



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Energias Alternativas e Renováveis
Departamento de Engenharia Elétrica

RONALDO ANTUNES DE ALMEIDA

**CONTROLE VETORIAL ATRAVÉS DE INVERSOR
MONOFÁSICO PWM DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO
CONECTADO À REDE ELÉTRICA**

João Pessoa-PB
JUNHO - 2018

RONALDO ANTUNES DE ALMEIDA

**CONTROLE VETORIAL ATRAVÉS DE INVERSOR
MONOFÁSICO PWM DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO
CONECTADO À REDE ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista sob orientação do Prof. Rogério Gaspar de Almeida.

**João Pessoa-PB
JUNHO - 2018**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

A447c Almeida, Ronaldo Antunes de.
CONTROLE VETORIAL ATRAVÉS DE INVERSOR MONOFÁSICO PWM DE
UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA /
Ronaldo Antunes de Almeida. - João Pessoa, 2018.
68f. : il.

Orientação: Rogério Gaspar de Almeida.
Monografia (Graduação) - UFPB/CEAR.

1. Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede. 2. Controle
Vetorial. 3. Inversor Monofásico. I. Almeida, Rogério
Gaspar de. II. Título.

UFPB/BC

RONALDO ANTUNES DE ALMEIDA

**CONTROLE VETORIAL ATRAVÉS DE INVERSOR
MONOFÁSICO PWM DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO
CONECTADO À REDE ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Aprovado por:

Prof. Dr. Rogério Gaspar de Almeida (Orientador)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Alexandre César de Castro (Avaliador)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Darlan Alexandria Fernandes (Avaliador)
Universidade Federal da Paraíba

**João Pessoa-PB
JUNHO - 2018**

*Dedico este trabalho à minha madrinha
Maria Lúcia (in memoriam) com a certeza
que, de onde estiver, tive sua força me aju-
dando em toda a caminhada.*

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus por toda a força que consegui ter durante esses anos de graduação, sem Ele nada disso seria possível. Peço que nunca me deixe faltar fé e me dê sabedoria para utilizar todos os conhecimentos adquiridos até aqui.

Agradeço a toda minha família por toda a força e confiança passadas durante toda minha vida acadêmica, em especial à minha mãe Lucineide Assis de Almeida, ao meu pai Roberto Antunes de Almeida e à minha irmã Vanessa Antunes por todos os esforços e sacrifícios feitos para que meu objetivo fosse alcançado, e a presença em todos os momentos, fáceis ou difíceis que enfrentamos durante essa jornada.

Quero fazer um agradecimento especial à minha namorada Laise Alves, que não poupou esforços e foi um ponto fundamental na conquista do meu sonho, me ajudou e ajuda todos os dias e tem o dom de me acalmar nos momentos mais difíceis.

À todos os amigos que mesmo em minha ausência fizeram questão de se fazer presentes e aliviar a carga de um curso que exige tanto de nossos emocionais.

À todos os professores que são a base para construção do conhecimento, muito obrigado por todo o apredizado compartilhado, farei meu melhor para que ele se dissemine para o bem sempre. Em especial quero agradecer ao professor Rogério Gaspar de Almeida, que me orientou não só neste trabalho, mas em muitos outros ensinamentos acadêmicos, além de ser uma pessoa na qual me inspiro como professor e ser humano.

Peço que Deus sempre abençoe os caminhos de todos e nunca lhes falte sabedoria, saúde e fé!

"Suba o primeiro degrau com fé. Não é necessário que você veja toda a escada. Apenas dê o primeiro passo."

Martin Luther King

Resumo

Este trabalho de conclusão de curso visa implementar, através de software de simulação, o controle vetorial sobre o inversor de um painel fotovoltaico alimentando uma carga monofásica em paralelo com a rede elétrica de distribuição, que reduza os efeitos de um afundamento de tensão sofrido pela carga no momento da ocorrência de anomalias na rede elétrica. Foi realizada a modelização de todo o sistema fotovoltaico, assim como a rede elétrica de distribuição envolvida no processo e o próprio controle. Após a montagem o controle foi avaliado, verificando seu funcionamento e comportamento dinâmico, diante de curtos circuitos em diferentes pontos da rede elétrica modelada. Todas as simulações realizadas neste trabalho utilizaram o software comercial Matlab/Simulink[®].

Palavras-chave: Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede; Controle Vetorial; Inversor Monofásico.

Abstract

This final project aims to implement, through simulation software, the vector control on the drive of a photovoltaic panel feeding a single-phase load in parallel with the power distribution, which reduce the effects of a sinking suffered by the charge tension load at the time of the anomalies occurrence in the electrical network. The photovoltaic system modelling, as well as the electrical distribution network involved in the process and the control itself. After mounting the control was assessed by checking your operation and dynamic behavior, in front of short circuits at different points of the electrical network modeled. All the simulations carried out in this work used the commercial Matlab/Simulink[®].

Key words: Photovoltaic System Connected to the Network; Vector Control; Single-Phase Inverter.

Lista de Figuras

1	Painéis Solares Tipo Monocristalino e Policristalino	18
2	Circuito Equivalente de Célula Fotovoltaica	19
3	Curvas IxV do Conjunto de Módulos Fotovoltaicos Para Dife- rentes Níveis de Irradiância	21
4	Curvas PxV do Conjunto de Módulos Fotovoltaicos Para Di- ferentes Níveis de Irradiância	21
5	Fluxograma Simplificado da Técnica Perturba e Observa . . .	23
6	Conversor Boost	23
7	Etapas de Operação - Conversor Boost	24
8	Principais Formas de Onda - Conversor Boost	25
9	Inversor de Tensão Ponte Completa	26
10	Forma de Onda na Saída de um Inversor de Tensão Ponte Completa	26
11	Topologia de Conexão Com Inversor Central	27
12	Topologia de Conexão Com Inversor <i>String</i>	28
13	Topologia de Conexão Com Inversor <i>Multi-String</i>	28
14	Topologia de Conexão Com Inversor Com Módulo Integrado .	29
15	Topologia do Controle proposto por [1]	30
16	Controle de Potência Ativa e Reativa proposto por [1]	30
17	Sistema Onde o Modelo Proposto Por [11] é Aplicado	31
18	Modelo Proposto por [12]	32
19	Modelo Proposto por [13]	33
20	Controlador Fuzzy Proposto por [13]	33
21	Controle de Painel Fotovoltaico Proposto por [14]	34
22	Tensões do Sistema Trifásico	36
23	Transformação $\alpha\beta$ das Correntes	36
24	Representação Trifásica e $\alpha\beta$	37
25	Representação Trifásica e Eixo dq	38
26	Representação Trifásica e dq	39
27	Bloco de Modelamento do Painel Fotovoltaico	40
28	Bloco de Modelamento do Conversor CC-CC Boost	41
29	Bloco de Modelamento do Controle MPPT com Técnica P&O	41
30	Bloco de Modelamento do Gatilho Para Geração do Sinal de Controle do Conversor Boost	42
31	Bloco de Modelamento do Conversor CC-CA	42
32	Representação da Rede Elétrica de Distribuição: (a) Primária e (b) Secundária	43

33	Circuito Para Análise	44
34	Diagrama Fasorial do Circuito em Análise	44
35	Circuito em Análise Desacoplado	45
36	Fasores do Sistema Desacoplado	46
37	Controle das Potências Ativa e Reativa Através de i_{0d} e i_{0q} .	48
38	Controle de Injeção da Potência Reativa	48
39	Chaveamento do Controle de Injeção da Potência Reativa . .	49
40	Subsistema do Circuito de Chaveamento do Controle de Injeção da Potência Reativa	49
41	PLL Utilizado no Matlab/Simulink [®]	50
42	Diagrama Simplificado do Sistema em Estudo	51
43	Corrente e Tensão de Saída do Inversor com $i_{0q} = 0$	52
44	Corrente e Tensão de Saída do Inversor com $i_{0q} = -50$ A . . .	53
45	Corrente e Tensão de Saída do Inversor com $i_{0q} = 50$ A . . .	53
46	Módulo da Tensão na Carga Após Curto no Ponto A e $i_{0q} = 0, -13,25$ e -50 A	54
47	Correntes no Inversor, Rede Elétrica de Distribuição e Carga (Curto no Ponto A)	55
48	Módulo da Tensão na Carga Após Curto no Ponto B e $i_{0q} = 0, -13,25$ e -50 A	56
49	Correntes no Inversor, Rede Elétrica de Distribuição e Carga (Curto no Ponto B)	56
50	Módulo da Tensão na Carga Após Curto no Ponto C com $i_{0q} = 0, -13,25$ e -50 A	57
51	Correntes no Inversor, Rede Elétrica de Distribuição e Carga (Curto no Ponto C)	58
52	Módulo de Tensão na Carga no Momento dos Curtos nos Pontos A, B e C com $i_{0q} = -50$ A	59

Lista de Tabelas

- 1 Dados do Módulo Fotovoltaico LF-335 WP-US Com 80 Células 20

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Motivação	14
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Objetivo Geral	15
1.2.2	Objetivos Específicos	15
1.3	Organização do Documento	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Fundamentação Teórica	17
2.1.1	Sistemas Fotovoltaicos Conectados	17
2.1.2	Painéis Fotovoltaicos	17
2.1.3	Modelo de Célula Fotovoltaica	18
2.1.4	Técnica de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência Perturba e Observa (P&O)	22
2.1.5	Conversor CC-CC Boost	23
2.1.6	Conversor CC-CA (Inversor)	25
2.2	Revisão Bibliográfica	29
2.2.1	Técnicas de Controle do Inversor Conectado à Rede em Sistemas Fotovoltaicos	29
3	SISTEMA FOTOVOLTAICO E CONTROLE VETORIAL	35
3.1	Transformações de Coordenadas	35
3.1.1	Transformada de Clarke	35
3.1.2	Transformada de Park	38
3.1.3	Relação Entre as Transformadas	39
3.2	Sistema de Estudo	39
3.2.1	Painel Fotovoltaico	40
3.2.2	Conversor CC-CC Boost	40
3.2.3	Conversor CC-CA	42
3.2.4	Carga e Rede de Alimentação Externa	43
3.3	Controle de Potências Ativa e Reativa	43
4	AVALIAÇÕES E RESULTADOS	51
4.1	Funcionamento do Controle	51
4.2	Comportamento Dinâmico do Controle	54
4.2.1	Curto-Circuito no Ponto A	54
4.2.2	Curto-Circuito no Ponto B	55

4.2.3	Curto-Circuito no Ponto C	57
5	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	60
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
6	APÊNDICE	64
6.1	Anexo I - Sistema Utilizado Para Simulação no Software Matlab / Simulink [®] - Completo	64
6.2	Anexo II - Sistema Utilizado Para Simulação no Software Matlab / Simulink [®] - Parte 1 (PV, Boost, Inversor e Carga) . .	65
6.3	Anexo III - Sistema Utilizado Para Simulação no Software Matlab / Simulink [®] - Parte 2 (Carga e PLL)	66
6.4	Anexo IV - Sistema Utilizado Para Simulação no Software Matlab / Simulink [®] - Parte 3 (Rede de Distribuição e Carga Trifásica)	67
6.5	Anexo V - Sistema Utilizado Para Simulação no Software Matlab / Simulink [®] - Controle de Potências Ativa e Reativa . .	68

1 INTRODUÇÃO

As fontes de energia renovável, como a fotovoltaica e eólica, receberam muita atenção recentemente como meio alternativo de geração de energia elétrica. Os sistemas fotovoltaicos são usados hoje em muitas aplicações e têm a vantagem de ter pouca manutenção e ser livre de poluição. Os sistemas que fornecem energia diretamente a rede elétrica estão se tornando mais populares devido à redução de custos com acumuladores de energia [1].

Em Dezembro de 2015 foi criado um Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), pelo Ministério de Minas e Energia do Brasil, para estímulo da geração de energia a partir de placas solares dentro das unidades consumidoras, que possa ser compartilhada com o sistema das distribuidoras de energia. O governo prevê um potencial de investimentos de R\$ 100 bilhões nessas tecnologias e que 2,7 milhões de unidades consumidoras poderão aderir ao programa até 2030 [2].

Um aspecto importante relacionado ao sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica é que ele pode operar como gerador de potências ativa e reativa. A injeção de potência reativa pelo sistema fotovoltaico pode controlar a tensão e o fator de potência de uma carga [3].

Através de um controle vetorial que desacople as potências ativas e reativas injetadas no sistema através do inversor do sistema fotovoltaico é possível se controlar o fator de potência numa carga monofásica e reduzir os efeitos causados por variações bruscas de tensão, como por exemplo evitar a atuação de relés de proteção devido afundamentos momentâneos da tensão e preservar a continuidade do abastecimento de energia na carga.

1.1 Motivação

Tendo em vista o grande incentivo realizado no que diz respeito à produção de energia elétrica através de fontes renováveis, o controle de tensão de um painel fotovoltaico, por exemplo, é de fundamental importância para garantir o correto funcionamento do mesmo e extrair o máximo de benefícios que o equipamento pode oferecer. Neste sentido um controle eficiente de potências ativa e reativa pode ser de grande valia no que diz respeito ao controle de fator de potência e controle da tensão no momento de surtos de tensão na rede que poderiam provocar atuação de proteções que seccionariam a carga ou até mesmo danificariam algum equipamento ligado à esta fonte de tensão.

1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são descritos nos tópicos 1.2.1 e 1.2.2

1.2.1 Objetivo Geral

Realizar o estudo da modelagem de um painel fotovoltaico e desenvolver um controle vetorial do inversor, conectado à carga ligada neste painel, para reduzir os efeitos de um surto de tensão sentido pela carga e corrigir o fator de potência da mesma.

1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos deste trabalho podem ser destacados os seguintes pontos:

- Implementar as equações associadas ao controle do barramento CC, assim como o controle vetorial do inversor monofásico PWM conectado à carga no ambiente computacional Matlab/Simulink[®]
- Desenvolver uma técnica de chaveamento para o inversor PWM de forma a controlar a tensão e o fator de potência de uma carga monofásica, conectada à rede elétrica e ao painel fotovoltaico, que é submetida a um surto de tensão e evitar a atuação de relés de proteção que seccionem esta carga.
- Avaliação e conclusões à respeito do controle implementado à partir de diversas situações impostas ao mesmo.

1.3 Organização do Documento

A organização deste trabalho foi feita da seguinte forma:

- Capítulo 2 (Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica) - será feita uma revisão dos principais fundamentos e bibliografias utilizadas para elaboração deste trabalho, onde serão apresentados os principais trabalhos utilizados como base para o desenvolvimento do mesmo;
- Capítulo 3 (Sistema Fotovoltaico e Controle Vetorial) - neste item será apresentada toda a conexão do sistema fotovoltaico monofásico estudado e o desenvolvimento do controle vetorial através do módulo de simulação computacional Matlab/Simulink[®];

- Capítulo 4 (Avaliações e Resultados) - aqui serão apresentados os resultados obtidos com o controle desenvolvido e realizado uma avaliação geral do mesmo;
- Capítulo 5 (Conclusões e Perspectivas Futuras)- por fim serão citadas as contribuições alcançadas com este trabalho e as perspectivas para trabalhos futuros utilizando os conhecimentos adquiridos com o controle desenvolvido.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A primeira parte deste capítulo aborda todo o embasamento teórico necessário para realização do estudo feito neste trabalho e a segunda parte contempla uma revisão bibliográfica dos principais trabalhos desenvolvidos na mesma área.

2.1 Fundamentação Teórica

2.1.1 Sistemas Fotovoltaicos Conectados

O incentivo à pesquisa e inovação na área de energias alternativas e renováveis é um dos principais temas discutidos atualmente devido o aumento exponencial da população mundial e a dependência, a cada dia maior, da tecnologia. Neste contexto, a geração de energia através de placas fotovoltaicas tem despertado grande interesse de pesquisadores e incentivo de governos para ampliar a geração através deste tipo de fonte renovável.

Os sistemas de geração fotovoltaica são classificados em dois grandes grupos: conectados à rede elétrica e isolados. Os sistemas conectados à rede têm tido um maior destaque devido o custo de instalação do mesmo, em relação ao sistema isolado, ser bem menor, devido ao não uso de acumuladores de energia, por exemplo.

Nos tópicos seguintes serão apresentados os principais componentes de um sistema fotovoltaico conectado.

2.1.2 Painéis Fotovoltaicos

Segundo [4] dentre os principais tipos existentes de painéis fotovoltaicos, quatro são as categorias mais relevantes e que são utilizados em sistemas conectados:

- Silício Monocristalino - é uma das estruturas pioneiras e apresenta uma alta eficiência de captação da irradiação solar comparado aos outros modelos, ocupa menor espaço e tem durabilidade de cerca de 30 anos;
- Silício Policristalino - se diferencia do modelo Monocristalino devido a forma como o Silício é fundido na fabricação da placa. É menos eficiente que o modelo anterior;
- Silício Amorfo - Exige um gasto menor de Silício devido não necessitar sofrer uma adaptação estrutural, o que torna este modelo mais barato

que os outros, porém tem uma baixa produção de energia.

- Orgânico - é um filme fino, capaz de realizar a absorção da luz solar e sua conversão em energia elétrica sem a presença de Silício em sua composição. Este modelo tem pouca eficiência, se comparado aos outros.

Na Figura 1 são vistos os painéis Mono e Policristalinos descritos anteriormente.

Figura 1: Painéis Solares Tipo Monocristalino e Policristalino

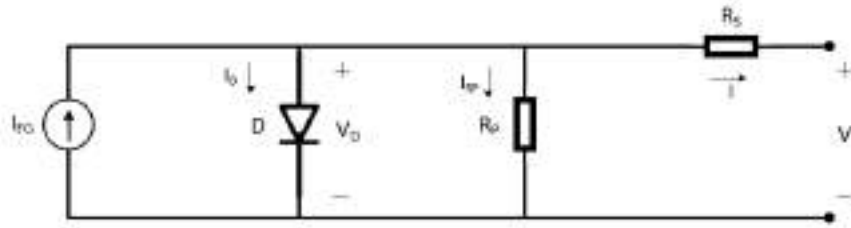


Fonte: [5]

2.1.3 Modelo de Célula Fotovoltaica

Um painel fotovoltaico é composto de células fotovoltaicas conectadas, de tal modo que esta conexão forneça uma dada tensão e corrente à depender das características específicas de cada célula. Um circuito ideal que pode representar de forma simplificada uma célula fotovoltaica é definido como uma fonte de corrente contínua (I_{FG}) em paralelo com um diodo. Para representar as perdas ôhmicas neste modelo são acrescentadas duas resistências, uma em série (R_S), que representa as perdas devido à corrente de condução e outra em paralelo (R_P), representando as correntes de fuga no processo. Este modelo de circuito representativo de uma célula fotovoltaica foi proposto por [6] e pode ser visto na Figura 2.

Figura 2: Circuito Equivalente de Célula Fotovoltaica



Fonte: [Autoria própria]

Aplicando a lei dos nós de Kirchhoff no circuito da Figura 2 obtemos:

$$I = I_{FG} - I_D - I_{RP} \quad (1)$$

Onde:

I é a corrente de saída da célula fotovoltaica;

I_{FG} é a corrente fotogerada;

I_D é a corrente que passa pelo diodo;

I_{RP} é a corrente de fuga.

Sendo a corrente fotogerada expressa como:

$$I_{FG} = \frac{G}{G_{MAX}}(I_{CC} + K_I \Delta T) \quad (2)$$

Onde:

G é a irradiância em W/m^2 ;

G_{MAX} é a irradiância na condição padrão de operação e igual a $1000 W/m^2$;

I_{CC} é a corrente de curto circuito do painel;

K_I é o coeficiente de temperatura;

ΔT a variação de temperatura do painel.

A corrente do diodo descrita por [7], é definida como:

$$I_D = I_0(e^{\frac{q \cdot V_D}{a \cdot K \cdot T}} - 1) \quad (3)$$

Em que:

I_0 é a corrente de saturação reversa do diodo;

V_D é a tensão sobre o diodo;

q é a carga do elétron;

K é a constante de Boltzman;

T é a temperatura da célula fotovoltaica.

Com base na equação de uma célula fotovoltaica, onde $V_D = R_S I + V$, sendo V a tensão de saída da célula fotovoltaica, a representação matemática de um dado arranjo de painéis fotovoltaicos ligados em série e em paralelo é definida como:

$$I = N_P I_{FG} - N_P I_0 \left[e^{\frac{q \cdot \left(\frac{N_S}{N_P} \right) R_S I + V_P}{N_S \cdot a \cdot K \cdot T}} - 1 \right] - \frac{\left(\frac{N_S}{N_P} \right) R_S I + V_P}{\left(\frac{N_S}{N_P} \right) R_P} \quad (4)$$

Onde:

N_S consiste no número de painéis em série;

N_P o número de painéis em paralelo;

V_P é a tensão resultante do arranjo de painéis fotovoltaicos.

A partir da equação 4 é possível obter tanto a curva IxV como a curva PxV de um dado painel fotovoltaico e/ou arranjo de painéis. Através dessas curvas obtêm-se as correntes e tensões associadas às máximas potências que o painel e/ou arranjo de painéis pode desenvolver para um dado valor de irradiância.

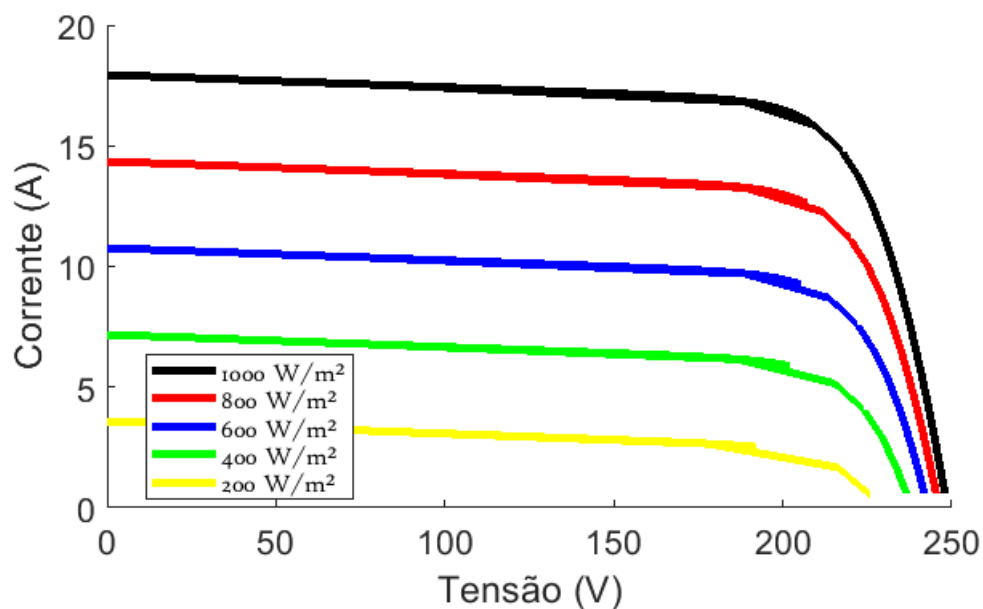
Neste trabalho, o modelo de painel fotovoltaico utilizado e implementado no ambiente computacional Matlab/Simulink[®] foi o módulo LF-335-WP-US do fabricante *Lifeline Energy*, cujos parâmetros nas condições de teste padrão ($G_{MAX} = 1000 \text{ W/m}^2$ e $T = 25 \text{ °C}$) são apresentados na Tabela 1. Neste trabalho foram adotadas 2 sequências em paralelo de 5 módulos fotovoltaicos em série para adequar a corrente e tensão de saída do conjunto de painéis à tensão e corrente de entrada utilizadas no inversor.

Tabela 1: Dados do Módulo Fotovoltaico LF-335 WP-US Com 80 Células

Módulo LF-335 WP-US (80 células)	
Corrente em Máxima Potência (Imp)	8,07 A
Tensão em Máxima Potência (Vmp)	41,50 V
Tensão de Circuito Aberto (Voc)	49,90 V
Resistência Paralela ao Diodo (Rp)	77,64 ohm
Resistência Série (Rs)	0,26 ohm

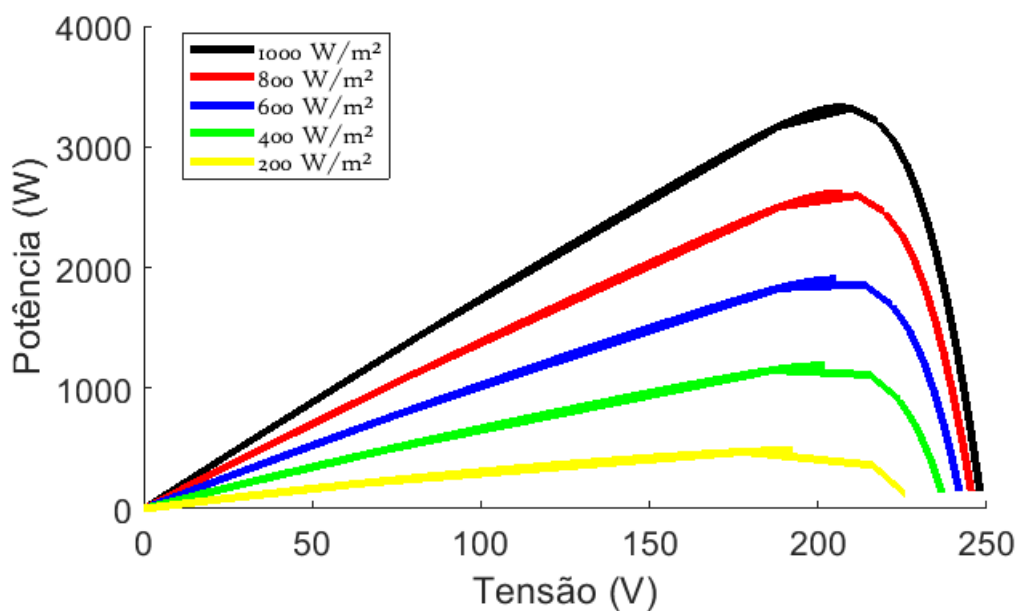
As curvas IxV e PxV deste conjunto de painéis, para diferentes níveis de irradiância, podem ser vistas nas Figuras 3 e 4, respectivamente.

Figura 3: Curvas IxV do Conjunto de Módulos Fotovoltaicos Para Diferentes Níveis de Irradiância



Fonte: Autoria própria

Figura 4: Curvas PxV do Conjunto de Módulos Fotovoltaicos Para Diferentes Níveis de Irradiância



Fonte: Autoria própria

2.1.4 Técnica de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência Perturba e Observa (P&O)

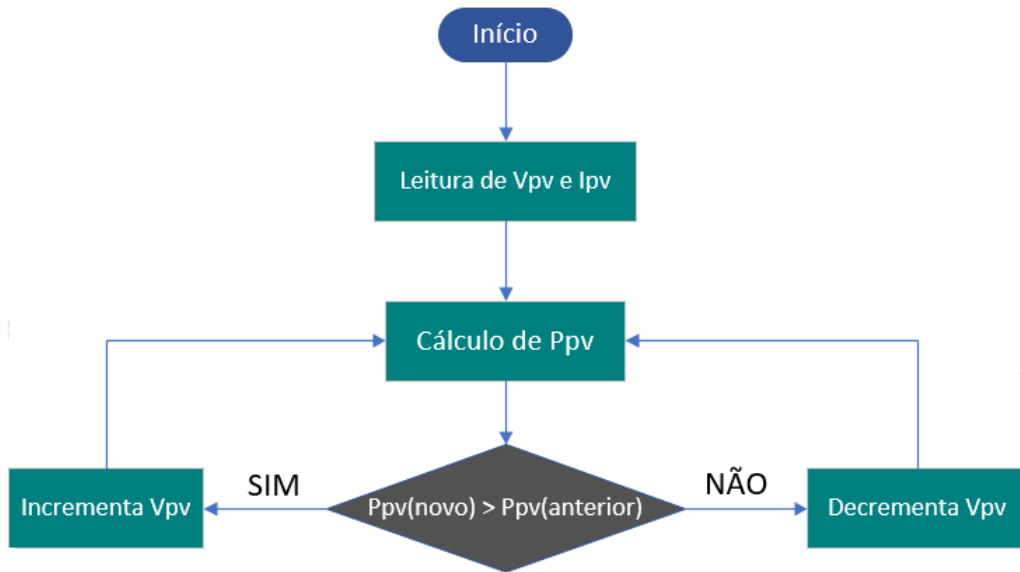
Para garantir que o painel fotovoltaico forneça a máxima potência possível é comum que seja utilizada alguma técnica para rastrear este ponto de operação, pois todo processo que torne a geração fotovoltaica mais eficiente é muito válido devido estes sistemas apresentarem alto índice de perdas dentre outros fatores que limitam sua eficiência energética.

A técnica conhecida como Perturba e Observa (P&O) é amplamente utilizada neste sentido devido sua simples implementação aliada à uma eficiência satisfatória durante o processo de rastreamento. Esta técnica consiste de um algoritmo de busca, que faz pequenas alterações (perturbações) na tensão do painel, podendo elevar ou reduzir a mesma em incrementos reduzidos e através do produto entre tensão e corrente do painel verificar o ponto em que a potência gerada está em seu ponto máximo.

O processo é iniciado com a leitura de tensão e corrente de saída do painel fotovoltaico, com estes dados se obtém a potência do painel e este valor é comparado com um valor de referência inicial (que pode ser zero para iniciar o processo). Após esta etapa o processo se repete, porém após a tensão sofrer o primeiro incremento. Com isso uma nova potência é calculada e comparada à potência anterior, caso a nova potência seja maior que a calculada anteriormente o algoritmo repete o processo, incrementando a tensão utilizada no cálculo da potência, até que a potência calculada seja menor que a anterior. Caso a tensão obtida gerar uma potência menor do que a calculada anteriormente é realizado um decremento na tensão para realizar a próxima etapa do cálculo e assim ficar oscilando, com pequenos incrementos e decrementos, no ponto de máxima potência do painel.

Na Figura 5 pode ser visto um fluxograma simplificado do algoritmo que realiza a técnica Perturba e Observa, que foi descrita neste tópico, para um melhor entendimento do processo.

Figura 5: Fluxograma Simplificado da Técnica Perturba e Observa



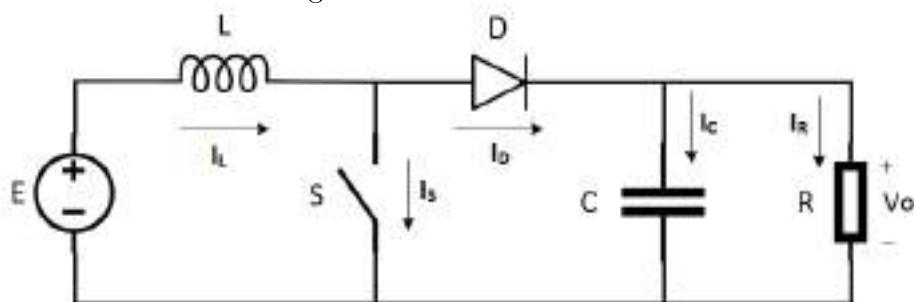
Fonte: Autoria própria

2.1.5 Conversor CC-CC Boost

Um conversor CC-CC é utilizado em aplicações que necessitem adequar o nível de tensão CC. Para o caso de um painel fotovoltaico, o ideal é elevar o nível da tensão que sai do painel, com objetivo de deixar esta num nível mais apropriado à tensão utilizada pelo conversor CC-CA (inversor) que será tratado no tópico 2.1.6. A utilização de conversores CC-CC pode reduzir a quantidade necessária de painéis fotovoltaicos, otimizando assim a geração de energia.

O conversor Boost é do tipo elevador de tensão e é conhecido por ter entrada em corrente e saída em tensão. O esquema de ligação deste tipo de conversor pode ser visto na Figura 6.

Figura 6: Conversor Boost

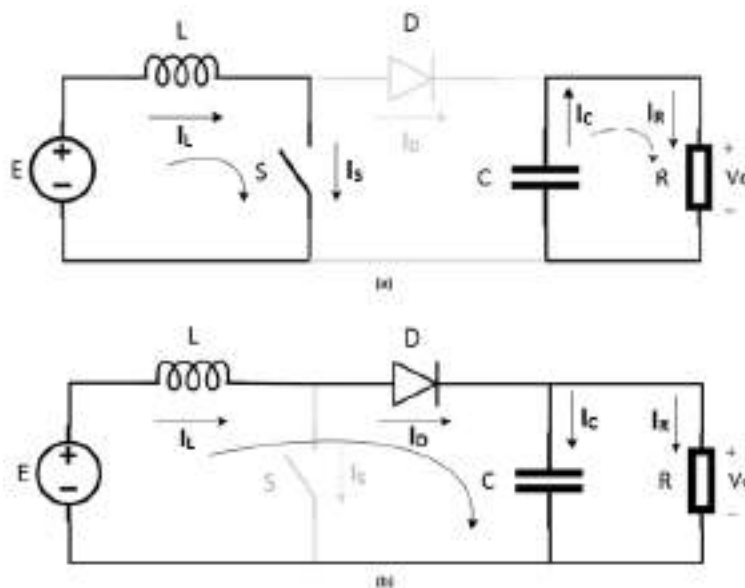


Fonte: Autoria própria

Este tipo de conversor tem duas etapas de operação que podem ser vistas

na Figura 7, onde na primeira (etapa de acumulação de energia) a chave S é fechada e o diodo D é bloqueado curto circuitando a fonte de alimentação e magnetizando o indutor L. Neste momento a corrente I_S é igual à corrente da fonte e I_D é nula. A segunda etapa de operação (transferência de energia) ocorre quando a chave S é aberta. Neste momento o diodo D entra em condução e tanto a fonte E como o indutor L transferem energia à carga.

Figura 7: Etapas de Operação - Conversor Boost



Fonte: Autoria própria

A característica de transferência estática do conversor Boost é dada pela equação (5):

$$\frac{V_0}{E} = \frac{1}{1 - D} \quad (5)$$

onde:

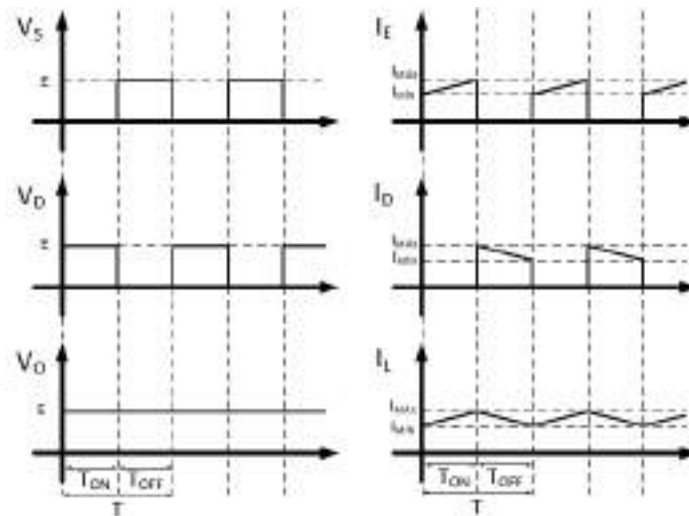
V_0 é a tensão de saída;

E é a tensão de entrada;

D é a razão cíclica de operação do conversor e varia de 0 a 1.

As principais formas de onda para este conversor, operando em condução contínua, podem ser vistas na Figura 8.

Figura 8: Principais Formas de Onda - Conversor Boost



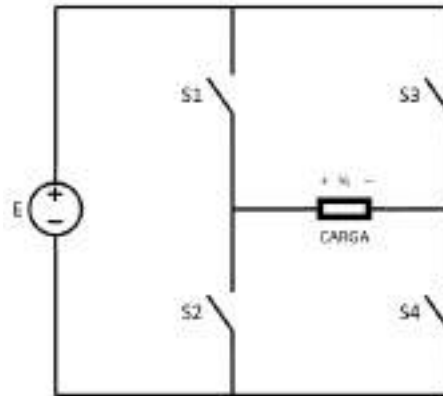
Fonte: Autoria própria

2.1.6 Conversor CC-CA (Inversor)

Os conversores CC-CA de tensão, também conhecidos como inversores têm a função básica de a partir de uma fonte CC obter uma fonte CA de valor médio nulo, simétrica em amplitude e de frequência constante. A utilização deste conversor numa aplicação fotovoltaica é de importância fundamental no processo, pois devido a variação de irradiância sofrida pelo painel e a variação constante do perfil de carga existe a necessidade de um controle eficiente no inversor que torne a tensão na carga constante e com valores adequados às especificações da rede local. Neste sentido estratégias de controle são definidas para comandar o chaveamento de um inversor e torná-lo parte ativa do controle de tensão na carga do sistema.

A estrutura de um conversor CC-CA ponte completa pode ser visto na Figura 9.

Figura 9: Inversor de Tensão Ponte Completa

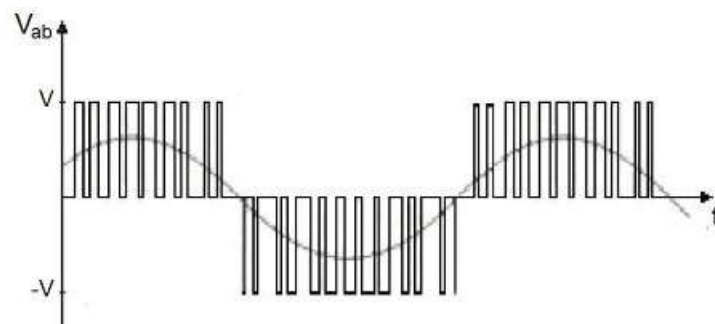


Fonte: Autoria própria

Este conversor também tem duas etapas de funcionamento, onde na primeira as chaves S_1 e S_4 conduzem enquanto S_2 e S_3 permanecem bloqueadas, fazendo com que a carga fique submetida a uma tensão E . Na segunda etapa ocorre o inverso da primeira, com S_1 e S_4 bloqueadas enquanto S_2 e S_3 conduzem. Neste momento a tensão vista pela carga é $-E$.

A forma de onda observada na saída do inversor (Figura 10) é de vários estágios de onda quadrada, porém com uma frequência elevada de chaveamento e a utilização de filtragem, pode-se obter na saída um sinal senoidal praticamente sem conteúdo harmônico e com fator de potência elevado.

Figura 10: Forma de Onda na Saída de um Inversor de Tensão Ponte Completa



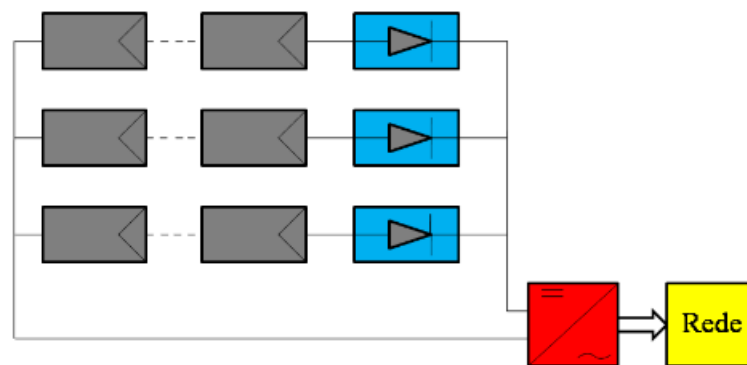
Fonte: [17]

Segundo [8] e [9] existem quatro tipos de ligação de inversores em sistemas fotovoltaicos conectados à rede:

- **Inversor Central**

Neste tipo de ligação um único inversor é conectado a todos os painéis do sistema, centralizando a conversão de energia. Tem a vantagem de ter menor custo, devido só utilizar um inversor no processo, porém com prejuízo de não otimizar o ponto de máxima potência de todos os painéis e ser mais vulnerável no que diz respeito a falhas. A topologia pode ser vista na Figura 11.

Figura 11: Topologia de Conexão Com Inversor Central

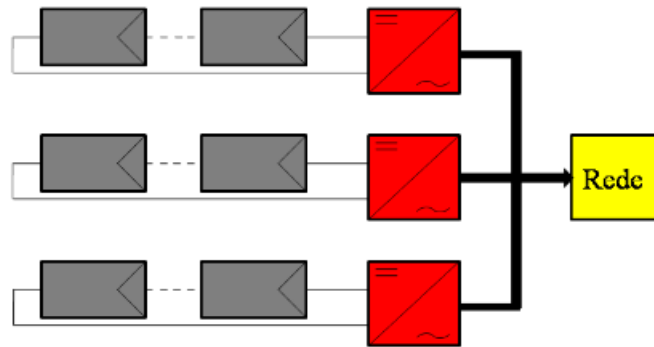


Fonte: [10]

- **Inversor *String***

A configuração *string* conecta cada fileira de painéis em série a um inversor independente, o que faz com que o sistema tenha menor quantidade de perdas e seja menos susceptível a falhas que deixem todo o sistema inoperante. A desvantagem é um custo maior, devido a necessidade de uma maior quantidade de inversores. A Figura 12 mostra a ligação *string*.

Figura 12: Topologia de Conexão Com Inversor *String*

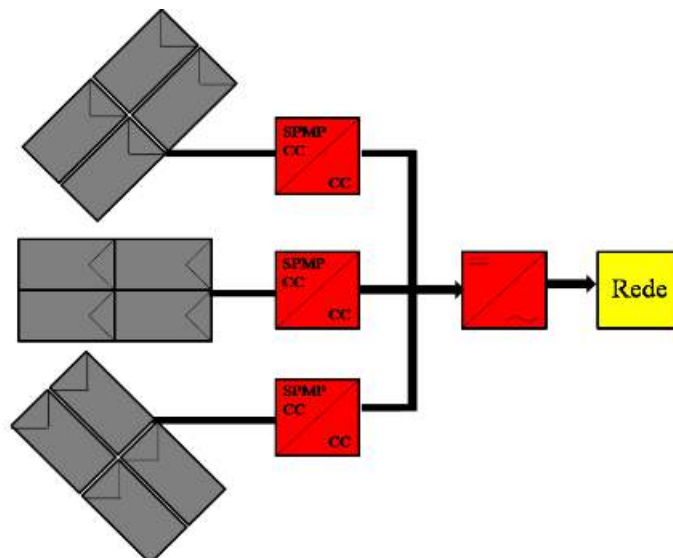


Fonte: [10]

- **Inversor *Multi-String***

A configuração *multi-string* é utilizada em configurações onde os painéis são submetidos a níveis de irradiância e temperatura diferentes e cada painel ou arranjo é conectado a um conversor CC-CC, com intuito de extrair o ponto de máxima potência de cada arranjo. Em seguida, todos são conectados a um único inversor, à exemplo da conexão central. Na Figura 13 é vista a configuração descrita.

Figura 13: Topologia de Conexão Com Inversor *Multi-String*



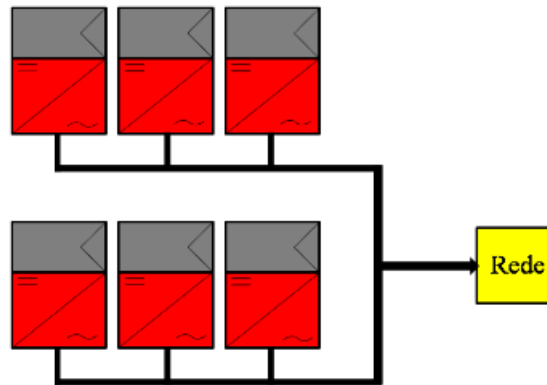
Fonte: [10]

- **Inversor Com Módulo Integrado ou Módulo CA**

Esta configuração é a que apresenta a menor quantidade de perdas quando comparada às outras, pois tem um inversor individual para cada

placa e elimina assim as perdas por conexão entre painéis, permitindo que todos operem em seu ponto de máxima potência. O prejuízo maior é quanto ao custo desta configuração que exige uma quantidade de inversores igual à quantidade de painéis utilizados. A configuração pode ser vista na Figura 14.

Figura 14: Topologia de Conexão Com Inversor Com Módulo Integrado



Fonte: [10]

2.2 Revisão Bibliográfica

2.2.1 Técnicas de Controle do Inversor Conectado à Rede em Sistemas Fotovoltaicos

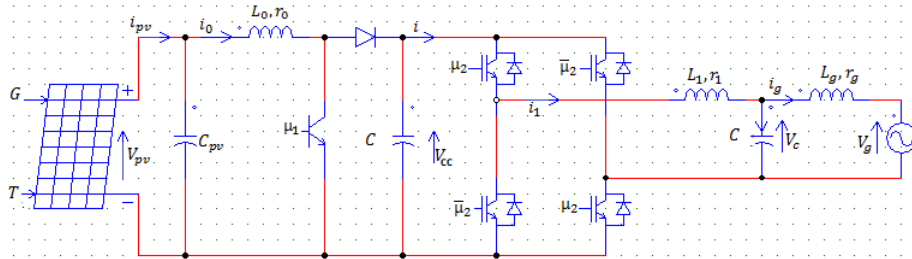
Dentre as técnicas de controle da tensão em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, serão apresentados neste tópico aquelas que mais se relacionam com o controle estudado e até mesmo servem de base para a implementação deste.

O modelo de controle vetorial de potência ativa e reativa através de um inversor monofásico conectado a um sistema fotovoltaico conectado à rede foi proposto por [1]. A topologia deste controle pode ser vista na Figura 15.

vido se baseia na técnica de modo deslizante e na função de Lyapunov.

O sistema proposto para o controle pode ser visto na Figura 17, onde a estratégia de controle é aplicada nos comandos das chaves do inversor. Os objetivos de controle deste modelo são: operar com o painel no ponto de máxima potência, regular a tensão no barramento CC e garantir a máxima transferência de energia da fonte para a carga e fornecer uma corrente em fase com a tensão da rede através do controle no inversor. Foram realizadas simulações no ambiente Matlab/Simulink[®] obtendo resultados satisfatórios para o método proposto.

Figura 17: Sistema Onde o Modelo Proposto Por [11] é Aplicado



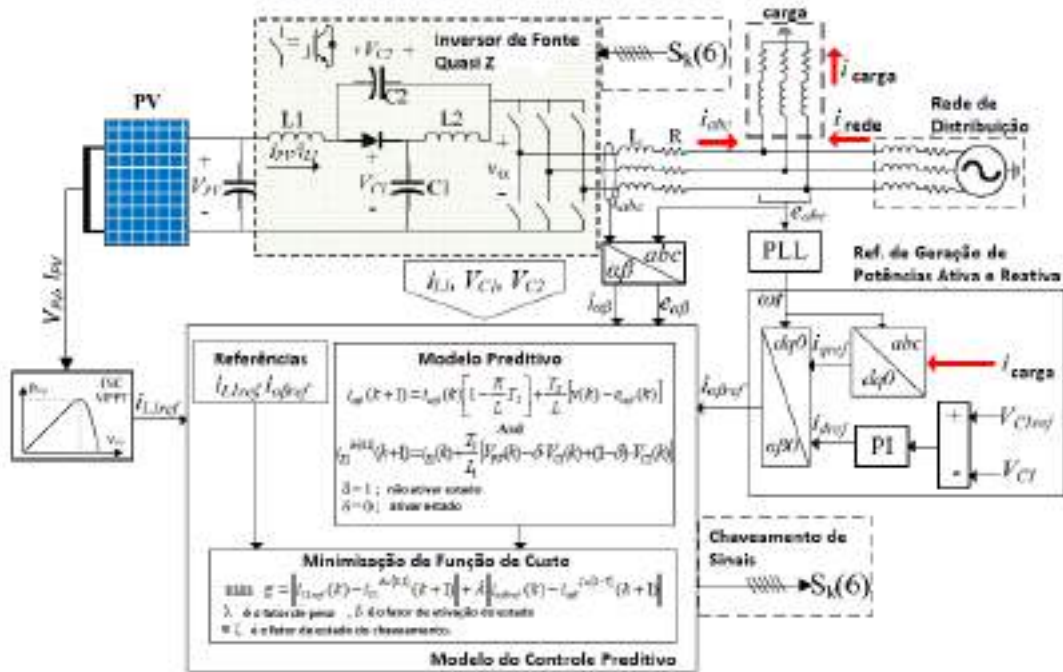
Fonte: [11]

O modelo de controle proposto por [12] é baseado no método de controle preditivo das potências ativa e reativa desacopladas através do inversor conectado à rede para aplicação em sistemas fotovoltaicos. O sistema propõe um algoritmo de controle de potências desacopladas que usa o modelo de estrutura de controle preditivo para injetar a máxima energia gerada pelo painel fotovoltaico e também compensar a energia reativa requerida pela rede. É proposta uma interface eletrônica de potência para integrar os painéis à rede e funcionar, ao mesmo tempo, como um compensador de potência reativa.

Uma técnica de controle é proposta para regular a tensão e a corrente dos elementos da rede de acordo com o ponto operacional máximo dos painéis fotovoltaicos e os requisitos de tensão/corrente da rede. O desempenho do controlador foi avaliado através da plataforma dSPACE-DS1007 e os resultados ficaram dentro do exigido pelo padrão IEEE-519.

Todo o esquema proposto pelos autores pode ser visto na Figura 18.

Figura 18: Modelo Proposto por [12]

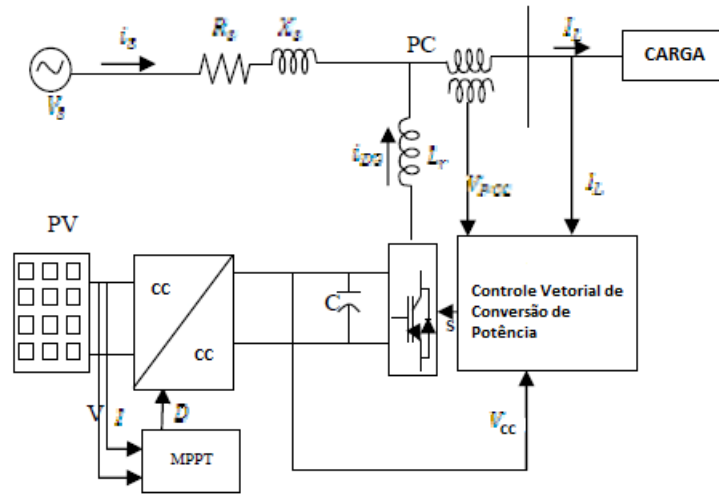


Fonte: [12]

Proposto por [13] este modelo é baseado em um controlador lógico Fuzzy para aplicação em um sistema fotovoltaico conectado à rede. Pelo modelo a tensão do barramento CC é mantida constante através do controle PWM do conversor e um algoritmo MPPT extrai a máxima potência do painel fotovoltaico. A tensão do barramento CC é mantida constante utilizando um controlador lógico Fuzzy e o uso do método MPPT de condutância incremental, que eliminam o circuito de controle PI, reduzindo assim o tempo de controle da potência reativa em comparação com as demais técnicas que utilizam PI na malha de controle.

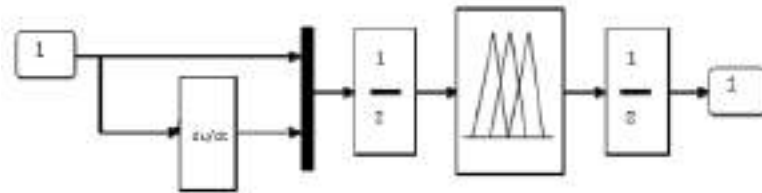
O esquemático deste modelo e a implementação do controle Fuzzy no ambiente Matlab/Simulink[®] podem ser vistos nas Figuras 19 e 20, respectivamente.

Figura 19: Modelo Proposto por [13]



Fonte: [13]

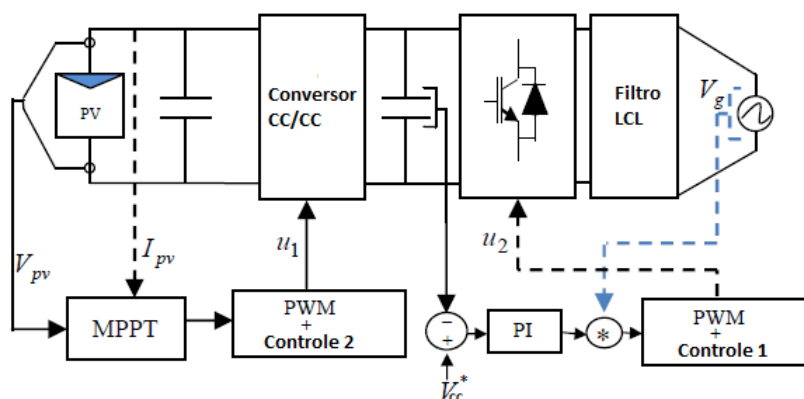
Figura 20: Controlador Fuzzy Proposto por [13]



Fonte: [13]

Outro método de controle, proposto por [14], é baseado na utilização da técnica de *backstepping* e das ferramentas de estabilidade de Lyapunov. Todo o sistema é descrito por um modelo matemático de quinta ordem e controlado pela técnica citada. Os objetivos principais do controle são a regulação de tensão do barramento CC, correção do fator de potência do inversor e extração da máxima potência do painel através de algoritmo MPPT implementado no conversor CC-CC. Os controles descritos podem ser vistos na Figura 21 e tiveram seu funcionamento testado no ambiente Matlab/Simulink[®] atendendo a todos os seus objetivos.

Figura 21: Controle de Painei Fotovoltaico Proposto por [14]



Fonte: [14]

Dentre os modelos apresentados para controle do inversor ligado a um sistema fotovoltaico, foi escolhido o modelo proposto por [1], para implementação de um controle de potências ativa e reativa, devido este modelo ser o mais aproximado para a aplicação desejada, pois o mesmo já consegue realizar o controle desacoplado de potências ativa e reativa, conforme será visto no capítulo 3.

3 SISTEMA FOTOVOLTAICO E CONTROLE VETORIAL

O controle desenvolvido neste capítulo tem como base o modelo proposto por [1], como foi visto no capítulo 2. Este modelo visa realizar o controle de potências ativa e reativa produzidas pelo painel fotovoltaico. O controle proposto será totalmente detalhado no decorrer deste capítulo, iniciando com uma breve descrição das transformadas de Clarke e Park.

3.1 Transformações de Coordenadas

As transformações de coordenadas são ferramentas muito importantes no que diz respeito à sistemas de controle, pois controlar variáveis com dois ou mais graus de liberdade, como uma onda senoidal, por exemplo, que varia em frequência e amplitude, torna o controle de um sinal muito mais complexo.

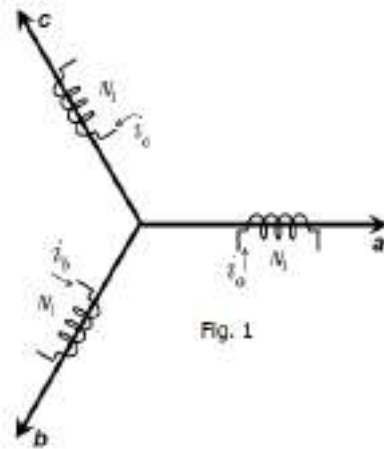
3.1.1 Transformada de Clarke

A transformada de Clarke (ou $\alpha\beta$) para sistemas trifásicos é feita para se obter uma base bifásica estacionária à partir dos vetores trifásicos do sistema. Consideremos os seguintes vetores de tensão:

$$\begin{aligned}V_A(t) &= \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t) V \\V_B(t) &= \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) V \\V_C(t) &= \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) V\end{aligned}\tag{6}$$

Que podem ser vistos fasorialmente na Figura 22.

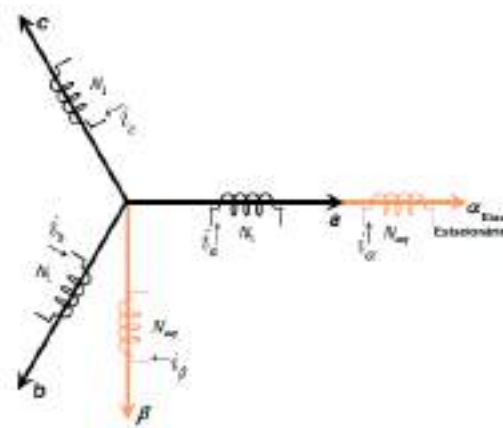
Figura 22: Tensões do Sistema Trifásico



Fonte: [15]

Projetando os vetores de corrente trifásicos num eixo imaginário $\alpha\beta$ conforme indicado na Figura 23:

Figura 23: Transformação $\alpha\beta$ das Correntes



Fonte: [15]

Assim é possível obter,

$$\frac{N_{eq}}{2} i_{\alpha} = \frac{N_1}{2} \cdot [i_a(t) + i_b(t) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + i_c(t) \cdot \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right)]$$

$$\frac{N_{eq}}{2} i_{\beta} = \frac{N_1}{2} \cdot [i_b(t) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) + i_c(t) \cdot \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right)]$$

(7)

Com isso,

$$\begin{aligned}
i_{\alpha} &= \frac{N_1}{N_{eq}} \cdot [i_a \cdot (t) + i_b \cdot (t) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cdot (t) \cdot \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right)] \\
i_{\beta} &= \frac{N_1}{N_{eq}} \cdot [i_b \cdot (t) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cdot (t) \cdot \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right)]
\end{aligned}
\tag{8}$$

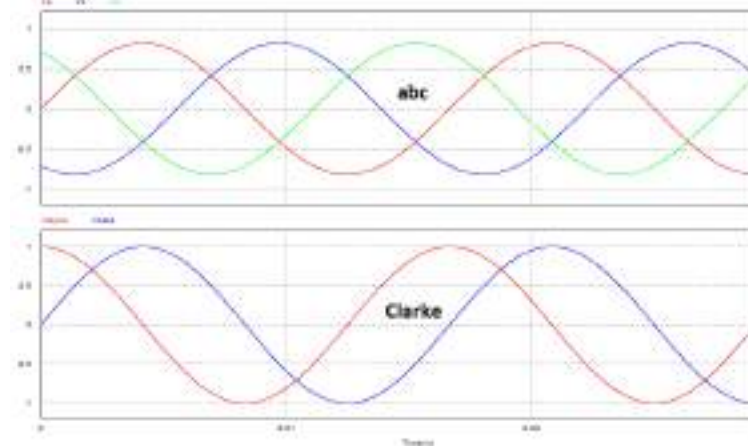
onde: $\frac{N_1}{N_{eq}} = \sqrt{\frac{2}{3}}$, para invariância de potência.

Após algumas simplificações, a expressão para a transformação das componentes trifásicas de corrente nas coordenadas $\alpha\beta$ será:

$$\begin{aligned}
i_{\alpha} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left[i_a - \frac{i_b}{2} - \frac{i_c}{2} \right] \\
i_{\beta} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left[i_b \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} - i_c \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right]
\end{aligned}
\tag{9}$$

O efeito gerado pela transformação $\alpha\beta$ pode ser visto graficamente na Figura 24.

Figura 24: Representação Trifásica e $\alpha\beta$



Fonte: [Autoria própria]

Para o caso de um sistema monofásico a transformação $\alpha\beta$ pode ser obtida com um simples deslocamento de fase do sinal a ser transformado. Portanto, considerando uma tensão monofásica dada por $V = V_m \cdot \cos(\omega t)$, suas respectivas coordenadas α e β serão:

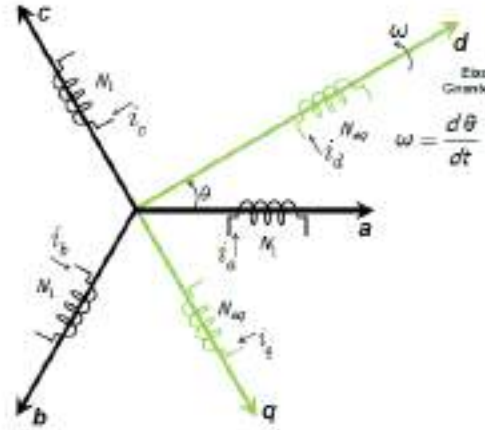
$$\begin{aligned}
V_\alpha &= Vm.\cos(\omega t) \\
V_\beta &= Vm.\cos(\omega t - \frac{\pi}{2})
\end{aligned}
\tag{10}$$

3.1.2 Transformada de Park

Também conhecida como transformada dq, a transformada de Park é constituída de vetores girantes e, com isso, faz com que fasores tenham uma representação constante nessas coordenadas se ajustados com um deslocamento de fase conveniente. Para o caso de sistemas de controle isto é ideal, pois controlar um parâmetro linear é menos complexo que controlar parâmetros que oscilam no tempo.

Considerando os mesmos vetores de tensão descritos no tópico 3.1.1, para as coordenadas dq teremos fasores conforme mostra a Figura 25.

Figura 25: Representação Trifásica e Eixo dq



Fonte: [15]

Realizando a projeção dos vetores no eixo dq, conforme foi feito nas coordenadas de Clarke, e simplificando as expressões, as coordenadas dq para um sistema trifásico podem ser obtidas pelas equações (11).

$$\begin{aligned}
i_d &= \sqrt{\frac{2}{3}}.[i_a(t).\cos(\theta) + i_b(t).\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + i_c(t).\cos(\theta - \frac{4\pi}{3})] \\
i_q &= \sqrt{\frac{2}{3}}.[-i_a(t).\sen(\theta) - i_b(t).\sen(\theta - \frac{2\pi}{3}) - i_c(t).\sen(\theta - \frac{4\pi}{3})]
\end{aligned}
\tag{11}$$

Graficamente, o efeito de uma transformação dq em um sistema trifásico pode ser observado na Figura 26.

Figura 26: Representação Trifásica e dq



Fonte: [Autoria própria]

3.1.3 Relação Entre as Transformadas

Após uma simples decomposição vetorial de coordenadas é possível obter a relação entre as coordenadas $\alpha\beta$ e dq conforme descrito nas equações (12) e (13) de $\alpha\beta$ para dq e o inverso, respectivamente, onde θ é o ângulo entre as duas coordenadas.

$$\begin{aligned} u_d &= u_\alpha \cdot \cos(\theta) + u_\beta \cdot \sin(\theta) \\ u_q &= -u_\alpha \cdot \sin(\theta) + u_\beta \cdot \cos(\theta) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} u_\alpha &= u_d \cdot \cos(\theta) - u_q \cdot \sin(\theta) \\ u_\beta &= u_d \cdot \sin(\theta) + u_q \cdot \cos(\theta) \end{aligned} \quad (13)$$

3.2 Sistema de Estudo

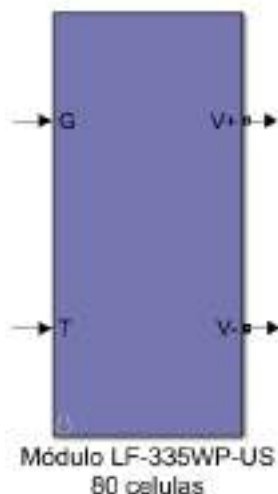
O sistema de estudo, onde o controle desenvolvido neste trabalho será utilizado, é composto por um painel fotovoltaico, um conversor CC-CC tipo Boost, um conversor CC-CA monofásico, uma carga monofásica e uma rede trifásica de média e baixa tensão, de onde é derivada a ligação monofásica da carga ao sistema elétrico. Todos os itens serão melhor detalhados nos tópicos seguintes.

3.2.1 Painel Fotovoltaico

O painel fotovoltaico utilizado teve suas células modeladas conforme descrito no tópico 2.1.3, onde foi adotado o modelo do Módulo LF-335WP-US (80 células), com especificações conforme indicado na Tabela 1. Devido às características de tensão e corrente de cada módulo foi necessário utilizar uma configuração de duas sequências em paralelo de cinco módulos em série, para adequar corretamente a tensão do painel à tensão de entrada do conversor CC-CA.

Após o correto dimensionamento, todo o modelamento do painel foi implementado em um bloco com máscara interativa do ambiente Matlab/Simulink[®], conforme pode ser visto na Figura 27, onde G e T são entradas de irradiância (em W/m^2) e temperatura (em graus Celsius) e V+ e V- saídas da tensão contínua do painel (em Volts), respectivamente.

Figura 27: Bloco de Modelamento do Painel Fotovoltaico



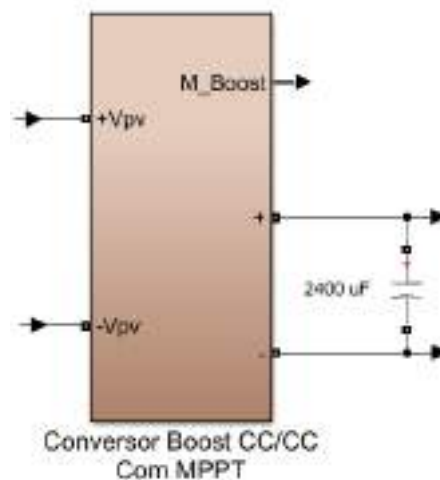
Fonte: [Autoria própria]

3.2.2 Conversor CC-CC Boost

O conversor CC-CC Boost utilizado foi implementado conforme sua estrutura clássica, apresentada no item 2.1.5. O controle deste conversor é comandado através da técnica de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) Perturba e Observa (P&O), para extrair a máxima potência do conjunto de painéis fotovoltaicos. Durante as simulações foi possível verificar uma tensão média de saída na faixa de 477 V para uma tensão média de entrada de 201 V, com a utilização de um capacitor de 2400 μF na saída do conversor, para estabilizar a tensão de saída do mesmo.

O bloco onde o conversor Boost foi modelado no ambiente Matlab/Simulink[®] em conjunto com o capacitor de saída podem ser vistos na Figura 28, onde $+V_{pv}$ e $-V_{pv}$ são as entradas de tensão contínua, vindas do painel fotovoltaico e as saídas de tensão são obtidas em $+$ e $-$. Por meio da saída denominada M-Boost podem se obter várias medidas do conversor como, por exemplo: tensões, correntes e potência de entrada, corrente de saída e tensão de controle do chaveamento.

Figura 28: Bloco de Modelamento do Conversor CC-CC Boost



Fonte: [Autoria própria]

O algoritmo de rastreamento da máxima potência do conversor, utilizando a técnica P&O foi implementado através do bloco *function* do Matlab/Simulink[®] (Figura 29), onde as entradas são a tensão e corrente oriundas do painel fotovoltaico e a saída é a tensão de controle para o chaveamento do conversor no ponto de máxima potência.

Figura 29: Bloco de Modelamento do Controle MPPT com Técnica P&O

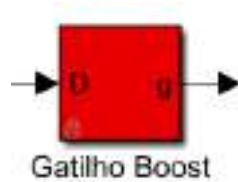


Fonte: [Autoria própria]

Para o sinal PWM da chave comandada foi implementado um bloco de gatilho, para comparação do sinal de controle com uma onda triangular que varia sua tensão entre 0 e 1 V. Este modelo pode ser visto na Figura 30, onde D é a entrada do sinal de controle oriunda do bloco MPPT e g o sinal

de saída para comandar o chaveamento do conversor Boost. A frequência de chaveamento também é definida neste bloco, que para este estudo foi adotado 10 kHz.

Figura 30: Bloco de Modelamento do Gatilho Para Geração do Sinal de Controle do Conversor Boost



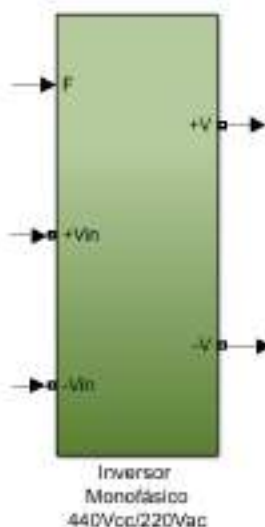
Fonte: [Autoria própria]

3.2.3 Conversor CC-CA

O conversor CC-CA aplicado no sistema de estudo foi um inversor monofásico $440 V_{CC}/220 V_{CA}$ ponte completa, conforme visto no item 2.1.6 deste trabalho. O comando do circuito PWM deste conversor é o principal sinal de controle deste trabalho, sendo melhor detalhado nos tópicos à seguir.

O bloco que implementa o inversor no Matlab/Simulink[®] pode ser visto na Figura 31, onde $+V_{in}$ e $-V_{in}$ é a tensão de entrada, oriunda do conversor Boost, $+V$ e $-V$ é a tensão CA de saída, que alimentam a carga, e F é a entrada do sinal de comando das chaves do inversor. A porta F será acionada por comando PWM, assim como o utilizado no conversor Boost, e tem sinal de controle gerado pelo sistema que será analisado como objetivo principal deste trabalho.

Figura 31: Bloco de Modelamento do Conversor CC-CA

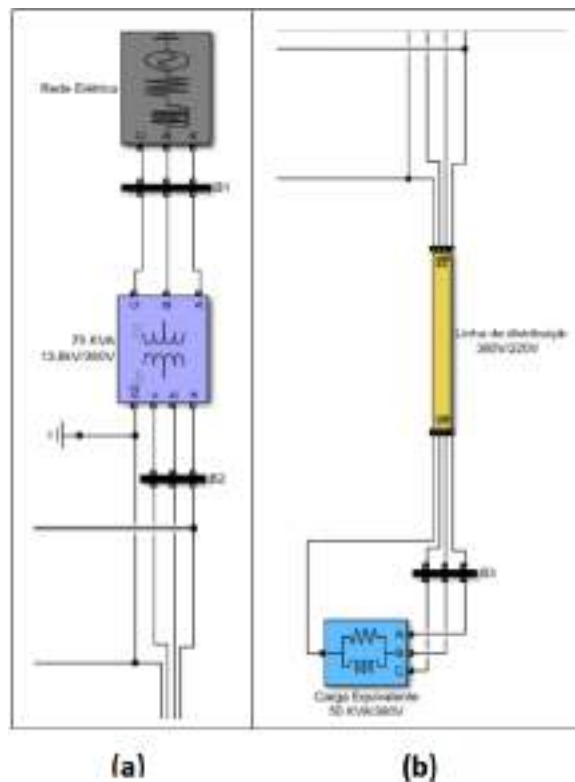


Fonte: [Autoria própria]

3.2.4 Carga e Rede de Alimentação Externa

A rede elétrica do sistema de distribuição que alimenta a carga, em conjunto com o painel fotovoltaico, foi implementada no Matlab/Simulink[®] à partir da rede primária em 13,8 kV, passando por um transformador de 75 kVA (13,8kV/380 kV) e atendendo a carga monofásica, 7,5 kV e fator de potência 0,92, em estudo e uma carga trifásica de 50 kVA e fator de potência 0,92. As perdas na rede também foram representadas através de resistências e indutâncias em série com o circuito. Todo o conjunto pode ser visto na Figura 32, com detalhes da conexão à rede primária em (a) e da secundária em (b).

Figura 32: Representação da Rede Elétrica de Distribuição: (a) Primária e (b) Secundária

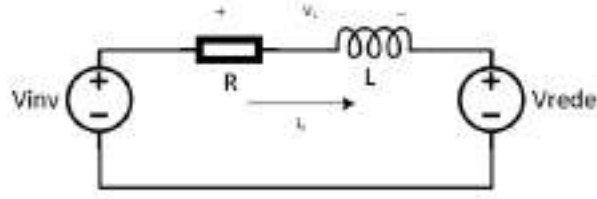


Fonte: [Autoria própria]

3.3 Controle de Potências Ativa e Reativa

Para implementar o controle vetorial de potências ativa e reativa será considerado o sistema conforme indicado na Figura 33, com a fonte V_{inv} sendo a tensão fundamental do inversor e V_{rede} a tensão da rede de distribuição elétrica.

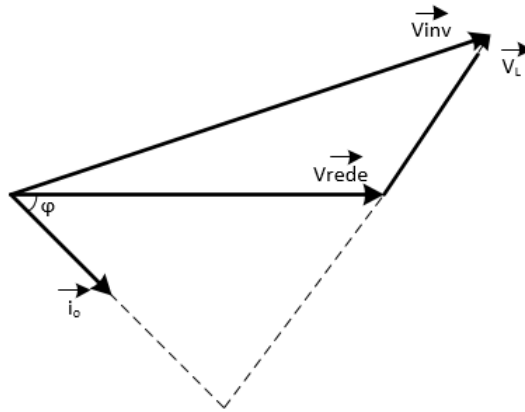
Figura 33: Circuito Para Análise



Fonte: [Autoria própria]

O diagrama fasorial deste sistema está representado na Figura 34.

Figura 34: Diagrama Fasorial do Circuito em Análise



Fonte: [Autoria própria]

Considerando as duas tensões nas coordenadas $\alpha\beta$:

$$V_{inv} = V_{inv\alpha} + jV_{inv\beta}$$

$$V_{rede} = V_{rede\alpha} + jV_{rede\beta} \quad (14)$$

Analisando o circuito proposto de acordo com a Lei das Tensões de Kirchhoff:

$$V_{inv\alpha} = Ri_{0\alpha} + L \cdot \frac{di_{0\alpha}}{dt} + V_{rede\alpha}$$

$$V_{inv\beta} = Ri_{0\beta} + L \cdot \frac{di_{0\beta}}{dt} + V_{rede\beta} \quad (15)$$

Onde $i_{0\alpha}$ e $i_{0\beta}$ são as componentes $\alpha\beta$ da corrente de saída do inversor.

Realizando uma transformação dq à partir da equação (15), a equação (16) pode ser obtida.

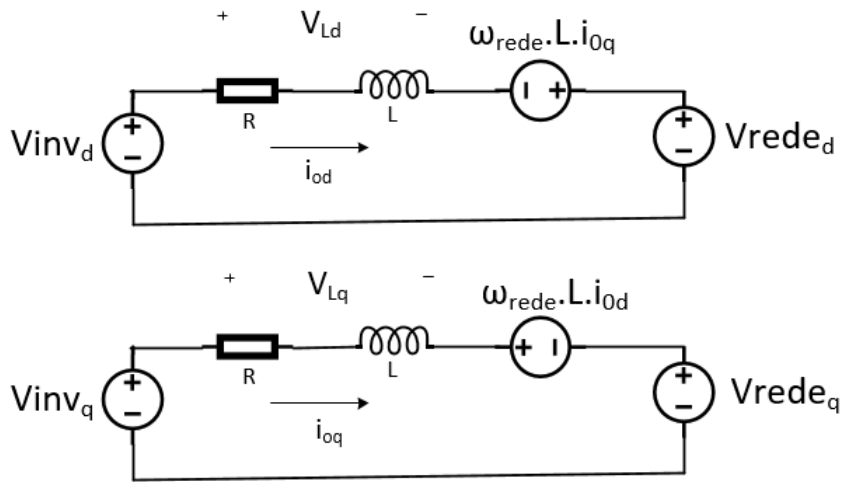
$$\begin{aligned}
V_{inv_d} &= R i_{0d} + L \frac{di_{0d}}{dt} - \omega_{rede} \cdot L \cdot i_{0q} + V_{rede_d} \\
V_{inv_q} &= R i_{0q} + L \frac{di_{0q}}{dt} + \omega_{rede} \cdot L \cdot i_{0d} + V_{rede_q}
\end{aligned}
\tag{16}$$

Onde:

V_{inv_d} e V_{inv_q} são as componentes dq da tensão fundamental do inversor;
 V_{rede_d} e V_{rede_q} são as componentes dq da tensão da rede;
e i_{0d} e i_{0q} são as componentes dq da corrente de saída do inversor.

Após desacoplar as componentes do sistema teremos uma configuração conforme mostrado na Figura 35.

Figura 35: Circuito em Análise Desacoplado

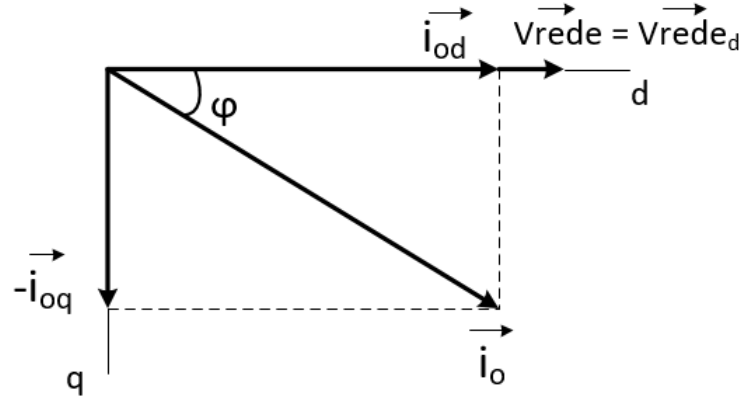


Fonte: [Autoria própria]

Onde $V_{Ld} = (R \cdot i_{0d} + L \cdot \frac{di_{0d}}{dt})$ e $V_{Lq} = (R \cdot i_{0q} + L \cdot \frac{di_{0q}}{dt})$.

Se o fasor de tensão da rede for fixado sobre o eixo d, a relação de fasores pode ser obtida conforme visto na Figura 36.

Figura 36: Fasores do Sistema Desacoplado



Fonte: [Autoria própria]

É possível expressar:

$$V_{rede} = V_{rede_p} \cdot \cos(\omega_{rede} t) \quad (17)$$

$$i_0 = I_0 \cdot \cos(\omega_{rede} t - \phi)$$

$$i_0 = I_{0d} \cdot \cos(\omega_{rede} t) - j I_{0q} \cdot \sin(\omega_{rede} t) \quad (18)$$

Da equação (18), é possível obter a equação (19):

$$i_{0d} = I_0 \cdot \cos(-\phi) = I_0 \cdot \cos(\phi)$$

$$i_{0q} = I_0 \cdot \sin(-\phi) = -I_0 \cdot \sin(\phi) \quad (19)$$

Onde V_{rede_p} , I_0 , I_{0d} e I_{0q} são valores de pico.

Neste ponto é possível se obter as potências ativa e reativa da rede com auxílio das equações 17 e 19 da seguinte forma:

$$P = V_{rede_p} \cdot \cos(\omega_{rede} t) \cdot I_{0d} \cdot \cos(\omega_{rede} t)$$

$$Q = -V_{rede_p} \cdot \cos(\omega_{rede} t) \cdot I_{0q} \cdot \sin(\omega_{rede} t) \quad (20)$$

Com isso é obtida a potência ativa em função da componente real I_{0d} e a potência reativa em função da componente imaginária I_{0q} da corrente do inversor, que podem ser controladas de forma desacoplada.

Considerando o fasor de tensão da rede sobre o eixo d, conforme visto na Figura 36, as equações (16) podem ser resumidas a:

$$\begin{aligned} V_{invd} &= V_{Ld} - \omega_{rede} \cdot L \cdot i_{0q} + V_{rede_d} \\ V_{invq} &= V_{Lq} + \omega_{rede} \cdot L \cdot i_{0d} \end{aligned} \quad (21)$$

Onde: V_{rede_q} é igual a zero devido $V_{rede_d} = V_{rede}$.

Representando a corrente i_{0d} no domínio s e obtendo uma função de transferência com a igualdade anterior:

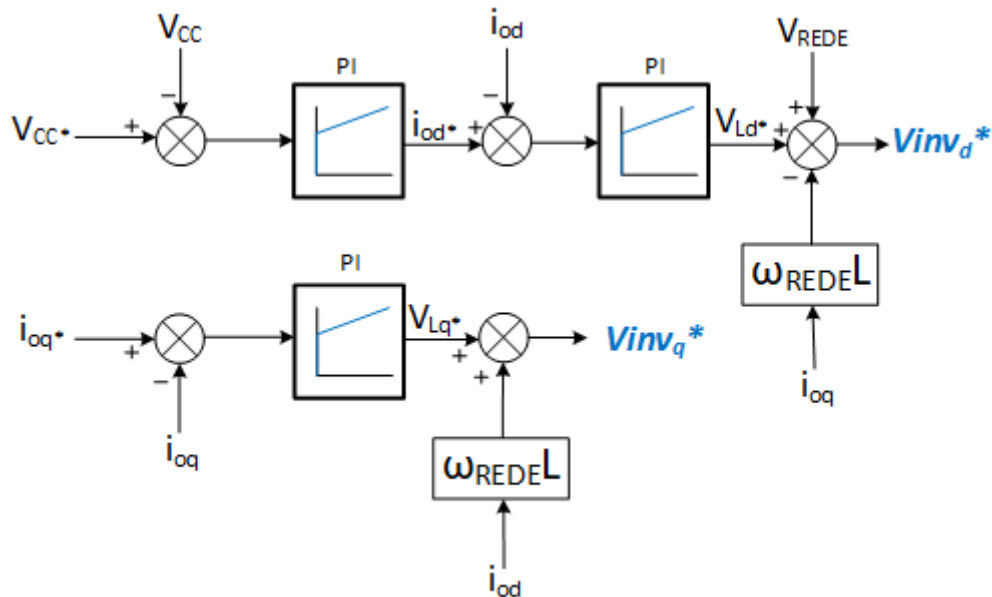
$$\begin{aligned} V_{Ld}(s) &= R \cdot i_{0d}(s) + s \cdot L \cdot i_{0d}(s) \\ \frac{i_{0d}(s)}{V_{Ld}(s)} &= \frac{1}{R + sL} \end{aligned} \quad (22)$$

De maneira análoga para i_{0q} :

$$\frac{i_{0q}(s)}{V_{Lq}(s)} = \frac{1}{R + sL} \quad (23)$$

Com as equações (22) e (23) podem ser obtidas duas malhas de controle independentes para a potência ativa e reativa injetadas no sistema, conforme visto na Figura 37.

Figura 37: Controle das Potências Ativa e Reativa Através de i_{od} e i_{oq}



Fonte: [Autoria própria]

Para definir os ganhos dos dos controladores PI foi utilizada a técnica proposta por [16] e em seguida ajustados os ganhos para obter o melhor resultado dos controladores, por tentativa e erro. Desta forma os ganhos dos controladores de tensão do barramento foram fixados em $Kp_{(barramento)} = 0,414$ e $Ki_{(barramento)} = 3,313$ e os controladores de corrente em $Kp_{(corrente)} = 48,36$ e $Ki_{(corrente)} = 10,14$.

Como estratégia para utilizar o controle de potências ativa e reativa descrito até aqui foi implementado o controle mostrado na Figura 38, que controla a potência reativa injetada no sistema pelo painel fotovoltaico através do controle do inversor.

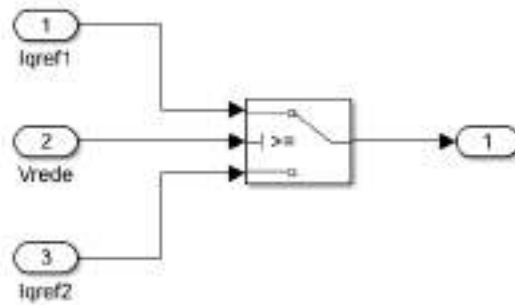
Figura 38: Controle de Injeção da Potência Reativa



Fonte: [Autoria própria]

Este controle é baseado na técnica de chaveamento condicional, onde um sensor detecta um sinal de referência e abaixo deste o sistema faz o chaveamento da saída. Tal controle foi implementado no Matlab/Simulink[®] através do elemento *Switch* da biblioteca *Signal Routing* deste ambiente de simulação, conforme pode ser visto na Figura 39.

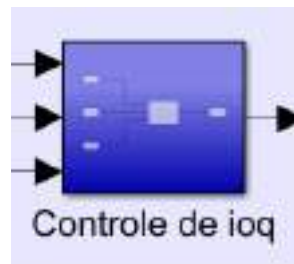
Figura 39: Chaveamento do Controle de Injeção da Potência Reativa



Fonte: [Autoria própria]

Foi criado um bloco para facilitar a visualização deste controle e realizar o acoplamento com o restante do sistema, conforme visto na Figura 40.

Figura 40: Subsistema do Circuito de Chaveamento do Controle de Injeção da Potência Reativa



Fonte: [Autoria própria]

Para o sistema de estudo foi definido que a tensão de referência da rede vista como o parâmetro condicional deste controle será o valor de 90% da tensão nominal, portanto se a tensão da rede for igual ou superior à referência o sistema deve fornecer $i_{0q} = 0$ para a saída deste bloco e entrada no circuito de controle, fazendo a potência reativa do sistema ser fixada em zero e deixando o fator de potência da carga unitário.

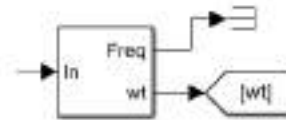
Caso o valor da tensão seja inferior ao valor de referência o sistema faz o chaveamento da saída, que agora injetará um i_{0q} até o limite imposto pelo painel fotovoltaico. Sabendo que a tensão de máxima potência do conjunto de painéis é 207,5 V e a corrente de máxima potência é 16,14 A, obtemos assim a potência aparente máxima gerada pelo painel de 3,349 kVA. Com isso, fixando o fator de potência da carga em 0,92 obtemos a potência reativa máxima que pode ser injetada pelo painel de $Q_{MAX} = -1,312$ kVAr. Com a potência reativa máxima que pode ser injetada pelo painel e utilizando a equação 20 temos que $i_{0q-MAX} = -13,25$ A.

Para realizar todo o processo de controle descrito até aqui primeiramente é necessário que seja realizada uma transformação $\alpha\beta$ no vetor de corrente de

saída do inversor, conforme descrito na equação 10 e após uma transformação $\alpha\beta$ -dq, como visto na equação 12, para que sejam geradas as coordenadas i_{0q} e i_{0d} da corrente do inversor. Após executado o controle serão geradas duas referências de tensão, v_{0d} e v_{0q} , que são convertidas para as coordenadas $\alpha\beta$ através da equação 13, onde apenas o sinal α é necessário para gerar o sinal, em dois níveis, para chaveamento do inversor conectado à carga.

No processo de transformação $\alpha\beta$ -dq e dq- $\alpha\beta$ é necessário utilizar a referência de tensão da rede elétrica, que é obtido através de um bloco PLL (*Phase Locked Loop*), que tem na entrada a tensão da rede e na saída a referência angular variando com o tempo (ωt), conforme visto na Figura 41.

Figura 41: PLL Utilizado no Matlab/Simulink®



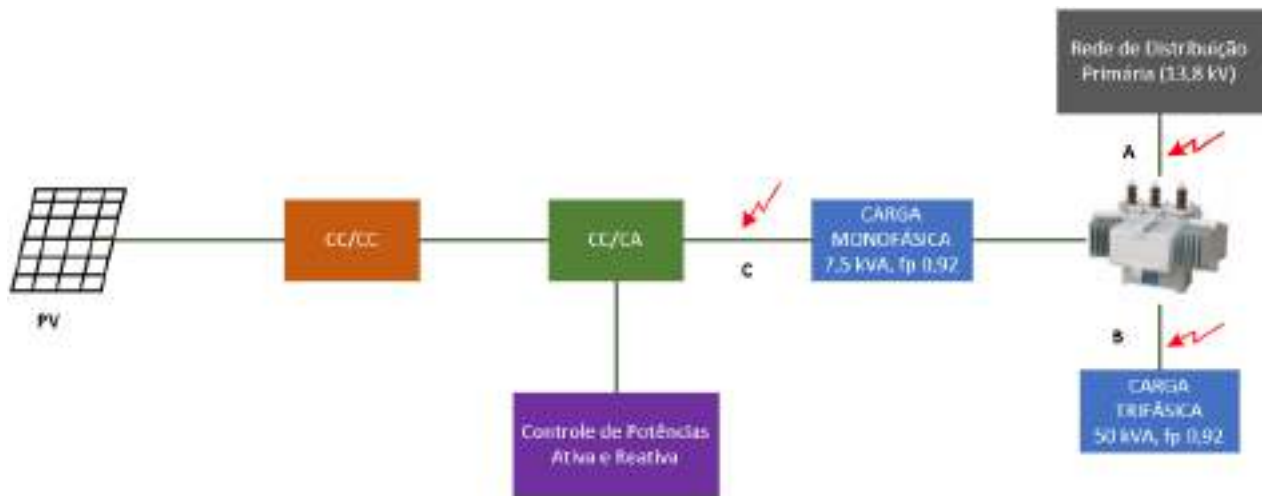
Fonte: [Autoria própria]

4 AVALIAÇÕES E RESULTADOS

Todo o controle foi simulado com auxílio do *software* Matlab/Simulink[®] e os resultados obtidos serão discutidos neste capítulo. O esquemático do sistema utilizado no software citado pode ser visto no APÊNDICE (I-V).

O diagrama simplificado de todo o sistema, mostrando os pontos dos curtos circuitos (A, B e C), onde foi realizada a avaliação dinâmica do controle, pode ser visto na Figura 42.

Figura 42: Diagrama Simplificado do Sistema em Estudo

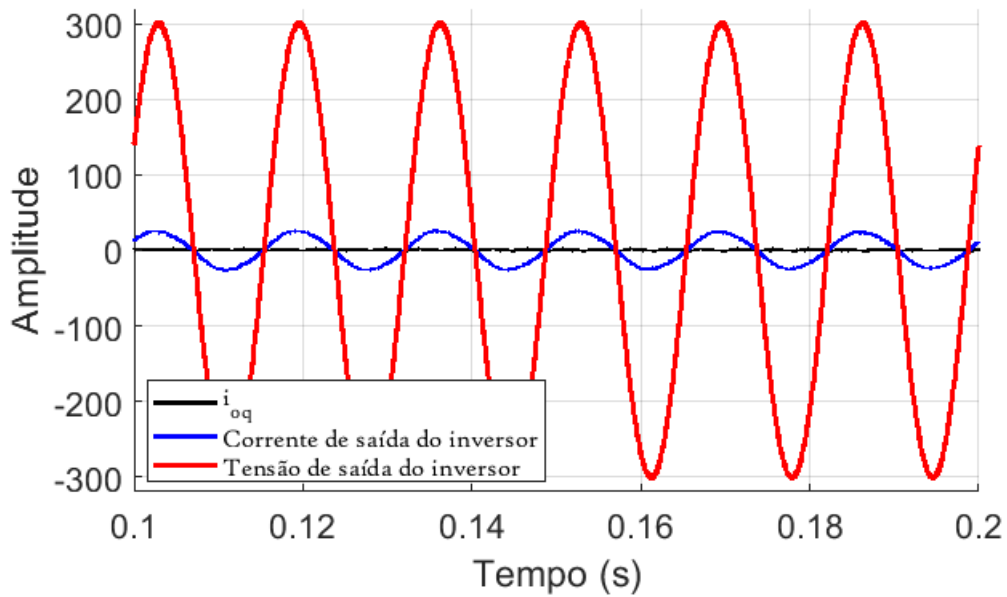


Fonte: [Autoria própria]

4.1 Funcionamento do Controle

Para avaliar o funcionamento do controle a corrente i_{0q} foi fixada, primeiramente, em zero e verificadas as formas de onda de tensão e corrente na saída do inversor, conforme pode ser observado na Figura 43, onde i_{0q} permaneceu em zero, deixando o sistema com potência reativa nula, e as formas de onda de tensão e corrente na saída do inversor em fase, portanto, com fator de potência unitário.

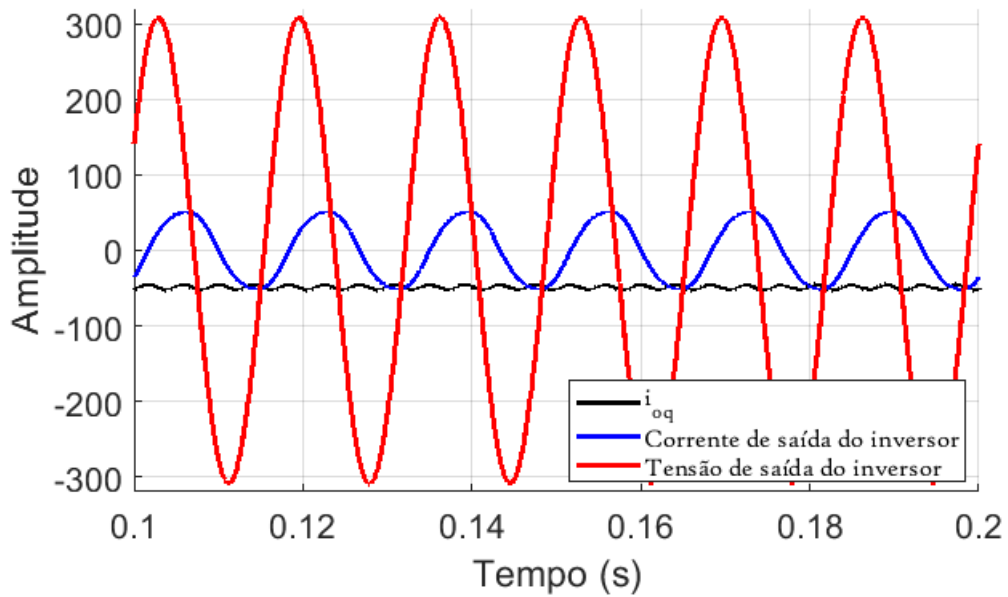
Figura 43: Corrente e Tensão de Saída do Inversor com $i_{0q} = 0$



Fonte: [Autoria própria]

No segundo momento i_{0q} foi fixada em -50 A, para avaliar a injeção de potência reativa no circuito, conforme é visto na Figura 44, onde é possível verificar a defasagem angular entre a tensão e corrente do inversor. Este valor de corrente foi definido para se obter o resultado de um caso com maior injeção de potência reativa e de possível implementação, observando o limite de injeção que não provoque uma distorção nos sinais analisados, de tal forma que o controle tenha uma faixa de comparação razoável para análise.

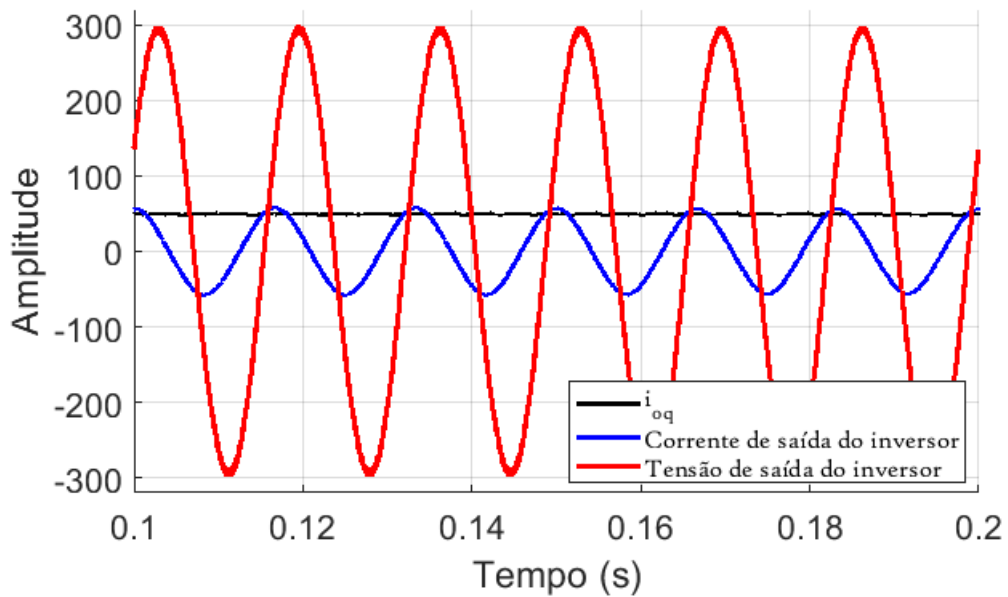
Figura 44: Corrente e Tensão de Saída do Inversor com $i_{0q} = -50$ A



Fonte: [Autoria própria]

Da mesma forma, foi realizado o teste para o consumo de potência reativa fazendo $i_{0q} = 50$ A. As formas de onda de tensão e corrente na saída do inversor podem ser vistas na Figura 45.

Figura 45: Corrente e Tensão de Saída do Inversor com $i_{0q} = 50$ A



Fonte: [Autoria própria]

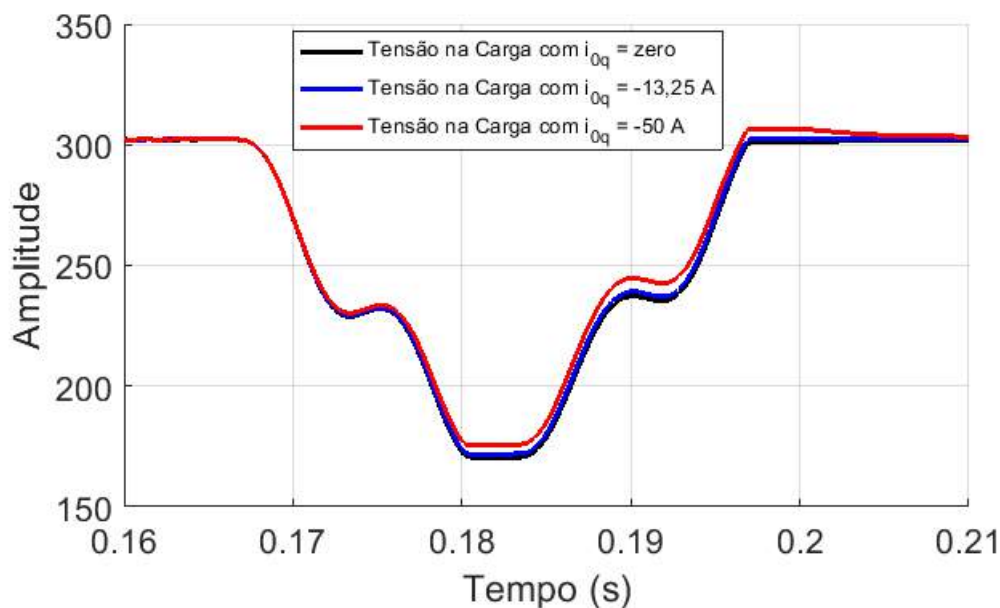
4.2 Comportamento Dinâmico do Controle

Uma nova avaliação do controle foi realizada na presença de um curto-circuito monofásico ocorrendo na mesma fase que a carga está ligada (fase A). O curto foi aplicado, entre os tempos 0,167 e 0,170 s, em três pontos distintos da rede para verificar a resposta do controle, conforme será descrito nos tópicos 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3.

4.2.1 Curto-Circuito no Ponto A

O primeiro curto-circuito fase terra foi aplicado na fase A, no lado de média tensão (13,8 kV) do transformador de distribuição (ponto A indicado na Figura 42). Na Figura 46 são vistas as formas de onda do módulo da tensão na carga para o controle ajustado com i_{0q} em 0, -13,25 e -50 A, onde é possível observar a redução no afundamento de tensão de acordo com a injeção de i_{0q} .

Figura 46: Módulo da Tensão na Carga Após Curto no Ponto A e $i_{0q} = 0, -13,25$ e -50 A

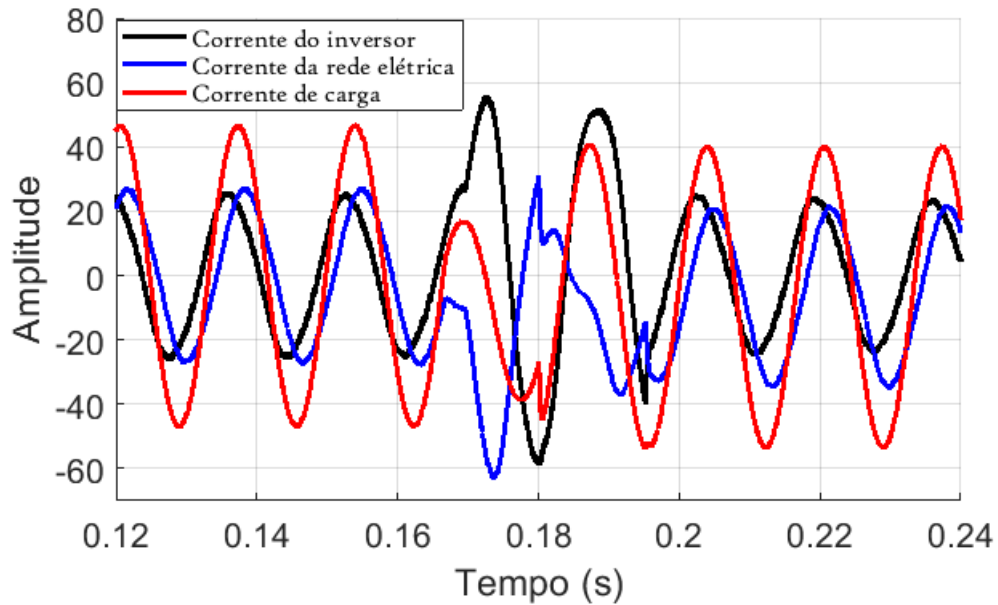


Fonte: [Autoria própria]

As correntes no inversor, na rede elétrica de distribuição e na carga, quando o controle injeta $i_{0q} = -50$ A, podem ser vistas na Figura 47, onde é possível perceber a maior contribuição da corrente do inversor durante o curto-circuito, devido a corrente da rede alimentar o curto-circuito com maior intensidade que a corrente oriunda do inversor que, por sua vez, contribui em maior proporção para manter a corrente de carga. Nos momentos em que

não há perturbação, as correntes do inversor e da rede se dividem quase na mesma proporção para suprir a corrente de carga.

Figura 47: Correntes no Inversor, Rede Elétrica de Distribuição e Carga (Curto no Ponto A)

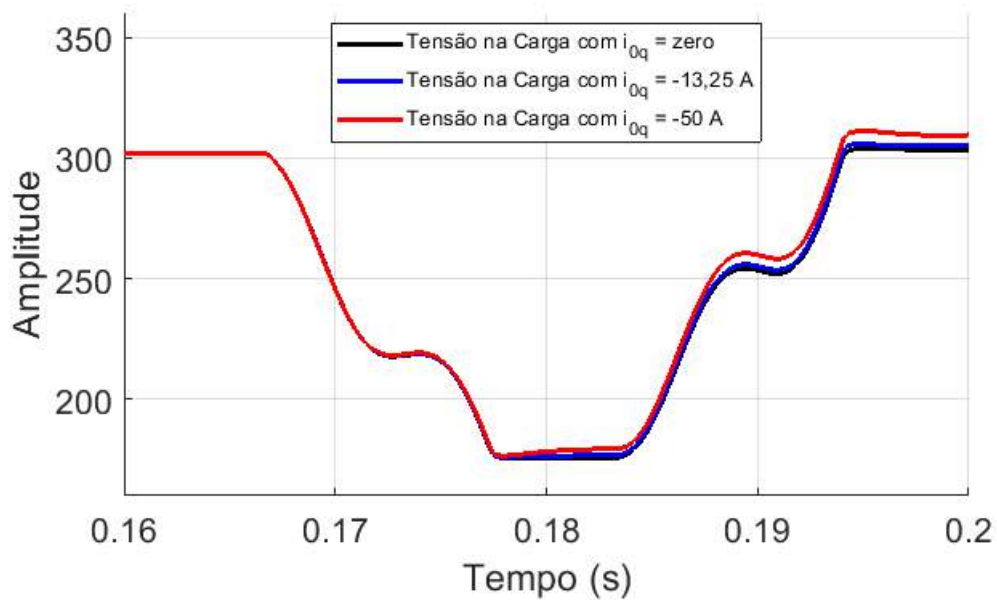


Fonte: [Autoria própria]

4.2.2 Curto-Circuito no Ponto B

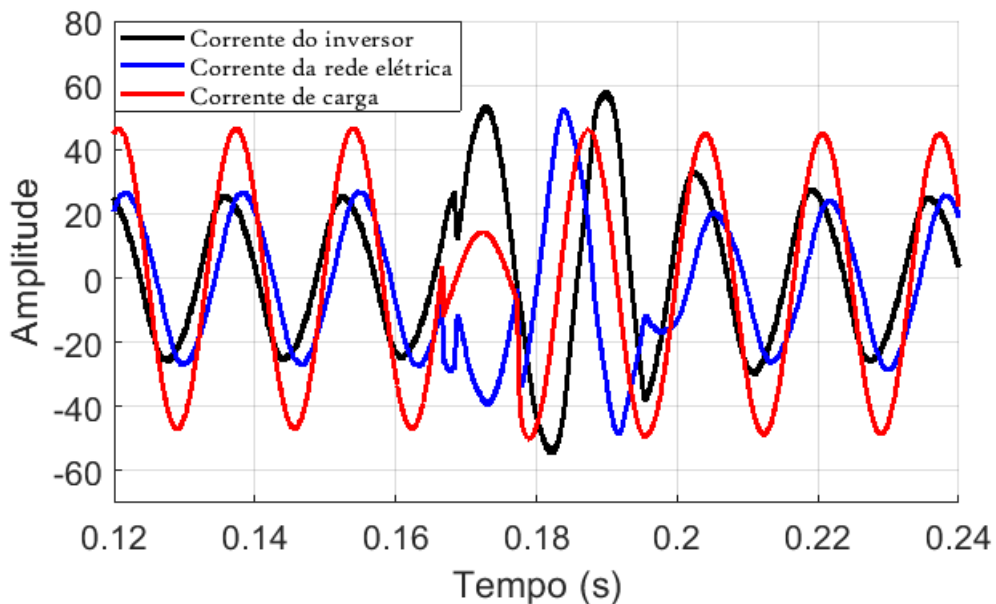
Outro curto fase terra foi realizado na fase A, próximo à carga trifásica ligada através da rede de distribuição de baixa tensão (380 V/ 220 V, ponto B indicado na Figura 42). As formas de onda para este caso podem ser vistas nas Figuras 48 e 49.

Figura 48: Módulo da Tensão na Carga Após Curto no Ponto B e $i_{0q} = 0, -13,25$ e -50 A



Fonte: [Autoria própria]

Figura 49: Correntes no Inversor, Rede Elétrica de Distribuição e Carga (Curto no Ponto B)



Fonte: [Autoria própria]

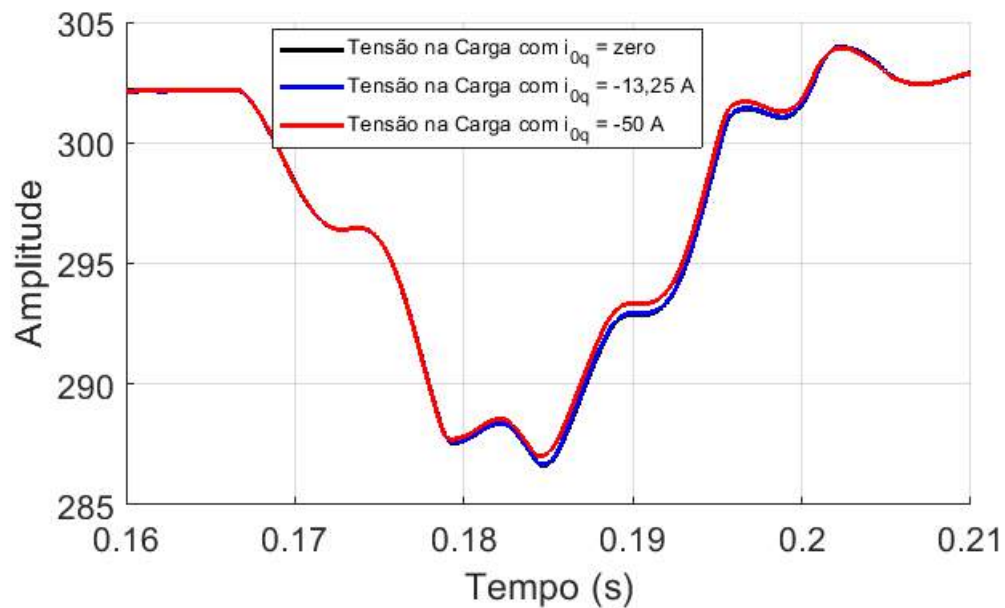
Como no caso anterior a redução no afundamento de tensão mais significativa ocorreu no controle com $i_{0q} = -50$ A, porém em menor módulo que no primeiro caso. A característica de corrente também se altera, pois neste caso apesar da contribuição de corrente do inversor ser maior, a rede de distribuição consegue uma contribuição mais elevada do que no caso anterior

para suprir a corrente de carga. Esta elevação na contribuição da corrente da rede para alimentar a carga é devido o curto estar no lado de baixa tensão do transformador, e desta forma, parte da corrente da rede alimenta o curto circuito e a outra parte alimenta a carga, diferente do caso anterior onde a corrente já era drenada da rede para o curto no primário do transformador.

4.2.3 Curto-Circuito no Ponto C

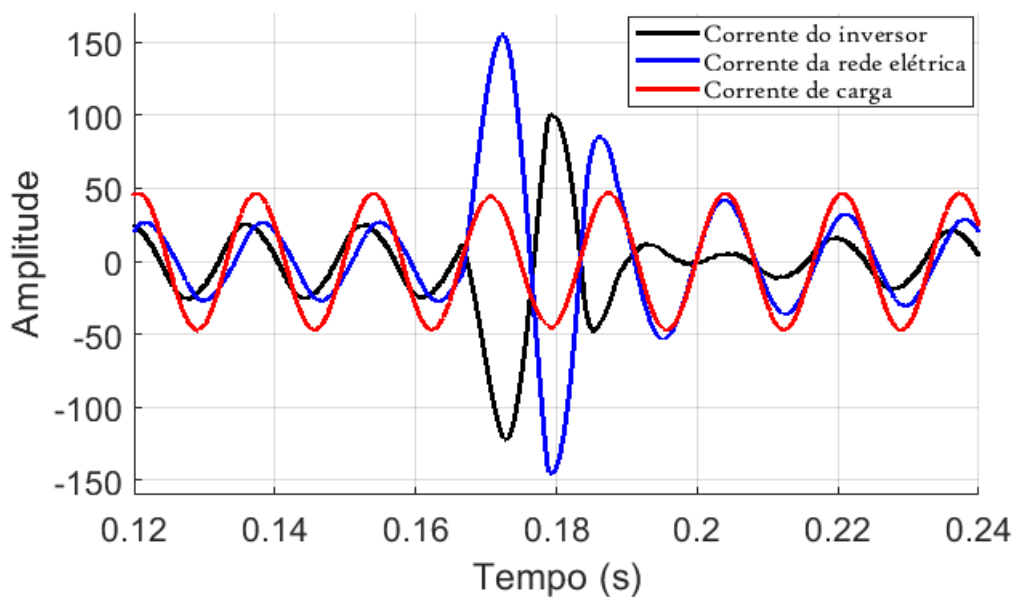
O último caso avaliado foi de um curto-circuito ocorrendo entre a carga monofásica e o inversor (ponto C indicado na Figura 42), também na rede de distribuição de baixa tensão (380 V / 220 V). O comportamento de tensão na carga e correntes, conforme vistos nos casos anteriores, podem ser vistos para este caso nas Figuras 50 e 51.

Figura 50: Módulo da Tensão na Carga Após Curto no Ponto C com $i_{0q} = 0, -13,25$ e -50 A



Fonte: [Autoria própria]

Figura 51: Correntes no Inversor, Rede Elétrica de Distribuição e Carga (Curto no Ponto C)

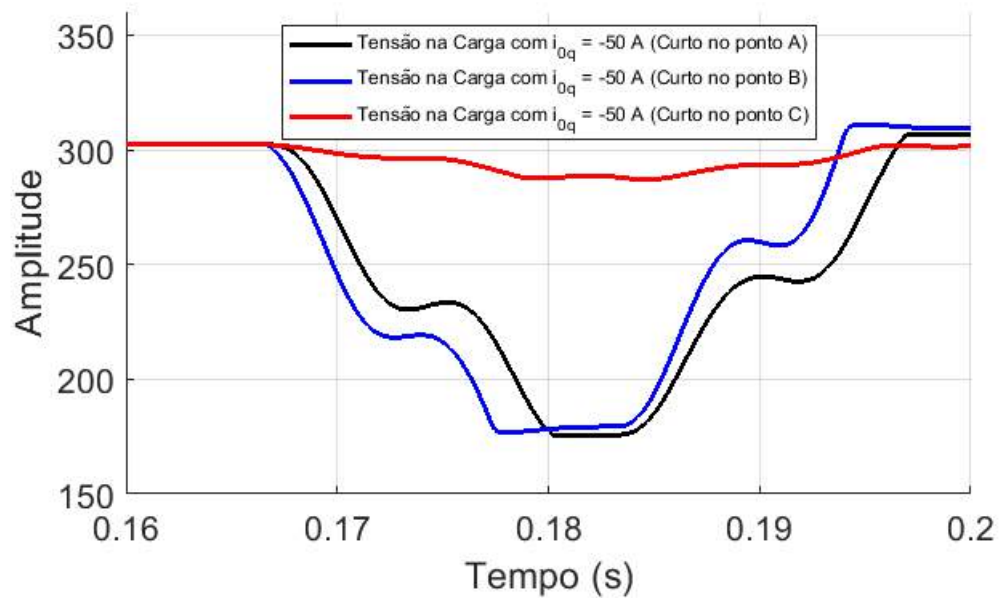


Fonte: [Autoria própria]

Para este caso a tensão na carga teve o menor afundamento de todos, porém o controle ainda conseguiu reduzir este afundamento, em menor módulo que nos outros casos. Percebe-se também que as correntes na rede elétrica de distribuição e no inversor aumentaram significativamente em relação aos outros casos e conseguiram controlar a corrente de carga de forma que o curto na rede não sensibilizou de forma significativa a corrente de carga, que permanece com seu formato de onda praticamente inalterado. Isto ocorreu devido o curto estar localizado no ponto C, que tem controle ativo do inversor. A corrente da rede não teve que se dividir entre o curto e a carga e, portanto, contribuiu para os dois no mesmo sentido, não sofrendo uma distorção como nos outros casos. A corrente do inversor foi controlada numa proporção que tornou possível a estabilidade do nível da corrente na carga, mesmo diante do curto circuito. Como consequência as contribuições de corrente do inversor e da rede elétrica chegaram numa faixa de 150 A no momento da perturbação.

Um comparativo da redução no afundamento de tensão sofrido pela carga durante o curto nos pontos A, B e C quando i_{0q} é fixado em -50 A pode ser visto na Figura 52, onde é notória a melhoria do afundamento de tensão no caso do curto no ponto C.

Figura 52: Módulo de Tensão na Carga no Momento dos Curtos nos Pontos A, B e C com $i_{0q} = -50$ A



Fonte: [Autoria própria]

Neste ponto é possível destacar a eficiência do controle em todos os casos avaliados, em menor ou maior grau, tornando válida a utilização do mesmo para casos onde seja necessário a redução do nível de afundamento de tensão numa carga monofásica alimentada por painel fotovoltaico conectado à rede elétrica de distribuição ou em outros casos que se assemelhem à esta configuração.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Neste trabalho de conclusão de curso foi implementado, através de software de simulação, o controle vetorial de um inversor de painel fotovoltaico conectado à uma carga monofásica suprida, em paralelo, pela rede elétrica de distribuição. O controle foi configurado para fornecer potência ativa e reativa de forma independente e, com isso, foi utilizado para controlar o afundamento de tensão, na carga do sistema em estudo, através da injeção de potência reativa no momento da anomalia presente no sistema.

O controle foi avaliado de forma a comprovar seu funcionamento quanto ao controle desacoplado de potências ativa e reativa, variando a injeção de potência reativa e verificando as formas de onda na saída do inversor. E também quanto ao seu comportamento dinâmico, onde o sistema foi submetido à curtos-circuitos em diversos pontos da rede elétrica e verificados os níveis de afundamento de tensão sofridos pela carga no momento de tais surtos. Os cenários criados permitiram comprovar a eficiência do controle para o objetivo proposto, elevando o módulo de tensão na carga durante os transitórios impostos, fato que merece destaque neste controle, pois este efeito causado pode evitar a atuação de relés de proteção que interromperiam o suprimento de energia da carga, realizando o seccionamento da mesma. É importante destacar que o controle aqui proposto deve ser utilizado com equipamentos de proteção adequados e bem dimensionados, de forma que caso o defeito causador do afundamento de tensão na carga seja permanente, esta venha a ser seccionada e protegida de forma adequada.

Neste momento é importante citar a importância deste trabalho para aplicação dos conceitos construídos durante toda a graduação em Engenharia Elétrica, pois é de fundamental importância o contato do aluno com tecnologias reais e o uso dos softwares de simulação, que são ferramentas essenciais para o desenvolvimento de projetos com alto nível de complexidade e resultados pouco divergentes de casos reais, sem a necessidade de um gasto inicial com um projeto modelo, que não teria referências do comportamento dinâmico do sistema.

Diante do que foi proposto neste trabalho outros campos de pesquisa e aplicação para projetos futuros podem ser abordados.

A melhoria da eficiência do controle, utilizando propostas que elevem a injeção de potência reativa no sistema, reduzindo o afundamento de tensão na carga a um nível imperceptível para o sistema de proteção na ocorrência de defeitos transitórios na rede elétrica é um campo que pode ser abordado.

A utilização deste modelo de controle para a implementação física do

mesmo e uma avaliação entre resultados reais e de simulação.

O controle implementado também pode ser utilizado em outros campos de pesquisa, como por exemplo na geração eólica. Utilizando os mesmos conceitos ou utilizando técnicas diferentes para o controle proposto, como o exemplo da lógica Fuzzy.

Também há a possibilidade de um estudo de viabilidade econômica ao utilizar este controle em sistemas com grande variação de tensão, relacionando para uma indústria, por exemplo, o tempo necessário para retorno de um investimento tendo em vista a parada de todo um sistema de produção e retomada do seu funcionamento após um defeito transitório que não afetaria o funcionamento do mesmo.

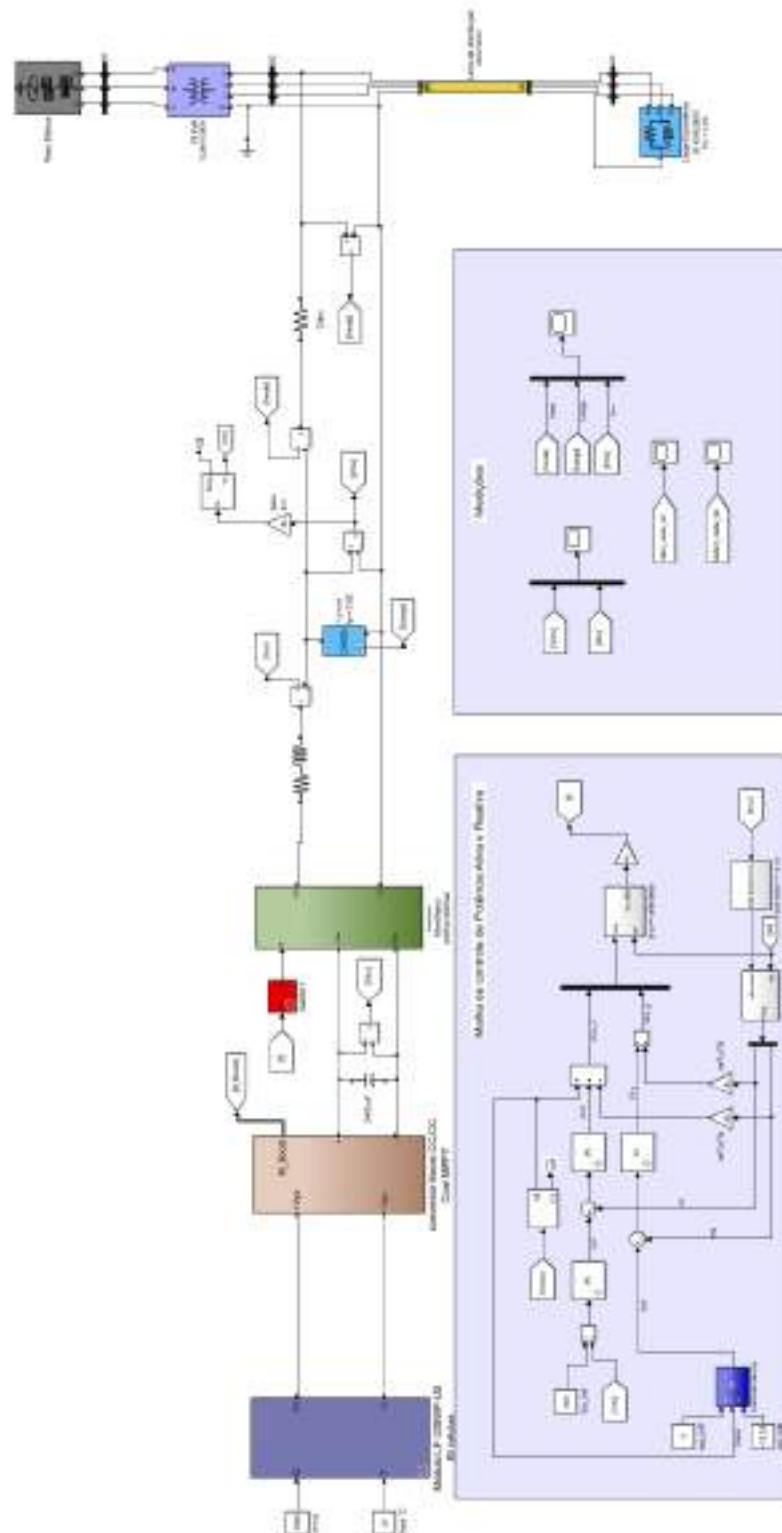
Referências

- [1] Samerchur S., Premrudeeprechacharn S., Kumsuwun Y., and Higuchi K. **Power Control of Single-Phase Voltage Source Inverter for Grid-Connected Photovoltaic Systems**. IEEE Trans. Energy Converters. 2011.
- [2] FARIELLO, D. **Governo cria programa de incentivo à geração de energia solar**. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/governo-cria-programa-de-incentivo-geracao-de-energia-solar>. Acesso em: 13.fev.2018.
- [3] BINH, T. C., DAT M. T., DUNG, N. M., AN, P. Q., TRUC, P. D. and PHUC, N. H. **Active and Reactive Power Controller for Single-Phase Grid- Connected Photovoltaic Systems**. Artigo IEEE, 2009.
- [4] PORTAL DA ENERGIA. **Tipos de Pannel Fotovoltaico** Disponível em: <http://portaldaenergia.com/tipos-de-pannel-fotovoltaico>. Acesso em 19.abr.2018.
- [5] BRAVO ENERGIA. **Pannel Monocristalino X Policristalino** Disponível em: <http://www.bravoenergia.com/trilha-solar-3-pannel-solar>. Acesso em 19.abr.2018.
- [6] Sumathi, Ashok Kumar and Surekha. **Solar PV and Wind Energy Conversion Systems**. Springer.pp; 630 – 631. 2015.
- [7] MASTERS. **Renewable and efficient electric power systems**. Stanford University. John Wiley e Sons, 2004.
- [8] CALAIS, M.; MYRZIK, J.; SPOONER, T.; AGELIDIS, V. G. **Inverters for single-phase grid-connected photovoltaic systems – An overview**. Proceedings of Power Electronics Specialists Conference, p. 1995-2000. 2002.
- [9] ALONSO-ABELLA, M.; CHENLO, F. **Choosing the right inverter for gridconnected PV systems**. Renew Energy World. v. 7. p. 132-147. 2004.
- [10] RAMPINELLI, G. A.; KRENZINGER, A. e ROMERO, F. C. **Revista Ciências Exatas e Naturais**. Vol.15, no 1, Jan/Jun 2013.

- [11] Aouadi C., Abouloifa A., Lachkar I., Hamdoun A., Boussair Y., Aourir M. and Mchaour Y. **Multi Loop Based Control of Photovoltaic System Connected to the Single Phase Grid.** International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2016.
- [12] Jain S., Nanduri S. P., Shadmand M. B. and Balog R. S. **Direct Decoupled Active and Reactive Predictive Power Control of Grid-Tied Quasi-Z-Source Inverter for Photovoltaic Applications.** IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2017.
- [13] Charan C. R., Dr. Sujatha K. N. and Satsangi K. P. **Fuzzy Logic Controller based Model for Rooftop/Grid connected Solar Photovoltaic System.** IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC), 2016.
- [14] Aouadi C., Abouloifa, Hamdoun A. and Boussairi Y. **Advanced Non-linear Control of Photovoltaic System Connected to the Grid.** Second World Conference on Complex Systems (WCCS), 2014.
- [15] Barbi I. **Teoria Fundamental do Motor de Indução.** Edição do autor, 1985.
- [16] Bishop R. H. **Modern Control Systems Analysis and Design Using MATLAB®.** ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY.
- [17] Braga H. A. C. and Barbi, I. **Conversores Estáticos Multiníveis - Uma Revisão.** vol 11, no. 1, pp 20-28, 2000.
- [18] SOUSA, K. K. F. **Controle da Tensão do Barramento CC Pelo Inversor Monofásico Ponte Completa em um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica.** Trabalho de Conclusão de Curso. UFPB. Campus João Pessoa. Abril 2016.

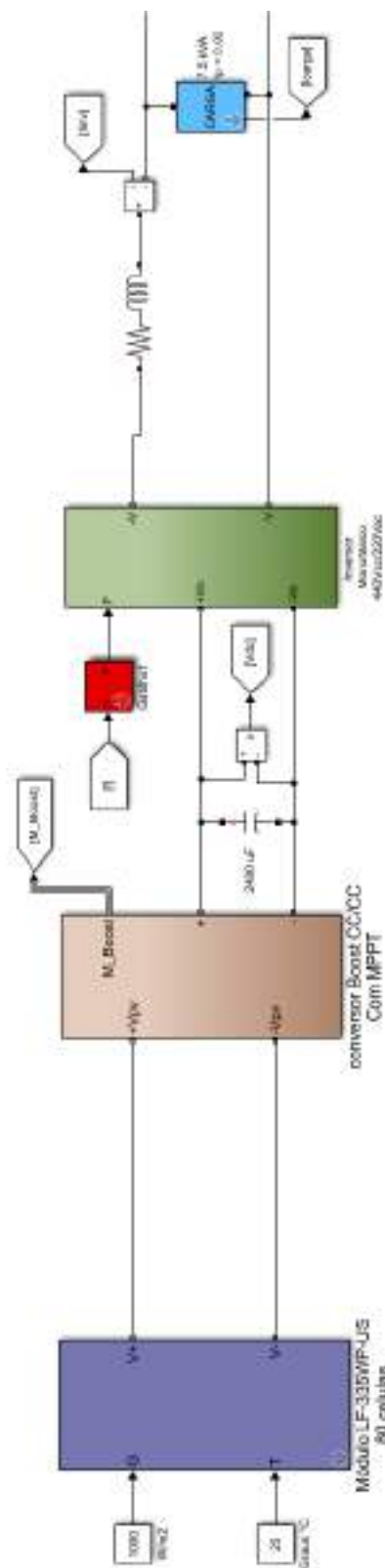
6 APÊNDICE

6.1 Anexo I - Sistema Utilizado Para Simulação no Software Matlab / Simulink® - Completo



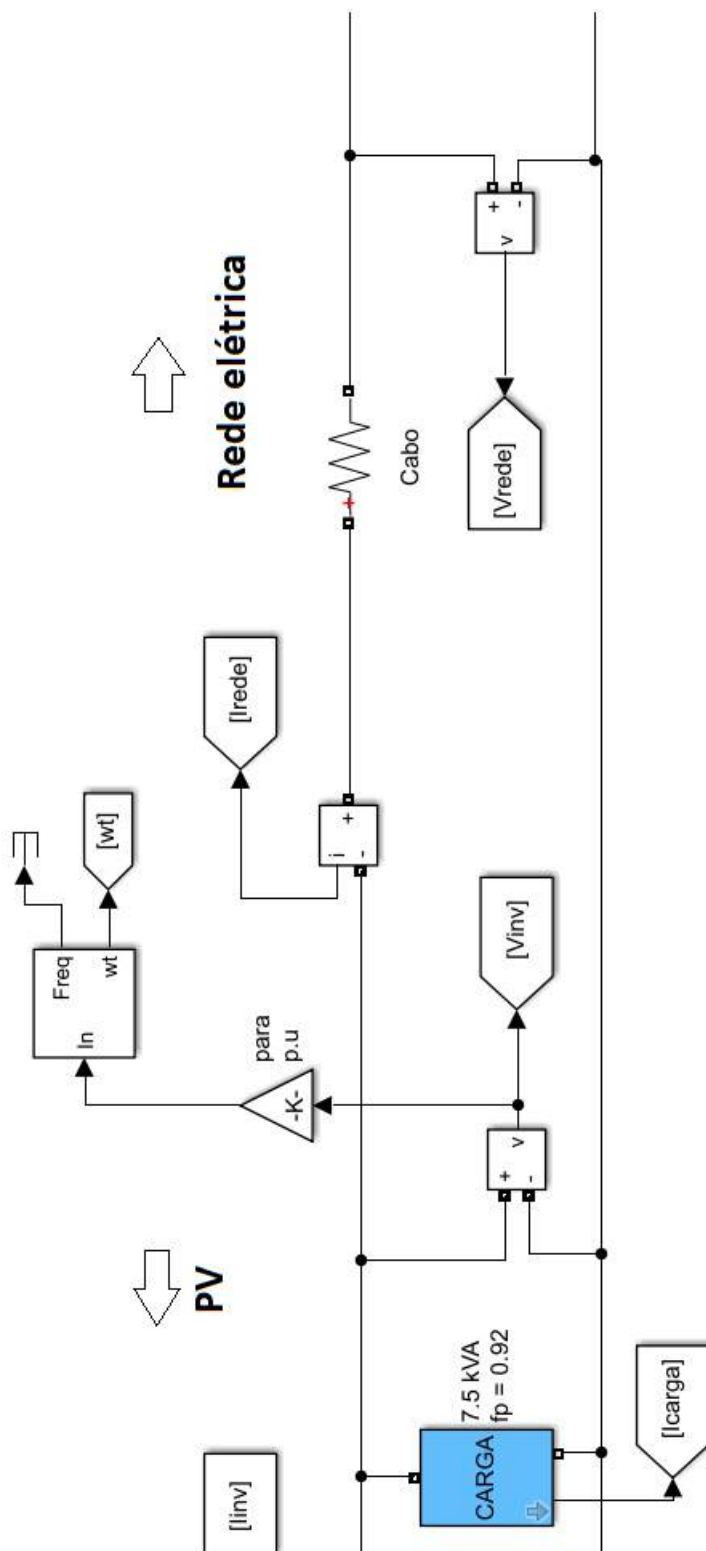
Fonte: [Autoria própria]

6.2 Anexo II - Sistema Utilizado Para Simulação no Software Matlab / Simulink[®] - Parte 1 (PV, Boost, Inversor e Carga)



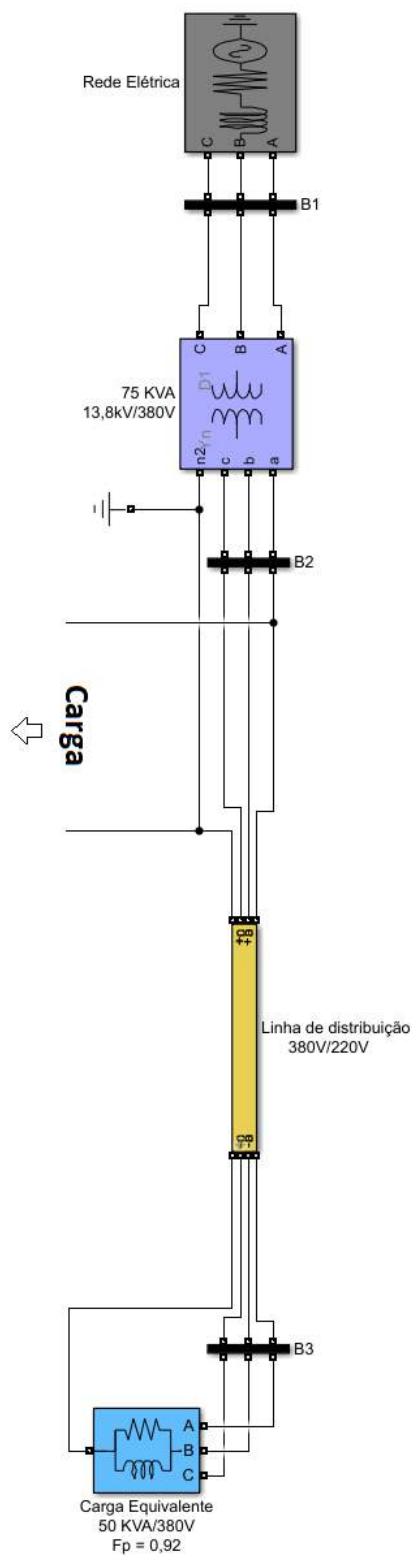
Fonte: [Autoria própria]

6.3 Anexo III - Sistema Utilizado Para Simulação no Software Matlab / Simulink® - Parte 2 (Carga e PLL)



Fonte: [Autoria própria]

6.4 Anexo IV - Sistema Utilizado Para Simulação no Software Matlab / Simulink[®] - Parte 3 (Rede de Distribuição e Carga Trifásica)



Fonte: [Autoria própria]

