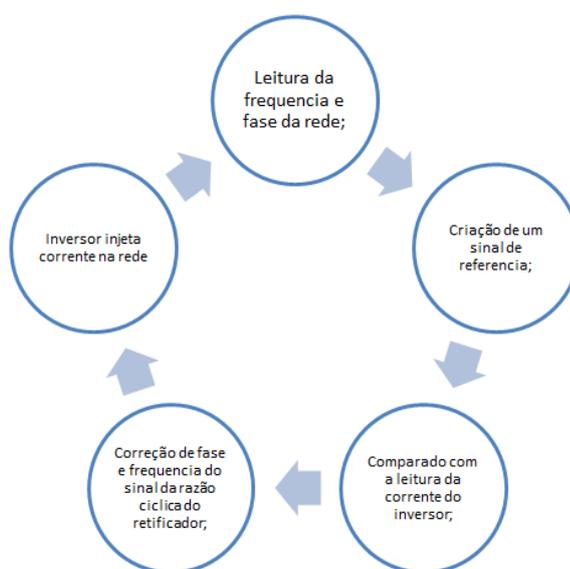


Figura 24: Simplificação da sincronização do dispositivo com a rede da concessionária.

2.3.1 PWM SENOIDAL

Quando o sinal que está sendo comparado com o sinal da fonte triangular é um sinal senoidal, é possível obter outro tipo de sinal PWM, a saída pode fornecer um sinal periódico com valor médio variável semelhante a uma senoide. Para esse tipo de PWM pode ser usada a configuração da figura 25 no simulador:

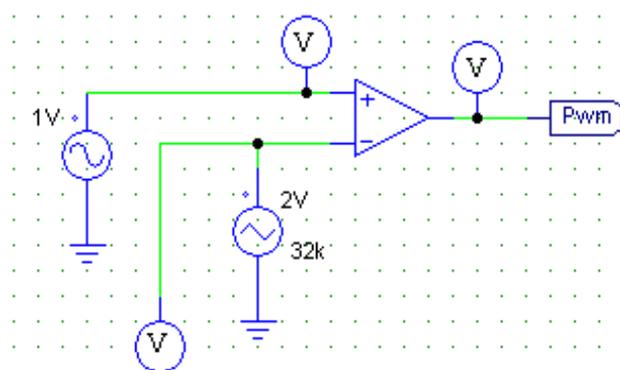


Figura 25: Exemplo de um PWM projetado no *PSIM* com razão cíclica alternando em forma de onda senoidal.

De maneira análoga, se o sinal senoidal for maior que o sinal da onda triangular o PWM terá um sinal de saída positivo (1) e se for menor terá um sinal de saída nulo (0), figura 26.

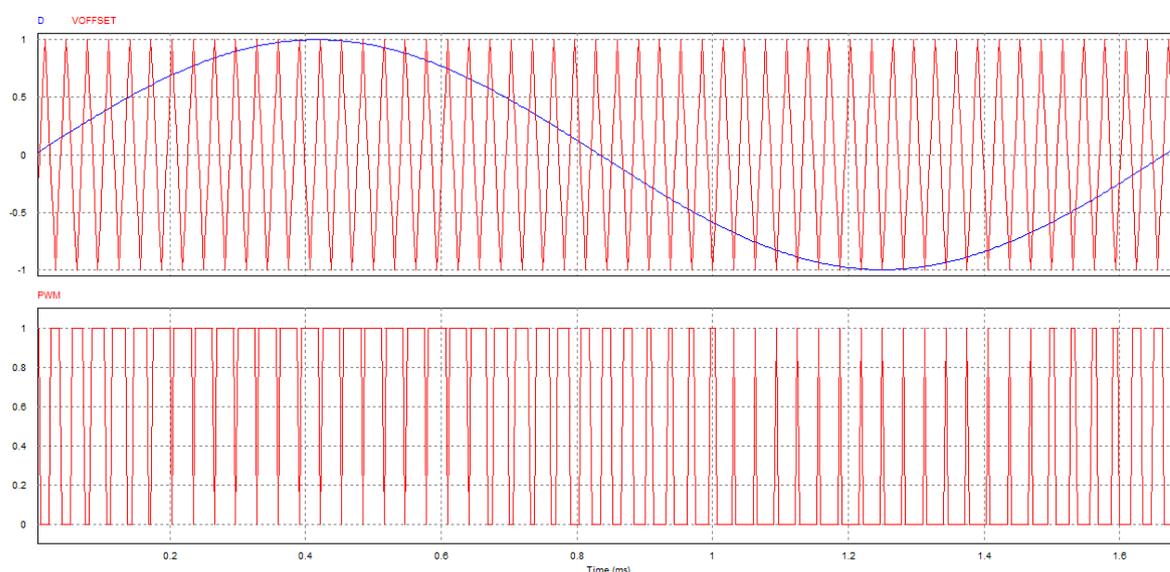


Figura 26: Sinal de onda triangular sendo comparado com o sinal senoidal em azul (cima). Sinal de onda resultante da operação do comparador (baixo).

Então, durante a primeira metade do ciclo da senoide, a saída do PWM vai ter uma razão cíclica média superior à da segunda metade do ciclo.

Para o dispositivo CC/CA deste trabalho, por exemplo, é necessária uma segunda saída associada a uma porta NOT que fará a inversão desse sinal para que o segundo par de MOSFET's atue para liberar potência para a carga no ciclo negativo da onda de corrente.

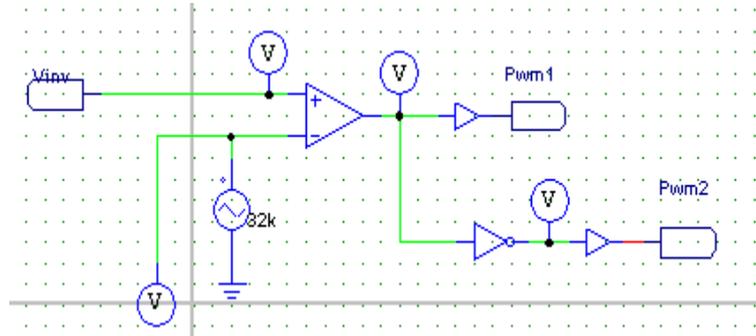


Figura 27: Exemplo de um PWM projetado no *PSIM* com dupla saída; Fonte: Autor.

2.3.2 REDE DA CONCESSIONÁRIA

A rede da concessionária é onde será injetada a potência de saída do sistema proposto. A rede neste trabalho será considerada como um barramento infinito com tensão alternada constante de 220V com frequência de operação de 60Hz. Na realidade a rede não fica 100% do tempo com essa frequência fixa, existe um nível aceitável de variação desse valor (entre 59.9 e 60.1Hz) [18] para que a qualidade de energia seja respeitada. Mas, em suma, pode-se assumir 60Hz como frequência constante para o projeto.

Além da frequência também deve ser considerada a fase da corrente. Não adianta a corrente de saída do sistema fotovoltaico estar na mesma frequência, se a corrente de saída do inversor e a tensão da rede e do conversor estiverem defasadas vão existir componentes reativos de potência ao invés de potência ativa, que é o que a empresa responsável pela distribuição de energia elétrica deseja que entre na sua rede.

Para isso o dispositivo PLL – *Phase Locked Loop* (que, traduzido do inglês, quer dizer Laço de Fase Fechado) foi introduzido no projeto para que a corrente de saída do conversor CC/CA esteja sempre na mesma frequência e fase da rede, fornecendo dessa maneira o máximo de potência ativa para o sistema.

2.3.3 DISPOSITIVO PLL – PHASE LOCKED LOOP

Esse dispositivo tem o propósito de realizar a sincronia da frequência e da fase da corrente que sai do conversor CC/CA com a frequência e a fase da tensão da rede. A ciência desse

dispositivo se destaca por sua razoável complexidade e sua excelente capacidade de atuar nas áreas de telecomunicações, análise de sinais e, nesse caso, análise de rede de distribuição para geração fotovoltaica.

O *Phase Locked Loop* (PLL) é um sistema de controle que, a partir da leitura de um sinal de entrada, gera um sinal de saída em sincronia com a frequência e a fase do sinal observado. O sistema mantém, em regime permanente, a frequência do sinal de saída igual à frequência do sinal observado, o sistema pode, também, rastrear instantaneamente a fase do sinal observado.

Existem, hoje, na literatura, algumas modalidades de PLL, contendo em cada uma delas uma bagagem acadêmica bem específica, elas estão disponíveis para os estudantes verificarem suas propriedades fundamentais, tanto para sistemas monofásicos quanto para sistemas trifásicos. Uma delas, não tão comumente usada, é o PLL baseado em séries de Fourier, para sistemas monofásicos.

Esse dispositivo se utiliza do conceito de séries de Fourier para construir um sinal de mesma frequência e fase da tensão da rede, com a possibilidade de ser implementado em formato de *software* em um micro-controlador, ou por meio de circuitos integrados. Obviamente um dispositivo microcontrolador se torna mais viável por sua portabilidade e praticidade [11].

O algoritmo proposto tem funcionalidade bastante singular em relação aos demais. O processo se divide em obter a leitura da frequência e da fase da rede por meio de um bloco denominado *Phase Detector* (PD). Esse bloco, como mostrado na figura 28, tem duas entradas: V_{C1} e a_1 , que são, respectivamente, a tensão da rede e a componente em fase da rede. O sinal senoidal que representa a tensão da rede possui duas componentes, uma em fase e outra em quadratura, uma maneira trigonométrica de se identificar um sinal em senos e cossenos, ao longo do texto se tornará mais claro o significado desses termos, e sua relação com a série de Fourier [11].

Sua única saída é o ângulo de fase do sinal. Antes de falar mais desse bloco, devem ser introduzidas neste espaço algumas considerações a respeito de séries de Fourier e como o sinal de entrada deve passar pelos demais blocos para se obter os valores da componente em fase (a_n) e da componente em quadratura (b_n);

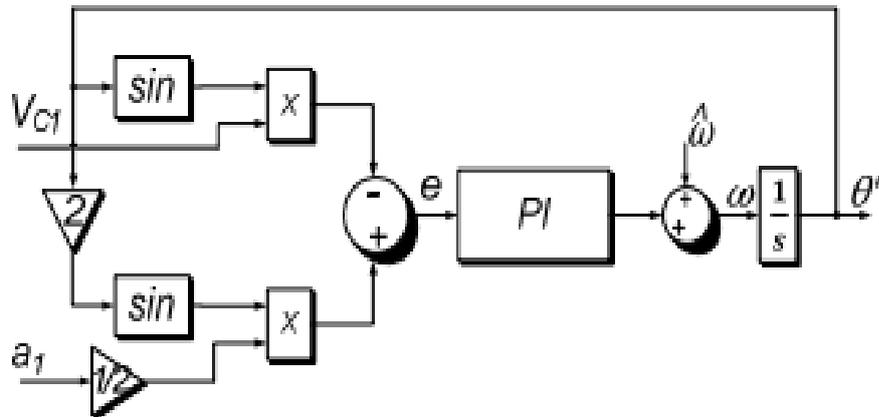


Figura 28: Diagrama de blocos *Phase Detector* [10];

Série de Fourier e o bloco DFA – *Dynamic Fourier Analysis*

As séries de Fourier são uma ferramenta que permite representar um sinal periódico como uma soma infinita de componentes senoidais (senos e cossenos). Ela define que qualquer função complexa pode ser representada em uma combinação infinita de senoides.

Em outras palavras, qualquer sinal periódico pode ser representado em sua essência por uma série de Fourier [11]:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)] \quad (2.24)$$

Onde,

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_{T_0} x(t) dt \quad (2.25)$$

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_{T_0} x(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (2.26)$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_{T_0} x(t) \sin(n\omega_0 t) dt \quad (2.27)$$

Com essas informações admite-se um sinal v_s :

$$v_s(t) = \sum_{n=1}^{\infty} [V_n \cos(n\omega_0 t + \phi_n)] \quad (2.28)$$

Esse modelo matemático representa o sinal que vai servir de entrada para o bloco DFA (a leitura da tensão da rede da concessionária). Observa-se que ele nada mais é do que uma soma de vários sinais com amplitudes, frequências e fases diferentes. Para um sinal puramente senoidal, por exemplo, o valor de n não precisa ser maior que 1.

Por exemplo, considerando apenas a harmônica fundamental de 60Hz $\omega_0 = 377 \text{ rad/sec}$, que nesse caso é representada pelo valor ' $n = 1$ ', e defasagem nula $\phi = 0$, e amplitude de $220\sqrt{2}$:

$$V_s = (220\sqrt{2})\cos(377t) \quad (2.29)$$

Utilizando métodos gráficos pode se identificar que, com a contribuição de apenas 1 das harmônicas o sinal senoidal da rede pode ser replicado pela expressão (2.29), sendo obtido o seguinte resultado:

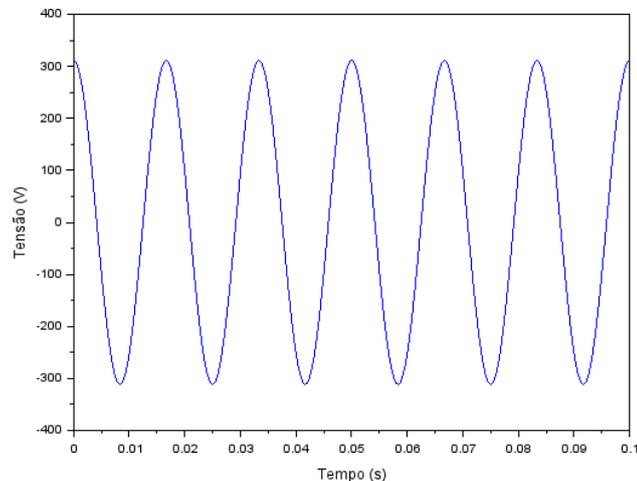


Figura 29: Sinal construído a partir da amplitude do sinal e da frequência aplicados na equação 2.28.

Dessa forma, a tensão da rede que pode ser representada pela equação (2.29) e tem o formato de onda do gráfico da figura 29, servirá de sinal de entrada para o bloco DFA.

O algoritmo determina que sejam criados dois sinais, que são originados pelo produto do sinal de entrada por funções senoidais uma em quadratura da outra, nesse caso serão usadas duas funções básicas, seno e cosseno:

$$v_{ic}(t) = \cos(H\omega_0 t) [\sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega_0 t + \phi_n)] \quad (2.30)$$

$$v_{is}(t) = \sin(H\omega_0 t) [\sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega_0 t + \phi_n)] \quad (2.31)$$

Desmembrando os sinais v_{ic} e v_{is} :

$$v_{ic}(t) = \cos(H\omega_0 t) [V_H \cos(H\omega_0 t + \phi_H)] + \dots$$

$$\cos(H\omega_0 t) [\sum_{n=1,2,\dots,H-1,H+1,\dots,N}^{\infty} V_n \cos(n\omega_0 t + \phi_n)] \quad (2.32)$$

$$v_{is}(t) = \sin(H\omega_0 t) [V_H \cos(H\omega_0 t + \phi_H)] + \dots$$

$$\sin(H\omega_0 t) [\sum_{n=1,2,\dots,H-1,H+1,\dots,N}^{\infty} V_n \cos(n\omega_0 t + \phi_n)] \quad (2.33)$$

Onde H representa qual harmônica do sinal está sendo analisada. Do sinal da tensão da rede, que pode ser escrito por uma somatória de sinais senoidais é retirada essa parcela de interesse.

Para isolar os termos da harmônica de interesse deste sinal deve ser aplicado um Filtro Passa-Baixas que irá atenuar as demais frequências que não são necessárias para a obtenção das componentes em fase e em quadratura do sinal de entrada da harmônica a_H e b_H . Após a passagem do sinal pelo filtro (figura 30) as equações (2.33) e (2.34) se tornam:

$$v_{ic}(t)' = \cos(H\omega_0 t) [V_H \cos(H\omega_0 t + \phi_H)] \quad (2.34)$$

$$v_{is}(t)' = \sin(H\omega_0 t) [V_H \cos(H\omega_0 t + \phi_H)] \quad (2.35)$$

Por definição das Séries de Fourier e aplicando propriedades trigonométricas, admite-se:

$$V_H \cos(H\omega_0 t + \phi_H) = a_H \cos(H\omega_0 t) + b_H \sin(H\omega_0 t) \quad (2.36)$$

É perceptível como as componentes a_H e b_H , do sinal da equação (2.37), influenciam significativamente na forma de onda do sinal. Dessa forma pode se ter um modelo matemático do sinal, sendo possível, portanto, reconstruí-lo a partir dos valores desses componentes.

O sinal das equações (2.35) e (2.36), considerando a equação (2.37):

$$v_{ic}(t)' = \cos(H\omega_0 t)[a_H \cos(H\omega_0 t) + b_H \sin(H\omega_0 t)] \quad (2.37)$$

$$v_{is}(t)' = \sin(H\omega_0 t)[a_H \cos(H\omega_0 t) + b_H \sin(H\omega_0 t)] \quad (2.38)$$

Logo:

$$v_{ic}(t)' = a_H \cos^2(H\omega_0 t) + b_H \cos(H\omega_0 t) \sin(H\omega_0 t) \quad (2.49)$$

$$v_{is}(t)' = a_H \sin(H\omega_0 t) \cos(H\omega_0 t) + b_H \sin^2(H\omega_0 t) \quad (2.40)$$

Aplicando identidades trigonométricas:

$$v_{ic}(t)' = \frac{a_H}{2} [1 + \cos(2H\omega_0 t)] + \frac{b_H}{2} [\sin(2H\omega_0 t)] \quad (2.41)$$

$$v_{is}(t)' = \frac{a_H}{2} [\sin(2H\omega_0 t)] + \frac{b_H}{2} [1 - \cos(2H\omega_0 t)] \quad (2.42)$$

Lembrando que o objetivo do bloco DFA é conseguir os valores dos termos a_H e b_H . Tendo isso em vista, para isolar os valores de interesse do restante da expressão, deve-se realizar uma operação que retire o que não é desejado. O diagrama de blocos da figura 30 mostra claramente como o autor utilizou-se de um recurso de realimentação para retirar os valores dos sinais de forma que ao final restasse apenas os valores das componentes em foco.

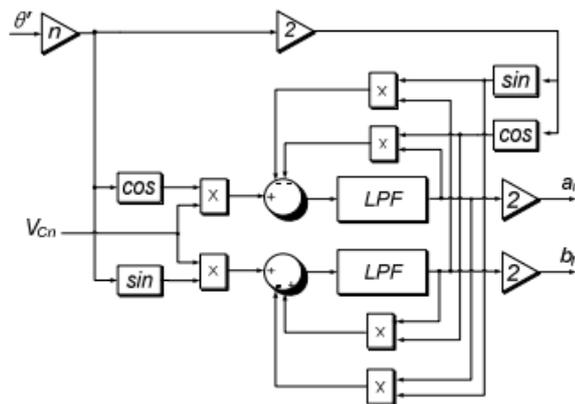


Figura 30: Diagrama de blocos do *Dynamic Fourier Analysis*; [10];

O sinal de saída do bloco DFA (a_H) é usado no bloco *Phase Detector* que retornará o valor do ângulo de fase instantâneo da rede no momento da leitura com atrasos que dependerão da maneira que for adotado o sistema do protótipo original. Se for aplicado em um microcontrolador, seu atraso poderá ser menor. Esse ângulo (θ) inicialmente assume um valor nulo que mudará a cada instância e assumirá os valores reais de acordo com os valores obtidos

pelo bloco DFA, já que ele vem do bloco *Phase Detector* que por sua vez depende do valor de a_1 que é a componente em fase da primeira harmônica [11].

Bloco OSR – *Original Signal Reconstruction*

Esse bloco é mais simples e fica claro sua relação com a série de Fourier quando temos que um sinal, ou uma das harmônicas dele, pode ser reconstruído com as suas componentes em fase e em quadratura e o seu ângulo de fase.

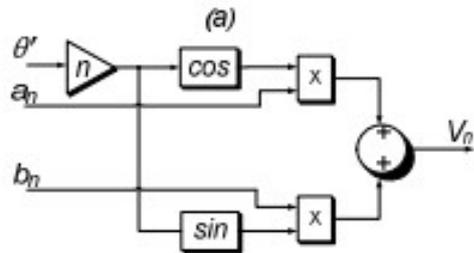


Figura 31: Diagrama de blocos do *Original Signal Reconstruction* [10];

Um sinal $V(t)$ pode ser reescrito:

$$V(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)] \quad (2.43)$$

Se sua componente DC é zero, então a_0 é igual a zero, e se a_n e b_n são as componentes das harmônicas de interesse encontradas no bloco DFA, a harmônica de interesse sendo a primeira, $n = H = 1$; então tem-se:

$$V(t)_{1^{\circ}H} = a_1 \cos(\omega_0 t) + b_1 \sin(\omega_0 t) \quad (2.44)$$

Onde $(\omega_0 t)$ é o ângulo de fase encontrado no bloco de detecção de fase (PD).

Portanto, o sinal é decomposto no bloco DFA e reconstruído nesse processo dando origem a um sinal que dependendo da quantidade de harmônicas que estão sendo estudadas irá subtrair esses sinais das demais harmônicas. Por exemplo no caso da primeira harmônica (2.44), se ela for retirada do sinal completo o que restam são todas as outras harmônicas, e se o foco for a terceira harmônica fica mais fácil de estudar ela se não tiver a primeira nem a quinta no sinal.

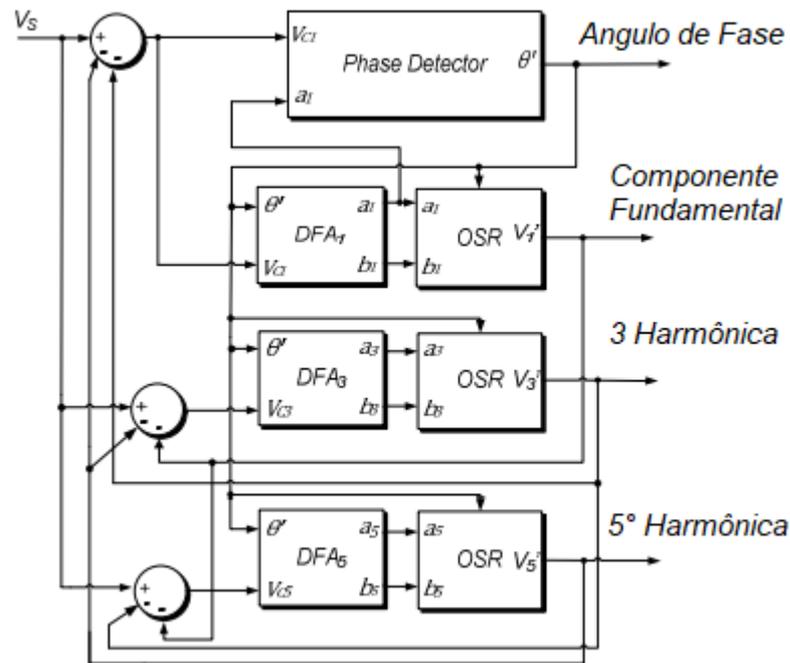


Figura 32: Diagrama de blocos do PL [10];

Como mostrado na figura 32 pode se observar que o sinal de entrada V_s é subtraído das saídas dos blocos OSR da terceira e da quinta harmônica, com isso obtém-se a resultante dessa operação que é a onda que representa a harmônica fundamental do sinal isolada. Sempre os blocos de reconstrução são alimentados com a fase que retorna do *Phase Detector*. Essas saídas V_1' , V_2' e V_3' podem servir para estudo dos sinais e verificar as suas componentes em cada nível de harmônicos. A soma das saídas dos blocos OSR's resulta na réplica do sinal observado.

2.4 INTRODUÇÃO AO PROJETO

O maior desafio para que este projeto fosse bem-sucedido é o dimensionamento dos componentes físicos do dispositivo. Até então na literatura comumente estudada nas universidades encontram-se boas referências para dimensionamentos para conversores CC/CC. No entanto, para o dispositivo em foco deve-se atentar a alguns detalhes específicos em relação ao projeto.

Um desses detalhes é que devido às características dos níveis de tensão e corrente dos módulos deve ser acoplado aos terminais do módulo um capacitor para que haja uma distribuição uniforme dessa tensão no tempo, já que o arranjo fotovoltaico é enxergado pelo circuito como uma fonte de corrente. Esse capacitor geralmente pode ser incorporado ao projeto nas saídas de cada módulo individualmente.

Esse capacitor deve possuir um valor de capacitância bem baixo para que o seu funcionamento seja satisfatório. Será adotado o valor de 30nF para esse tipo de projeto, realizado no PSIM. Deve-se atentar que o PSIM só aceita a simulação do painel fotovoltaico se for com esse capacitor acoplado.

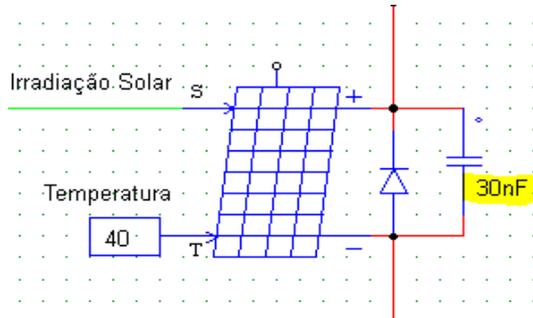


Figura 33: Módulo acoplado ao diodo e ao capacitor de 30nF; Fonte: Autor.

Outra coisa a ser levada em consideração são os demais dispositivos que compõem o conversor *boost*, que são: Indutor, Capacitor de saída e Resistência. Deve se levar em conta também que para esse tipo de projeto específico, onde há um conversor *boost* conectado a um painel/módulo solar deverá, necessariamente, possuir um capacitor de entrada adicional além dos capacitores acoplados em cada módulo individualmente para que a tensão de entrada do conversor seja conservada em um nível apropriado para seu funcionamento.

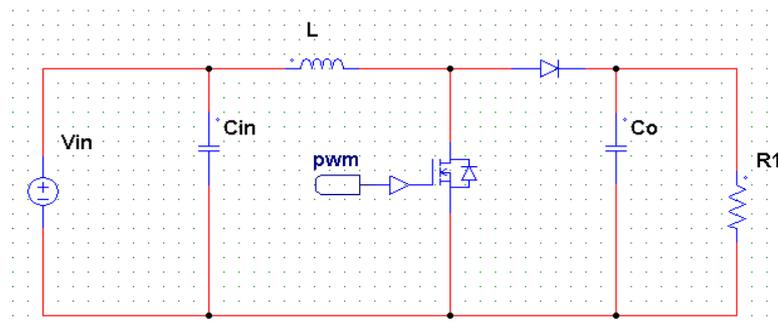


Figura 34: Topologia do conversor CC/CC adotado neste projeto;

No formato da figura 34, o dispositivo deverá funcionar adequadamente. Para dar continuidade ao projeto.

2.5 CONECTANDO O CONVERSOR CC/CC AO CONVERSOR CC/CA

A continuidade do projeto sucede com a conexão entre a saída do conversor *Boost* com a entrada do conversor CC/CA que possui uma ponte de semicondutores que irão controlar a entrada de potência para carga/rede. O esquema básico obtido com auxílio do programa de

simulação, PSIM, pode ser exibido, na íntegra, na figura A1 no Apêndice. O circuito pode ser subdividido em 3 partes principais:

1. Conversor *Boost*;
2. Conversor CC/CA;
3. Controladores (MPPT, PLL);

Para a compreensão dessa fase selecionamos essa parcela específica do circuito mostrado na figura A1 do Apêndice:

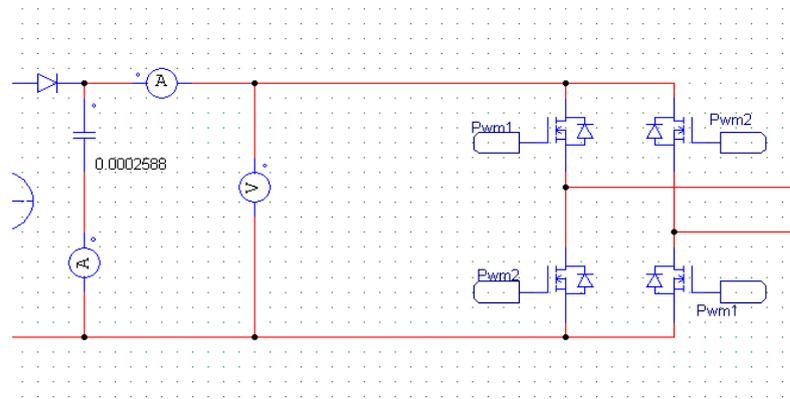


Figura 35: Conexão específica entre a saída do conversor Boost e a entrada do conversor CC/CA;

Nessa conexão (figura 35) pode se observar claramente que a saída do conversor *boost* não possui o resistor que foi encontrado pelo cálculo de dimensionamento no capítulo 2, a razão disso é a sua não necessidade já que com um acréscimo de um resistor a potência dissipada no mesmo se tornaria um desperdício; pode se considerar que a entrada do conversor CC/CA encara o conversor *boost* como sendo uma fonte CC. Foi adicionado ao projeto um filtro LC que foi dimensionado para filtrar as altas frequências devido ao chaveamento de 100kHz do PWM do conversor CC/CA. O dimensionamento deste filtro foi feito por um algoritmo baseado em filtros passivos. Não é o foco deste trabalho, no entanto o algoritmo ficará disponível no Anexo, figura A5.

Como neste projeto um dos objetivos é a sincronia da fase da corrente de saída do conversor CC/CA com a fase da tensão da rede elétrica, deve se priorizar, portanto, as componentes em fase da tensão da rede. Sabe-se que o sinal da rede pode ser representado pela equação (2.44). Para um sinal puramente em fase com a rede elimina-se o segundo termo priorizando o termo acompanhado do cosseno, sendo a_1 a amplitude do sinal que nesse caso dependerá do nível de irradiação e da tensão no barramento CC, sendo ajustada por um controle

3. RESULTADOS E SIMULAÇÕES.

Alguns testes foram realizados no projeto do dispositivo no simulador. Os testes foram realizados visando simular as condições mais próximas da realidade possível. Por exemplo, a irradiação solar em forma de arco no período de 10 segundos simbolizando a duração do dia no período de 8 às 16 horas. Como mostrado na figura, durante o período de 10 segundos, completa-se um ciclo. A figura 37 mostra como ficará a irradiação solar que o arranjo fotovoltaico do projeto irá receber. A temperatura foi fixada em 45°C para todos os testes.

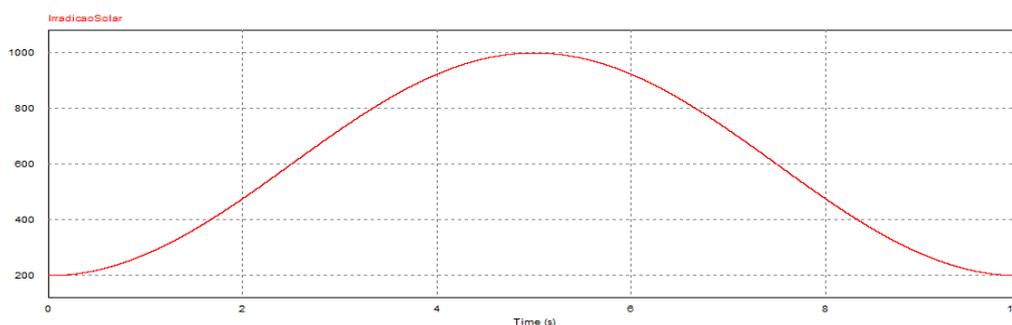


Figura 37: Irradiação Solar simulada no PSIM. Fonte: Autor.

Com base nessa distribuição de irradiação foi realizado o primeiro teste que terá o tempo total de 10 segundos de duração simulando um período de um ciclo. O sistema tem algumas variáveis a serem consideradas para que a análise seja bem-sucedida, uma delas é a frequência da corrente de saída do conversor CC/CA a outra é a fase da corrente injetada pelo conversor CC/CA que deve estar sempre em sincronia com a fase da tensão da rede.

O resultado da simulação pode ser visto a seguir em um período de irradiação máxima:

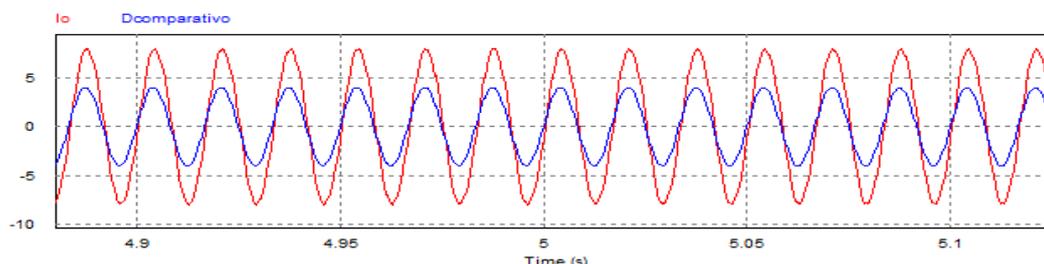


Figura 38: Forma de onda da corrente de saída do conversor CC/CA no período (vermelho), forma de onda da tensão da rede da concessionária (azul). Fonte: Autor.

É possível observar que a corrente que é injetada no barramento da rede da concessionária está em sincronia com a forma de onda da tensão dela. Isso significa que o dispositivo PLL está rastreando adequadamente a fase da tensão da rede. O que estabelece qualidade e segurança para o uso dos equipamentos eletrodomésticos mais comuns. Nesse nível de irradiação (1000 W/m^2)

a sincronia da rede estabelece um fator de potência de 0.99 o que é um valor alto e desejado para preservar a qualidade da energia.

Pode se observar que no regime transitório (figura 39) a corrente apresenta uma anormalidade no seu comportamento em comparação ao que se espera, isso se dá por conta da irradiação solar que ainda não é suficiente para gerar uma potência capaz de injetar a corrente na rede. Esse intervalo de tempo é de 8ms. Após esse período, a energia começa a estabilizar e começa a entrar em sincronia. Nesse estágio o fator de potência entre a corrente e a tensão na saída do dispositivo ainda é muito baixo.

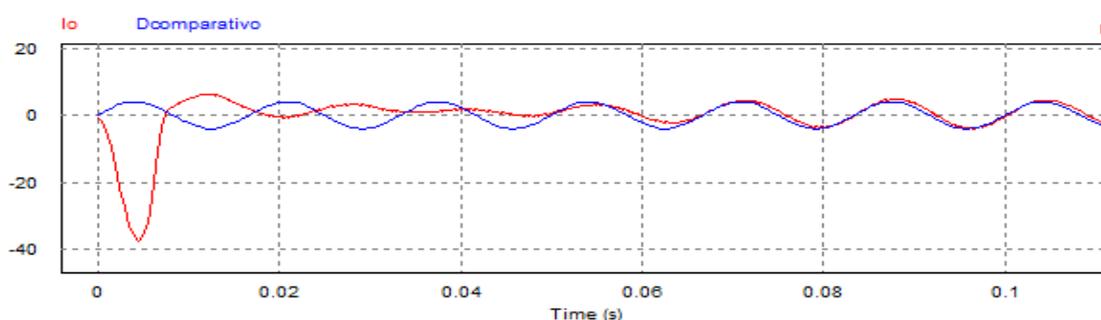


Figura 39: Forma de onda da corrente de saída do conversor CC/CA em regime transitório, (vermelho), em comparação com a forma de onda da tensão da rede, 60Hz(azul). Fonte: Autor;

Outro momento a se destacar é quando a irradiação decresce para valores inferiores a 700 W/m^2 (figura 40), é possível observar que a corrente apresenta um valor de pico menor do que quando a irradiação é máxima, aproximadamente 5 A, ainda em sincronia, retornando um fator de potência de 0.98.

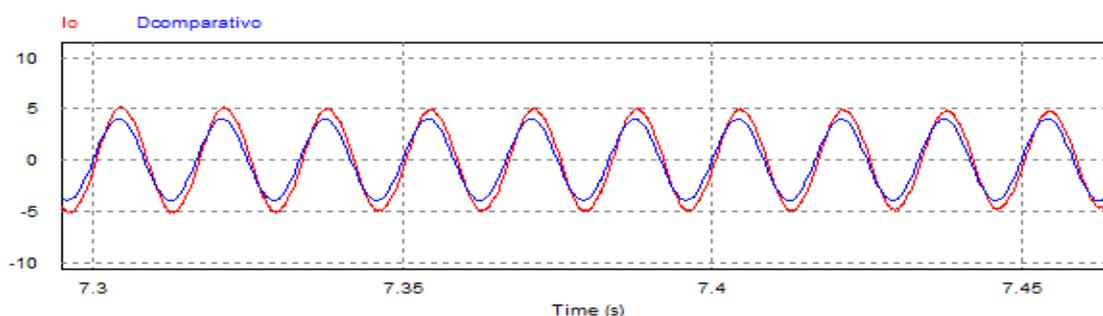


Figura 40: Forma de onda da corrente de saída do conversor CC/CA, (vermelho), em comparação com a forma de onda da tensão da rede (azul). Fonte: Autor;

No domínio da frequência os resultados foram satisfatórios, observa-se na figura 41 que tanto a corrente que sai do conversor CC/CA quanto a tensão da rede estão com frequência estabelecidas em 60Hz.

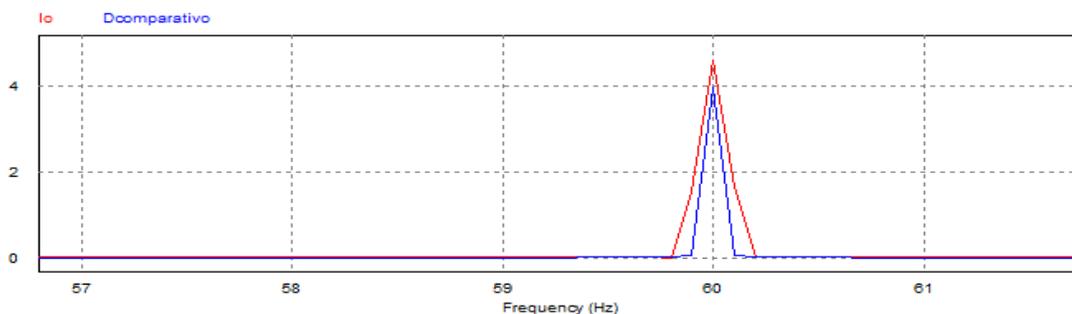


Figura 41: Espectro de frequência da corrente de saída do conversor CC/CA, (vermelho), em comparação com tensão da rede, 60Hz(azul). Fonte: Autor;

Por outro lado, deve-se atentar aos níveis de potência que saem do arranjo fotovoltaico. Para isso foram observadas duas medidas importantes: a irradiação e a potência de saída dos módulos, o resultado pode ser visto na figura 42:

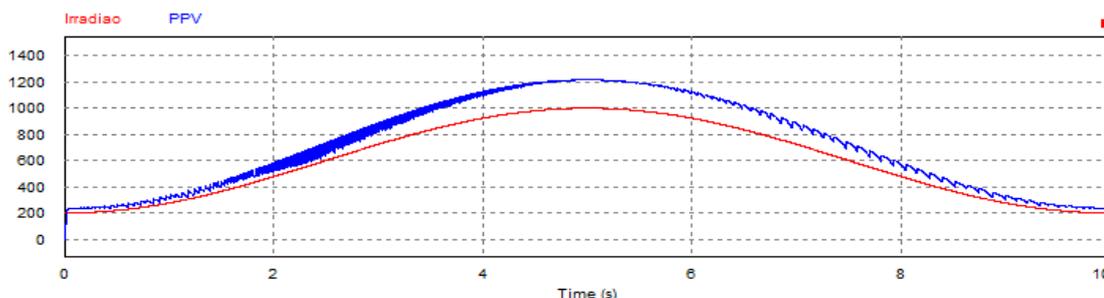


Figura 42: Gráfico que faz a comparação entre a irradiação incidente nos módulos e a potência que é gerada pelo arranjo. Fonte: Autor;

Pode se concluir, pelo gráfico da figura 42, que o algoritmo MPPT está realizando a sua função já que a potência segue o formato da irradiação até chegar na potência máxima do arranjo, próximo aos 1200W.

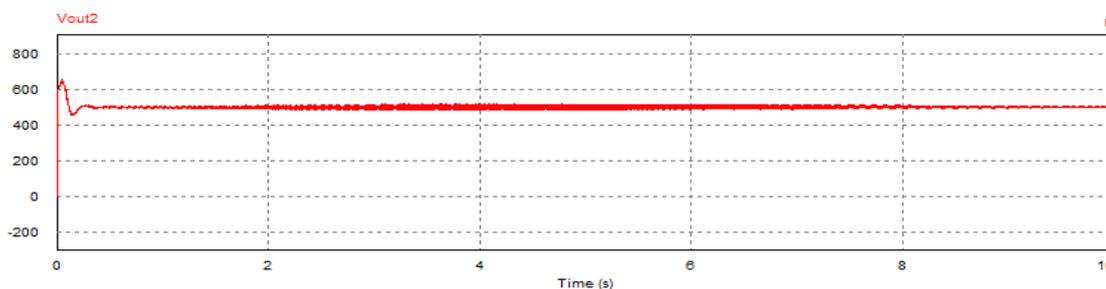


Figura 43: Gráfico que mostra o nível de tensão no barramento CC na saída do conversor boost. Fonte: Autor;

Mais um detalhe que deve ser examinado é o nível de tensão no barramento CC do dispositivo, na saída do conversor *boost*. Essa tensão deve permanecer em níveis controlados

para preservar a integridade dos componentes e segurança da rede. Observa-se, na figura 43, que a tensão permanece estável em uma média de 500V após o regime transitório que dura 30ms.

Um segundo teste foi realizado considerando uma irradiação semelhante, porém foi acrescentado uma simulação de sombreamento parcial nas 4 placas, mostrado na figura 44.

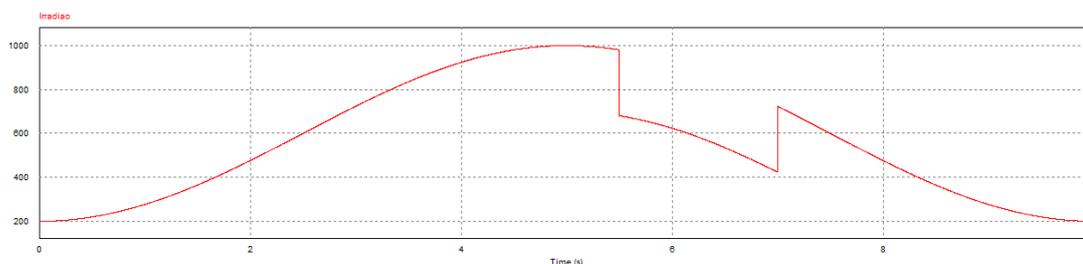


Figura 44: Simulação de uma irradiação padrão com um sombreamento em um determinado período. Fonte: Autor;

Esse “sombreamento” foi inserido para verificar a eficácia do sistema em manter os níveis de potência máxima quando variações bruscas de irradiação ocorrem, por exemplo um período de chuvas ou quando uma grande quantidade de nuvens impede a passagem da luz solar.

O sistema apresentou resultados satisfatórios, mantendo o nível de potência em valores máximos, além disso manteve a qualidade da sincronia da corrente injetada com a fase da tensão da rede elétrica em maior parte do tempo. Os resultados podem ser observados nas figuras 45 e 46.

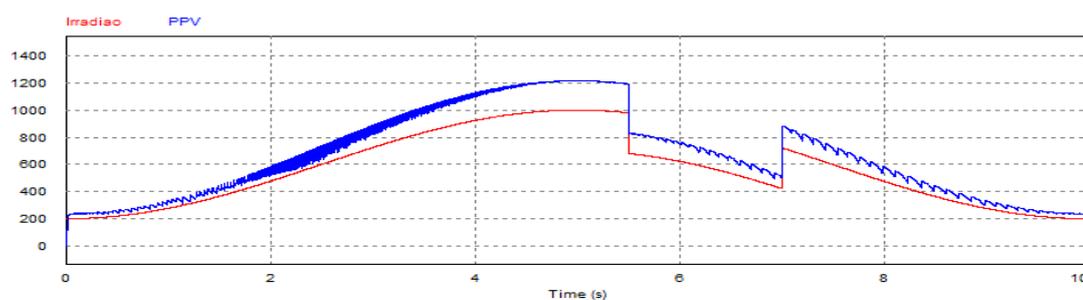


Figura 45: Gráfico que faz a comparação entre a irradiação incidente nos módulos (em vermelho) e a potência que é gerada pelo arranjo no teste com sombreamento (em azul). Fonte: Autor;

O Fator de potência nessas condições apresentou-se em valores semelhantes aos do teste sem a simulação do sombreamento, valores entre 0,97 e 0,98, o que indica um excelente rastreamento de fase.

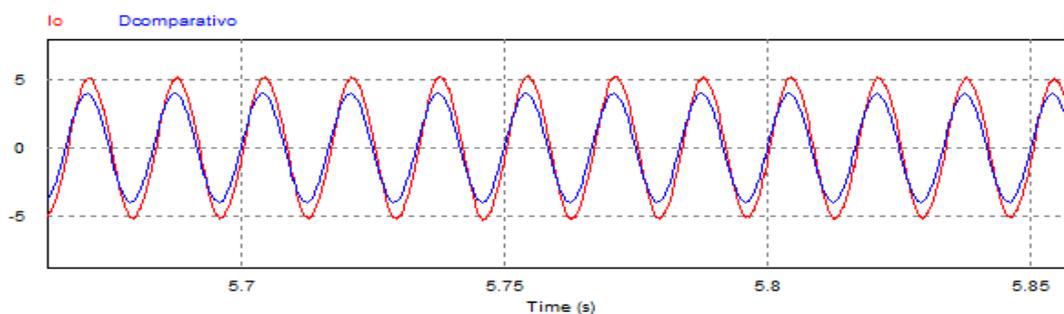


Figura 46: Forma de onda da corrente de saída do conversor CC/CA, (vermelho), em comparação com a forma de onda da tensão da rede (azul). Fonte: Autor;

O controle de tensão na saída do conversor CC é mostrado na figura 47. É possível observar ondulações nos momentos de queda de irradiação e depois que a irradiação retorna ao normal.

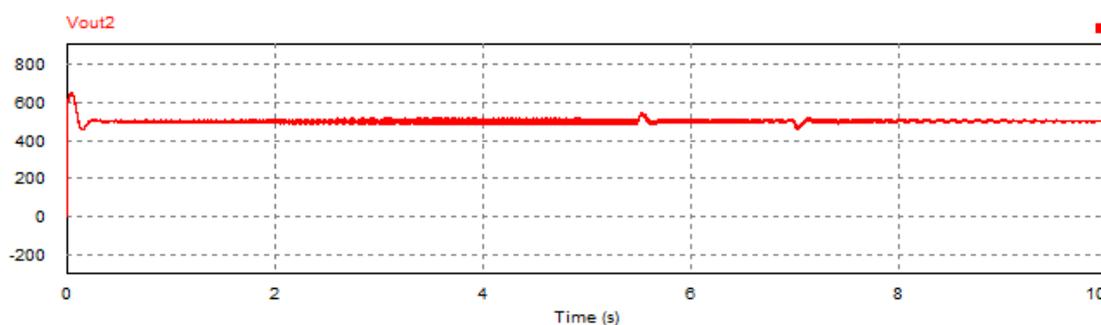


Figura 47: Gráfico que mostra o nível de tensão no barramento CC na saída do conversor *boost* no teste com sombreamento; Fonte: Autor.

Mais testes podem ser realizados lembrando que dentro da simulação é possível realizar uma gama de leituras das variáveis observáveis, podendo assim ser incrementado algum elemento para melhorar o fator de potência, que representa a proporção de sincronia dos sinais observados, que já está bem elevado, como por exemplo o dimensionamento dos controladores.

4. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O projeto apresentado neste documento tem o objetivo de trazer uma visão mais técnica, prática e analítica do dimensionamento e características básicas do dispositivo que faz a transformação da energia captada pelos módulos fotovoltaicos, em corrente contínua, em corrente que possa ser injetada na rede de maneira que seja realizado o aproveitamento máximo.

Fica evidente que ainda há uma boa área a ser explorada no sentido da construção de um protótipo que viabilize uma fabricação em massa. Alguns pontos específicos merecem destaque nessa área, um deles é que o dispositivo foi projetado com componentes ideais, não considerando o fator de tempo de disparo dos semicondutores e como a queda de tensão afeta os resultados. Para isso deve ser realizado um estudo mais detalhado para que sejam dimensionados os semicondutores corretos para aplicação real desse dispositivo, visando a máxima eficiência e redução máxima dos custos da fabricação.

Outro ponto importante é que existem outros métodos para rastreamento de máxima potência. O que foi apresentado neste trabalho é um modelo de algoritmo que pode ser melhorado. O Perturbe e Observe foi escolhido por sua simplicidade e eficiência, podendo, claro, ser substituído por outro, de acordo com o grau de aplicação.

É notável também que existe uma variação de tensão no barramento CC do conversor CC/CA. Essa variação, que chega aos valores de $\pm 15V$, é considerada alta para dispositivos que devem manter seu nível de tensão bem estabilizado. Para isso um dimensionamento mais adequado dos controladores PI deve ser realizado.

Um olhar mais calmo e detalhado é necessário no estudo do dispositivo PLL apresentado nos capítulos anteriores, esse método foi desenvolvido por alguns alunos brasileiros que trouxeram uma nova maneira de enxergar a dinâmica da sincronia, e é plenamente possível ser construído um protótipo com esse dispositivo transformando esse modelo físico em um algoritmo capaz de realizar as mesmas funções de maneira mais rápida e eficiente.

Além disso, os métodos aqui apresentados promovem uma indagação importante a respeito do conhecimento que há hoje em dia disponível, abrindo portas para um exame aprofundado no que tange a conhecimentos novos que são criados/descobertos a todo momento, e ao mesmo tempo, sendo divulgados na internet. Sempre, evidentemente, sendo examinados e testados para que haja a comprovação científica de sua eficácia.

Atualmente é visto um claro aumento na demanda desse tipo de dispositivo. E sempre é bom revermos nossa bagagem de estudo quando temos um grande número desses dispositivos no mercado. Ao se preocupar com o meio ambiente o leitor deste trabalho deve visar sempre que deve se conhecer o aparelho eletrônico para poder realizar uma manutenção e economizar recursos ao recuperar um inversor danificado, ao invés de desembolsar dinheiro e comprar outro, desnecessariamente.

Um fator chave para o projetista que visa seguir adiante com um projeto desse nível: ele deve entender que há uma margem de escalabilidade desse protótipo, pois os custos de fabricação são significativamente baixos em comparação com os possíveis preços de venda. Dessa maneira um pequeno nível de esforço para uma lucratividade alta.

O protótipo deve ser estudado, analisado e redimensionado com vista nos parâmetros exigidos pelas autoridades competentes para que haja o sucesso do empreendimento.

REFERÊNCIAS

- [1] PORTAL SOLAR. **História e Origem da Energia Solar**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/historia-e-origem-da-energia-solar>>, acessado em 02 de Abril de 2022, às 10:49hrs.
- [2] JUNIOR, R. MORAES e BAGNARA, MÔNICA. **Os princípios químicos e físicos envolvidos no funcionamento das células fotovoltaicas**. Salão do Conhecimento UNIJUÍ, 2016;
- [3] AMBIENTES BRASIL. **Histórico das Células Fotovoltaicas e a Evolução da Utilização de Energia Solar**. Disponível em: <https://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/energia_solar/historico_das_celulas_fotovoltaicas_e_a_evolucao_da_utilizacao_de_energia_solar.html>, acessado em 10 de Junho de 2022 as 20:03hrs.
- [4] OPERADOR NACIONAL DO SIN - ONS, **Carga e Geração**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/carga-e-geracao>, acessado dia 10 de maio de 2022, as 05:45hrs.
- [5] BP Energy Outlook, 2022 Edition.
- [6] ASHAM MEHMOOD, **Como dimensionar um conversor boost para sistemas fotovoltaicos?** Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Ku50FzwomvA&t=131s>>, acessado dia 04 de agosto de 2021, às 15:00hrs.
- [7] DANIEL, W. HART, **Eletrônica de Potência**, Análise e Projeto de Circuitos, 2012.
- [8] RASHID MUHAMMAD H., **Eletrônica de Potência - Circuitos Dispositivos e Aplicações**; 4º Edição 2014;
- [9] WAGNER, T. GRUNDEMANN. **Mppt perturba e observa aplicado ao conversor boost**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA.
- [10] PANGRATZ, AUGUSTO GUILHERME. **Conversor boost para módulo fotovoltaico: aplicação com MPPT e monitoramento remoto de desempenho pela WEB**. 2018, Joinville. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.
- [11] CLAUDIO H. G. SANTOS, REGINALDO V. FERREIRA, SIDELMO MAGALHÃES SILVA, BRAZ J. CARDOSO FILHO. **Fourier-Based PLL applied for selective Harmonic Estimation in Electric Power Systems**, Journal of Power Electronic, Vol. 13, No 5, September 2013;
- [12] Canadian, **Datasheet: CS6U - 320P**; CANADIAN SOLAR INC. Novembro, 2016;

- [13] ZANLORENZI, G.; SZEJKA, A. L.; SOUZA, T. M. **Proposta conceitual de um módulo fotovoltaico híbrido com resfriamento por serpentina de água**. INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, UNESP, Guaratinguetá, São Paulo, 2017;
- [14] SALATIEL DE CASTRO LOBATO, **Análise comparativa entre as principais técnicas de MPPT com foco experimental**. 2015, Juiz de Fora, MG; Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista;
- [15] CAIO MORAES. **As 7 principais técnicas de MPPT**. Eletrônica de Potência. Disponível em: <https://eletronicadepotencia.com/as-7-principais-tecnicas-de-mppt/>. Acesso em: 30 de abril de 2022;
- [16] ASHAM MEHMOOD, **Registro Institucional na IEEE Xplore**. Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/author/37088867519>. Acesso em: 20 de Maio de 2022;
- [17] JOSÉ A. POMÍLIO. **Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**, 2021, UNICAMP, Departamento de Sistemas de Energia;
- [18] LIL R. A. FERREIRA; EDUARDO A. DOS SANTOS; RODRIGO B. OTTO, **Avaliação de Impactos na Qualidade de Energia Elétrica: Inserção de uma Unidade de Geração Distribuída Fotovoltaica**; Laboratório de Automação e Simulação de Sistemas Elétricos, Fundação Parque Tecnológico Itaipu.
- [19] ANDRÉ LAJE ALMEIDA DIAS, **Modelagem, Projeto e Implementação de um Inversor Monofásico para Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica**; Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto; 2019.

APÊNDICE – ESQUEMA DO CIRCUITO COMPLETO E ALGORITMOS

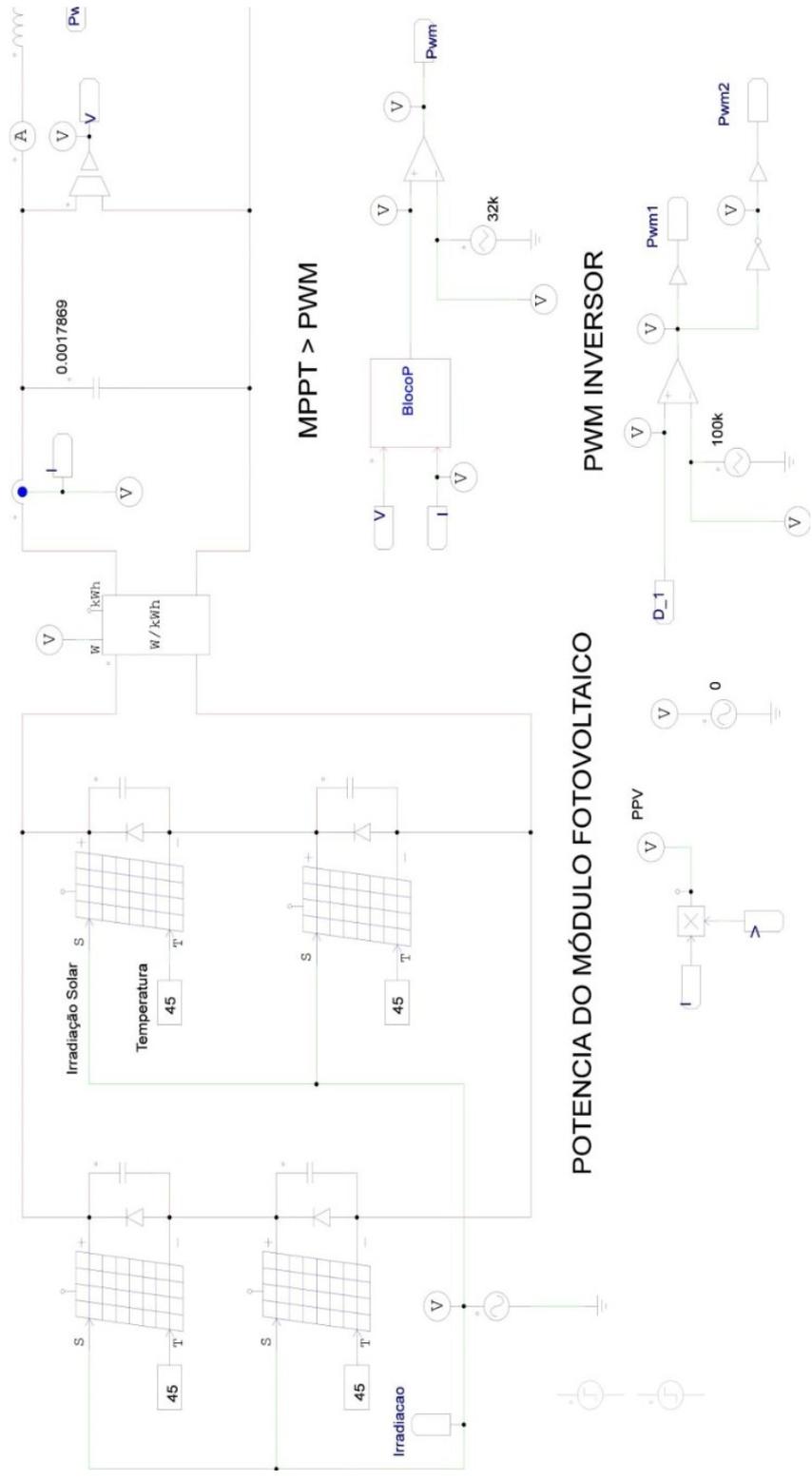


Figura A1-a: Circuito completo 1/2; Fonte: Autor.

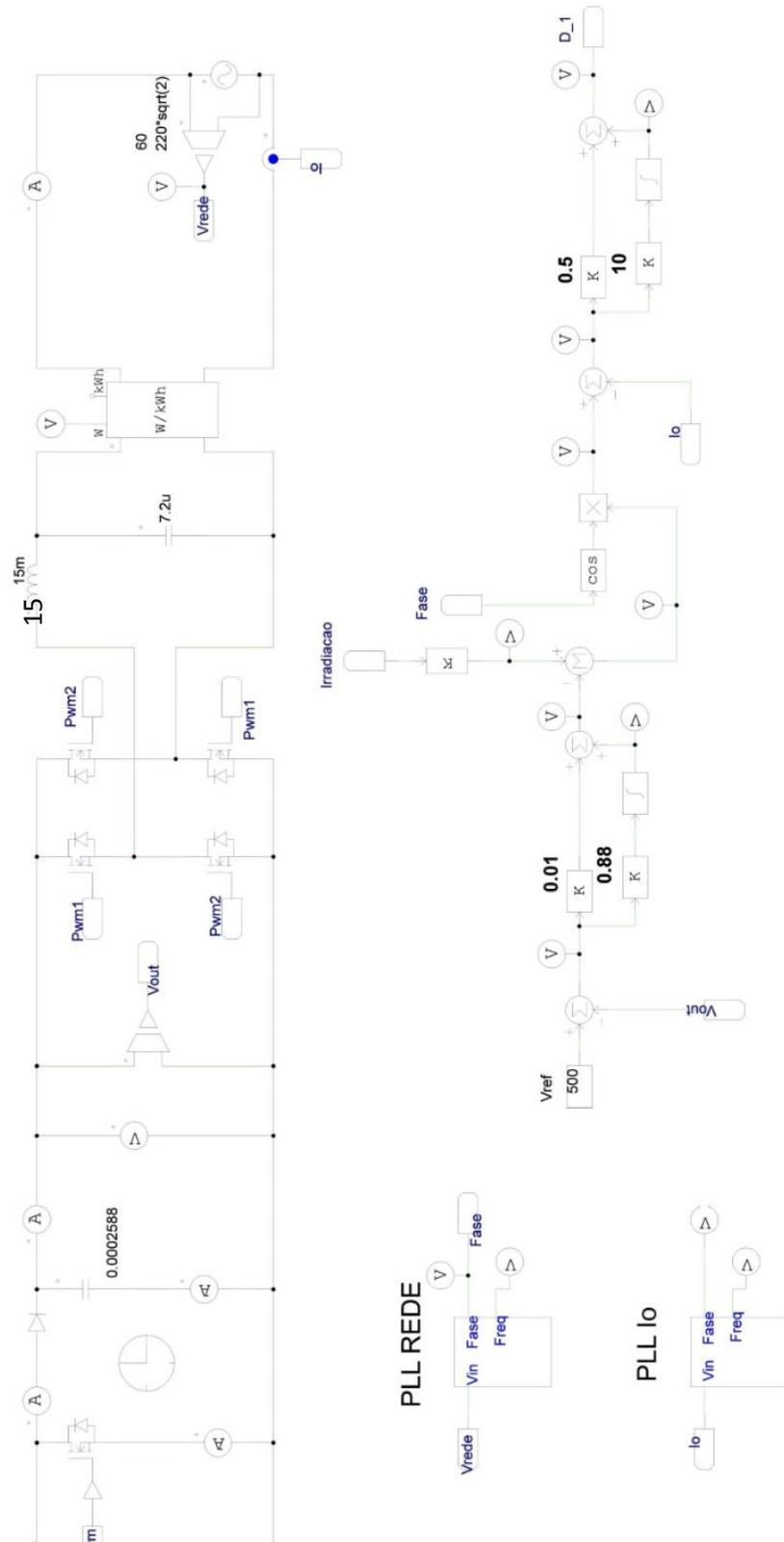


Figura A1-b: Circuito completo 2/2; Fonte: Autor.

```

g_nStepCount++;
|
VA = in[0];
IA = in[1];

PA = VA*IA;
DeltaPA = PA-PAprev;
DeltaVA = VA-VAprev;

if(DeltaPA>0){
    if(DeltaVA>0){D=D-Step;}
    else if(DeltaVA<0){D=D+Step;}
}

else if(DeltaPA<0){
    if(DeltaVA>0){D=D+Step;}
    else if(DeltaVA<0){D=D-Step;}
}

if(D<Dmin){D=Dmin;}
else if(D>Dmax){D=Dmax;}

VAprev = VA;
PAprev = PA;

out[0]=D;

```

Figuras A2: Algoritmo utilizado na aba de função *Variable/Function Definitions* do Bloco C do PSIM.

```

#include <Stdlib.h>
#include <String.h>

int g_nInputNodes=0;
int g_nOutputNodes=0;

int g_nStepCount=0;

double VA = 0.0;
double PA = 0.0;
double IA = 0.0;

double VAprev = 0.0;
double PAprev = 0.0;

double DeltaVA = 0.0;
double DeltaPA = 0.0;

double D = 0.5;
double Step = 0.2;
double Dmin = 0.25;
double Dmax = 0.9;
|

```

Figura A3: Algoritmo utilizado na aba de função *RunSimUser Function* do Bloco C do PSIM.

```
1 clc
2 clear
3 clear all
4
5 fs = 100e3; // Frequência de Chaveamento
6 Vi = 468; // Tensão de Entrada
7 Vo = Vi/2; // Tensão de Saída
8 L = 15e-3; // Indutor
9 C = 7.2e-6; // Capacitor
10 DiL = Vo/2/L/fs; // Ripple de Corrente
11 DVo = DiL/8/fs/C; // Ripple de Tensão
12 fc = 1/sqrt(L*C)/2/pi; // Frequência de Corte
```

Figura A4: Algoritmo utilizado no SCILAB para dimensionar filtro LC com frequência de corte 484 Hz.

