



**INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - IEDS
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS**

JUSTINO CORÓ NANQUE

**SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE
ELÉTRICA**

**REDENÇÃO
2023**

JUSTINO CORÓ NANQUE

SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à coordenação do curso de Engenharia de Energias da Universidade da Integração da Lusofonia Afro- Brasileira, como requisito parcial à obtenção do título de graduação em Engenharia de Energias.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Alves De Lima Henn.

REDENÇÃO

2023

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

Nanque, Justino Coró.

N171s

Simulação de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica /
Justino Coró Nanque. - Redenção, 2024.
68f: il.

Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de
Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da
Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção,
2024.

Orientador: Gustavo Alves de Lima Henn.
Coorientador: Hermínio Miguel de Oliveira Filho.

1. Sistemas de energia fotovoltaica. 2. Energia solar. 3.
Algoritmos. I. Henn, Gustavo Alves de Lima. II. Oliveira Filho,
Hermínio Miguel de. III. Título.

CE/UF/BSCA

CDD 621.310981

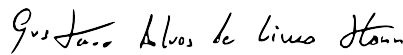
JUSTINO CORÓ NANQUE

SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à coordenação do curso de Engenharia de Energias da Universidade da Integração da Lusofonia Afro- Brasileira, como requisito parcial à obtenção do título de graduação em Engenharia de Energias.


Aprovada em: 29 / 09 / 2023

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Gustavo Alves de Lima Henn (Orientador)


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

Documento assinado digitalmente
 HERMINIO MIGUEL DE OLIVEIRA FILHO
Data: 27/11/2023 04:15:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Hermínio Miguel de Oliveira Filho (Coorientador)

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira

(UNILAB)

Documento assinado digitalmente
 RANOYCA NAYANA ALENCAR LEAO E SILVA AQUINO
Data: 27/11/2023 13:37:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profª. Dra. Ranoyca Nayanca Alencar Leao e Silva Aquino (Examinadora)

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira

(UNILAB)

DEDICATÓRIAS

À Deus.

Aos meus avós e demais ancestrais.

Aos meus pais, Agostinho e Maria Isabel.

Aos meus irmãos.

Aos amigos, que estiveram comigo durante esse percurso.

A todos que contribuíram de alguma forma para esta conquista.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à Deus que me concedeu o dom de viver e por sempre iluminar o meu caminho.

Gratidão meus queridos avós e demais ancestrais por terem sido o meu caminho, vocês vivem em mim. Jamais esquecerei de onde vim, dos conceitos e valores que me foram passados.

Aos meus pais, Agostinho Coró e Maria Isabel Indi Coró, pelo amor, carinho e todo esforço investido na minha educação que foram a base da construção da minha vida. Onde quer que vocês estejam fiquem sabendo que sem o vosso apoio, eu jamais conseguiria conquistar o que eu conquistei.

Aos meus filhos, por compreenderem os vários anos em que estive ausente em busca dos meus sonhos. Mesmo distantes, o amor que sinto por vocês é intenso e eterno.

Aos meus irmãos, Ângela Dayves Coró Nanque, Ludmila Akmeio Coró Nanque, Osvaldo Adenilson Coró Nanque, Filomena Dayves Coró Nanque, Irtana Valentina Coró Nanque, Maria Olga Coró Nanque e Urcelina Coró Nanque, pelo encorajamento e apoio.

Deixo um agradecimento especial ao meu orientador prof. Dr. Gustavo Alves de Lima Henn por aceitar conduzir a minha monografia, pelo apoio, compreensão e paciência demonstrada durante o período do projeto. A sua profissão é inspiradora e é um grande privilégio poder aprender com você.

Gratidão ao meu coorientador prof. Dr. Hermínio Miguel de Oliveira Filho pela vontade e disponibilidade de ajudar sempre que necessário. Obrigado por me ensinar coisas que eu achei que nunca conseguiria compreender.

Agradeço à minha querida lindíssima orientadora de estágio e examinadora da minha monografia profa. Dra. Ranoyca Nayanca Alencar Leao e Silva Aquino que sempre me ajudou com sua vasta experiência desde o início deste projeto. As suas valiosas indicações fizeram toda a diferença.

Também quero agradecer à Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira e o corpo docente do curso de Engenharia de Energias pela excelência da qualidade do ensino oferecido.

Aos meus amigos, Waldimir Barbosa, Valdir Ié, Issuf Badji, Osnel Paulo Insali, Salomão José Becuba Baptista, Antônio Imbana e Adair Luizinho Gomes, pela oportunidade de convívio e por estarem ao meu lado em todos os momentos.

Por fim, gostaria de agradecer a todos que de certa forma contribuíram para concretização deste trabalho. Serei eternamente grato a vocês por todas as coisas que me proporcionaram.

“A educação é a única arma e riqueza que vos restará.”

Agostinho Coró

RESUMO

A instalação de sistemas de energias renováveis tem um significado relevante no contexto de desenvolvimento sustentável, isso pelo fato de se identificarem como alternativa às fontes de energias convencionais. Atualmente o uso de sistemas de energia solar fotovoltaicos tem se mostrado viável no que concerne à geração da eletricidade, principalmente sistemas conectados à rede elétrica. Assim, o objetivo principal deste trabalho é projetar e simular um sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica de distribuição. No qual é apresentado estudo teórico e simulações referentes ao conversor boost, conectado a um painel fotovoltaico, com rastreamento do ponto de máxima transferência de potência (MPPT) do tipo perturbe e observe (P&O), além de modelagem do inversor monofásico interligado à rede elétrica. Os resultados obtidos a partir das simulações no software PSIM mostraram-se coerentes como esperado, atendendo as expectativas do projeto.

Palavras chave: Sistemas fotovoltaicos. Energia solar. Conversor *boost*. MPPT. Algoritmo P&O. Inversor monofásico.

ABSTRACT

The installation of renewable energy systems has an important significance in the context of sustainable development, because they are identified as an alternative to conventional energy sources. Currently, the use of photovoltaic solar energy systems has proved to be viable when it comes to electricity generation, mainly grid-connected systems to the electricity grid. Therefore, the main objective of this work is to design and simulate a solar photovoltaic system connected to the electricity distribution network. It presents a theoretical study and simulations of a boost converter connected to a photovoltaic panel, with maximum power transfer point (MPPT) tracking of the perturb and observe (P&O) type, as well as modelling of the monophasic inverter interconnected to the electricity grid. The results obtained from the simulations in the PSIM software proved to be coherent as expected, fulfilling the project's expectations.

Keywords: Photovoltaic systems. Solar energy. Boost converter. MPPT. P&O Algorithm. Monophasic inverter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Topologia do conversor boost.....	20
Figura 2.2 – Circuito equivalente para o conversor boost para chave S_w ligada.....	21
Figura 2.3 – Circuito equivalente do conversor elevador para a chave S_w desligada	23
Figura 2.4 – Formas de onda típica do conversor boost no instante T_{on} e T_{off}	24
Figura 2.5 – Fluxograma do algoritmo P&O.....	28
Figura 3.1 – Inversor monofásico	31
Figura 3.2 – Circuito equivalente a primeira etapa do funcionamento do inversor	32
Figura 3.3 – Circuito equivalente a segunda etapa do funcionamento do inversor	32
Figura 3.4 – Circuito equivalente a terceira etapa do funcionamento do inversor.....	33
Figura 3.5 – Circuito equivalente a quarta etapa do funcionamento do inversor.....	33
Figura 3.6 – Comando de interruptores.....	34
Figura 3.7 – Sinais de modulação e pulsos de comando	35
Figura 3.8 – Topologia do filtro LC	35
Figura 3.9 – Malha de controle de corrente injetada na rede.....	40
Figura 3.10 – Diagrama de Bode.....	41
Figura 3.11 – Diagrama de Bode para planta compensada.....	44
Figura 3.12 – Diagrama de blocos referente ao controlador de tensão a e corrente.....	45
Figura 3.13 – Diagrama de Bode para a planta FTMAv(s).....	46
Figura 3.14 – Diagrama de Bode da planta compensada.....	48
Figura 4.1 – Esquemático do sistema simulado no Psim.....	49
Figura 4.2 – Parâmetros do solar module (physical model).....	50
Figura 4.3 – Parâmetros do módulo fotovoltaico (physical model).....	51
Figura 4.4 – Forma de onda de V_{pv}	52
Figura 4.5 – Formas de onda de V_{tri} , V_{ref} e V_{PWM}	52
Figura 4.6 – Formas de onda de V_{PWM} e I_L e V_C	53
Figura 4.7 – Operação <i>soft stater</i>	53

Figura 4.8 – V_{ref} no intervalo de 200ms a 300ms.....	54
Figura 4.9 – Inversor monofásico e o comando de interruptores.....	55
Figura 4.10 – Tensão no barramento do inversor.....	55
Figura 4.11 – Formas de onda de V_{tri} , V_{ref} e V_{AB}	56
Figura 4.12 – Formas de onda de da tensão V_{AB} e a tensão V_0	56
Figura 4.13 – Formas de onda de corrente e a tensão na rede.....	57
Figura 4.14 – Potência ativa, aparente e o fator de potência na saída do inversor.....	58
Figura 4.15 – Forma de onda da tensão na entrada do inversor.....	58
Figura 4.16 – Formas de onda de corrente e tensão na rede.....	59
Figura 4.17 – Espectro harmônico da corrente injetada na rede.....	59
Figura 4.18 – Circuito do sistema completo.....	60
Figura 4.19 – Comportamento de V_{ref} para a radiação solar incidente de 1000W/m ² para 500W/m ²	60
Figura 4.20 – Potência gerada pelo módulo fotovoltaico.....	61
Figura 4.21 – Tensão no barramento CC do inversor.....	61
Figura 4.22 – Corrente injetada na rede elétrica.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Especificação dos componentes do conversor boost.....	26
Tabela 2.2 – Ações do algoritmo P&O.....	29
Tabela 3.1 – Especificações do inversor monofásico.....	36

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

MPPT	Rastreamento do ponto de máxima potência
P&O	Perturbar e observar
CC	Corrente contínua
CA	Corrente alternada
FP	Fator de potência
MPP	Ponto de máxima potência
PSIM	Pacote de software de simulação de circuito eletrônico
FV	Sistema fotovoltaico
PWM	Modulação por largura de pulso
LC	Indutivo capacitivo
TDH	Taxa de distorção Harmônica
FPB	Filtro passa baixa
PI	Proporcional integral
FTMA	Função de transferência de malha aberta
FTLA	Função de transferência de laço aberto
FTMA _i (s)	FTMA para controle de corrente através do indutor do inversor
FTMA _v (s)	FTMA para controle da tensão de entrada no inversor
IEEE	Instituto de engenheiros elétricos e eletrônicos
CTP	Condição de teste padrão
CI	Circuito integrado

LISTA DE SÍMBOLOS .

t_{lig}	Tempo em que a chave do conversor permanece ligada	Segundos
t_{desl}	Tempo em que a chave do conversor permanece desligada	Segundos
V_i	Tensão de entrada do conversor boost	Volt
$V_L(t)$	Tensão no indutor	Volt
D	Diodo do conversor boost	
L	Indutor do conversor boost	Henry
C	Capacitor do conversor boost	Farad
R	Resistor do conversor boost	Ohm
S	Interruptor do conversor boost	
i_L	Corrente no indutor	Ampère
Δt	Variação de tempo	Segundos
f_{sc}	Frequência de chaveamento do conversor boost	Hertz
T_s	Período	Segundos
V_0	Tensão de saída do conversor boost	Volt
G	Ganho estático ou razão cíclica	
V_{pv}	Tensão do painel fotovoltaico	Volt
P_{pv}	Potência do painel fotovoltaico	Watt
ΔV_c	Variação de tensão no capacitor	Volt
i_{in}	Corrente de entrada	Ampère
Δi_c	Variação de corrente no capacitor	Ampère
Δi_L	Variação de corrente no indutor	Ampère
I_{pv}	Corrente de painel fotovoltaico	Ampère
ΔP_{pv}	Variação de potência de painel fotovoltaico	Watt
P_{new}	Potência nova	Watt
P_{old}	Potência antiga	Watt
V_{ref}	Tensão de referência	Volt
V_{ref_old}	Tensão de referência antiga	Volt
V_{CC}	Tensão de corrente contínua	Volt
S_1, S_2, S_3, S_4	Interruptores do inversor	

D_1, D_2, D_3, D_4	Diodos do inversor	
L_1	Indutor do inversor	Henry
C_1	Capacitor do inversor	Farad
V_{tri}	Tensão triangular	Volt
I_{0rms}	Corrente eficaz	Ampère
I_{0pk}	Corrente de pico	Ampère
V_{pkrede}	Tensão de pico na rede	Volt
$V_{pk\sin}$	Tensão de pico da senoide	Volt
m	Modulação	
I_{ref}	Corrente de referência	Ampère
Σ	Somatório	
C_i	Compensador para controle de corrente	
K_{PWM}	Ganho do modulador PWM	
G_i	Função de transferência que relaciona a corrente através do indutor	
H_i	Ganho de sensor de corrente	
f_{ci}, f_{cv}	Frequência de cruzamento	
f_{zi}, f_{zv}	Frequência dos zeros dos compensadores	
f_{pi}, f_{pv}	Frequência dos polos dos compensadores	
Z_i, Z_v	Zeros dos compensadores	
P_i	Polo do compensador de corrente	
T_i, T_v	Constantes de tempo	
G_1, G_2	Ganhos dos compensadores	
C_{iPI}	Função de transferência do compensador PI	
M_f	Margem de fase	
C_v	Compensador para controle de tensão	
G_v	Função de transferência para malha de tensão de entrada	
H_v	Ganho de sensor de tensão	
C_0	Capacitor de barramento	
V_m	Amplitude da portadora triangular	

SUMÁRIO

JUSTINO CORÓ NANQUE	4
BANCA EXAMINADORA	4
ABSTRACT	ix
Keywords:	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiv
CAPÍTULO I	18
1. INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVOS	20
1.1.2 Objetivo geral	20
1.1.3 Objetivos específicos	20
CAPÍTULO II	21
2 INTRODUÇÃO	21
2.1 ETAPAS DE OPERAÇÃO DO CONVERSOR BOOST	22
2.2 PROJETO DO CONVERSOR BOOST	26
2.3 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO PERTURBE E OBSERVE (P&O) 28	
CAPÍTULO III	31
3 INTRODUÇÃO	31
3.1 FUNCIONAMENTO DO INVERSOR	32

3.2	TÉCNICA DE MODULAÇÃO	34
3.3	FILTRO DE SAÍDA	36
3.3.1	Dimensionamento do filtro indutivo-capacitivo (filtro LC).....	37
3.4	CONEXÃO COM A REDE ELÉTRICA.....	38
3.4.1	Sincronismo.....	39
3.5	PROJETO DE CONTROLE.....	40
3.5.1	Controle de corrente.....	40
3.5.2	Projeto da malha de corrente (PI com filtro)	43
3.6	Controle de tensão no barramento CC.....	45
3.6.1	Projeto da malha de tensão (compensador PI).....	47
	CAPÍTULO IV	50
4.1	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO.....	50
4.2	DESCRIÇÃO DO SISTEMA FV	50
4.3	DESEMPENHO DO CONVERSOR BOOST	52
4.3.1	Comportamento do MPPT P&O.....	54
4.4	DESCRIÇÃO DO INVERSOR	55
4.5	DESEMPENHO DO INVERSOR	56
4.5.1	Resultados de simulação em regime permanente	56
4.5.2	Resultados de simulação em regime transitório	59
4.5.2.1	Resultado da simulação do sistema completo	61
	CAPÍTULO V.....	64
	REFERÊNCIAS	65

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o desequilíbrio ambiental e busca pela efetivação de energias alternativas, faz com que a humanidade permaneça em uma incessante busca de novas tecnologias para produção de energia elétrica com impacto limitado ao ecossistema. As alterações climáticas, levou tanto os países desenvolvidos quanto os países em desenvolvimento a promover desenvolvimento e o uso de energias alternativas, como: energia solar, eólica, hidrelétrica, biocombustíveis e maremotriz (MACHADO, 2017).

Do ponto de vista ambiental, a utilização de recursos não renováveis para produção de energia tem sido responsável por problemas ambientais. Nesse cenário, a utilização de fontes alternativas é de suma importância, visto que são julgadas limpas, inesgotáveis e pouco poluentes. Segundo Mattei e Parré:

É extremamente importante o desenvolvimento de fontes de energias alternativas visando o equilíbrio de longo prazo, dado que os recursos naturais são escassos e a população e as cidades crescem amplamente no tempo. A sustentabilidade do setor de energia elétrica garantirá cada vez mais o acesso desse recurso para as pessoas e o crescimento e desenvolvimento econômico das próximas gerações. (MATTEI e PARRÉ, 2021, p. 2).

Entre diferentes tipos de fontes alternativas, o aproveitamento do sol para a geração de energia elétrica é atualmente considerado como sendo uma das fontes de energia natural mais benéficas e mostra certas vantagens como, por exemplo: contribuição sustentável, opera de modo silencioso, a modularidade (que usa os mesmos componentes em inúmeros produtos diferentes), não contém partes móveis, e mais (SILVA et al., 2019).

Existem duas formas mais conhecidas de produzir energia elétrica através da luz do sol. A primeira é a heliotérmica ou termossolar, no qual a irradiação é coletada e convertida em calor com a finalidade de produzir eletricidade. Para obter a eletricidade através deste processo com maior eficiência, é necessário que o sistema esteja situado em um local com alta incidência de radiação solar, pois a energia radiante emitida pelo sol não atinge a superfície terrestre de maneira uniforme. A segunda é a fotovoltaica: nesse processo é feita a conversão direta da radiação solar em eletricidade. Esse processo se dá através do efeito fotovoltaico (ANEEL, 2018).

Os sistemas solares fotovoltaicos são compostos por um conjunto de componentes agregados entre si com o propósito de procurar uma solução excelente através da maior eficiência. Portanto, para que haja altos rendimentos na conversão, segundo Hafemeister, Dias e Poltosi (2018), faz-se necessário o uso de uma função do inversor chamada técnica de extração de máxima potência, que é popularmente conhecido como rastreador do ponto de máxima

potência (MPPT). Vale destacar que existem diversas formas de aplicar o MPPT. A técnica perturbar e observar (P&O) é uma delas.

Geralmente, a tensão gerada pelo módulo fotovoltaico é relativamente baixa. Sendo assim, é necessário associar os painéis em série (configuração em *string*) formando assim um único braço, com a finalidade de elevar a tensão total do arranjo. Além disso, a utilização do conversor elevador, também denominado conversor *boost*, é uma alternativa para maximização da tensão de barramento CC. Esta mesma conclusão foi alcançada por Tiburski et al. (2018).

Painéis fotovoltaicos geram energia apenas em forma de corrente contínua (CC). Enquanto a rede elétrica apresenta-se na forma de corrente alternada (CA). Dessa forma, para que seja viável realizar a interface entre os painéis fotovoltaicos e a rede elétrica, é necessário utilizar o conversor CC-CA, também conhecido como inversor, cuja principal função é a conversão de tensão e corrente contínua gerada pelo módulo fotovoltaico em tensão e corrente alternada.

Secundariamente, o inversor agrega a função de sincronismo e controle de ilhamento, que são um dos fatores mais relevantes no momento de acoplamento do inversor com a rede de elétrica. Para paralelizar o inversor e a rede de distribuição é imprescindível que estes tenham a mesma amplitude, a mesma frequência e a mesma fase. Se realizado de forma inadequada, poderá ocorrer circulação de corrente muito elevada, ocasionando potencial danos nos equipamentos elétricos e disparo forçado dos dispositivos de proteção. Para que o sincronismo no ponto de conexão entre estas duas fontes de tensão esteja dentro dos limites aceitáveis, é necessário controlar o inversor, fazendo com que este funcione como uma fonte de corrente para que ela esteja em fase com a tensão e garantir assim o fator de potência (FP) perto de unitário como exigido por norma (BARBI, et al., 2007).

Em virtude da necessidade de segurança tanto para sistema fotovoltaico quanto para a rede elétrica, deve-se implementar um sistema de controle e segurança no inversor conhecido como anti-ilhamento. O ilhamento é definido como situação em que sistema solar fotovoltaico permanece em operação quando acontecer desligamento da rede elétrica, formando assim ilhas. Nesse caso, o sistema fotovoltaico além de abastecer energia para carga local a qual foi projetado, abastece energia à rede. Entretanto, este fenômeno pode danificar equipamentos elétricos e provocar risco de vida para a equipe de manutenção no momento de religação da rede elétrica com a ilha eletrificada (SILVA, 2016).

Ainda segundo Silva (2016), é necessário projetar inversor fotovoltaico capaz de detectar e controlar a condição de ilhamento, para assim, interromper automaticamente sua

operação a fim de garantir segurança a rede elétrica, ao sistema fotovoltaico e equipamentos que nele se encontram ligados.

1.1 OBJETIVOS

1.1.2 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo projetar e simular um sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica.

1.1.3 Objetivos específicos

- Projetar e simular um conversor boost conectado a um conjunto de painéis fotovoltaicos, operando com MPPT;
- Projetar e simular um inversor conectado à uma carga que emule a rede elétrica, operando com controle de sincronismo;
- Simular o sistema completo: painéis fotovoltaicos, conversor boost, inversor e rede;
- Aplicar e estudar os efeitos dinâmicos no sistema: variações de temperatura e irradiação nos painéis fotovoltaicos, e afundamentos de tensão na rede.

CAPÍTULO II

2 INTRODUÇÃO

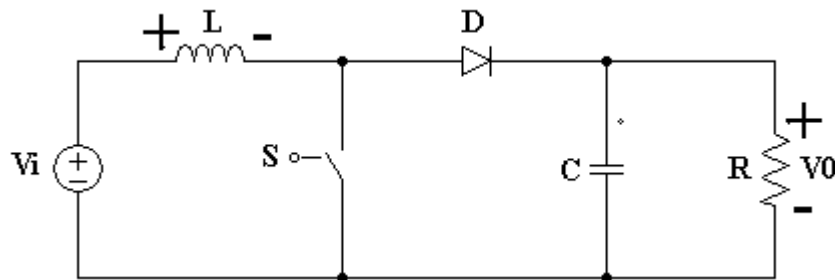
Este capítulo tem como objetivo mostrar o projeto de um conversor elevador aplicado em um arranjo fotovoltaico. No universo da energia solar fotovoltaica, o conversor elevador é conectado na saída dos painéis com a finalidade de rastrear o ponto de máxima potência. Este tipo de conversor tem como principal função regular a tensão de saída para um nível igual ou superior em relação à entrada.

Para operação do conversor boost, na maioria das vezes utiliza-se a técnica de modelagem da chave PWM controlada pela variação da razão cíclica (G) que é uma grandeza adimensional com valores definidos que variam entre zero e um, equivalendo de 0 a 100% (MUNIZ, 2017).

Para valores da razão cíclica superiores a 80% a operação do conversor se torna inviável, isso devido às grandes variações na ondulação da tensão de saída causadas por pequenas variações no ciclo de trabalho, levando o conversor à instabilidade e aumento de perdas associado aos componentes do mesmo (TORRICO BASCOPE et al., HENN et al., 2010).

A topologia de circuito de conversor *boost* é ilustrada na figura 2.1:

Figura 2.1 – Topologia do conversor *boost*.



Fonte: Próprio autor (2023).

Pela configuração do circuito da figura 2.1, pode-se observar que a fonte de alimentação está em série com o indutor, que armazena energia em forma de campo magnético. O conversor elevador opera com uma chave de potência que possui dois estágios de operação e liga e desliga instantaneamente, possibilitando assim, o fornecimento da energia ao capacitor e a carga. Esse ciclo se repete periodicamente durante o funcionamento do inversor (TENÓRIO, 2017).

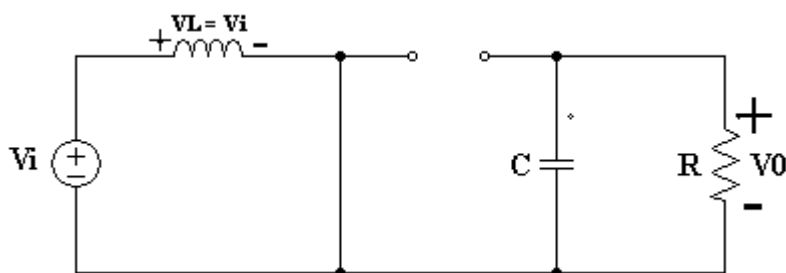
2.1 ETAPAS DE OPERAÇÃO DO CONVERSOR BOOST

Para análise das etapas de funcionamento do circuito de conversor *boost* em regime permanente no qual o indutor está funcionando no modo de condução contínua, pode-se avaliar o funcionamento do conversor em dois estágios de operação: pelo exame da corrente e tensão no indutor para quando a chave estiver fechada (T_{lig}) e para quando a chave estiver aberta (T_{desl}).

Primeira etapa: inicia-se com a chave do conversor ligada por um intervalo de tempo, no mesmo instante a tensão no indutor V_L passa a ser igual a tensão da fonte V_i e o diodo D fica reversamente polarizado, enquanto a corrente cresce de forma linear e a carga R é alimentada apenas pelo capacitor C.

O circuito equivalente do conversor para chave fechada pode ser visto na figura 2.2.

Figura 2.2 – Circuito equivalente para o conversor *boost* para chave S ligada.



Fonte: Próprio autor (2023).

Pela lei de Kirchhoff das tensões obtém-se a equação 2.1.

$$-V_i + V_L(t) = 0 \quad (2.1)$$

Assim,

$$V_L(t) = V_i \quad (2.2)$$

Com a chave fechada durante um certo intervalo de tempo, a tensão no indutor permanece constante e a corrente aumenta gradativamente. Dessa forma, é feita a análise de tensão e corrente no indutor pela equação 2.3.

$$V_L(t) = V_i = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.3)$$

No qual, $V_L(t)$ é tensão no indutor, V_i é a tensão de entrada, L é a indutância e i_L é a corrente no indutor.

Logo:

$$L = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = V_i \quad (2.4)$$

A variação da corrente no indutor:

$$\Delta i_L = \frac{V_i}{L} t_{lig} \quad (2.5)$$

Sabe-se que:

$$t_{lig} = D \cdot T_s \quad (2.6)$$

Logo:

$$\Delta i_L = \frac{v_i}{L} D \cdot T_s \quad (2.7)$$

Sabe-se que:

$$f_s = \frac{1}{T_s} \therefore T_s = \frac{1}{f_s} \quad (2.8)$$

Então obtém-se a variação da corrente no indutor pela equação a seguir:

$$\Delta i_L = \frac{v_i}{L} D \cdot \frac{1}{f_s} \quad (2.9)$$

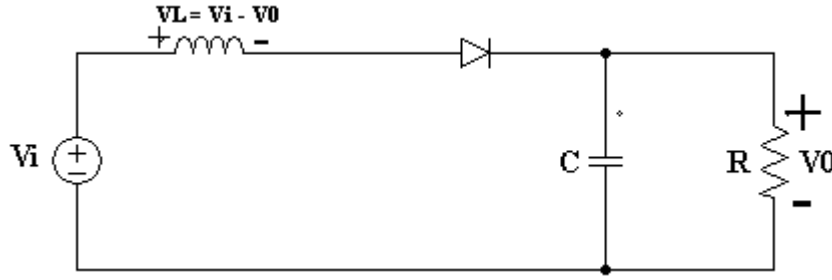
Onde Δi_L é a variação da corrente no indutor, T_{lig} é o tempo em que a chave permanece ligado, T_s o período, f_s a frequência de chaveamento e Δt simboliza a variação do tempo.

Segunda etapa: inicia-se com a chave S desligada, no instante $t = D \cdot T_s$, o diodo entra em condução, a corrente no indutor i_L decresce linearmente devolvendo energia armazenada na etapa anterior e a energia armazenada pelo indutor L será transferida através do diodo para capacitor C . A tensão de entrada V_i se somará com a tensão do indutor V_L , desse modo aumentando a tensão de saída.

No momento em que a chave for fechada novamente, o diodo fica reversamente polarizado, a energia do capacitor libera a tensão para carga e o ciclo se repete novamente.

Na figura 2.3 é mostrado o circuito equivalente ao conversor boost para chave aberta.

Figura 2.3 – Circuito equivalente do conversor elevador para a chave S desligada.



Fonte: Próprio autor (2023).

Aplicando a lei de Kirchhoff das tensões tem-se que:

$$-V_i + V_L + V_0 = 0 \therefore V_L(t) = V_i - V_0 \quad (2.10)$$

$$V_L(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} \therefore L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} = V_i - V_0 \quad (2.11)$$

Considerando a tensão V_0 e a tensão aplicada no indutor constantes, por conseguinte a corrente irá variar linearmente à medida que o tempo varia. Como a tensão de saída V_0 é maior que a tensão de entrada V_i , então essa taxa de variação é constante e negativa, então a variação da corrente no indutor decresce. Essa variação é calculada através da equação 2.12.

$$L \cdot \frac{\Delta i_L(t)}{\Delta t} = \frac{V_i - V_0}{L} \quad (2.12)$$

Logo :

$$\Delta i_L(t) = \frac{V_i - V_0}{L} \cdot t_{desl} \quad (2.13)$$

Onde V_0 é a tensão na carga e t_{desl} é o tempo em que a chave permanece desligada.

Sabe-se que:

$$t_{desl} = (1 - D) \cdot T_s \quad (2.14)$$

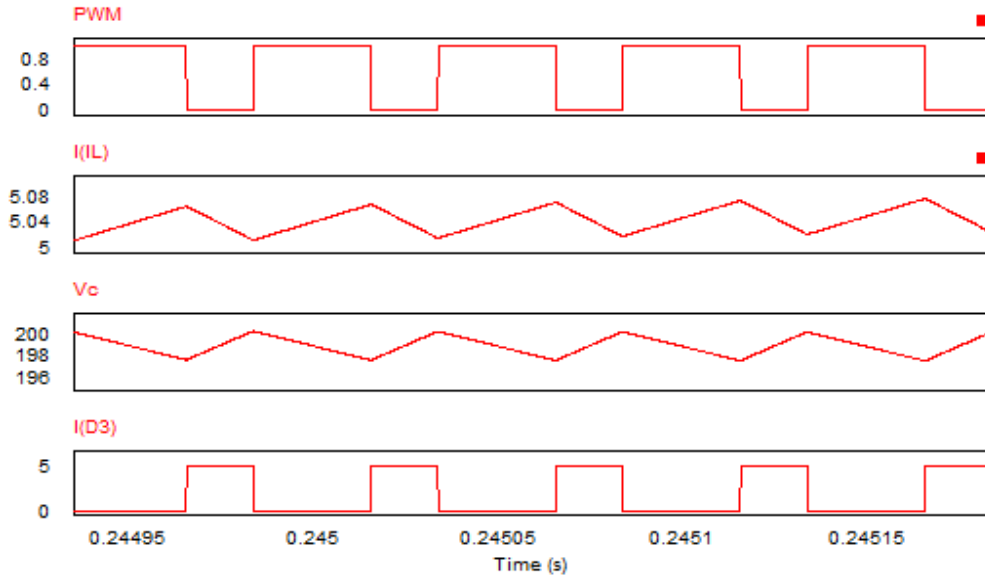
Substituindo:

$$T_s = \frac{1}{f_s} \therefore \Delta i_L(t) = \frac{V_i - V_0}{L} \cdot (1 - D) \cdot \frac{1}{f_s} \quad (2.15)$$

Pela figura 2.4 pode-se verificar que quando a chave é desligada a corrente no indutor decresce e a tensão no capacitor cresce linearmente. Em suma, na primeira etapa o indutor armazena a energia no seu campo magnético e na segunda etapa libera a energia para o

capacitor. Uma vez injetando a corrente no capacitor a sua tensão aumenta e consequentemente a tensão de saída aumenta.

Figura 2.4 - Formas de onda típicas do conversor boost no instante T_{lig} e T_{dest} .



Fonte: Próprio autor (2023).

A partir das análises das etapas de operação, pode-se obter o ganho estático do conversor *boost* uma vez que a variação de corrente no indutor será a mesma. Nesse caso, o princípio da conservação de energia pode ser representado por ambas as variações de corrente em módulo para obter a equação final do ganho estático (G). Assim:

$$|\Delta i_L(t)_{lig}| = |\Delta i_L(t)_{dest}| \quad (2.16)$$

Substituindo as equações 2.9 e 2.15 na equação 2.17, tem-se:

$$\frac{V_i}{L} D \cdot \frac{1}{f_s} = \frac{V_i - V_0}{L} \cdot (1 - D) \cdot \frac{1}{f_s} \therefore V_0(1 - D) = V_i \quad (2.17)$$

Isolando V_0 :

$$V_0 = \frac{V_i}{(1 - D)} \quad (2.18)$$

O ganho estático é responsável por determinar o aumento ou a redução da tensão de entrada em um conversor. Esse ganho pode ser determinado a partir da relação da tensão na carga e da tensão de entrada (RASHID, 2001).

$$G = \frac{V_0}{V_i} \quad (2.19)$$

Substituindo a equação 2.18 na equação 2.19, obtém-se a equação final do ganho estático:

$$G = \frac{\frac{V_i}{(1-D)}}{V_i} \therefore G = \frac{1}{(1-D)} \quad (2.20)$$

A indutância a ser usada é definida pela equação 2.21:

$$L = \frac{V_i \cdot D}{f_s \cdot \Delta i_L(t)} \quad (2.21)$$

A capacitância a ser usada é definida pela equação 2.22:

$$C = \frac{V_0 D}{f_s R \Delta V_0} \quad (2.22)$$

2.2 PROJETO DO CONVERTOR BOOST

Para determinar os parâmetros do conversor, é necessário definir todas as especificações necessárias para o projeto conforme mostra a tabela 2.1.

De acordo com a tabela 2.1, a tensão de entrada (V_{pv}) de 62V corresponde à tensão de máxima potência do painel fotovoltaico, bem como a potência (P_{pv}) de 296,7W. Para a tensão na carga V_0 , foi adotado um valor de 180V para que a razão cíclica ficasse de forma aceitável e não entrasse na zona de instabilidade do conversor e, porque ela atenderia a uma possível integração de um sistema de $110V_{rms}$ em corrente alternada.

Tabela 2.1 - Especificação dos componentes do conversor boost.

Grandeza	Representação	Valor
Potência do arranjo fotovoltaico	P_{pv}	297,6W
Tensão do painel fotovoltaico	V_{pv}	62V
Tensão na carga	V_0	180V
Ondulação no capacitor	ΔV_C	1%
Ondulação da corrente no indutor	Δi_L	1%
frequência de chaveamento	f_{sc}	20KHz

Fonte: Próprio autor (2023).

A frequência de chaveamento f_{sc} foi ajustada de acordo com os parâmetros e resultados que se queria obter no projeto do conversor. Os valores de ondulação no capacitor e ondulação de corrente no indutor foram calculados de acordo com os valores da tensão na carga V_0 e a corrente de entrada i_{in} previamente estabelecidos de modo a garantir uma boa faixa de operação do próprio conversor, bem como o valor da potência.

$$\Delta i_L = 1\% = 0,01. i_{in} = 0,048 \text{ A} \quad (2.23)$$

$$\Delta V_C = 1\% = 0,01. V_0 = 1.8 \text{ V} \quad (2.24)$$

Para obter os valores de indutância, capacitância e resistência na carga foram utilizados equações a seguir:

$$L = \frac{V_i D}{f_{sc} \Delta i_L(t)} = \frac{62.0,66}{20 \times 10^3 \cdot 0,048} = 42,63 \text{ mH} \quad (2.25)$$

$$C = \frac{V_0 D}{f_{sc} R \Delta V_C} = \frac{180.0,66}{20 \times 10^3 \cdot 109,2 \cdot 1,8} = 30,22 \mu\text{F} \quad (2.26)$$

$$R = \frac{180^2}{297,6} = 109,2 \Omega \quad (2.27)$$

2.3 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO PERTURBE E OBSERVE (P&O)

Sistemas de energia solar fotovoltaica são dependentes das condições climáticas aos quais são expostos. Os módulos fotovoltaicos por si só não apresentam um rendimento expressivo, ou seja, a eficiência é muito baixa, por esse motivo é necessário usar a técnica de MPPT a fim de extrair a máxima potência. Sabe-se que, o ponto de máxima potência varia em termos das condições de radiação solar, da temperatura e das tensões dos terminais do painel fotovoltaico (NETO; SANTOS; IANO, 2017).

Normalmente, associa-se o conversor ao painel solar a fim de controlar a tensão de saída, fazendo com que este opere sempre próximo ao ponto de máxima transferência de potência. Existem diversas técnicas para implementação do algoritmo MPPT. Entretanto, a técnica de perturbar e observar é a mais utilizada, visto que, dispõe de uma boa eficiência e é de fácil implementação (SATHLER, 2015).

A técnica perturbar e observar como o próprio nome sugere, trata-se de um método de perturbação e observação no qual é aplicado uma pequena mudança na razão cíclica do conversor e verificar a variação da potência. Caso ocorra aumento da potência fornecida pelo painel o algoritmo segue com perturbações no mesmo sentido, caso ocorra decréscimo de potência na próxima iteração a perturbação irá acontecer no sentido contrário. Desse modo, o algoritmo de P&O faz com que a referência fique variando em valores próximos do MPP (SEGUEL, 2009), (Moacyr et al, 2010).

Ainda segundo o Seguel (2009), para que o algoritmo tenha uma boa eficiência é importante fazer uma escolha adequada para incremento de perturbação ΔV , garantindo que o algoritmo não demore a encontrar o ponto de máxima potência e não resulte em grandes variações em torno deste ponto.

O rastreamento de MPP é realizado a partir de duas iterações consecutivas. Em sua primeira iteração o conversor CC/CC é colocado a operar em uma razão cíclica $D(n - 1)$.

A partir desse ponto de operação são realizadas as leituras de tensão $V_{pv}(n - 1)$ e corrente $I_{pv}(n - 1)$ possibilitando assim cálculo de potência:

$$P_{pv}(n - 1) = V_{pv}(n - 1) \cdot I_{pv}(n - 1) \quad (2.28)$$

Em seguida é iniciada a segunda iteração onde é aplicada uma perturbação ΔD na razão cíclica, logo:

$$D(n) = D(n - 1) \pm \Delta D \quad (2.29)$$

É feita novamente a leitura de tensão $V_{pv}(n)$ e corrente $I_{pv}(n)$ e obtém-se uma nova leitura de potência dada pela equação 2.30. A variação de potência é dada pela equação 2.31:

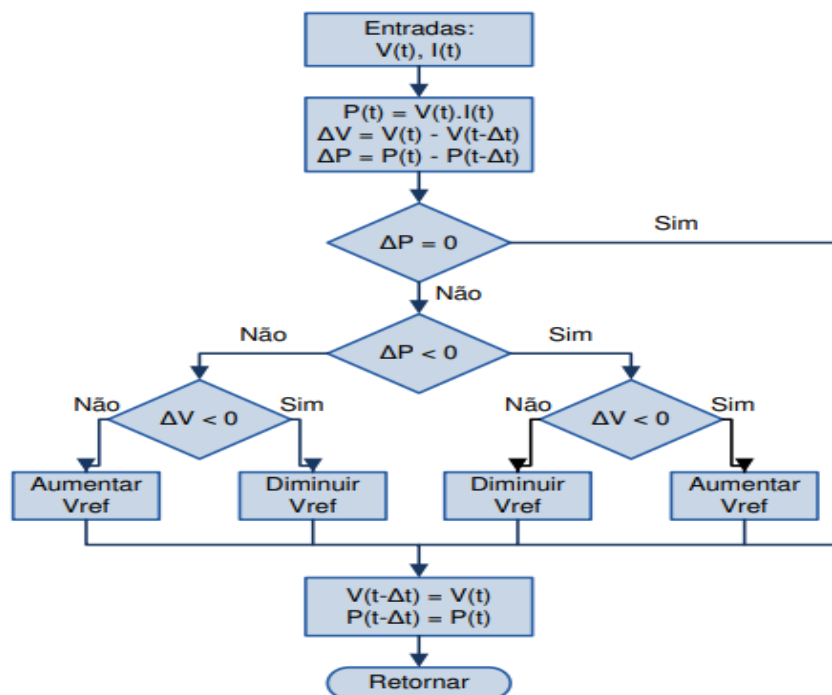
$$P_{pv}(n) = V_{pv}(n) \cdot I_{pv}(n) \quad (2.30)$$

$$\Delta P_{pv} = P_{pv}(n) - P_{pv}(n - 1) \quad (2.31)$$

A partir da perturbação ΔD na razão cíclica, pode-se observar que quando a potência é maior que zero, ou seja, $\Delta P_{pv} > 0$, o sistema de controle percebe que o sistema flui no sentido de do valor de MPP. Caso contrário, ou seja, se $\Delta P_{pv} < 0$, o sistema inverte para direção oposta, e o sentido de perturbação deve ser alterado (PEREIRA; SOUSA; SANTOS, 2016).

O algoritmo referente ao método perturbe e observe está representado na figura 2.5.

Figura 2.5 – Fluxograma do algoritmo P&O.



Fonte: Moacyr et al, 2010.

Utilizou-se o software PSIM para desenvolver e testar o algoritmo perturbe e observe no sistema solar fotovoltaico. Para acionamento da chave foi utilizado um bloco C, que é um bloco capaz de desenvolver logicas utilizando linguagem de programação e este por sua vez tem como principal função ler os valores de tensão e corrente e comparar os valores com aqueles lidos anteriormente, isto é, através do cálculo potência.

Para execução do algoritmo perturbe e observe, geralmente se observam duas principais variáveis, a potência e a razão cíclica. Neste algoritmo foi projetado um *softstart* de maneira que a razão cíclica saia de zero até um determinado valor de forma controlada. Somente após o fim da partida suave, o algoritmo passa a calcular e comparar as potências lidas a cada iteração (SILVA, 2021).

De maneira geral, são 4 as situações que podem ocorrer durante o desenvolvimento do algoritmo. Cada uma delas o algoritmo irá reagir de maneira diferente como mostra a tabela 2.2. No capítulo 4 será feita a simulação com a finalidade de certificar se o algoritmo perturbe e observe está funcionando como esperado.

Tabela 2.2 – Ações do algoritmo P&O.

Comparação de potência	Comparação de V_{ref}	Ação do algoritmo
$P_{new} > P_{old}$	$V_{ref} > V_{ref_old}$	Incrementa V_{ref}
$P_{new} > P_{old}$	$V_{ref} < V_{ref_old}$	Decrementa V_{ref}
$P_{new} < P_{old}$	$V_{ref} > V_{ref_old}$	Decrementa V_{ref}
$P_{new} < P_{old}$	$V_{ref} < V_{ref_old}$	Incrementa V_{ref}

Fonte: Próprio autor (2023).

CAPÍTULO III

3 INTRODUÇÃO

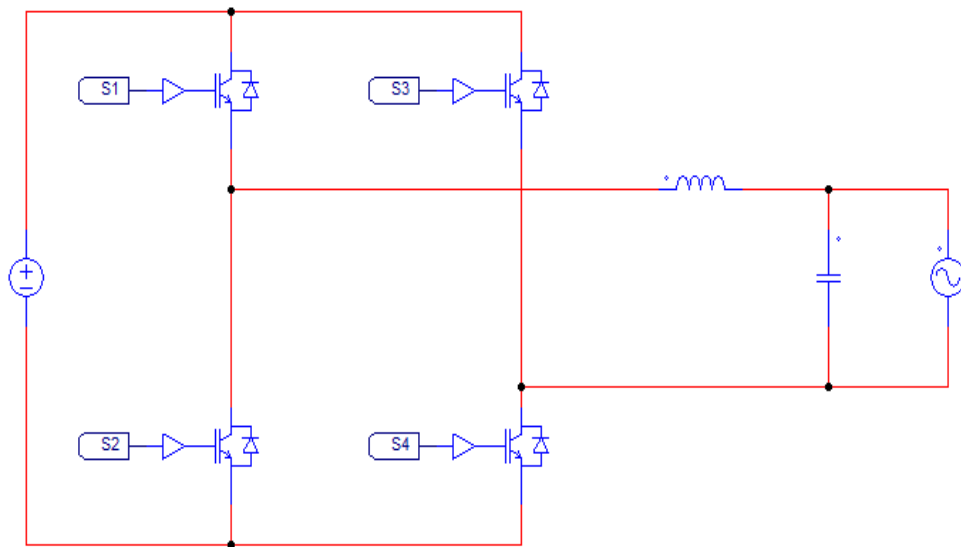
Existem duas topologias de inversores mais utilizados em sistema fotovoltaico (FV), um é conhecido como inversor solar *off-grid* (isolados) e o outro é chamado de inversor solar *on-grid* (conectados à rede). O primeiro trata-se de uma topologia totalmente isolado da rede elétrica que necessita de baterias para armazenar a energia produzida pelos painéis solares, e utilizá-las em dias nublados ou de menor radiação. Esse sistema é mais indicado para áreas rurais, lugares distantes, pois seu uso não depende da rede de transmissão. Em contrapartida, o segundo trata-se de um inversor conectado à rede elétrica e não necessita de sistema de armazenamento de energia, este permite que a energia excedente produzida por este sistema seja repassada para a rede de transmissão e, posteriormente convertida em créditos de energia (BOSO; GABRIEL; GABRIEL, 2015).

Para interligar o sistema *on-grid* com a rede é necessário o uso de inversor, que além de converter energia de corrente CC em CA, interligar, sincronizar, regular a tensão, também possui a função de segurança, e garantir qualidade de energia elétrica injetada na rede.

Sistema de energia solar fotovoltaico possui vários componentes que são essenciais para o seu funcionamento. Um dos principais componentes que constituem o sistema solar fotovoltaico é o inversor, cujo principal papel é converter energia elétrica gerada pelo painel solar, de tensão e corrente contínua CC em tensão e corrente alternada, podendo atender a demanda energética como controlar a amplitude, a fase e a frequência da tensão de saída.

Segundo Bezerra (2010), existem diversos tipos de inversores. Cada um deles conta características específicas que o faz atender à demanda de energia dos mais diferentes estabelecimentos, como residencial, comercial ou industrial. Em caso do sistema *on-grid* é utilizado inversor monofásico para conexão à rede. A figura 3.1 mostra uma das principais topologias do inversor monofásico.

Figura 3.1 – Inversor monofásico.



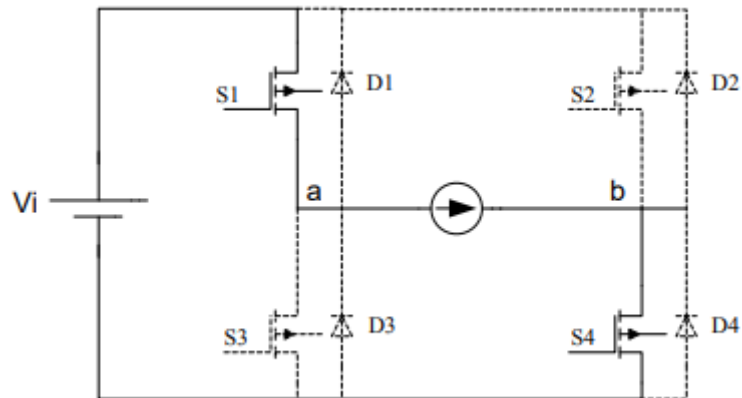
Fonte: Próprio autor (2023).

3.1 FUNCIONAMENTO DO INVERSOR

O inversor possui um circuito embutido com quatro chaves e é alimentado pela tensão e corrente contínua V_{CC} . Este é conhecido como inversor em ponte completa e possui a capacidade de transformar tensão e corrente CC em CA, podendo controlar a amplitude, a frequência e a tensão de saída. Este inversor possui quatro etapas de operação, sendo que, com o fechamento dos interruptores S_1 e S_4 , pode-se obter o semiciclo positivo da tensão alternada de saída, ao passo que com o fechamento de S_2 e S_3 , pode-se obter o semiciclo negativo da tensão alternada de saída. O valor da tensão zero pode ser obtido tanto com o fechamento dos interruptores S_1 e S_2 quanto ao fechamento de S_3 e S_4 . Não são permitidos fechamento dos interruptores do mesmo braço (S_1 e S_2 nem S_3 e S_4) em simultâneo visto que pode causar um curto-circuito. Nesse caso, em termos de operação o inversor deve-se operar em três níveis ($+V_{CC}$, 0 e $-V_{CC}$), dessa forma, os interruptores vão comutar de forma complementar (MACCARINI, 2009).

Primeira etapa: Os interruptores S_1 e S_4 são ligados, enquanto os interruptores S_2 e S_3 permanecem desligados, então a fonte CC entrega a energia à carga. O circuito referente a essa etapa de operação é mostrado na figura 3.2. Vale ressaltar que, as partes pontilhadas nos circuitos das etapas de operação do inversor que se seguem não atuam ativamente.

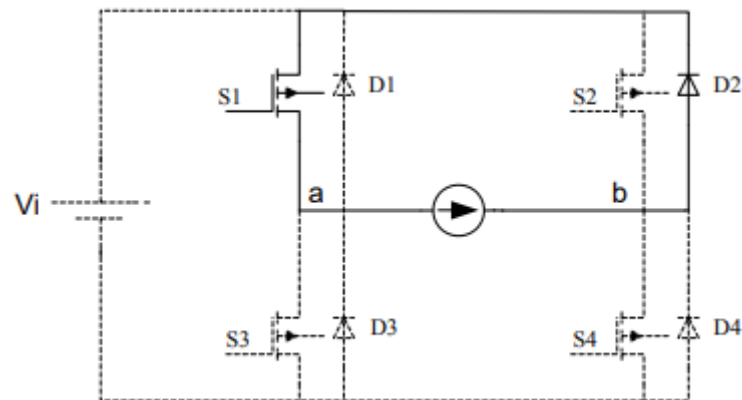
Figura 3.2 – Circuito equivalente a primeira etapa de operação.



Fonte Barbi (2007).

Segunda etapa: Nessa etapa de operação não existe transição de energia da fonte para a carga. No entanto, a corrente é conduzida em roda livre pelo interruptor S_1 e o diodo D_2 . É de salientar que o D_2 é submetido a condução devido ao bloqueio do interruptor S_4 . A figura 3.3 representa a segunda etapa de operação.

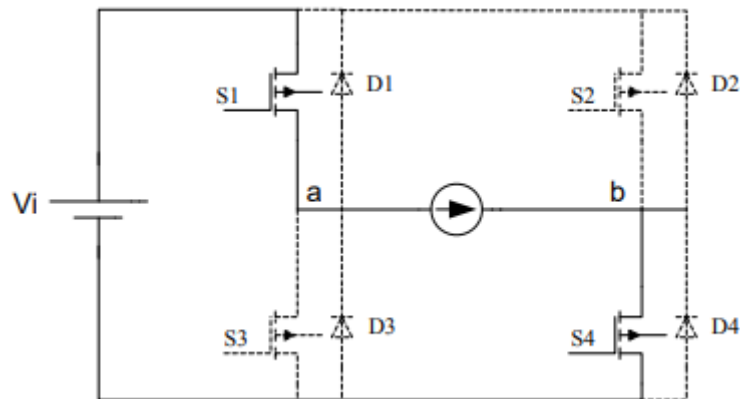
Figura 3.3 – Circuito equivalente a segunda etapa de operação.



Fonte: Barbi (2007).

Terceira etapa: A etapa inicia quando os interruptores S_1 e S_4 assumem a corrente e entram em condução. Enquanto S_2 e S_3 permanecem desligados, visto que o acionamento simultâneo de interruptores do mesmo braço pode provocar danos aos inversores. O circuito equivalente a essa etapa pode ser observado na figura 3.4.

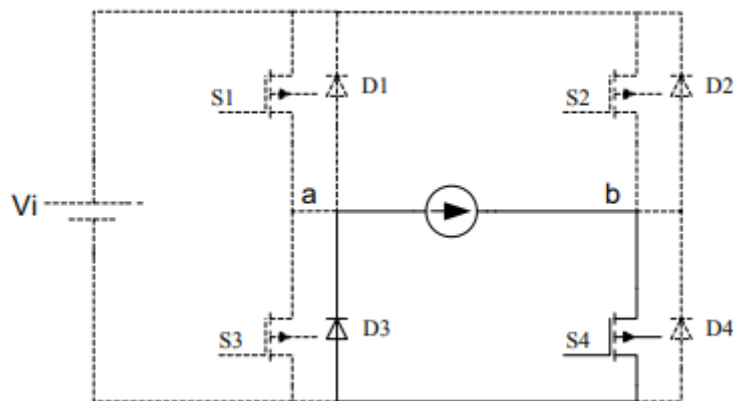
Figura 3.4 – Circuito equivalente a terceira etapa de operação.



Fonte: Barbi (2007).

Quarta etapa: Nessa etapa os interruptores S_1 e S_2 permanecem desligados. Entretanto, o D_3 entra em condução assumindo a corrente de carga. A figura 3.5 representa a quarta etapa de operação, no qual pode-se notar que o interruptor S_3 nem chega a conduzir devido ao sentido da corrente.

Figura 3.5 – Circuito equivalente a quarta etapa de operação.



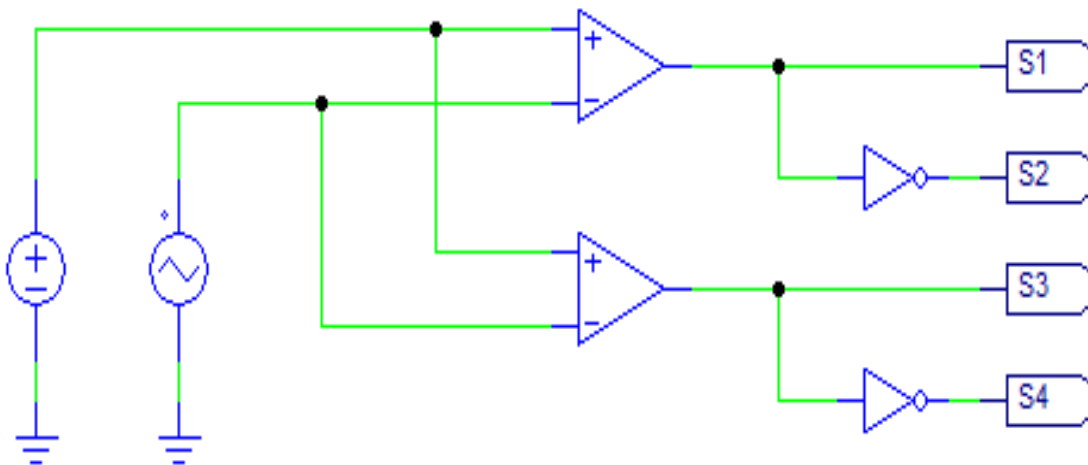
Fonte: Barbi (2007).

3.2 TÉCNICA DE MODULAÇÃO

Os inversores antigos produziam na saída uma onda quadrada, e essa onda esquenta os equipamentos e produz ruídos. Os inversores modernos produzem uma onda de tensão de saída mais próxima da onda senoidal, com harmônicos reduzidos usando a estratégia de modulação conhecida como PWM (*Pulse Width Modulation*).

A técnica de modulação PWM também conhecido como modulação por largura de pulsos, usa dois comparadores. Segundo Oliveira (2017), os comparadores são projetados para comparar a onda senoidal com triangular, no qual o primeiro comparador controla o pulso de disparo das chaves S_1 e S_2 , enquanto o segundo comparador controla o pulso de disparo das chaves S_3 e S_4 . Essas chaves determinam o nível de tensão nas extremidades da carga. De acordo com a figura 3.6 pode-se ver a porta lógica NOT nos terminais da saída de cada controlador, isto é para certificar que quando S_1 estiver ligada o S_2 estará desligada, quando S_3 estiver ligada o S_4 estará desligada e vice-versa. A Figura 3.6 mostra o comando de interruptores do inversor.

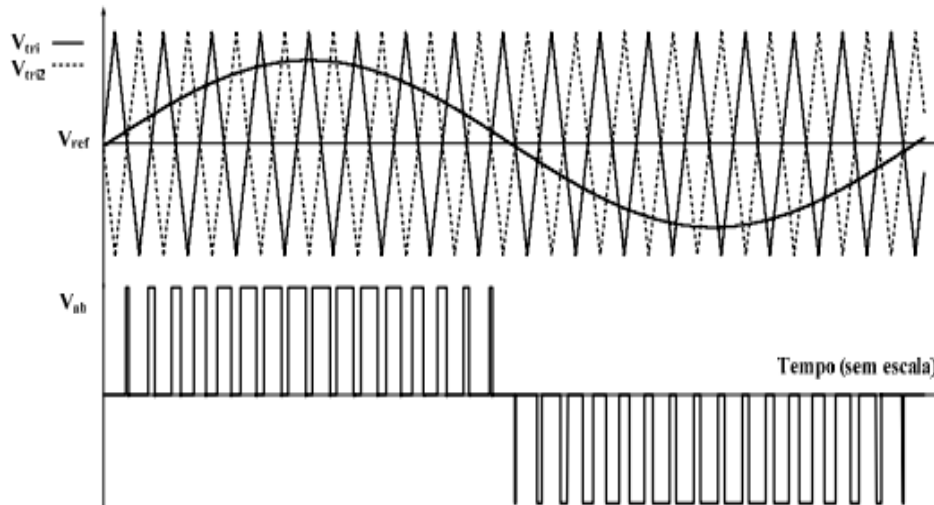
Figura 3.6 – Comando de interruptores.



Fonte: Próprio autor (2023).

O inversor utilizado neste projeto é caracterizado por apresentar três níveis de tensão entre os pontos a e b. Estes três níveis de tensão se dão através da comparação entre a portadora triangular com a referência senoidal. A partir do princípio de funcionamento da técnica de modulação usado neste projeto pode-se concluir que, quando o sinal modulante V_{ref} for maior do que a portadora V_{tri} se obtém na saída um pulso em nível alto, isto é, o interruptor entra em condução e, quando o sinal modulante for menor que a portadora se obtém um pulso em nível baixo, tal que produza os três níveis na tensão de saída do inversor. No entanto, essa analogia do modulador a três níveis é mostrada na figura 3.7, respectivamente.

Figura 3.7 – Sinais de modulação e pulsos de comando.

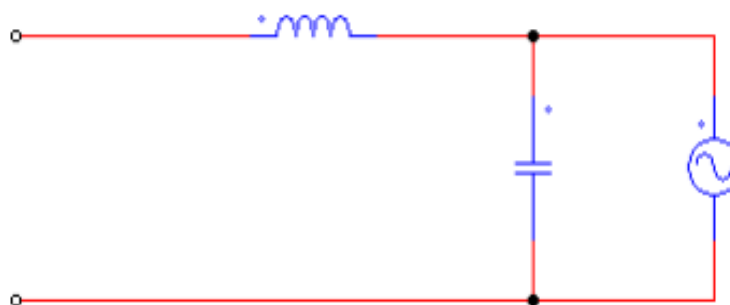


Fonte: Gerent (2005).

3.3 FILTRO DE SAÍDA

A presença dos componentes harmônicos nos sistemas elétricos afeta a qualidade de energia elétrica devido a perdas e interferência. Alguns problemas associados aos efeitos harmônicos são a redução da vida útil das máquinas rotatórias, ressonantes, interferência nos dispositivos de proteção e erro nas medidas de potência. Assim sendo, é necessário o uso de filtro nos inversores para atenuar os componentes harmônicos indesejadas. Existem diferentes tipos de filtros, porém o filtro LC é o mais difundido e utilizado. Como pode ser observado na figura 3.8, filtro LC é a combinação do indutor e capacitor usados em circuitos eletrônicos e servem para minimizar ou eliminar os ruídos causados por alguns equipamentos eletrônicos (ARAÚJO, 2012).

Figura 3.8 – Topologia do filtro LC.



Fonte: Próprio autor (2023).

3.3.1 Dimensionamento do filtro indutivo-capacitivo (filtro LC)

Nesta seção é mostrada a metodologia para dimensionamento do filtro LC para conversores estáticos de energia conectados à rede. Com o propósito de minimizar os componentes harmônicos existentes na saída do inversor, é utilizado um filtro LC de forma que a tensão de saída do inversor seja mais senoidal, isto é, com baixa TDH (taxa de distorção harmônica). Nesta seção busca-se obter, através das equações os valores do indutor e capacitor que atendam a necessidade do projeto. Para cálculo desses valores, inicialmente são especificados alguns parâmetros. Estes parâmetros podem ser vistos na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Especificações do inversor monofásico.

V_{in}	V_0	P_0	ΔI	ΔV	f_s
206V	110V	1Kw	10%	3%	50KHz

Fonte: Próprio autor (2023).

A tensão aplicada no indutor quando a chave estiver fechada, em um período de comutação é dada pela equação 3.1.

$$V_L = V_{in} - \sqrt{2} \cdot V_0 = 50,44V \quad (3.1)$$

Para determinar o valor eficaz da corrente média utiliza-se a expressão que relacione a potência e tensão nominal que é dada pela equação 3.2.

$$I_{0rms} = P_0 / V_0 = 9,1A \quad (3.2)$$

Sabendo do valor eficaz da corrente média, obtém-se o valor da corrente de pico dada pela equação 3.3.

$$I_{0pk} = \sqrt{2} \cdot I_{0rms} = 12,87A \quad (3.3)$$

Determina-se a variação da corrente pela equação 3.4.

$$\Delta I = 0,1 \cdot I_{0rms} = 0,91A \quad (3.4)$$

A variação de tensão é calculada pela equação 3.5.

$$\Delta V = 0,03 \cdot V_{in} = 6,18V \quad (3.5)$$

Pela equação 3.6 é calculado o período de comutação T_s

$$T_s = 1 / f_s = 20\mu s \quad (3.6)$$

Através da potência mínima fornecida à carga e a tensão nominal na carga especificadas

na tabela 3.1, pode-se calcular o valor de R dada pela equação 3.7.

$$R = V_0^2 / P_0 \rightarrow R = 12,1\Omega \quad (3.7)$$

O valor de índice de modulação m é obtido através da relação entre as amplitudes da tensão de pico na rede com a tensão de barramento V_{CC} . O índice de modulação é calculado pela equação 3.8.

$$V_{pkrede} = V_0 \cdot \sqrt{2} = 155,56V \therefore m = V_{pkrede} / V_{CC} \rightarrow m = 0,755 \quad (3.8)$$

Com o valor de índice de modulação já conhecido pode-se calcular a tensão de pico da senoide de saída do inversor pela equação 3.9.

$$V_{pksin} = m \cdot V_{pk} \rightarrow V_{pksin} = 3,775V \quad (3.9)$$

Com os todos os valores obtidos, finalmente é calculado o valor do indutor de filtro usando a equação 3.10.

$$L_1 = ((\Delta I_{nor} \cdot V_{pkrede} \cdot T_s) / \Delta I) \rightarrow L_1 = 566,6 \mu H \quad (3.10)$$

Finalmente, pela equação 3.11 pode-se obter a expressão para cálculo da capacitância necessária para o filtro.

$$C_1 = \frac{P_0}{2\pi f V_0 \Delta V} \rightarrow C_1 = 2084 \mu F \quad (3.11)$$

Geralmente, os inversores são classificados de acordo com a tensão produzida. Existem três formas de ondas mais comum, que pode ser quadrada, quadrada modificada ou retangular e senoidal. A forma de onda de tensão de saída indica a qualidade e o custo do inversor. Essa forma de onda depende do método de conversão e a filtragem utilizados para suaviza-la e minimizar os conteúdos harmônicos indesejáveis que resultam do processo de conversão (GUIMARÃES et al., 2004).

3.4 CONEXÃO COM A REDE ELÉTRICA

O inversor além de converter potência é um componente utilizado em sistema solar fotovoltaico para estabelecer a comunicação entre o sistema fotovoltaico e a rede elétrica. Para tanto, algumas exigências devem ser atendidas a fim de garantir a segurança e a confiabilidade em sistemas conectados à rede. Durante a conexão com a rede elétrica deve-se levar em consideração os seguintes fatores: Sincronismo, regulação de tensão, nível de corrente a ser

injetada na rede, distorção harmônica, monitoramento anti-ilhamento, entre outras (MARANGONE, 2012).

3.4.1 Sincronismo

Os sistemas de energia solar precisam de equipamentos de conversão de energia com um controle a fim de garantir um desempenho adequado e satisfatória na integração com a rede. No entanto, o inversor além de converter tensão e corrente contínua em tensão e corrente alternada agrega a função de controle de fluxo de potência. Os inversores que atuam como fonte de tensão apresentam duas estratégias de controle, sendo que, pode ser controlado corrente ou tensão. O inversor de fonte de tensão controlado por tensão baseia-se no controle do ângulo entre a tensão de saída do inversor e a tensão da rede com o intuito de controlar o fluxo de potência, ao passo que nos inversores controlados por corrente, as componentes ativas e reativas da corrente injetada na rede são controlados através da técnica de modulação PWM.

Nos inversores controlados por corrente, as distorções nas tensões da rede e a defasagem de tensão é menos sensível, também possui uma resposta mais rápida e adequada. O inversor controlado por tensão é sensível a pequenos erros de fase, o que pode acarretar em elevadas correntes harmônicas quando a tensão da rede estiver distorcida. Sendo assim, nos inversores conectados à rede elétrica é recomendado o controle por corrente (SILVA, 2019). O controlador de corrente por ser responsável a garantir a estabilidade do sistema, assim com boa qualidade de energia elétrica abastecida à rede, é essencial garantir o seu adequado funcionamento para que o inversor consiga integrar com a rede de maneira satisfatória, cumprindo com as normas que fixam limites de injeção de correntes harmônicas e da taxa de distorção harmônica. O desempenho de controlador de corrente em sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica é diretamente influenciado pelo desempenho do sistema. As informações da amplitude, da frequência e da fase da rede precisam de um algoritmo confiável capaz de providenciar essas informações com agilidade e melhor precisão, para tal, é necessário a utilização do sistema de sincronismo baseado em PLL (do inglês, *Phase Lockheed loop*). A técnica de controle de sincronismo é muito importante visto que o inversor fica monitorando constantemente o deslocamento entre as fases, a frequência, e a potência fornecida à rede. (MACHADO; SILVA, 2017).

3.5 PROJETO DE CONTROLE

A técnica de controle de corrente através de diagrama de blocos tem sido amplamente estudada e aplicada por muitos autores em diversas aplicações. Essa técnica de controle oferece inúmeras vantagens, tais como: limitações de corrente exigida pela norma, regulação de tensão, imunidade ao elevado efeito harmônico, uso de controladores simples (Proporcional-Integral PI) e também proporciona a frequência de comutação constante (MIRANDA-TERÁN et. al., 2014).

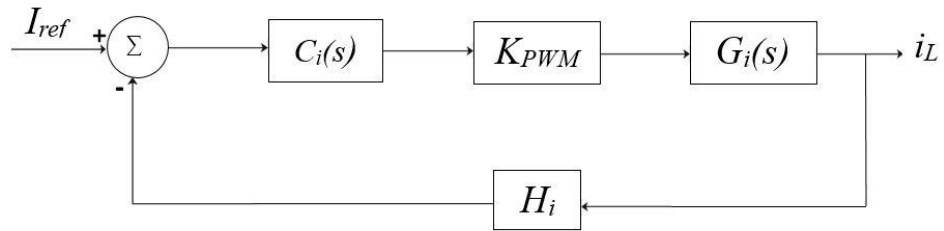
Segundo Dos Santos (2022), uma das finalidades do conversor é gerar a potência ativa na rede elétrica, respeitando as limitações exigidas por normas vigentes. Para esse propósito, é necessário que a corrente de saída permaneça no formato senoidal e que esteja em fase com a tensão da rede elétrica. Para que a corrente de saída no inversor e a tensão na rede não fiquem variando de modo desproporcional, faz-se necessário a utilização de dois compensadores: um é de corrente da saída que vai operar no sentido de atenuar as variações bruscas de corrente através do indutor e o outro é da tensão de entrada que deverá atuar no sentido de atenuar as variações bruscas da tensão na entrada.

3.5.1 Controle de corrente

A malha de controle de corrente é comumente utilizada em sistemas conectados à rede elétrica com propósito de fornecer a corrente no formato senoidal na saída do inversor e sincronizada com a tensão da rede. Para ter uma corrente no formato senoidal de baixa distorção harmônica na saída do inversor, é necessário que haja um controlador da corrente de saída.

Na malha de controle gera-se uma perturbação na corrente de referência com o intuito de se observar se a corrente de saída vai seguir esta perturbação. O sinal da senoide é obtido através de PLL e este sinal senoidal com amplitude unitária é multiplicado com a referência. Em seguida, o sinal é amostrado e comparado com o sinal medido no sensor, depois o erro é gerado. Este sinal de erro é enviado para um controlador e este por sua vez gera um sinal de controle que passa para o modulador PWM que posteriormente produz uma modulação por largura de pulso considerando uma referência senoidal. A figura 3.9 mostra o diagrama de blocos usado para controle de corrente. Através desta técnica de controle é possível regular a corrente através do indutor.

Figura 3.9 – Malha de controle de corrente injetada na rede.



Fonte: Próprio autor (2023).

No diagrama de blocos da figura 3.9, encontram-se os seguintes elementos:

I_{ref} : Corrente de referência;

$C_i(s)$: Compensador de corrente;

K_{PWM} : Ganho do modulador;

$G_i(s)$: Função de transferência que relaciona a corrente através do indutor;

i_L : corrente no indutor do inversor;

H_i : Ganho de realimentação.

Com a finalidade de projetar compensadores usados no inversor, primeiramente é necessário obter as funções de transferência das variáveis a serem controladas. Considerando inversor como uma fonte de tensão, com modulação de três níveis no qual a tensão de saída depende da razão cíclica gerada, que define período de chaveamento (SANTOS, 2022).

$$G_i(s) = \frac{V_{in}}{L \cdot s} \quad (3.12)$$

A corrente de referência usada neste projeto é mostrada na equação 3.13.

$$I_{ref_i} = 2A \quad (3.13)$$

Usando o valor da corrente de referência I_{ref_i} como referência do compensador $C_i(s)$ e o valor da tensão de entrada nominal V_{in} mostrada na tabela 3.1, a malha de controle apresentará um ganho de realimentação $H_i(s)$ como ilustra a equação 3.14.

$$H_i(s) = \frac{I_{ref_i}}{\sqrt{2} \cdot I_{orms}} \rightarrow H_i(s) = 0,156dB \quad (3.14)$$

Em seguida, obtem-se o ganho do modulador através da equação 3.15. A função

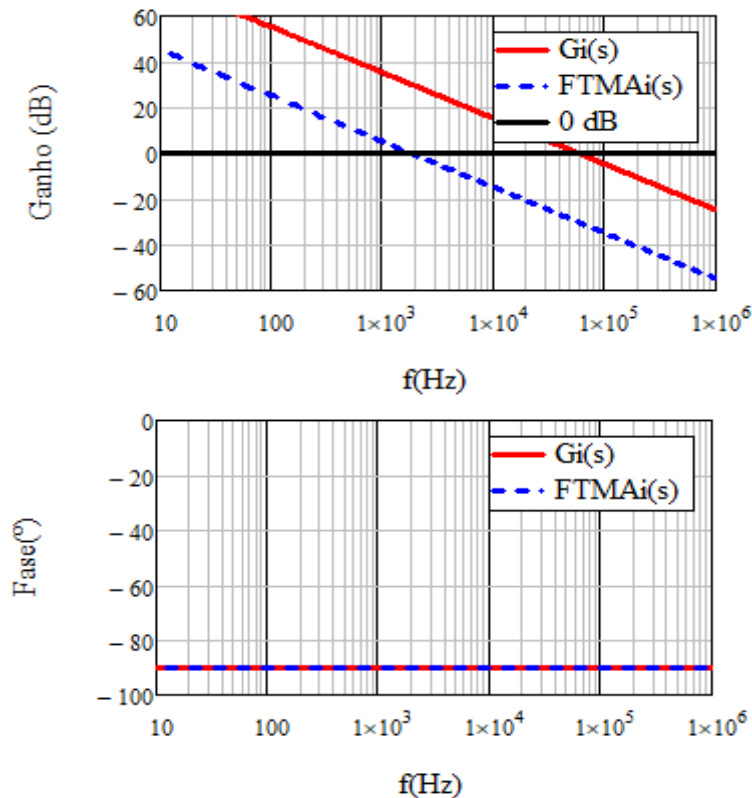
modulador é converter o sinal de controle em um sinal PWM. Pode-se obter essa conversão a partir da comparação entre o sinal de controle e a portadora triangular de amplitude $V_m = 5V$. O modulador PWM possui um circuito integrado CI SG3525 para acionamento das chaves, este CI apresenta especificações para amplitude da portadora triangular. Através dessa amplitude obtém-se o ganho do modulador PWM.

$$K_{PWM} = \frac{1}{5} = 0,2 \quad (3.15)$$

A função de transferência em malha aberta FTMAi(s) é obtida através da equação 3.16 e seu diagrama de Bode é representado na figura 3.10, juntamente com a FT $G_i(s)$. O diagrama de Bode a ser compensado apresenta um declive de -20dB/década cuja a característica classifica o sistema como de primeira ordem. Este declive junto com a margem de fase maior que 0° , comprovam a estabilidade do sistema. Nesse caso, para melhorar a velocidade da resposta do sistema perante a perturbações externas é necessário a adição de um compensador.

$$FTMAi(s) = G_i(s) \cdot K_{PWM} \cdot H_i(s) \quad (3.16)$$

Figura 3.10 – Diagrama de Bode.



Fonte: Próprio autor (2023).

3.5.2 Projeto da malha de corrente (PI com filtro)

Segundo a teoria de controle, a correta colocação da frequência de cruzamento da FTMAi(s) é um fator muito importante no que se refere a estabilidade do sistema de controle e este valor deverá ser no máximo um quarto da frequência de cruzamento, ou seja, menor ou igual a $f_c = f_s/4$. Vale destacar que, quanto maior for a frequência de cruzamento, o sistema compensado terá uma maior velocidade de resposta, visto que um maior velocidade de resposta do sistema pode ser uma vantagem em muitas aplicações (OLIVEIRA FILHO, 2010).

Assim:

$$f_{ci} = \frac{f_{s1}}{4} = 10\text{KHz} \quad (3.17)$$

Uma vez que o compensador escolhido para este projeto é do tipo PI, então a função de transferência $C_i(s)$ pode ser obtida através das colocações a seguir.

Sabendo que a frequência de zero do compensador é alocada uma década abaixo da frequência de cruzamento a fim de obter um declive na curva de ganho a -20 dB/década na passagem pelo ganho unitário em laço aberto. A equação 3.18 mostra a frequência do zero escolhido.

$$f_{zi} = \frac{f_c}{10} = 1\text{KHz} \quad (3.18)$$

Um polo é colocado na origem para minimizar o erro estático:

$$f_p = 0 \quad (3.19)$$

A frequência de filtro deve estar alocada abaixo da frequência de comutação para evitar problemas de instabilidade. Portanto, um outro polo é colocado na metade da frequência de chaveamento como mostra a equação 3.20.

$$f_{pi} = \frac{f_{si}}{2} = 25\text{ KHz} \quad (3.20)$$

Com os valores de f_{zi} e f_{pi} , pode-se encontrar de modo numérico o zero e o pólo do compensador, expressado na equação 3.21 e 3.222.

$$z_i = 2\pi f_{zi} \rightarrow z_i = 6,283 \times 10^3 \text{rad/s} \quad (3.21)$$

$$p_i = 2\pi f_{pi} \rightarrow p_i = 1,571 \times 10^5 \text{ rad/s} \quad (3.22)$$

Com o valor do zero de compensador, pode-se calcular constante de tempo T_i através da equação 3.23.

$$T_i = \frac{1}{z_i} \rightarrow T_i = 1,592 \times 10^{-4} \text{ s} \quad (3.23)$$

A través da equação 3.24 pode-se calcular o valor adicional necessário para que a FTMAi(s) em questão alcance a frequência de cruzamento desejada.

$$H_i = 20 \cdot \log (|FTMAi(s)|) = - 14,893 \text{ dB} \quad (3.24)$$

No entanto, o compensador terá que ter um ganho de acordo com o valor fornecido na equação 3.25.

$$G_1 = 10^{\frac{|H|}{20}} \rightarrow G_1 = 5,555 \quad (3.25)$$

Com todas as variáveis necessárias, finalmente tem-se o compensador para controle de corrente:

$$C_i(s) = G_{Ci} \cdot \frac{s+z_i}{s \cdot (s+p_i)} \quad (3.26)$$

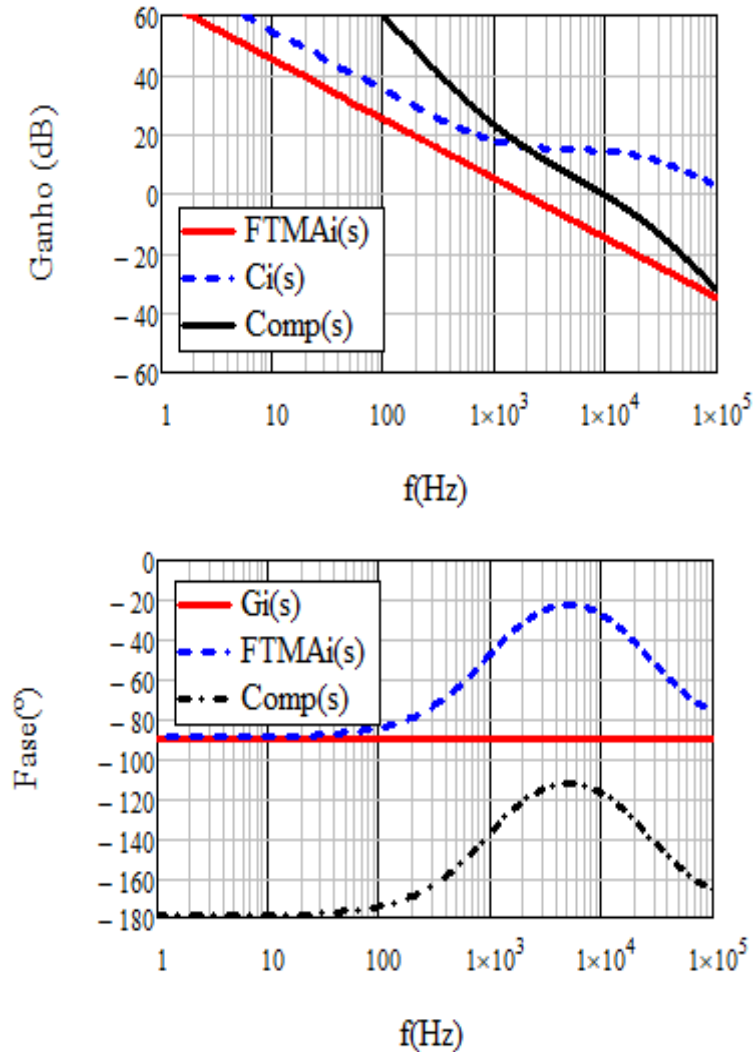
Onde G_{Ci} é obtido através da seguinte equação:

$$G_{Ci} = G_1 \cdot p_i \quad (3.27)$$

A função de transferencia em malha aberta FTMAi do compensador pode ser conseguida através da equação 3.28. O diagrama de Bode do sistema não compensado, compensador e sistema compensado é mostrado na figura 3.11, no qual pode-se notar que no gráfico de resposta a frequência de cruzamento ocorre em 1KHz, com a curva de ganho apresentando um declive de -20 dB/década e uma margem de fase de $M_f = 62,5^\circ$.

$$FTMAicomp(s) = FTMAi(s) \cdot C_i(s) \quad (3.28)$$

Figura 3.11 – Diagrama de Bode para planta compensada.

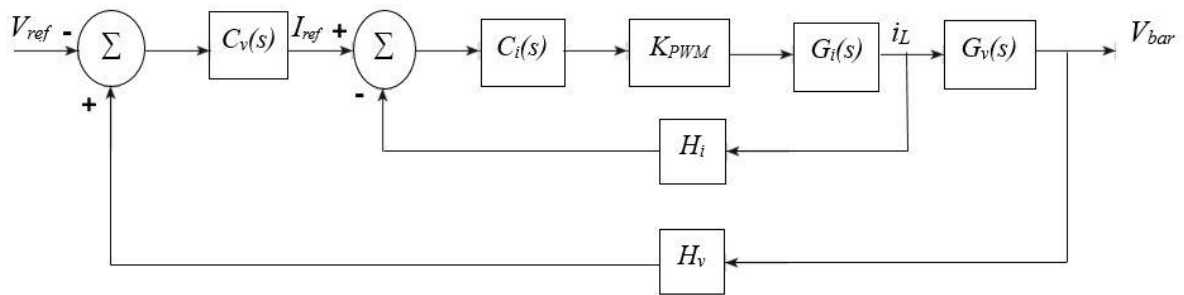


Fonte: Próprio autor (2023).

3.6 Controle de tensão no barramento CC

Para que a tensão no barramento CC seja mantida dentro dos limites aceitáveis, é necessário utilizar um controlador de tensão. Este controlador tem como principal objetivo manter a tensão no barramento constante. A estratégia de controle usada nesta seção é semelhante ao anterior, só que neste caso a tensão no barramento CC é tomado como variável a ser controlada. O diagrama de blocos referente ao controlador de tensão é mostrado na figura 3.12. Vale destacar que o diagrama que representa a tensão no barramento fica no exterior do diagrama de controle de corrente, uma vez que todo sistema de controle possui o funcionamento em cascata.

Figura 3.12 – Diagrama de blocos referente ao controlador de tensão e a corrente.



Fonte: Próprio autor (2023)

No circuito da figura 3.12, encontram-se os seguintes elementos:

V_{ref} : tensão de referência;

$C_v(s)$: Compensador de tensão;

$G_v(s)$: Função de transferência em relação a tensão no barramento;

H_v : Ganho de realimentação de tensão.

Em seguida, é mostrada a modelagem matemática que reflita a função de transferência em malha aberta (FTMA). Segundo Santos (2022), a partir do diagrama referente ao controlador de tensão obtém-se a função de transferência $G_V(s)$ como mostra a mostrada na equação 3.29.

$$G_V(s) = \frac{V_{in}}{2 \cdot s \cdot L} \quad (3.29)$$

Usando o valor da tensão de referência v_{refv} como referência do compensador $C_V(s)$ e o valor da tensão de entrada V_{in} mostrada na tabela 3.1, a malha de controle apresentará um ganho de realimentação $H_V(s)$ como ilustra a equação 3.30.

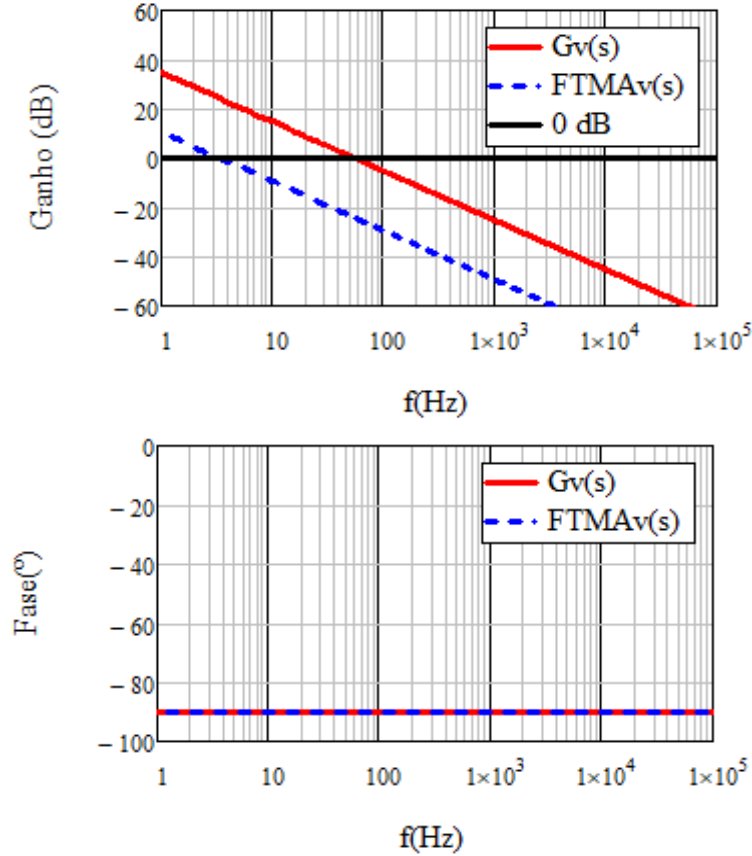
$$v_{refv} = 2,0V \quad (3.30)$$

$$H_V(s) = \frac{v_{refv}}{V_i} \rightarrow H_V(s) = \frac{2}{206} = 9,709 \times 10^{-3} \quad (3.31)$$

Observando a figura 3.13, nota-se que esta apresenta relações para o sistema de controle, assim, a função de transferência em malha aberta é dada pela equação 3.32 e seu diagrama de bode é representado na figura 3.13, no qual pode-se observar que a curva de ganho apresenta um declive de -20dB/década.

$$FTMA_v(s) = G_v(s) \cdot H_V(s) \cdot \frac{1}{H_v} \quad (3.32)$$

Figura 3.13 – Diagrama de Bode para planta $FTMA_v(s)$.



Fonte: próprio autor (2023).

3.6.1 Projeto da malha de tensão (compensador PI)

Nessa seção deseja-se obter a função de transferência de laço aberto (FTLA) com frequência de cruzamento f_{cv} abaixo da frequência de cruzamento f_{ci} do projeto anterior. Nessa técnica de controle é necessário garantir o desacoplamento entre a malha de tensão e de corrente. Também, a frequência de cruzamento da $FTMA_v(s)$ deve ser no máximo menor ou igual a $f_{cv} = f_{s2}/4$, ou seja, abaixo de um quarto da frequência de ondulação de tensão em cima do capacitor C_0 do barramento CC. Assim tem-se:

$$f_{cv} = \frac{f_{s2}}{4} \rightarrow f_{cv} = 15\text{Hz} \quad (3.33)$$

Para este projeto foi escolhido o compensador proporcional integral no qual a função de transferência $C_v(s)$ é obtida mediante as seguintes colocações:

Para se obter um declive na curva de ganho correspondente a -20 dB/década, a frequência do zero do compensador é colocada um quinto abaixo da frequência de cruzamento. Desse modo, escreve-se a equação 3.34 de seguinte forma:

$$f_{zv} = \frac{f_{cv}}{5} \rightarrow f_{zv} = 3\text{Hz} \quad (3.34)$$

O polo é colocado na origem para minimizar o erro estático.

$$f_{pv} = 0 \quad (3.35)$$

O valor do zero de compensador pode ser encontrado através da seguinte equação:

$$z_v = 2\pi f_{zv} \rightarrow z_v = 18,85\text{rad/s} \quad (3.36)$$

Com o valor do zero de compensador pode-se calcular constante de tempo T_v através da equação 3.37.

$$T_v = \frac{1}{z_v} \rightarrow T_v = 0,053\text{s} \quad (3.37)$$

Para que a função de transferência em laço aberto alcance a frequência de cruzamento desejada é necessário obter um valor adicional, ou seja, o ganho do compensador. Então, através da equação 3.38 encontra-se, conseqüentemente a equação para tal valor adicional. Assim, tem-se que:

$$H_2 = 20 \cdot \log(|FTMAv(s)|) = -11,28 \quad (3.38)$$

Sabendo que $H = 20 \cdot \log(G)$, assim tem-se:

$$G_2 = 10^{\frac{|H|}{20}} \rightarrow G_2 = 3,664 \quad (3.39)$$

Com todas as variáveis necessárias, finalmente obtém-se o compensador para o controle de tensão:

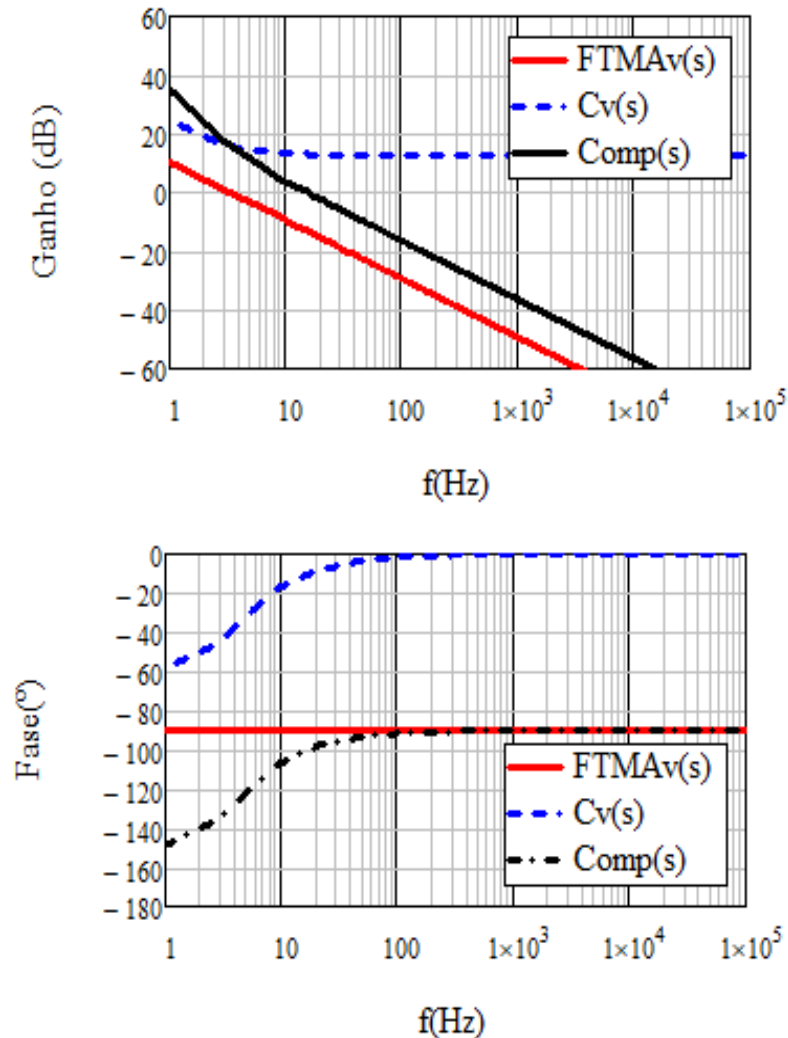
$$C_V(s) = G_2 \cdot \frac{s+z}{s} \quad (3.40)$$

A função de transferência para a planta compensada do sistema pode ser obtida através da seguinte equação:

$$FTMAv_{comp}(s) = FTMAv(s) \cdot C_V(s) \quad (3.41)$$

Assim, baseado na equação 3.45, o diagrama de Bode do sistema compensado é mostrado na figura 3.14 no qual pode-se notar que a frequência de cruzamento ocorre com a curva de ganho apresentando um declive de -20 dB/década e uma margem de fase de $M_f = 78,69^\circ$.

Figura 3.14 – Diagrama de Bode da planta compensada.



Fonte: Próprio autor (2023).

Vale destacar os cálculos feitos neste projeto podem ser calculados manualmente ou por meio de algumas ferramentas computacionais, como, por exemplo: *Matlab*, *Scilab* ou *Octave*, *PSIM*, *Mathcad* entre outros. Neste projeto os resultados foram obtidos por meio de dois softwares conhecidos como *PSIM* e *Mathcad*, isso devido a agilidade e flexibilidade que estes oferecem.

CAPÍTULO IV

4.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

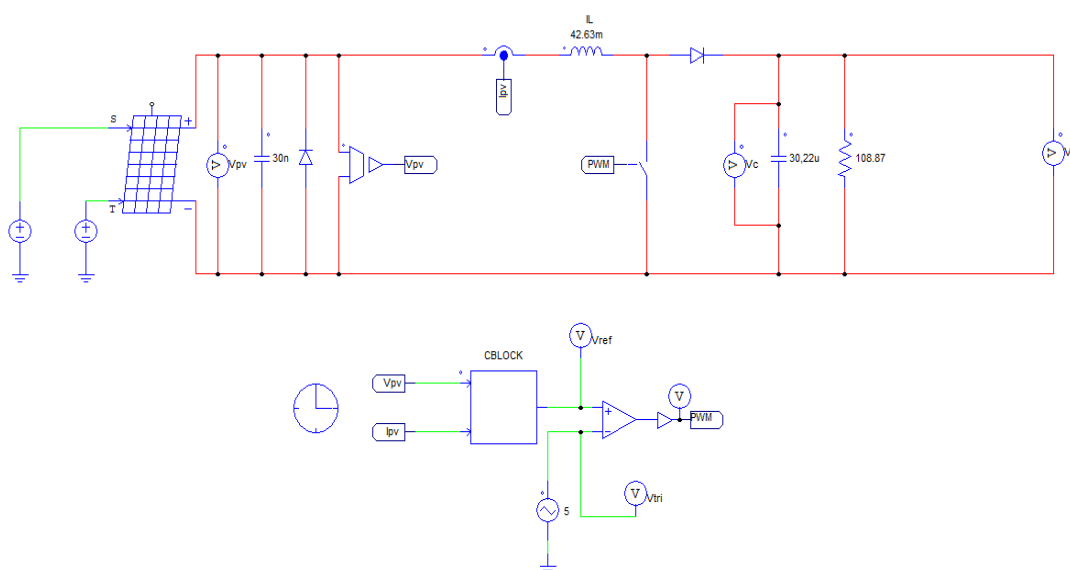
Os resultados de simulação são muito importantes para analisar o comportamento do sistema projetado e também pode servir de base para implementações experimentais. Nessa seção serão apresentados todos os resultados de simulação obtidos durante a elaboração deste trabalho, no qual é analisado o comportamento do conversor *boost* em relação ao seu desempenho estático, o comportamento dinâmico do algoritmo MPPT, o comportamento do inversor em regime permanente e transitório, e por fim o comportamento do sistema completo mediante a variação de irradiação.

4.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA FV

Para a obtenção dos resultados, foi utilizado o *Solar Module-Physical Model* (Módulo Fotovoltaico-Modelo Físico) do PSIM conectado a um conversor elevador, junto com sensores de tensão e de corrente. O capacitor e o diodo em paralelo com o painel fotovoltaico foram utilizados como sugestão do próprio manual do PSIM a fim de garantir a convergência dos cálculos envolvendo o painel. Vale salientar que, os parâmetros utilizados no sistema projetados são os mesmos calculados através das equações apresentadas no capítulo 2.

A figura 4.1 representa o circuito usado na simulação do conversor elevador, tendo um painel fotovoltaico como fonte de alimentação.

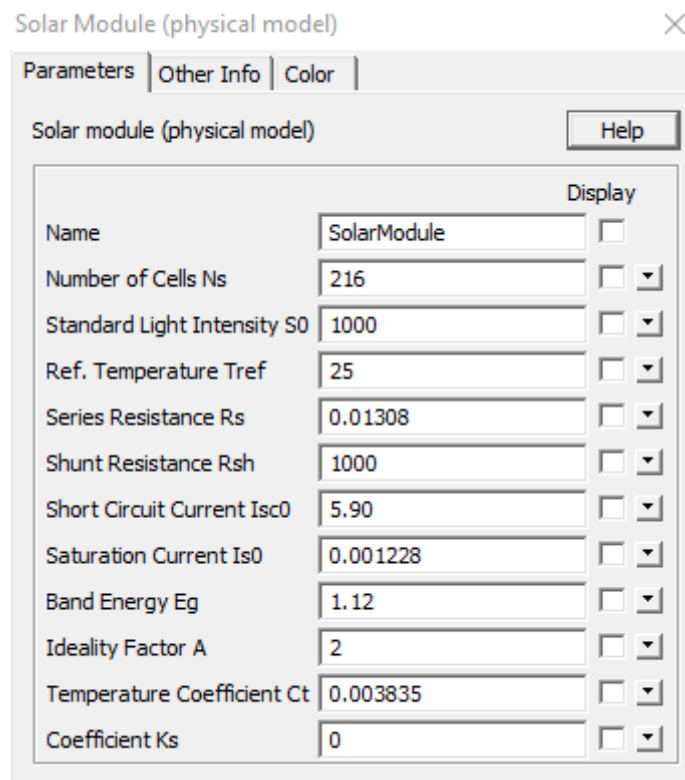
Figura 4.1 – Esquemático do sistema simulado no PSIM.



Fonte: Próprio autor (2023).

A figura 4.2 apresenta os parâmetros do módulo fotovoltaico *Solar Module-physical model*. O módulo possui parâmetros como *Number of Cells ns* (número de células em série), *Standard Light Intensity* (Intensidade da Luz padrão, em W/m²), *Ref. Temperature Tref* (temperatura de referência, dada em °C), *Series Resistance Rs* (Resistência em série Rs, em Ω), *Shunt Resistance Rsh* (Resistência de derivação Rsh, em Ω), *Short Circuit Current Isc* (Corrente de curto circuito, em A), *Saturation Current Is* (Corrente de saturação, em ampères, que corresponde à corrente de saturação do diodo), *Band Energy Eg* (Banda de Energia, em V), *Ideality Factor A* (Fator de idealidade) que corresponde ao coeficiente de emissão do diodo, *Temperature coefficient Ct* (Coeficiente de temperatura, em A/K) e por fim, *Coefficient Ks*, que define como a intensidade da luz afeta a célula em uma certa temperatura (MANUAL DO PSIM, 2021).

Figura 4.2 - Parâmetros do *Solar Module (physical model)*.

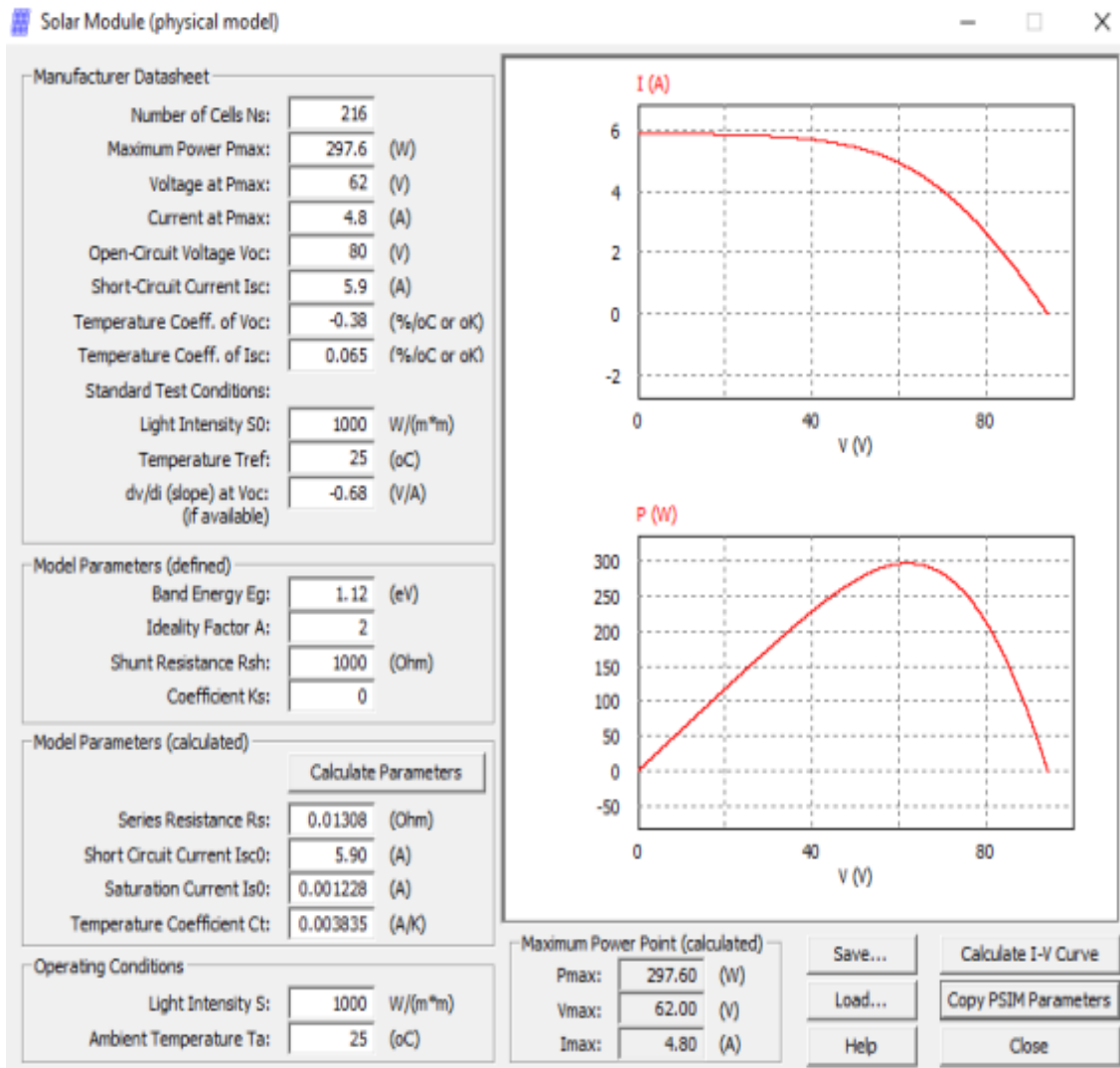


Fonte: Próprio autor (2023).

Para este projeto, foi utilizado um painel fotovoltaico composto por 216 células em série. Os parâmetros foram escolhidos de modo que as características do modelo físico do painel fotovoltaico correspondessem ao Módulo Solar – Modelo Funcional (do inglês *Solar Module – Functional Model*). No entanto, para que essas características elétricas fossem preservadas sem ter que modificar os parâmetros do conversor *boost*, foi acrescentado ao modelo físico valores

que correspondessem eletricamente ao modelo funcional. Isso porque a princípio, todo o projeto do sistema e simulação foi obtido utilizando o modelo funcional do painel fotovoltaico do PSIM. A figura 4.3 mostra os parâmetros do módulo fotovoltaico.

Figura 4.3 – Parâmetros do módulo fotovoltaico (*physical model*).

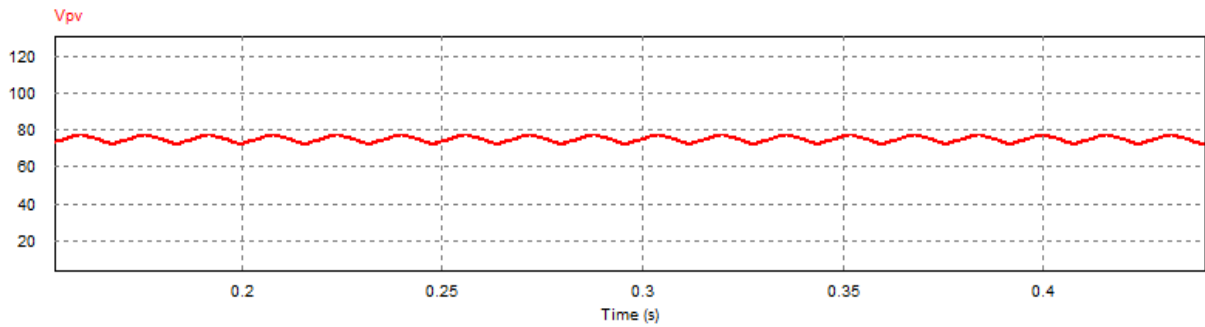


Fonte: Próprio autor (2023).

4.3 DESMPENHO DO CONVERSOR BOOST

Para todos os resultados nesta seção serão considerados a operação em regime permanente do conversor boost para uma radiação de 1000W/m² e temperatura de célula de 25°C. A figura 4.4 representa a forma de onda referente a tensão do barramento CC de entrada do conversor boost. Já a figura 4.5 são mostradas a tensão de referência, tensão da portadora triangular e sinal PWM.

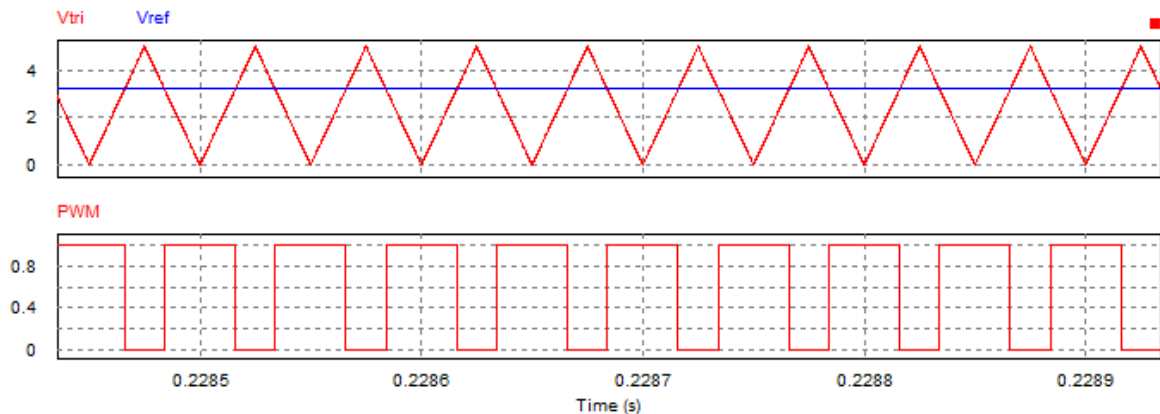
Figura 4.4 – Forma de onda de V_{pv} .



Fonte: Próprio autor (2023).

Normalmente, os parâmetros elétricos do módulo solar fotovoltaico são apresentados sob condições padrão. A figura 4.3 mostra os parâmetros do painel, no qual pode-se observar que a tensão de saída que é entregue à conversor boost, sob condições ideais da radiação e temperatura é de 62V. Mas no resultado da simulação observa-se que esse valor aumentou para 77,8V.

Figura 4.5 – Formas de onda de V_{tri} , V_{ref} e V_{PWM} .

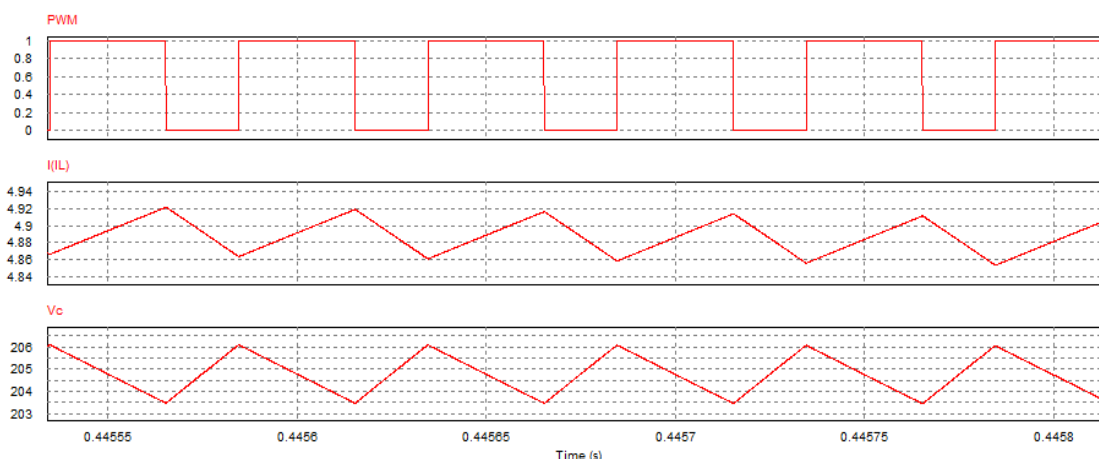


Fonte: Próprio autor (2023).

Pela figura 4.5 mostra a forma de onda da portadora, a tensão de referência gerada pelo bloco MPPT e o sinal PWM enviado à chave do conversor boost.

A figura 4.6 representa a forma da onda da tensão no gatilho, corrente no indutor e a tensão no capacitor. Pode-se observar que o valor médio da corrente no indutor, que corresponde à corrente produzida pelo painel, é de 4,8A e a ondulação da corrente média no indutor ($I_{Lm\acute{a}x} - I_{Lm\acute{i}n}$) é de 0,048A. A ondulação da tensão no capacitor é de 2,1V e o valor médio da tensão deste é de 206V. Estes valores foram encontrados através da simulação no PSIM.

Figura 4.6 - Formas de onda de V_{PWM} , I_L e V_C .

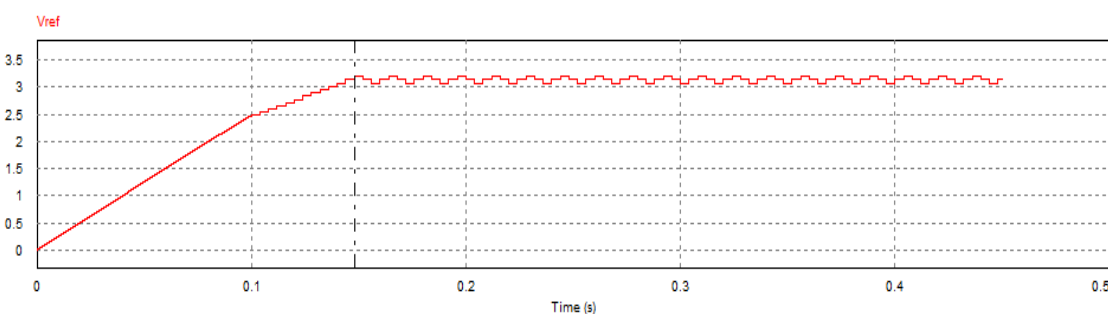


Fonte: Próprio autor (2023).

4.3.1 Comportamento do MPPT P&O

Com o propósito de certificar se realmente o algoritmo estava rastreando a máxima potência do painel, considerou-se a radiação e temperatura constantes ($1000\text{W}/\text{m}^2$ e 25°C , respectivamente). A figura 4.7 representa a forma de onda da operação de *soft starter*, onde pode-se notar um aumento da tensão de referência de forma controlada até atingir o valor de $2,5\text{V}$ em 100ms . Geralmente, a operação *soft starter* é usado para controlar a tensão de partida, pela referida figura observa-se que depois da tensão de partida a tensão aumentou gradativamente até alcançar MPP em $3,2\text{V}$ em 148ms (SILVA, 2021).

Figura 4.7 – Operação de *soft starter*.

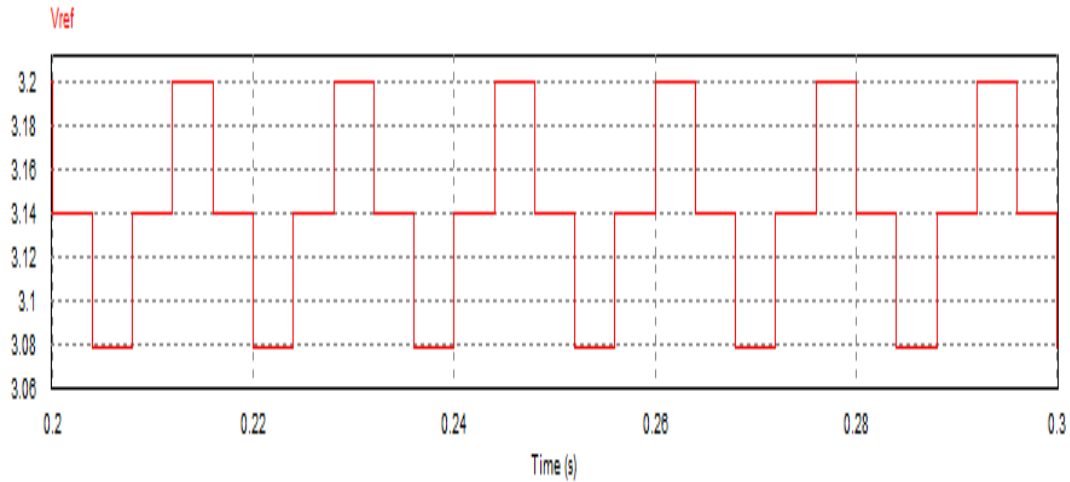


Fonte: Próprio autor (2023).

A figura 4.8 representa a tensão de referência com o conversor funcionando em regime permanente. Pode-se observar que o algoritmo fornece uma tensão de referência que fica variando constantemente com o propósito de buscar o ponto de máxima potência. Essa variação ocorre em três degraus para cima e depois três degraus para baixo. Isso mostra que o algoritmo

está funcionando de acordo com o projetado, visto que uma das características do P&O é variar em torno de condição de equilíbrio.

Figura 4.8 – V_{ref} no intervalo de 200ms a 300ms.



Fonte: Próprio autor (2023).

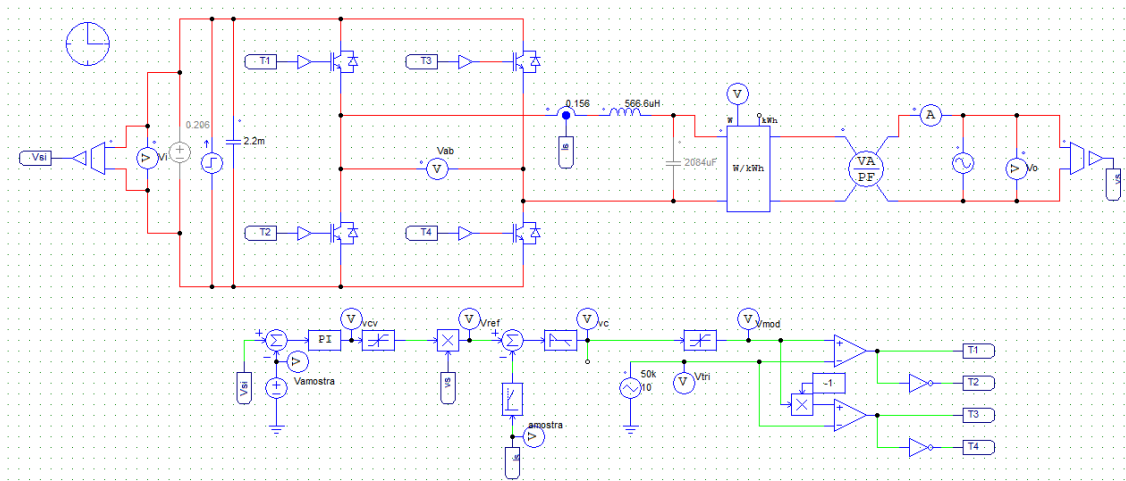
4.4 DESCRIÇÃO DO INVERSOR

Nesta seção será apresentada uma breve descrição sobre o inversor monofásico de três níveis usado neste projeto. O inversor é alimentado pelo conversor boost, este é composto por dois braços de interruptores (do tipo IGBT) que operam de forma complementar. Geralmente, estes interruptores são controlados a partir de um circuito comando que opera com a técnica de modulação PWM. Este circuito de comando conta com dois comparadores que fazem a comparação entre o sinal modulante V_{ref} e o sinal da portadora triangular V_{tri} . Este circuito de comando, para além de acionar os interruptores também serve para controlar a tensão no barramento CC e a corrente a ser injetada na rede elétrica.

Apesar da estratégia de modulação aplicada ao inversor, a tensão que se encontra na saída do braço de inversor será constituída por pulsos retangulares. Para algumas aplicações este formato de pulso é inadequado para alimentar cargas, isso devido a elevada distorção harmônica que nele se encontra. Neste caso, preciso usar filtro para reduzir ou eliminar componentes harmônicos indesejáveis.

A estrutura típica do inversor monofásico e o comando de interruptores é mostrada na figura 4.9.

Figura 4.9 – Inversor monofásico e o comando de interruptores.



Fonte: Próprio autor (2023).

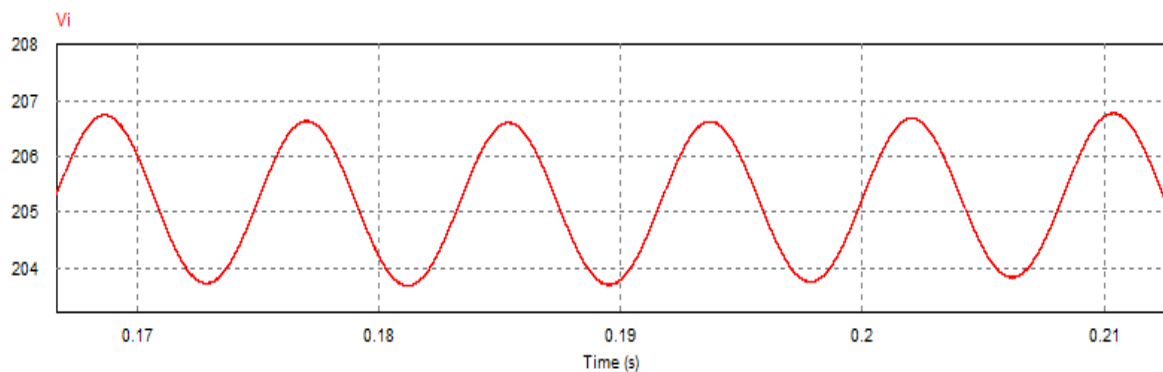
4.5 DESEMPENHO DO INVERSOR

Nessa seção será avaliada a integração entre inversor e a rede. A rede elétrica é um sistema complexo e existe inúmeras razões que podem afetar o seu funcionamento dinâmico, como a comutação de cargas ligadas a mesma, entre outras razões que podem causar sua instabilidade. Logo, o inversor deve ser continuamente monitorado de forma a possibilitar o correto funcionamento do sistema.

4.5.1 Resultados de simulação em regime permanente

Neste tópico serão realizadas as simulações em regime permanente. A figura 4.10 exibe a ondulação da forma de onda da tensão CC no barramento do inversor, no qual pode-se observar uma ondulação 3V, sobre um valor médio de 206V.

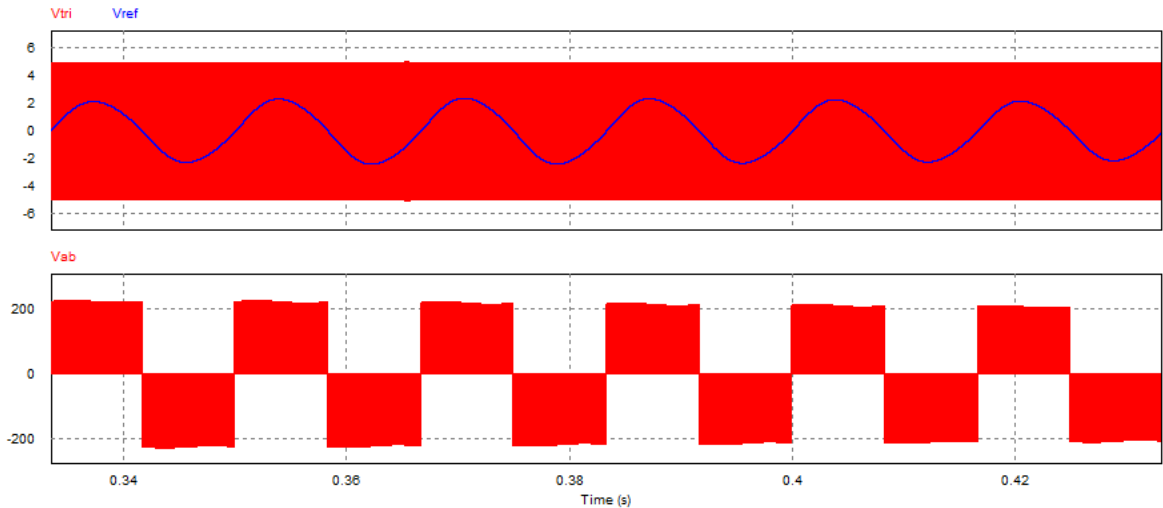
Figura 4.10 – Tensão no barramento do inversor.



Fonte: Próprio autor (2023).

A figura 4.11 mostra a forma de onda da tensão da portadora triangular V_{tri} , do sinal modulante V_{ref} e da tensão de saída do inversor a três níveis antes do filtro LC, onde V_{ab} apresenta pulsos positivos no semiciclo positivo da tensão da rede e pulsos negativos no semiciclo negativo da tensão da rede, no qual fica evidente a presença de um nível de tensão $+V_{CC}$, 0 e $-V_{CC}$.

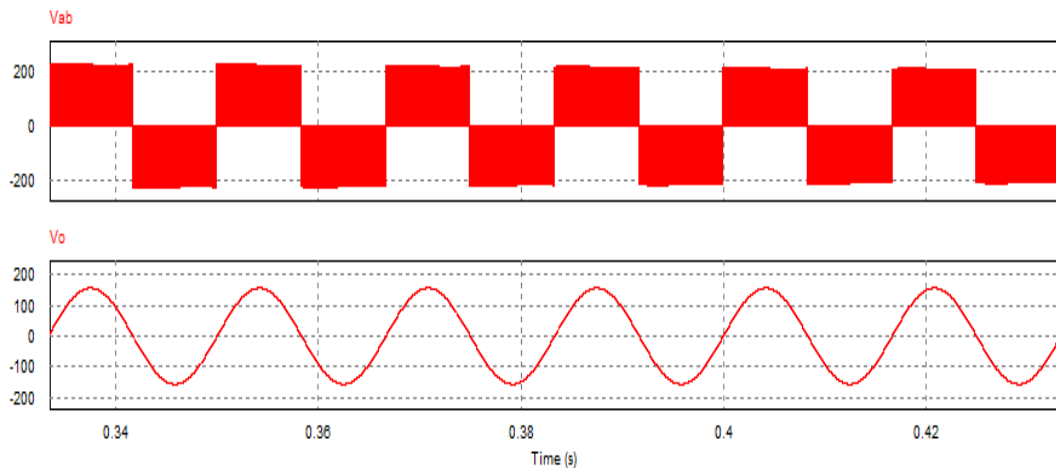
Figura 4.11 – Formas de onda da V_{tri} , V_{ref} e V_{ab} .



Fonte Próprio autor (2023).

A figura 4.12 mostra a forma de onda de V_{ab} antes e depois do filtro LC do inversor e a tensão de saída V_0 do inversor, respectivamente. Após o filtro, a tensão V_0 apresenta um formato de onda puramente senoidal. A tensão possui 155,56V de pico e $109,9 V_{rms}$ como esperado.

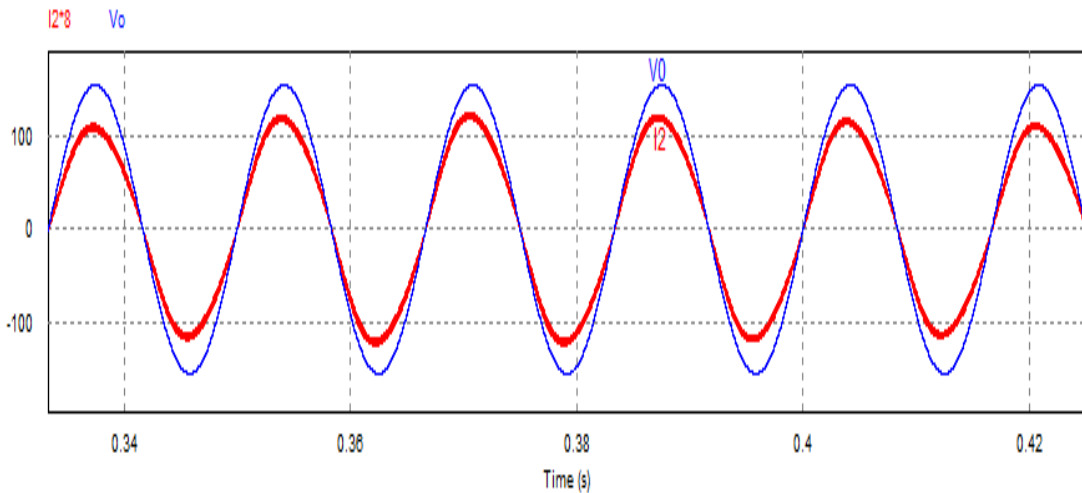
Figura 4.12 – formas de onda da tensão V_{AB} e a tensão de saída V_0 .



Fonte: Próprio autor (2023).

A figura 4.13 mostra a forma de onda da corrente e tensão da rede. A forma de onda da corrente está representada em cor vermelha (multiplicado por 8) e da tensão da rede está representada em cor azul. Pela referida figura nota-se que as curvas de corrente e tensão estão sincronizadas, evidenciando que o erro é quase desprezível para a forma-de-onda senoidal em 60Hz.

Figura 4.13 – Formas de onda de corrente e a tensão da rede.

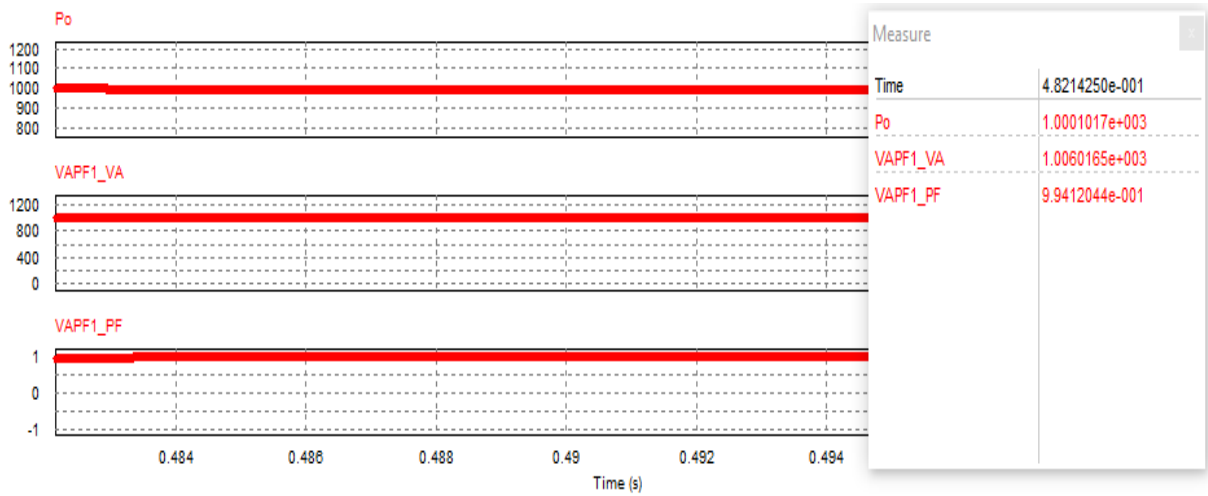


Fonte: Próprio autor (2023).

Na figura 4.14 são apresentadas as potências ativa e aparente, bem como o fator de potência do inversor em regime permanente. Usando o próprio software PSIM para calcular a potência ativa, aparente e o fator de potência obtém-se 1kW, 1,006kVa e 0,994, atrasado.

Os inversores *on grid*, geralmente são projetados para injetar a corrente na rede de distribuição, com defasagem controlada em relação à tensão que se encontra na rede. Isso permite ao inversor controlar a quantidade de potência ativa e reativa injetada na rede. A injeção de elevada potência ativa tem implicação direta no que concerne ao elevado fator de potência. Se a potência reativa for alta, significa de que o fator de potência vai diminuir e consequentemente, a potência aparente será pouco convertida em trabalho útil. Por isso, é crucial controlar a injeção da potência reativa para assim obter um fator de potência dentro dos limites aceitáveis.

Figura 4.14 – Potência ativa, aparente e o fator de potência na saída do inversor.

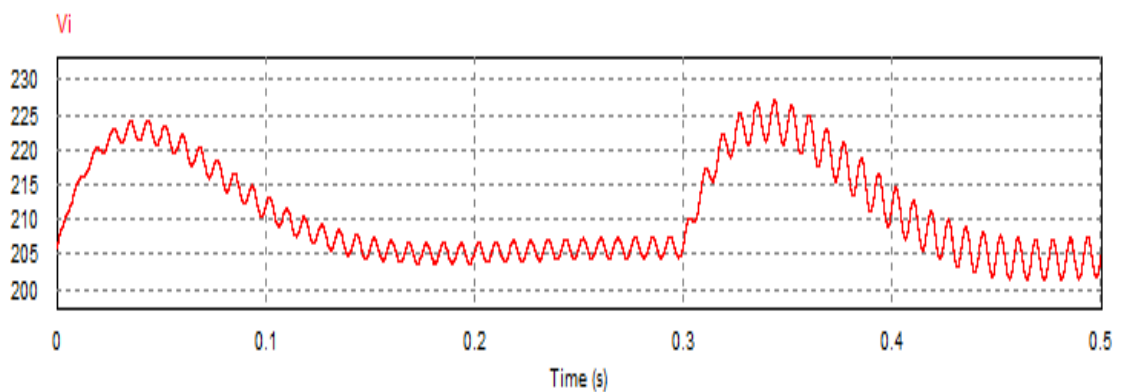


Fonte: Próprio autor (2023).

4.5.2 Resultados de simulação em regime transitório

O primeiro parâmetro a ser avaliado é comportamento da tensão no barramento CC. A figura 4.15 representa a forma de onda da tensão no barramento CC na qual pode-se observar que essa tensão apresenta oscilações, devido a um degrau de fonte de corrente na entrada do inversor. Observando a forma de onda da tensão, nota-se que quando a energia gerada pelo painel fotovoltaico é entregue ao barramento CC a tensão no capacitor C_0 aumenta. O controle remove a energia do barramento CC para rede elétrica e conseqüentemente diminui a tensão no barramento CC para um valor de referência.

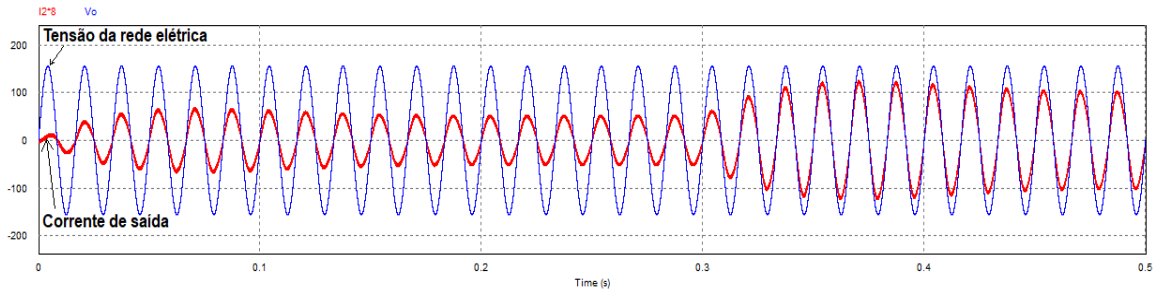
Figura 4.15 – Forma de onda da tensão de entrada no inversor.



Fonte: Próprio autor (2023).

Em condições ideais de funcionamento um sistema deve-se apresentar formas de onda de corrente em fase com a tensão da rede, além de formato perfeitamente senoidal. A figura 4.16 mostra as formas de onda da corrente na saída do inversor e a tensão na rede, através desta figura percebe-se que a corrente de saída (em vermelho, multiplicado por 8) está em fase com a tensão da rede (em azul).

Figura 4.16 – Formas de onda de corrente e tensão da rede.

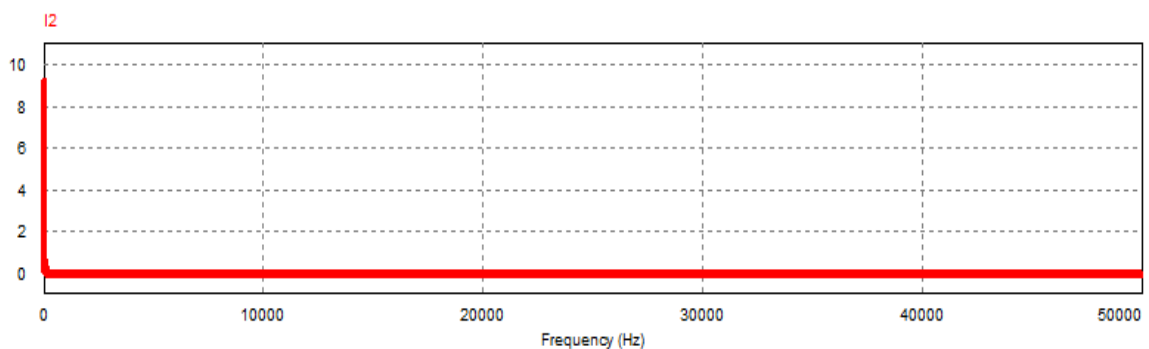


Fonte: Próprio autor (2023).

A figura 4.17 mostra o espectro harmônico da corrente injetada na rede elétrica referente a irradiação de 1000W/m^2 e uma temperatura de 25°C , onde apresenta uma distorção harmônica total de aproximadamente 4%, próximo ao limite de 5% estabelecido tanto por IEEE 1547:2013 quanto por IEC 61727:2004.

Em suma, se a corrente de saída tiver um formato perfeitamente senoidal e possuir uma correta sincronização com a tensão da rede, a produção de harmônicos será relativamente baixa e se for deformada a produção de harmônicos será elevada e conseqüentemente pode ocasionar inúmeras conseqüências negativas como, a quedas de tensão, queda de fator de potência, ressonância, entre outras.

Figura 4.17 – Espectro harmônico da corrente injetada na rede.

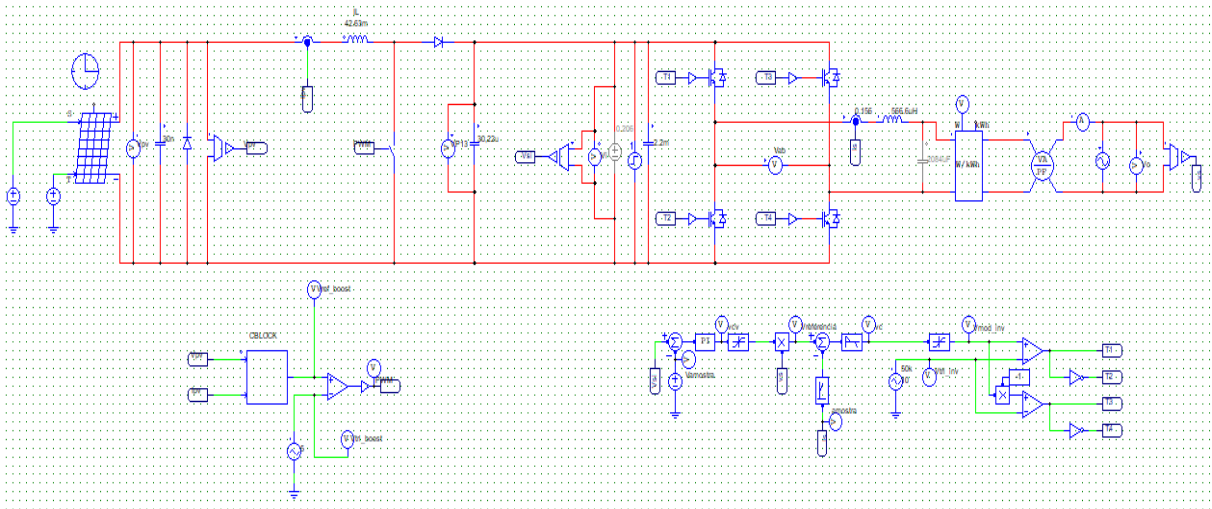


Fonte: próprio autor (2023).

4.5.2.1 Resultado da simulação do sistema completo

Nessa seção foram conectadas todas as partes constituintes do sistema (nesse caso, módulo fotovoltaico, conversor boost, inversor monofásico e rede elétrica) com a finalidade de observar comportamento de alguns parâmetros. O circuito utilizado para obter as formas de onda é mostrado na figura 4.18.

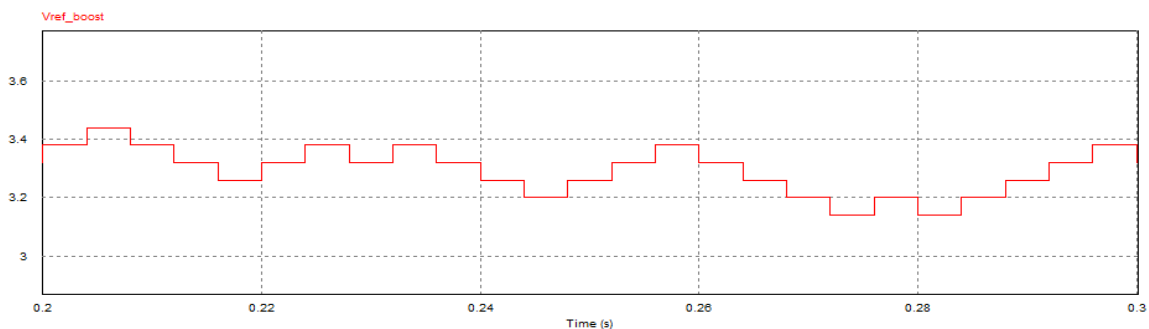
Figura 4.18 – Circuito do sistema completo.



Fonte: Próprio autor (2023).

A figura 4.19 mostra a forma de onda da tensão de referência, no qual pode-se observar o comportamento do MPPT. Para tal, foi aplicada uma variação da radiação de 1000W/m^2 para 500W/m^2 e temperatura de 25°C , respectivamente. Nota-se que, entre 200ms e 300ms o algoritmo permaneceu estável em seu ponto de máxima potência. Atenta-se para o fato que foi realizada a primeira simulação com painel fotovoltaico operando em condição de teste padrão (CTP), em que foi aplicado 1000W/m^2 e temperatura de célula de 25°C .

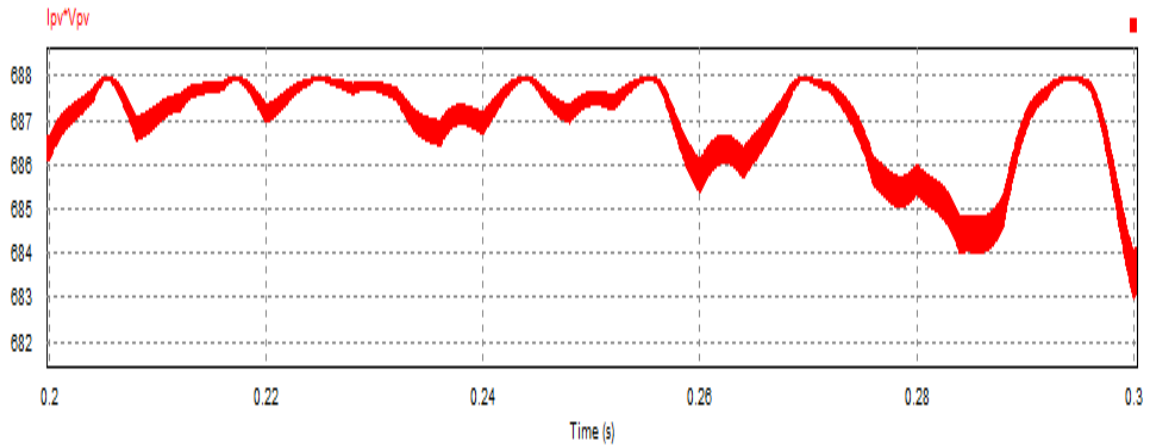
Figura 4.19 – Comportamento de V_{ref} para a radiação solar incidente de 1000W/m^2 para 500W/m^2 .



Fonte: Próprio autor (2023).

Com o resultado da integração obteve-se potência gerada pelo módulo fotovoltaico em função do tempo. Essa potência resulta da multiplicação entre corrente e a tensão. De acordo com a figura 4.20 para uma radiação incidente de 500W/m^2 , observa-se que a potência extraída no módulo nessa condição é de aproximadamente $0,687\text{kW}$.

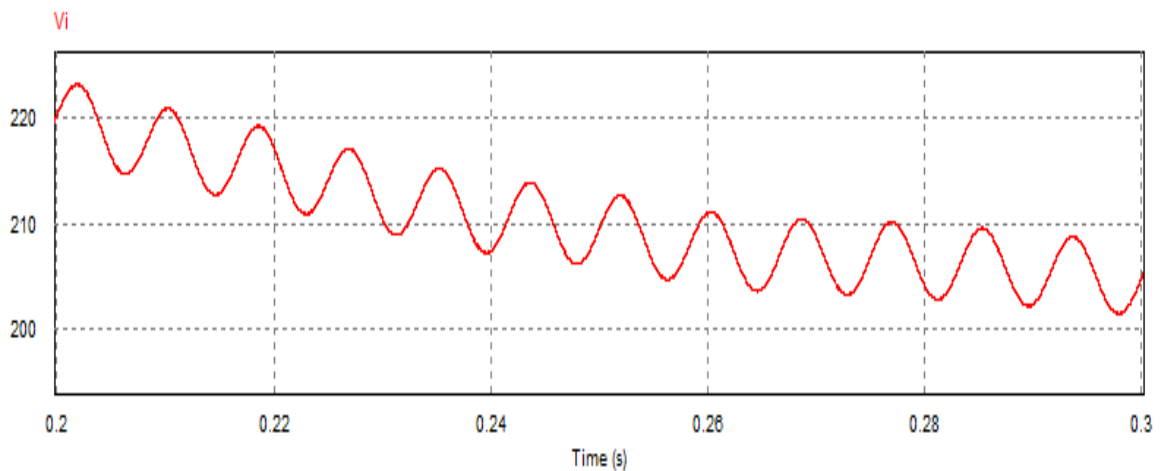
Figura 4.20 – Potência gerada pelo módulo fotovoltaico.



Fonte: Próprio autor (2023).

A figura 4.21 representa a tensão no barramento CC do inversor, ou seja, a tensão de saída do conversor boost. Sob perturbação na radiação incidente, com variação de 100% para 50%, observou-se uma queda de 15V no valor da tensão entre 200ms e 300ms . Este efeito se deve à redução de energia resultante do decremento na irradiação incidente.

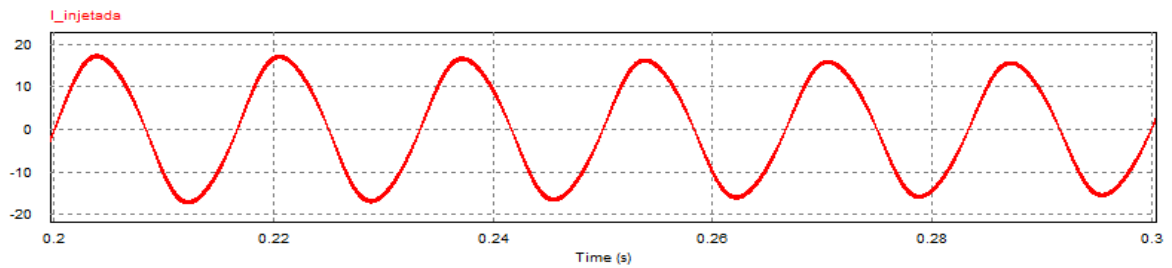
Figura 2.21 – Tensão no barramento CC do inversor.



Fonte: Próprio autor (2023).

A figura 4.22 mostra o sinal da corrente injetada na rede elétrica compreendido entre o tempo de 200ms a 300ms. Para a condição de 500W/m² sob uma temperatura de 25°C, a corrente injetada na rede possui um valor de 11,5rms, com uma distorção harmônica de 3,8%. A corrente possui um formato perfeitamente senoidal, isso demonstra a eficácia de controle e filtro LC usado nesse projeto.

Figura 4.22 – Corrente injetada na rede elétrica.



Fonte: Próprio autor (2023).

CAPÍTULO V

No início deste trabalho foi contextualizado a importância do uso da energia solar e os objetivos a serem alcançados. Este trabalho tinha como principal objetivo projetar e simular um sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica e posteriormente analisar o comportamento de cada um dos blocos que constituem todo o sistema estudado. Com o auxílio do Software PSIM foi desenvolvido um sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição. Este sistema foi dimensionado de acordo com as configurações dos tipos de painéis solares utilizados, visando obter resultados adequados que sejam capazes de contribuir na futura implementação deste projeto. Além disso, possibilitou otimizar o desempenho do sistema, através do algoritmo de rastreamento da máxima potência, que apresentou resultados aceitáveis no que concerne ao condicionamento do módulo fotovoltaico em busca de máxima potência. Ou seja, o algoritmo operou sempre próximo ao ponto de máxima potência.

O inversor apresentou resultados satisfatórios, essencialmente no que diz respeito a técnica de controle. Detalhadamente foram apresentados projetos de controle de corrente injetada na rede elétrica e da tensão no barramento CC, que mostraram resultados adequados que garantem a correta sincronização com a rede elétrica. A partir desta condição, obteve-se elevado fator de potência, que ficou próximo do valor unitário e a corrente ficou perfeitamente em fase com a tensão da rede, demonstrando a qualidade de energia.

Por fim, ficou comprovado por meio da simulação que o sistema projetado apresentou resultados satisfatórios em cada etapa do projeto.

Neste projeto, foram apresentados estudos sobre painel solar conectado a um conversor do tipo boost e o inversor monofásico. Para trabalhos futuros, além de implementar o projeto de circuito PLL, será feita uma simulação com impedância na linha de conexão com o barramento da rede. Outra modificação seria a simulação com barramento da rede contendo cargas não lineares.

REFERÊNCIAS

- ABREU MACHADO, Melissa Gurgel. **Benefícios Da Implementação De Energia Eólica No Estado Do Ceará-Brasil**. 2020. Dissertação (Mestrado em Economia e Gestão do Ambiente). Faculdade de Economia, Universidade do Porto (Portugal).
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de energia elétrica do Brasil. Brasília: ANEEL, 2008. 236p.
- ARAÚJO, R. D. **projeto e simulação de filtros L e LCL para interconexão de inversor NPC trifásico à rede**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.
- BARBI, I. et al. **Projetos de inversores**. Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 2007.
- BEZERA, Luiz Daniel S. **Conversor CC-CC para aplicação em sistemas autônomos de energia elétrica**. 2010. Trabalho de pós-graduação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Federal do Ceará.
- BOSO, Ana Cláudia Marassá Roza; GABRIEL, Camila Pires Cremasco; GABRIEL FILHO, Luís Roberto Almeida. **Análise de custos dos sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid no brasil**. ANAP Brasil, v. 8, n. 12, 2015.
- Brasil. Resolução ANEEL nº 456, de 29 de novembro de 2000. **Estabelecemos as disposições atualizadas e consolidadas, relativas as condições gerais de fornecimento de energia elétrica, a serem observadas na prestação e utilização do serviço público de energia elétrica, tanto pelas concessionária e permissionárias quanto polos consumidores**. Diário Oficial da União, Brasília, v. 138, n. 230-E, p. 35, 30 nov. 2000, sessão 1.
- DA SILVA NETO, Domingos Teixeira; SANTOS, Polyane Alves; IANO, Yuzo. **Modelagem de um Painel Fotovoltaico e Implementação do Algoritmo Perturba e Observa Usando o Software Matlab/Simulink®**. Campinas, 2017. Disponível em: <<https://www.lcv.fee.unicamp.br/images/BTSym-17/Papers/73532.pdf>>. Acesso em: 1 de dezembro de 2022.
- DAZCAL, R. G.; JUNIOR, A. G. M. **Estudo da implementação de um sistema de energia solar fotovoltaica em um edifício da universidade presbiteriana mackenzie**. Fortaleza:

Abenge—Associação Brasileira de Educação de Engenharia, 2008.

GUIMARÃES, A. P. C. et al. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Ediouro Gráfica e Editora SA Edição Especial, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

HAFEMEISTER, Augusto; DIAS, João Batista; POLTOSI, Leonel Augusto Calliari. **Aplicação do Algoritmo de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT) em Módulos Fotovoltaicos**. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018. 2018.

HART, D. W. **Eletrônica de potência**. Madrid: Prentice Hall, 2016.

HENN, G. A. L., SILVA, R. N. A. L. et al. Interleaved boost converter with high voltage Gain. IEEE transactions on power electronics. V. 23, n. 11, p. 1-10, nov. 2010.

KÜHL, M. G. . **circuito conversor boost step-up simulado através do circuito controlador mc34063**.

LEM, “Folha de dados do sensor de corrente”. Disponível em:< <https://www.lem.com/en>>. Acesso em: 16 de janeiro de 2023.

MACHADO, Sebastián Manrique; DA SILVA, Newton. **Técnicas de controle e métodos de sincronização para sistemas de energia renovável ligados à rede elétrica-Uma revisão**. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 38, n. 1, p. 63-76, jan./jun. 2017.

MACCARINI, Mateus Costa et al. **Inversor monofásico sincronizado para a conexão de um gerador eólico à rede elétrica: estudo, projeto e implementação**. 2009.

MARANGONI, Filipe. **Inversores Monofásicos para conexão de Sistemas Fotovoltaicos conectados à Rede**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2012.

MATTEI, T.F.; PARRÉ, J.L. **Panorama do setor de energia elétrica no brasil e no paraná: políticas e desafios para energias alternativas**. Revista Faz Ciência, v. 23, n. 38, 2021.

MIRANDA-TERÁN, Eldin M. et al. **Estratégia de controle de um inversor monofásico para injetar energia na rede elétrica**. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS. 2014.

MOACYR, A. G. B., LUIGI G. J. et al. **Avaliação das principais técnicas para obtenção de MPPT de painéis fotovoltaicos**. In: 2010 9th IEEE/IAS international conference on industry applications-INDUSCON 2010, São Paulo. 8-10 nov. 2010.

MUNIZ, L.R.A. **Implementações de algoritmos de controle e busca de máxima potência aplicados a conversão de energia fotovoltaica**, 2017. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, Belo Horizonte, 2017.

DA SILVA NETO, Domingos Teixeira; SANTOS, Polyane Alves; IANO, Yuzo. **Modelagem de um Painel Fotovoltaico e Implementação do Algoritmo Perturba e Observa Usando o Software Matlab/Simulink®**. In: Brazilian Technology Symposium. 2017

NUNES, André Luiz de Oliveira. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico monofásico conectado à rede elétrica operando com fator de potência unitário**. 2021. Monografia (graduação em Engenharia Elétrica), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia – IFBA, Paulo Afonso, 2021.

Oliveira Filho, H. M. **Conversor Estático de Três Estágios para Carregamento de Baterias a partir de Sistemas Eólicos**. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica) - Universidade Federal do Ceará – UFC, 2010, 165p.

OLIVEIRA, F. H. M. **Estudo de técnica utilizando a modulação PWM baseada em portadora aplicada aos inversores monofásicos assimétricos com diodos de grampeamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal da Paraíba, UFP, João Pessoa-PB, 2017.

PEREIRA, O. L. S.; GONÇALVES, F. F. **Dimensionamento de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica: estudo de caso do sistema de tubarão – sc**. Revista Brasileira de Energia, v. 14, n. 1, p. 25-45, 2008.

PEREIRA, P. F.; SOUZA, A. C.; SANTOS, I. N. **Modelagem e avaliação de desempenho das principais técnicas de controle de MPPT empregadas na geração fotovoltaica**. Universidade Federal de Uberlândia-UFU, 2016.

RASHID, M. H. Power electronics handbook, Academic Press, 2001.

RODRIGUES, Reinaldo Luan. **Estudo e implementação para cálculo de fator de potência de acordo com a recomendação IEEE 1459-2010**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SANTOS, José Eduardo Nascimento. **Inversores multiníveis a capacitor flutuante: em aplicação de processamento de energia solar fotovoltaica conectado à rede elétrica de**

distribuição. Monografia (graduação em engenharia elétrica) – Universidade Federal de Santa-Catarina, UFSC, Florianópolis, 2022.

SATHLER, Hans Hoffmann. **Projeto de um conversor elevador CC-CC micro controlado para utilização em processamento de energia solar fotovoltaica por técnica de MPPT.** Monografia (Graduação em engenharia elétrica), Centro Federal de Educação Tecnológica, Belo Horizonte, 2015.

SEGUEL, Júlio Igor López. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital,** 2009. Dissertação (Pós-graduação em engenharia elétrica) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SILVA, G.F. et al. **Energias alternativas: Tecnologias Sustentáveis para o Nordeste Brasileiro.** (1 st ed.). Aracaju: Associação Acadêmica de Propriedade Intelectual-API.

SILVA, H. T. **Estudo sobre a interação de métodos anti-ilhamento para sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição de baixa tensão com múltiplos inversores.** Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

SILVA, I. K. A. **Modelagem de controle do inversor para geração distribuída em DIGSILENT PowerFactory para análise de redes elétricas.** Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica) – Universidade Federal da Paraíba, UFP, João Pessoa-PB, 2019.

SILVA, Jean Carlos da. **Análise e Projeto de um Conversor Boost de Três Níveis Intercalado.** 2015. 85f. Dissertação –Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2015.

SILVA, Rodrigo Nascimento. **Análise de desempenho do MPPT P&O aplicado a sistemas fotovoltaicos.** Monografia (Graduação em engenharia de energias) Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2021.

SILVA, SAO da et al. **Sistema fotovoltaico com condicionamento ativo de energia usando MPPT baseado em PSO e malha feed-forward de controle de tensão do barramento CC.** *Eletrônica de Potência*, v. 21, n. 2, p. 105-116, 2016.

TENÓRIO, A.N.O.L. **Simulação de um conversor boost para rastreamento de máxima potência em sistemas fotovoltaicos.** Monografia (Graduação em engenharia de energia), Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

three-state switching cell, Proc. 32nd Annu. Conf. IEEE Ind. Electron., pp. 1927– 1932.

TIBURSKI, M. J. et al. **Metodologia de projeto de conversores boost para aplicações de alta eficiência e elevado ganho de tensão.** In: Seminário de Eletrônica de Potência e Controle, 11., 2018, Santa Maria.

Torrice-Bascope, G. V., Torrice-Bascope, R. P., Oliveira, D. S., Antunes, F. L. M., Araújo, S. V. and Branco, C. G. C. (2006). **A generalized high voltage gain boost converter based on.**

VERAS, Caio Kerson Oliveira et al. **Sistema fotovoltaico conectado à rede com rastreamento do ponto de máxima potência e controle por corrente média.** In: Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS. 2020.