



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA

JOSÉ DJAIR GUEDES DA SILVA

AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA UTILIZANDO PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS

Campina Grande
2017

JOSÉ DJAIR GUEDES DA SILVA

AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA UTILIZANDO
PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

João Batista Morais dos Santos

Campina Grande, 2017

JOSÉ DJAIR GUEDES DA SILVA

AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA UTILIZANDO
PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor João Batista Morais dos Santos, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho a meus pais, por todo o suporte necessário para conclusão deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me proporcionar força e coragem durante toda esta longa caminhada.

Aos meus pais, Graça e Djalma, que com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida, sempre pacientes e dispostos a me ajudar no que eu precisasse.

A toda minha família, por sua capacidade de acreditar e investir em mim, em especial a tia Toinha, que foi uma das grandes incentivadoras para que eu chegasse até aqui.

Ao professor João Batista Morais dos Santos, por todo apoio e orientação para conclusão deste trabalho.

A todos meus amigos, em especial os que conheci durante o curso, companheiros de estudo e irmãos na amizade que fizeram parte da minha formação, pelo apoio e incentivo constante.

A todos os meus professores, por me proporcionarem o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional.

“As conquistas são daqueles que batalham. Por isso o que alcancei até hoje é apenas uma pequena parte de tudo que ainda irei conquistar.”

José Djair Guedes

RESUMO

Neste trabalho são feitas avaliações de estratégias de controle para geração de energia, utilizando painéis fotovoltaicos conectados a rede. Este tipo de geração de energia elétrica é uma solução para a diminuição do uso de fonte poluentes e não renováveis. Uma das vantagens é o suprimento da demanda local de energia de forma distribuída e nas proximidades da carga, diminuindo a necessidade de longas linhas de transmissão. Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica não necessitam de um banco de baterias, como geralmente ocorre com os sistemas isolados ou híbridos, pois toda a energia gerada pelos painéis é instantaneamente transferida para a rede CA. Foi feito um estudo das normas regulamentadoras para este tipo de conexão. As estratégias de controle estudadas são: controlador PI clássico no referencial estacionário, controlador PI em um referencial síncrono e controlador proporcional ressonante.

Palavras-chave: Controle, Energia Fotovoltaica, Geração Distribuída, Conexão à Rede Elétrica.

ABSTRACT

In this work, the evaluation of control strategies for power generation using photovoltaic panels connected to the network. This type of power generation is a solution to reduce the use of polluting and non-renewable source. One advantage is the supply of local energy demand in a distributed manner and near the load, reducing the need for long transmission lines. Photovoltaic systems connected to the electricity grid do not require a battery bank, as usually occurs with single or hybrid systems, because all the energy generated by the panels is instantly transferred to the network CA. a study of regulatory standards for this type of connection was made. Control strategies are studied: classical PI controller in the stationary reference, PI controller in a synchronous reference and resonant proportional controller.

Keywords: Control, Photovoltaic Energy, Distributed Generation, Power Connection.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Irradiação solar global média	16
Figura 2: Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica	17
Figura 3: Curva característica corrente versus tensão e potência versus tensão	18
Figura 4: Topologia de um conversor cc-ca aplicado a sistemas fotovoltaicos	25
Figura 5: Componentes de um sistema fotovoltaico conectado a rede	26
Figura 6: Esquema de ligação com a rede elétrica.....	27
Figura 7: Tipos de centrais geradoras.....	30
Figura 8: Malha de controle	34
Figura 9: Circuito do conversor buck.	39
Figura 10: Saída do conversor buck	40
Figura 11: Circuito do conversor boost	40
Figura 12: Saída do conversor boost.	41
Figura 13: Conversor cc-ca meia ponte.....	42
Figura 14: Saída do circuito da Figura 12.	42
Figura 15: Conversor cc-ca ponte completa.....	43
Figura 16: Saída do circuito da Figura 14	43
Figura 17: Modulação unipolar	44
Figura 18: Modulação bipolar	44
Figura 19: Resposta em frequência da malha fechada para o PI estacionário	45
Figura 20: Resposta no domínio do tempo PI estacionário	46
Figura 21: Corrente de referência (azul) e corrente de saída (preto)	47
Figura 22: Resposta em frequência para $f = 60$ Hz	47
Figura 23: Resposta em frequência do controlador PRES não ideal para diferentes valores de ω_{cf}	48
Figura 24: Resposta em frequência da malha fechada com o controlador proporcional não ideal	49
Figura 25: Resposta no domínio do tempo da corrente de referência (azul) e da corrente de saída (vermelha) com o controlador PRES.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
MPP	Ponto de Máxima Potência
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
PV	Painel Fotovoltaico
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
PROCOBRE	Instituto Brasileiro do Cobre

SUMÁRIO

Agradecimentos.....	vi
Resumo.....	viii
Abstract	ix
Lista de Ilustrações.....	x
Lista de Abreviaturas e Siglas	xi
Sumário	xii
1 Introdução.....	14
1.1 Objetivos.....	15
1.2 Estrutura do trabalho.....	15
2 Energia Fotovoltaica.....	16
2.1 Célula Fotovoltaica	17
2.2 Característica IxV	18
2.3 MPP	19
3 Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede	21
3.1 Produção Distribuída	21
3.2 Sistemas Fotovoltaicos conectados á Rede no Brasil.....	22
3.3 Principais Componentes.....	23
3.3.1 Painel Fotovoltaico	23
3.3.2 Conversor CC-CC.....	24
3.3.3 Conversor CC-CA	24
3.3.4 Quadro elétrico e Medidor de energia	25
3.4 Esquema de Ligação com a rede Elétrica	26
4 Normas Regulamentadoras.....	28
4.1 Normas brasileiras	28
4.1.1 Resoluções 687/2015 da ANEEL	28
4.1.2 Normas Técnicas	30
4.2 Normas Internacionais	31
4.2.1 IEEE 1547	31
4.2.2 IEEE 929	32
4.2.3 IEEE 519	32
5 Controle de Corrente Injetada na Rede.....	33
5.1 Modelagem do sistema	33
5.2 Filtro utilizado.....	34
5.3 Controlador PI no referencial estacionário	35
5.4 Controlador PI no referencial síncrono	37
5.5 Controlador proporcional ressonante	38
6 Resultados	39
6.1 Simulação dos conversores	39

6.1.1	Conversores CC-CC	39
6.1.2	Conversores CC-CA	41
6.2	Análise dos controladores	45
7	Conclusão	51
	Referências	52

1 INTRODUÇÃO

Fontes de energia renováveis, como eólica, solar e hidráulica utilizam recursos não esgotáveis em relação às fontes tradicionais de energia como óleo, gás natural ou carvão, fontes poluentes e não renováveis. Aliados à redução de custos, os incentivos econômicos para o desenvolvimento de novas tecnologias, os esforços da comunidade acadêmica e as novas legislações que beneficiam as fontes renováveis de energia, vem ocorrendo uma aceleração na aplicação de sistemas fotovoltaicos quase que de modo exponencial. Tudo isso vem estimulando ainda mais pesquisas e investimentos nessa área.

O conjunto de dispositivos capazes de realizar a conversão de energia solar em energia elétrica é denominado sistema fotovoltaico. São classificados em três categorias: sistemas isolados (*Stand Alone*); sistemas conectados à rede (*Grid Connected*) e; sistemas híbridos (*Hybrid System*). Cada tipo de sistema possui sua forma de projeto e construção, nível de complexidade, componentes específicos, etc.

Tratando apenas dos sistemas conectados à rede, a crescente busca por energias renováveis e os recentes avanços nessa área, fez com que a geração fotovoltaica se tornasse competitiva em muitas aplicações e compusesse sistemas de geração distribuída conectados diretamente à rede convencional. Esta é uma solução para diminuição do uso das atuais fontes de energia poluentes e não renováveis.

Uma de suas vantagens é o suprimento da demanda local de energia de forma distribuída e nas proximidades das cargas. Dessa forma, além de diminuir as perdas e melhorar a eficiência do sistema energético, um sistema fotovoltaico conectado à rede também pode atuar com o objetivo de melhorar a qualidade da energia.

Em relação ao cenário nacional, de acordo com (TOLMASQUIM, 2016) uma ação institucional importante para a promoção da energia fotovoltaica no Brasil foi a chamada de Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) Estratégico 013/2011, da ANEEL, que teve 17 projetos fotovoltaicos aprovados, totalizando 24,6 MWp. Esses projetos combinaram diferentes tipologias de instalações (distribuída e centralizada, por exemplo), e foram concluídos ao longo de 2014 e 2015.

1.1 OBJETIVOS

Com este trabalho pretende-se descrever e avaliar as estratégias de controle para sistemas fotovoltaicos conectados à rede, utilizando a energia fotovoltaica para geração distribuída de energia elétrica.

Com este objetivo geral, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- Revisar e entender o conjunto de dispositivos que formam o sistema fotovoltaico conectado a rede (painéis solares, inversores e circuitos auxiliares);
- Estudar e listar as normas regulamentadoras, dado que os sistemas fotovoltaicos irão compor o sistema elétrico convencional;
- Estudar e avaliar as técnicas de controle mais utilizadas;

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

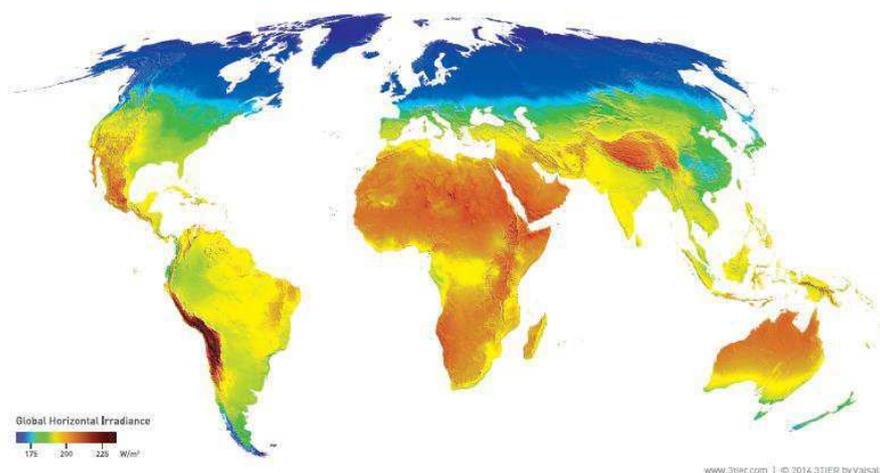
Este documento foi estruturado como segue. Nesta seção, foi descrito uma breve introdução sobre o que será relatado. Nas seções seguintes são feitas revisões bibliográficas sobre a energia fotovoltaica e os sistemas fotovoltaicos conectados a rede. Em seguida, foi feito um estudo sobre as normas regulamentadoras no Brasil e as principais normas internacionais. Na seção 5, é feita a modelagem do sistema de controle e apresentação dos controladores estudados, e em seguida são apresentados os resultados. Finalmente são feitas as conclusões.

2 ENERGIA FOTOVOLTAICA

Todos os dias chegam à superfície do nosso planeta uma quantidade imensurável de raios solares, de forma limpa e gratuita. Estes raios solares podem ser utilizados na geração de eletricidade, por meio de um processo de conversão fotovoltaica. A palavra fotovoltaica deriva de dois termos, ‘foto’ que vem do grego e significa luz, e ‘voltaica’ que vem da unidade de potencial, volt.

A produção de energia solar está diretamente relacionada com a quantidade de irradiação recebida. Na Figura 1 está ilustrada a irradiação solar média a nível global, conforme se pode verificar, o Brasil apresenta um grande potencial para produção de energia fotovoltaica. A participação deste tipo de energia na matriz energética brasileira é bastante pequena, apesar dos elevados índices de irradiação solar no território brasileiro. Isso se deve, principalmente, ao elevado custo de instalação e a ausência de tecnologia nacional para a fabricação destes equipamentos.

Figura 1: Irradiação solar global média



Fonte: (<http://alten-energy.com/sector-fotovoltaico/>)

A obtenção de energia fotovoltaica se dá por meio da utilização de células fotovoltaicas, geralmente feitas de silício. Ao atingir estas células, a luz solar é diretamente convertida em eletricidade. Novos tipos de materiais vêm sendo estudados para a produção destas células, atualmente, a produção destas células concentra-se na

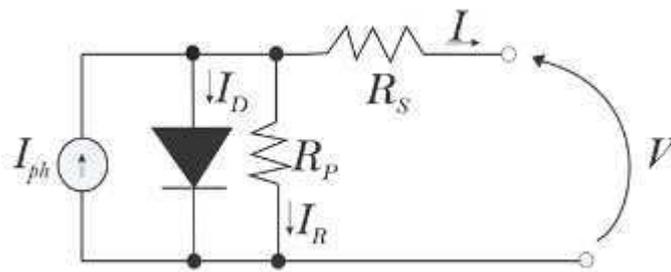
fabricação de células fotovoltaicas sob a forma de filmes finos (BRAGA, 2008). Este tipo de célula utiliza menor quantidade de material na sua produção e requer menor quantidade de energia no seu processo de produção.

2.1 CÉLULA FOTOVOLTAICA

Um grande número tecnologias para produção de células fotovoltaicas foram desenvolvidas nos últimos 60 anos. Atualmente as células fabricadas com lâminas de silício cristalino dominam o mercado (PINHO e GALDINO, 2014).

O circuito elétrico equivalente de um gerador fotovoltaico é representado pela Figura 2. A fonte de corrente I_{ph} representa a corrente gerada pela radiação solar incidente sobre a superfície do gerador. Como o gerador é composto por silício, ele se comporta como um diodo, atravessado por uma corrente I_D , que depende da tensão V nos terminais do gerador. No gerador observa-se uma queda de tensão no circuito até os contatos exteriores, a qual é causada por uma resistência que pode ser representada por uma resistência parasita série R_S . Do mesmo modo, também existe corrente de fuga, provocada por uma resistência paralela que pode ser descrita por uma resistência parasita paralela, R_P .

Figura 2: Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica



Fonte: Elaborado pelo autor.

A corrente I devido a uma carga é dada por:

$$I = I_{ph} - I_D - I_R \quad (1)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V+R_S I}{mV_t}} - 1 \right) - \frac{V + R_S I}{R_P} \quad (2)$$

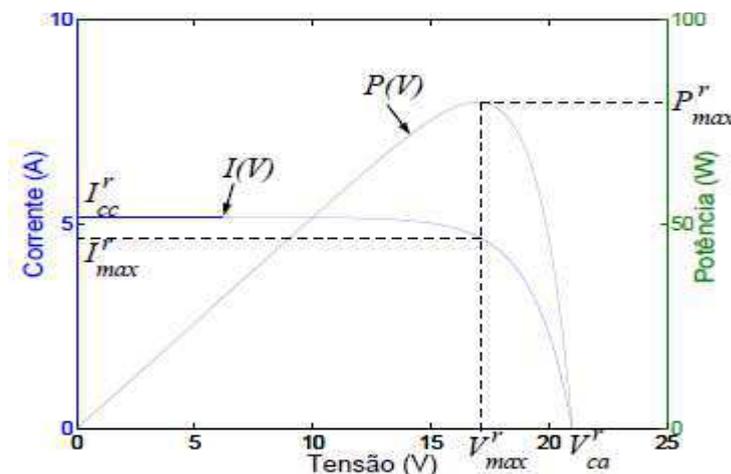
Onde:

- I_0 representa a corrente reversa máxima de saturação do diodo;
- V , a tensão nos terminais do gerador;
- m , o fator de idealidade do diodo;
- R_S , a resistência parasita série;
- R_P , a resistência parasita paralela;
- V_t , o potencial térmico dado por $V_t = kT/q$;
- k , a constante de Boltzman ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K);
- T , temperatura absoluta do gerador em Kelvin e
- q , a carga do elétron ($q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C).

2.2 CARACTERÍSTICA $I \times V$

A Equação 2 representa o comportamento de uma célula fotovoltaica, para representar o comportamento de um painel fotovoltaico, faz-se necessário a plotagem de um gráfico de tensão e corrente, conforme indicado na Figura 3.

Figura 3: Curva característica corrente versus tensão e potência versus tensão



Fonte: (SANTOS, 2014)

Alguns parâmetros são específicos de cada gerador, sendo fornecidos pelo fabricante, como por exemplo, os valores da corrente de curto-circuito I_{cc} , tensão de circuito aberto V_{ca} , corrente máxima I_{max} , tensão máxima V_{max} e potência máxima P_{max} .

A corrente de curto-circuito é a máxima corrente que se pode obter, e é obtida quando a tensão nos terminais da célula fotovoltaica é igual à zero. A tensão de circuito aberto é a tensão entre os terminais da célula fotovoltaica no momento em que não há corrente circulando, sendo a máxima tensão que uma célula fotovoltaica pode produzir (PINHO e GALDINO, 2014).

Outro parâmetro que pode ser obtido a partir da curva característica $I \times V$ é a eficiência, que define a capacidade de conversão de energia solar em energia elétrica. Representa a relação entre potência elétrica produzida e potência de energia solar incidente na célula fotovoltaica. É definida da seguinte forma:

$$\eta = \frac{V_{ca} * I_{cc} * FF}{A * G} * 100\% \quad (3)$$

Onde:

- A é a área da célula, em m^2 ;
- G , a irradiância solar incidente, em W/m^2 ;
- V_{ca} é a tensão de circuito aberto;
- I_{cc} , a corrente de curto-circuito;
- FF , o fator de forma, definido como a relação entre a máxima potência da célula e o produto da corrente de curto-circuito com a tensão de circuito aberto.

2.3 MPP

A potência fornecida pelo painel fotovoltaico é fornecida pelo produto de tensão versus corrente ponto a ponto do gráfico. Observa-se que o ponto de máxima geração de potência, em inglês MPP (*Maximum Power Point*), é fornecido pelo produto da tensão no ponto de máxima potência, V_{max} , pela corrente no ponto de máxima potência, I_{max} . Este é o ponto de melhor geração de energia, para uma determinada radiação e temperatura.

A potência gerada pelos painéis fotovoltaicos é dependente da quantidade de radiação solar, incidente em sua superfície e da temperatura ambiente. Estes dois parâmetros mudam no decorrer do dia. Como soluções para este problema existem

técnicas de rastreamento deste ponto de máxima potência, MPPT (do inglês, *Maximum Power Point Tracking*).

Para que ocorra a transferência máxima de potência gerada, é necessário que a curva de carga intercepte o ponto de máxima potência.

3 SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

O conjunto de dispositivos capazes de realizar a conversão de energia solar em energia elétrica é denominado sistema fotovoltaico. São classificados em três categorias: sistemas isolados (*Stand Alone*); sistemas conectados à rede (*Grid Connected*) e; sistemas híbridos (*Hybrid System*). Cada tipo de sistema possui sua forma de projeto e construção, nível de complexidade, componentes específicos, etc.

Tratando apenas dos sistemas conectados à rede, a crescente busca por energias renováveis e os recentes avanços nessa área fez com que a geração fotovoltaica se tornasse competitiva em muitas aplicações e compusesse sistemas de geração distribuída conectados diretamente à rede convencional. Esta é uma solução para diminuição do uso das atuais fontes de energia poluentes e não renováveis.

O uso de sistemas fotovoltaicos conectados à rede não necessita de sistemas armazenadores de energia, pois a energia que não é consumida pela carga, é injetada na rede elétrica. Representa uma forma de geração renovável de energia que em apresentando um elevado crescimento mundial.

3.1 PRODUÇÃO DISTRIBUIDA

A produção distribuída se refere à geração de energia elétrica realizada próxima ao consumidor, e conectada diretamente à rede de distribuição da concessionária. A grande vantagem deste tipo de geração de energia é a economia em investimentos no processo de transmissão, reduzindo consideravelmente as perdas.

Formada por um conjunto de painéis fotovoltaicos, instalados diretamente nas próprias edificações ou em outros locais, como estádios, estacionamentos, etc. Estas edificações serão supridas pela energia produzida por estes painéis e pela rede distribuição que elas estiverem interligadas.

Este tipo de produção de energia apresenta inúmeras vantagens para o sistema elétrico. Podem-se destacar as seguintes:

- A produção de energia é feita nas proximidades da carga, reduzindo as perdas nas linhas de transmissão;

- Trata-se de um sistema que pode ser ampliado com facilidade, à medida que for surgindo maior necessidade;
- Não existe necessidade de alocação de espaço, pois a produção de energia ocupa um espaço já utilizado;
- Redução nos custos com linhas de transmissão;
- É uma fonte limpa de energia que chega diariamente ao nosso planeta, de forma inesgotável.

3.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE NO BRASIL

Os primeiros passos dos sistemas fotovoltaicos no Brasil foram voltados para o setor de telecomunicações, a eletrificação rural, serviços públicos, bombeamento de água e para estudo e pesquisa. Segundo (IZIDORO, et. al., 2014), até 2010 a maioria dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede estava instalada em universidades e centros de pesquisa.

Existem algumas barreiras que dificultam o crescimento do mercado nacional voltado para esta área. De acordo com (JANUZZI, 2009), algumas destas barreiras até então eram:

- Custos elevados;
- Falta de regulamentação para instalações conectadas à rede;
- A maior parte do material necessário para a instalação era importada;
- Falta de organização na legalização para implantar o sistema.

No Brasil, existem programas de incentivo que impulsionam a geração distribuída de energia, tendo como fonte geradora a solar. Como a chamada nº 013/2011 da ANEEL, que em agosto de 2011 desenvolveu um escopo para projetos e pesquisar nesta área.

Outros programas de incentivo para este tipo de geração são: o projeto 50 telhados, que tem por objetivo divulgar a geração de energia elétrica distribuída por meio da energia solar; O selo solar, que é uma forma de divulgação da energia solar e tem por objetivo incentivar projetos de produção de energia renovável no país.

O estádio do Mineirão em Belo Horizonte, utilizado para a copa do mundo no Brasil, tem como fonte principal de energia elétrica, a fotovoltaica. O que não é utilizado para consumo do estádio é injetado diretamente na rede de distribuição.

3.3 PRINCIPAIS COMPONENTES

3.3.1 PAINEL FOTOVOLTAICO

De acordo com (CHU & MEISEN, 2011), os principais tipos de painéis fotovoltaicos são: silício cristalino, filmes finos e telureto de cádmio (CdTe). Cerca de 85 a 90 % do mercado utiliza o silício cristalino para a produção de painéis, utilizado em duas formas: silício monocristalino e policristalino.

Os painéis produzidos por silício policristalino apresentam quantidades de silício residual menor que os produzidos por silício monocristalino, e também apresentam menor eficiência. No entanto, eles são mais baratos e mais resistentes a degradação devido a irradiação.

Nos painéis de filmes finos, são depositadas pequenas camadas (na ordem de micrômetros) de materiais fotossensíveis em um suporte. A principal vantagem desse tipo de produção é a baixa utilização de matéria-prima.

O telureto de cádmio é um tipo de semicondutor que possui um processo de produção relativamente simples. Apresenta o retorno mais rápido de produção de energia, se comparado com outros tipos de painéis, porém este material é tóxico e menos abundante que o silício.

Uma única célula fotovoltaica isolada possui pequena capacidade de produção de energia elétrica. Para obter determinados níveis de tensão é necessário que se realizem ligações entre estas células. A quantidade de células em um painel é determinada pela necessidade da carga que se deseja alimentar.

Caso o painel fotovoltaico não seja suficiente para alimentar a carga, é possível conectar outros painéis, com o intuito de aumentar a geração de energia. Nas conexões em série a tensão de saída é proporcional à quantidade de painéis, enquanto a corrente permanece constante:

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (4)$$

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (5)$$

Na conexão em paralelo de painéis fotovoltaicos, as correntes elétricas são somadas, enquanto o valor da tensão permanece inalterado:

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad (6)$$

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (7)$$

3.3.2 CONVERSOR CC-CC

Responsável por converter a tensão contínua de entrada na saída, em um nível maior ou menor. Existem duas topologias básicas de conversores CC-CC, que são o abaixador de tensão (conversor *buck*) e o elevador de tensão (conversor *boost*).

Segundo (CASARO E MARTINS, 2010), em sistemas fotovoltaicos conectados a rede, o conversor que compõe o estágio CC-CC dispensa a estrutura de controle, pois funciona com razão cíclica e frequência constante ao longo de toda a faixa de operação. Este conversor pode ser utilizado para obter do painel fotovoltaico, a máxima potência que pode ser gerada.

A relação entre o tempo de condução e o tempo de comutação da chave é definida como razão cíclica (*duty cycle*). Desta forma, a razão cíclica pode assumir valores entre 0 e 1.

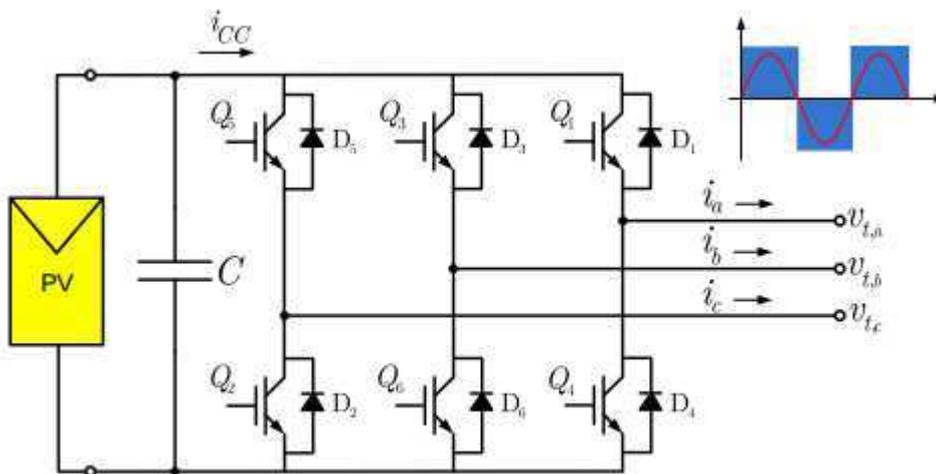
3.3.3 CONVERSOR CC-CA

O conversor CC-CA, ou simplesmente inversor possui a função de converter a tensão contínua de entrada em uma tensão alternada na saída. A Figura 4 apresenta a topologia deste conversor aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados a rede. O capacitor é utilizado com o objetivo de manter a tensão de saída dos painéis fotovoltaicos constante.

Existem duas topologias de inversores CC-CA: meia ponte e ponte completa. O inversor meia ponte possui apenas um braço inversor, sendo recomendado em

aplicações de baixa potência. Enquanto o conversor ponte completa apresenta dois braços inversores e é recomendado em aplicações de maior potência.

Figura 4: Topologia de um conversor cc-ca aplicado a sistemas fotovoltaicos



Fonte: (ALMEIDA, 2011)

3.3.4 QUADRO ELÉTRICO E MEDIDOR DE ENERGIA

Os componentes do sistema fotovoltaico são ligados no quadro elétrico, que pode ser um quadro isolado ou o quadro já existente.

O medidor de energia é responsável por medir a quantidade de energia que é consumida pelo cliente. Quando a energia gerada pelo sistema é maior que a consumida pela casa, o excedente é injetado na rede elétrica. É por meio do medidor, que a concessionária é informada da quantidade de energia injetada na rede e a quantidade de energia consumida pelo cliente, possibilitando assim gerar a conta de energia do mês.

3.4 ESQUEMA DE LIGAÇÃO COM A REDE ELÉTRICA

Na Figura 5 pode-se observar a composição básica de um sistema fotovoltaico conectado a rede, onde:

1. Painéis Solares;
2. Inversor;
3. Quadro elétrico;
4. Consumidor;
5. Medidor de Energia;

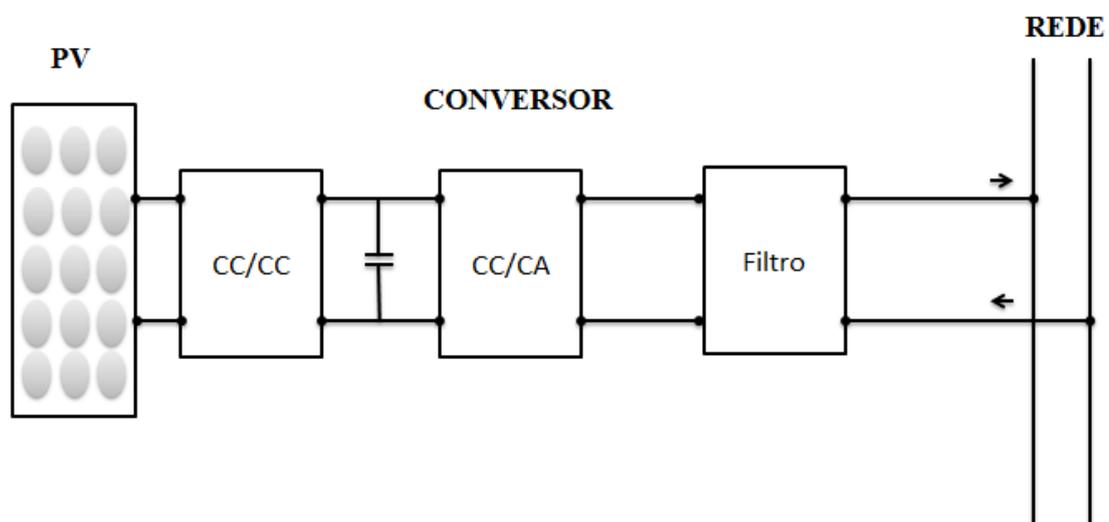
Figura 5: Componentes de um sistema fotovoltaico conectado a rede



Fonte: Next Solar.

O diagrama de blocos da Figura 6 representa o conjunto dos componentes do sistema fotovoltaico, para conexão com a rede elétrica, que constitui basicamente do painel fotovoltaico, do sistema conversor de energia e da rede elétrica.

Figura 6: Esquema de ligação com a rede elétrica



Fonte: Elaborado pelo autor.

4 NORMAS REGULAMENTADORAS

4.1 NORMAS BRASILEIRAS

O surgimento de normas técnicas, relacionadas aos sistemas fotovoltaicos conectados à rede contribui para garantir a qualidade da instalação e da conexão com a rede. Apesar da escassez de normas relacionadas a esta área, vem crescendo o número de estudos que propiciem o surgimento de novas normas regulamentadoras. A seguir são apresentadas as normas brasileiras que regulamentam a implantação deste tipo de sistema.

4.1.1 RESOLUÇÕES 687/2015 DA ANEEL

Trata-se de uma atualização da resolução 482/2012 da ANEEL, que tem por propósito, estabelecer as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração ao sistema de distribuição de energia elétrica, assim como a criação do sistema de compensação de energia elétrica, permitindo que pequenos geradores (como por exemplo, painéis solares fotovoltaicos) se conectem a rede elétrica, com o objetivo de reduzir o valor da fatura de energia. Foram atualizados e incluídos conceitos nesta nova resolução.

Esta nova resolução estabelece que unidades microgeradoras correspondam a centrais geradoras com potência instalada menos ou igual a 75 kW, enquanto unidades minigeradoras, centrais com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para outras fontes geradoras conectadas à rede de distribuição.

Um conceito bastante importante presente nesta resolução é o de sistema de compensação de energia elétrica, que corresponde a um sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa.

A geração compartilhada permite que um conjunto de consumidores se una em uma espécie de cooperativa, instalando uma unidade de micro ou minigeração

distribuída e compartilhem a energia gerada para redução na tarifa de energia entre os membros da cooperativa.

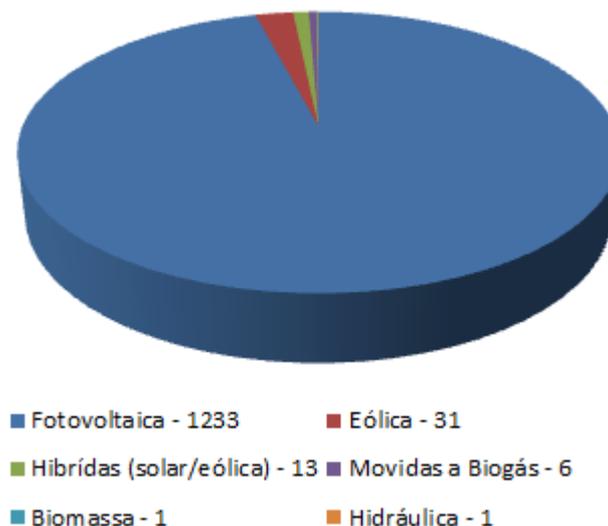
Caso exista a necessidade de melhoria no sistema de distribuição devido exclusivamente a conexão de microgeração, os custos necessários para estas melhorias são de responsabilidade da distribuidora. Sendo de responsabilidade do consumidor apenas o caso de geração compartilhada. No caso da minigeração, os custos por melhorias no sistema de distribuição são de responsabilidade do consumidor.

Existe a possibilidade da fatura de energia elétrica ser zerada. No caso da geração ser menor que o consumo, o consumidor retira da rede elétrica o necessário para suprir sua necessidade. Quando a geração é maior que o consumo, o excedente é injetado diretamente na rede elétrica, gerando créditos de energia. Estes créditos são utilizados para diminuir ou até mesmo zerar a fatura de energia elétrica.

Ao final do mês, é realizado um balanço de consumo e produção. Pode ocorrer de o consumo ser menor que a produção, neste caso os créditos obtidos pelo consumidor são transferidos para o mês seguinte, porém existe uma validade de 60 meses. Este excedente também pode ser utilizado para compensar o consumo de outras unidades que estejam cadastradas.

Em relação ao processo de instalação da unidade geradora, a ANEEL estabeleceu a emissão de formulários para que o consumidor solicite a instalação. Os formulários são divididos por faixa de potência: microgeração de até 10 kW, microgeração entre 10 kW e 75 kW e minigeração entre 75 kW e 5 MW. O prazo que a distribuidora tem para realizar a instalação de unidades de até 75 kW foi reduzida de 82 dias para 34 dias. A partir de janeiro de 2017, o consumidor pode entrar com a solicitação à distribuidora e acompanhar todo o andamento pela internet.

Segundo dados da ANEEL, nos três primeiros anos que a resolução 482/2012 entrou em vigor, foram instalados 1.285 centrais geradoras, onde a grande maioria das unidades geradoras foi a fotovoltaica, conforme indica a Figura 7. A previsão é que até 2024 cerca de 1,2 milhão de unidades consumidoras passem a produzir sua própria energia, totalizando 4,5 gigawatts (GW) de potência instalada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2 NORMAS TÉCNICAS

Com o intuito de normatizar a interface de inversores usados na conexão de sistemas de geração fotovoltaico à rede de distribuição, o PROCOBRE (Instituto brasileiro de cobre) criou uma comissão de estudos no setor fotovoltaico para a criação de normas técnicas e procedimentos de ensaios. Em março de 2013 foram criadas as normas ABNT NBR 16.149, ABNT NBR 16.150 e NBR/IEC 62116.

A ABNT NBR 16.14 (Sistemas fotovoltaicos FV – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição) é responsável pela caracterização da interface de conexão entre o sistema fotovoltaico e a rede de distribuição de energia, estabelecendo todos os requisitos.

As normas ABNT NBR 16.150 (Sistemas fotovoltaicos FV — Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição — Procedimento de ensaio de conformidade) e NBR/IEC 62116 (Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica) são responsáveis pelos procedimentos de ensaio.

A primeira especifica os procedimentos de ensaio necessários para verificar se os equipamentos utilizados na interface de conexão entre o sistema fotovoltaico e a rede de distribuição estão em conformidade com os requisitos da ABNT NBR 16149. A segunda fornece um procedimento de ensaio com a finalidade de avaliar o desempenho

das medidas de prevenção de ilhamento utilizadas em sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

Outra norma importante relacionada a estes tipos de sistemas é a ABNT NBR 16274 (Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho), de 2014. O objetivo desta norma é estabelecer informações e documentação mínimas após a instalação de um sistema fotovoltaico conectado à rede e descrever a documentação, os ensaios de comissionamento e os critérios de inspeção necessários para avaliar a segurança da instalação e a correta operação do sistema.

Com a criação destas normas, são fornecidas todas as especificações das instalações e dos equipamentos utilizados, assim como garantia da qualidade das instalações elétricas e segurança dos equipamentos do sistema conectado à rede. Este processo de normatização contribui no crescimento do setor de energia renovável brasileira.

4.2 NORMAS INTERNACIONAIS

Apesar da falta de padronização internacional em relação aos sistemas fotovoltaicos conectados à rede, existem algumas normas que são adotadas pelo IEEE. A seguir, são feitas considerações a respeito destas normas.

4.2.1 IEEE 1547

Esta norma apresenta os requisitos gerais para a conexão, repostas às condições anormais da rede, condições de ilhamento e manutenção das ligações do sistema com a rede. As especificações desta norma são aplicáveis a unidades de geração inferior a 10 MVA.

Em relação à desconexão do sistema da rede, devido a eventuais anormalidades, a norma apresenta valores de tempos de operação de acordo com cada tipo de anormalidade. Para a condição de ilhamento, a norma prevê um tempo de 2 segundos para a desconexão da rede, funcionando de forma isolada em relação à rede.

4.2.2 IEEE 929

Apresenta especificações de sistemas conectados a rede, em relação à qualidade de energia, operação da rede da concessionária, proteção e segurança de operação. Estas especificações favorecem a padronização dos equipamentos dos sistemas fotovoltaicos conectados a rede.

Nesta norma estão presentes instruções sobre os equipamentos, com a finalidade de garantir o funcionamento do sistema fotovoltaico e conectado a rede da concessionária.

4.2.3 IEEE 519

Aborda assuntos relacionados ao controle de injeção de harmônicos no sistema elétrico de distribuição. Os limites apresentados nesta norma são para operação em regime permanente, sendo recomendado apenas nos piores casos.

A norma apresenta limites de corrente para sistemas de potência com tensão entre 120 V e 69 kV, assim como os limites de distorção da tensão de alimentação em relação à fundamental.

5 CONTROLE DE CORRENTE INJETADA NA REDE

Para transferir potência do sistema fotovoltaico para a rede elétrica, é necessário a utilização de técnicas de controle capazes de regular a corrente que é transferida para a rede. Este sistema de controle deve garantir que, esta corrente de saída do sistema fotovoltaico esteja na mesma frequência e amplitude da corrente da rede. Neste sentido, o controle de corrente injetada na rede é responsável pela qualidade da potência que se está injetando na rede.

Nesta seção serão apresentadas as técnicas de controle estudadas para o controle de corrente injetada na rede elétrica, assim como a modelagem do sistema.

5.1 MODELAGEM DO SISTEMA

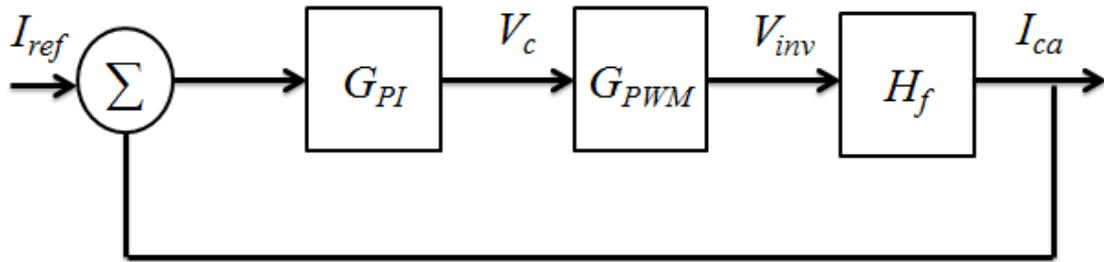
Para realizar a análise do sistema fotovoltaico, foram formuladas algumas hipóteses, como:

- As perdas nos arranjos fotovoltaicos foram desconsideradas;
- O sistema se adapta as variações de temperatura;
- A temperatura do sistema depende apenas da temperatura ambiente;
- Foi considerado que o painel fotovoltaico opera sempre no seu ponto de máxima potência

A Figura 6 representa a malha de controle de corrente, onde:

- G_{PI} representa a função de transferência do controlador;
- G_{PWM} , a função de transferência do PWM;
- H_f , a função de transferência do filtro.

Figura 8: Malha de controle



Fonte: Elaborado pelo autor

A função de transferência G_{PWM} pode ser representada por um simples atraso de meio período de amostragem do sinal, ou seja:

$$G_{PWM} = \frac{1}{0.5hs + 1}. \quad (8)$$

Onde h representa o período de amostragem do sinal.

5.2 FILTRO UTILIZADO

O objetivo dos filtros de corrente é garantir que a corrente na saída esteja de acordo com a forma senoidal da corrente da rede. Neste contexto, torna-se necessário que as componentes harmônicas que surgem no inversor não se traduzam em harmônicos de corrente. A seguir, segue a descrição das duas topologias de filtros: L e LCL.

De acordo com (CARACAS, 2013), a função de transferência simplificada do filtro LCL é dado pela Equação 9.

$$H_{LCL} = \frac{I_{ca}}{V_{inv}} = \frac{1}{L_{f1}L_{f2}C s^3 + (L_{f1} + L_{f2})s}. \quad (9)$$

A função de transferência deste filtro é de terceira ordem. Segundo (TEODORESCU et. al., 2011) pode-se trabalhar com um filtro L equivalente em uma determinada faixa de frequência. A função de transferência do filtro L equivalente é dada por:

$$H_L = \frac{1}{L_f s + R_L}, \quad (10)$$

Onde:

$$L_f = L_{f_1} + L_{f_2}, \quad (11)$$

$$R_L = R_{L_1} + R_{L_2}. \quad (12)$$

5.3 CONTROLADOR PI NO REFERENCIAL

ESTACIONÁRIO

Este controlador é uma solução simples e conhecida, que é utilizado para controlar correntes contínuas e correntes senoidais em inversores monofásicos. A função de transferência deste controlador é dada pela Equação 12:

$$G_{PI} = K_{p_i} + \frac{K_{i_i}}{s}. \quad (13)$$

A função de transferência de malha aberta é dada por:

$$FTMA = G_{PI} G_{PWM} H_f \quad (14)$$

Para simplificar o projeto do controlador, as funções de transferência G_{PWM} e H_f são reescritas da seguinte forma:

$$G_{PWM} = \frac{1}{0.5s + 1} = \frac{\tau_h}{s + \tau_h} \quad (15)$$

$$H_f = \frac{1}{L_f s + R_L} = k \frac{\tau_i}{s + \tau_i} \quad (16)$$

Onde:

$$\tau_h = \frac{1}{0.5h}, \quad (17)$$

$$\tau_i = \frac{R_L}{L_f}, \quad (18)$$

$$K = \frac{1}{R_L}. \quad (19)$$

Logo, a função de transferência de malha aberta é dada por:

$$FTMA = K_{PI} \frac{s + \frac{K_{ii}}{K_{PI}}}{s} \frac{K \tau_i}{s + \tau_i} \frac{\tau_h}{s + \tau_h} \quad (20)$$

Utilizando a técnica de cancelamento de polos e zeros, onde se escolhe os ganhos do controlador PI de forma a cancelar o polo mais lento, obtemos a seguinte função de transferência:

$$FTMA = \frac{Z}{s(s + \tau_h)} \quad (21)$$

Onde:

$$Z = K_{PI} K \tau_h \tau_i \quad (22)$$

A função de transferência de malha fechada equivalente é:

$$FTMF = \frac{FTMA}{FTMA + 1} = \frac{\frac{Z}{s^2 + s\tau_h}}{1 + \frac{Z}{s^2 + s\tau_h}} \quad (23)$$

$$FTMF = \frac{Z}{s^2 + s\tau_h + Z} \quad (24)$$

Fazendo $s = j\omega$, seguido de algumas simplificações:

$$FTMF = \frac{Z}{Z\omega^2 + j\omega\tau_h} \quad (25)$$

Segundo (OGATA, 2003), o ganho proporcional é calculado a partir das especificações da banda passante desejada para a malha fechada. A banda passante (ω_c) equivale ao intervalo de frequência na qual o ganho de malha fechada não cai abaixo de -3 dB. Em termos matemáticos, tem-se que:

$$|H_f(\omega_c)| = -3 \text{ dB} \quad (26)$$

Nestas condições, para $\omega_c = 320 * 2\pi = 2 \text{ Krad/s}$, são obtidas as expressões dos controladores em função dos parâmetros da planta e para esta frequência são obtidos os ganhos do controlador:

- $K_{pii} = 590$;
- $K_{pi} = 16$;

5.4 CONTROLADOR PI NO REFERENCIAL SÍNCRONO

O controlador PI no referencial síncrono é utilizado para solucionar as limitações do controlador PI no referencial estacionário. Trata-se de um controlador bastante utilizado no controle de motores CA e retificadores trifásicos. Nos sistemas trifásicos, as três grandezas senoidais são transformadas em duas grandezas senoidais em quadratura, conhecidas como componente alfa (α) e beta (β) (CARACAS, 2013).

Por meio da utilização das transformadas de Clark e Park, as tensões e correntes senoidais foram transformadas em um novo referencial que gira de forma sincronizada com a rede elétrica. Com a utilização deste controlador, pode-se obter erro de regime permanente nulo, possui implementação mais complexa quando comparada às demais estratégias.

5.5 CONTROLADOR PROPORCIONAL RESSONANTE

O controlador proporcional ressonante é utilizado para se obter erro nulo em regime permanente. De acordo com (CARACAS, 2013), este controlador é derivado matematicamente por meio da transformação de um controlador PI no referencial síncrono para o referencial estacionário. A função de transferência do controlador ressonante é dada pela Equação 27.

$$G_{PRES} = K_{p_i} + \frac{2K_{i_i}s}{s^2 + \omega_0^2}. \quad (27)$$

Com a utilização deste controlador, nota-se a obtenção de um ganho infinito na frequência de ressonância, o que pode causar instabilidades ao sistema. Como solução, deve-se utilizar o controlador proporcional ressonante não ideal, onde o integrador é aproximado por um filtro passa faixa, sua função de transferência é dada por:

$$G_{PRES} = K_{p_i} + \frac{2K_{i_i}\omega_{cr}s}{s^2 + 2\omega_{cr}s + \omega_0^2}. \quad (28)$$

onde ω_{cr} representa a frequência de corte do integrador não ideal

6 RESULTADOS

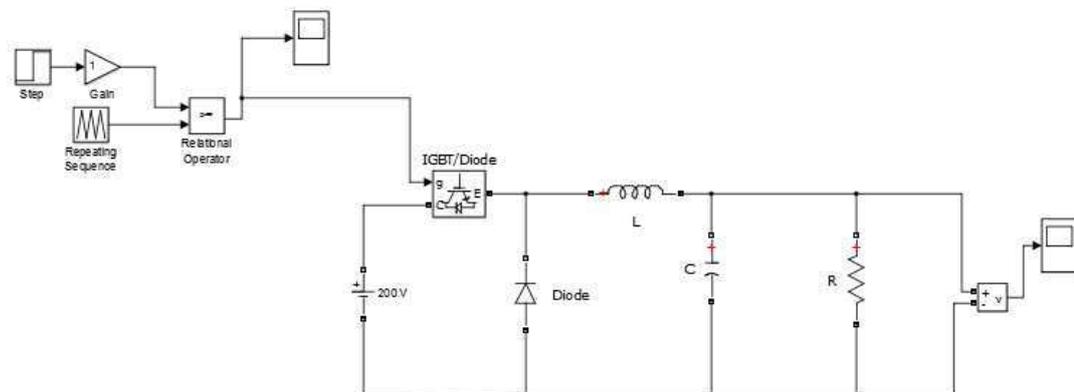
6.1 SIMULAÇÃO DOS CONVERSORES

6.1.1 CONVERSORES CC-CC

No conversor BUCK (Figura 8), a tensão de saída sempre é menor que a de entrada. A relação entre entrada e saída é definida pela Equação 29. Para um valor de $D=0,5$ percebe-se que na saída do conversor a tensão de entrada de 200 V é reduzida para 100 V, conforme indica a Figura 9.

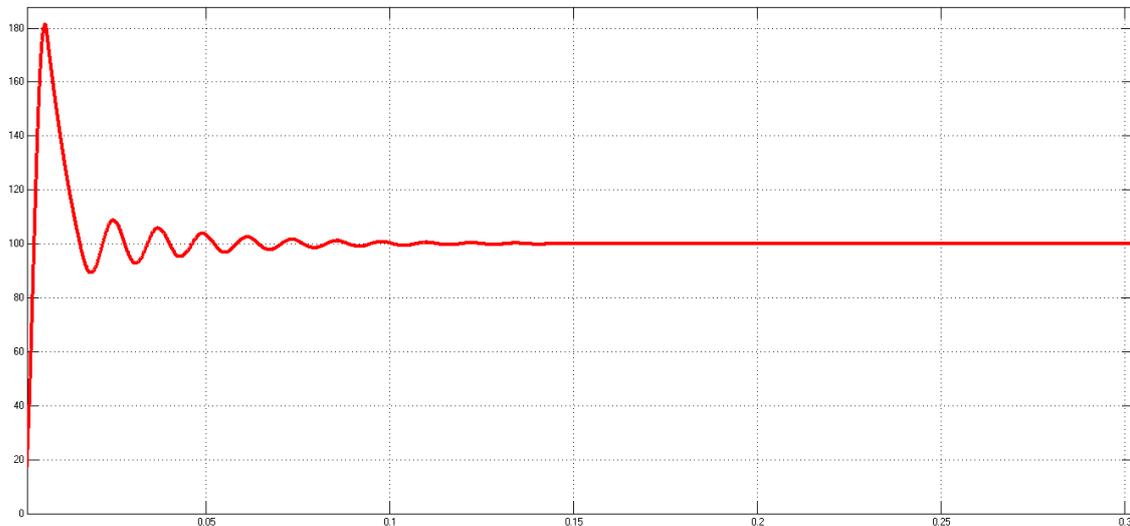
$$D = \frac{V_{saida}}{V_{entrada}}. \quad (29)$$

Figura 9: Circuito do conversor buck.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 10: Saída do conversor buck

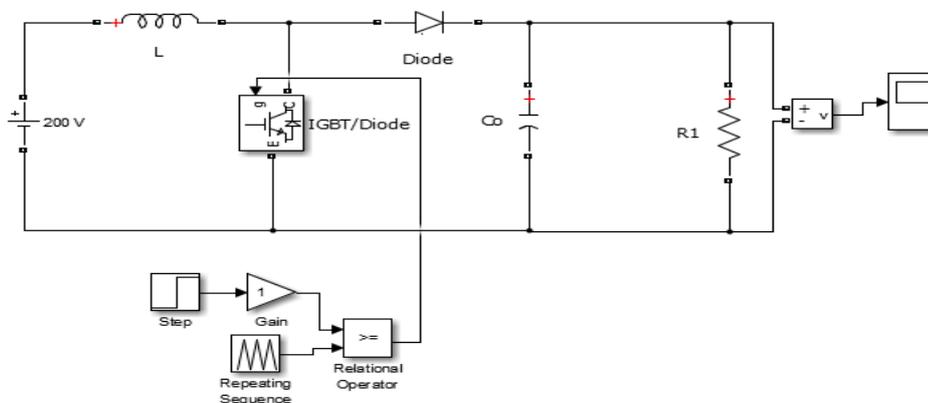


Fonte: Elaborado pelo autor

Já no conversor BOOST (Figura 11), a tensão de saída sempre é maior que a de entrada. A relação entre entrada e saída é definida pela Equação 30. Para um valor de $D=0,5$ percebe-se que na saída do conversor a tensão de entrada de 200 V é elevada para 400 V, conforme indica a Figura 11.

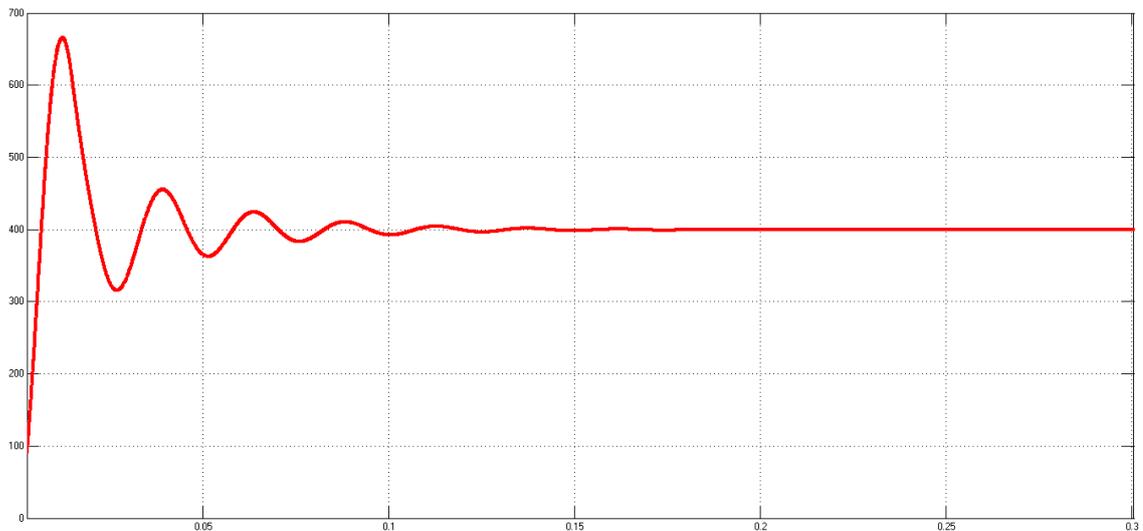
$$D = 1 - \frac{V_{entrada}}{V_{saida}} \quad (30)$$

Figura 11: Circuito do conversor boost



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 12: Saída do conversor boost.



Fonte: Elaborado pelo autor.

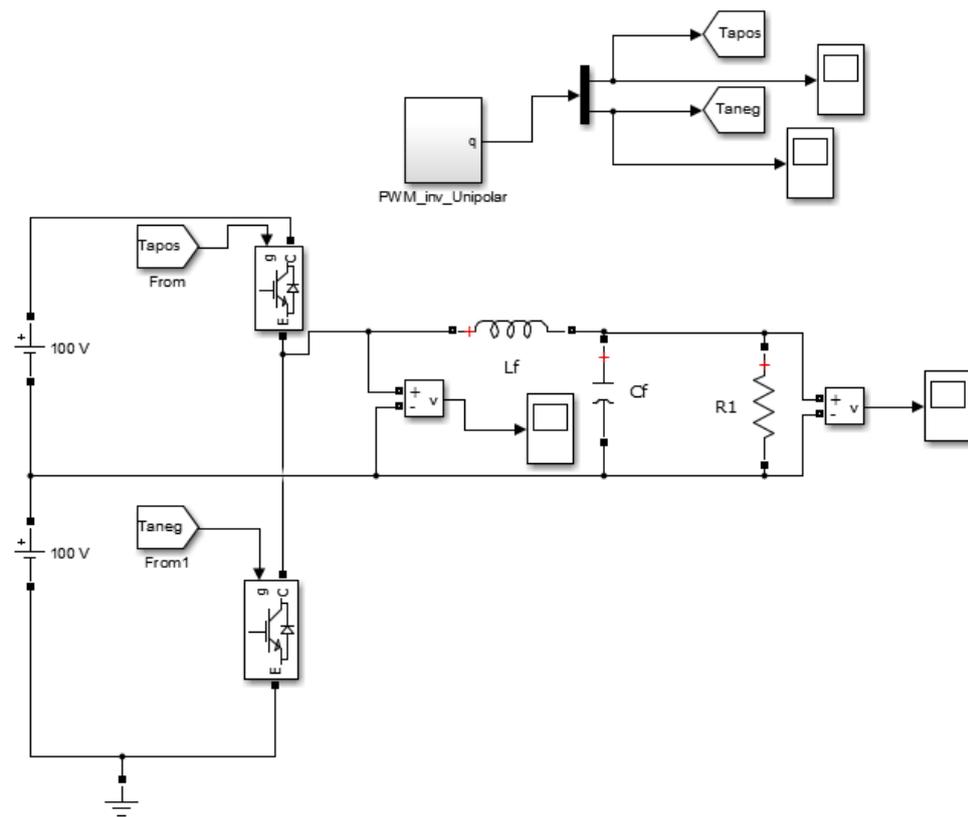
6.1.2 CONVERSORES CC-CA

A modulação PWM é baseada na variação da largura dos pulsos, gerados pela comparação entre um sinal analógico com um sinal de referência, geralmente uma onda triangular. Existem dois tipos de modulação senoidal: modulação unipolar e modulação bipolar.

Na modulação unipolar, a tensão na saída varia entre três níveis de tensão: 0, $-V_{cc}$ e $+V_{cc}$, enquanto na modulação bipolar varia entre 0 e $+V_{cc}$. Para implementação da técnica de modulação PWM bipolar, é necessário um pequeno número de componentes, o que reduz os custos. Entretanto, apresenta maior quantidade de distorção presente no sinal de saída (FEROLDI, 2011).

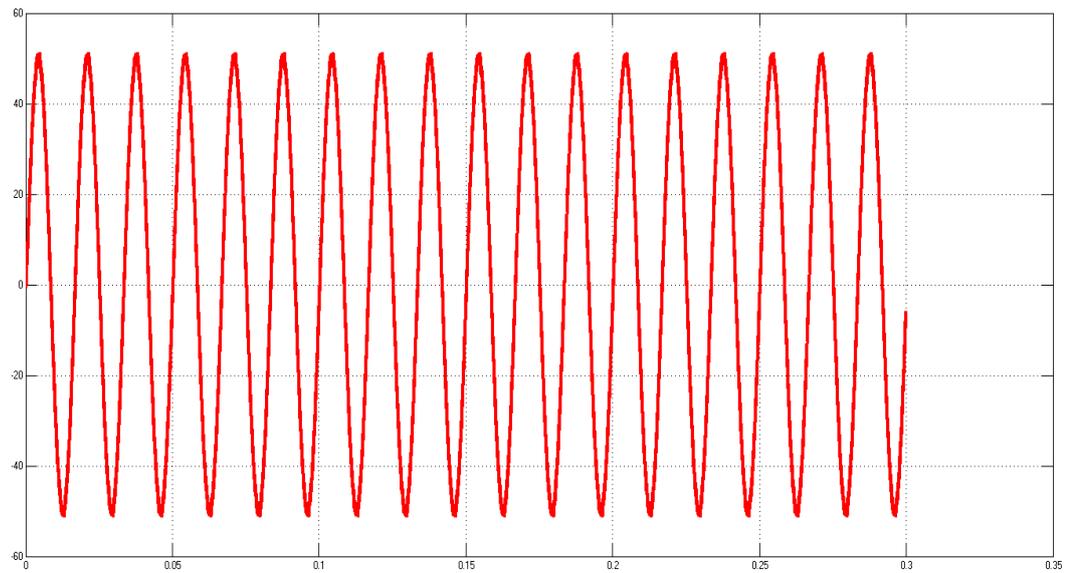
A Figura 12 representa a topologia de um conversor CC-CA meia ponte, para uma tensão contínua na entrada com amplitude de 100 V, obtém-se na saída uma onda senoidal, conforme indicado na Figura 13.

Figura 13: Conversor cc-ca meia ponte



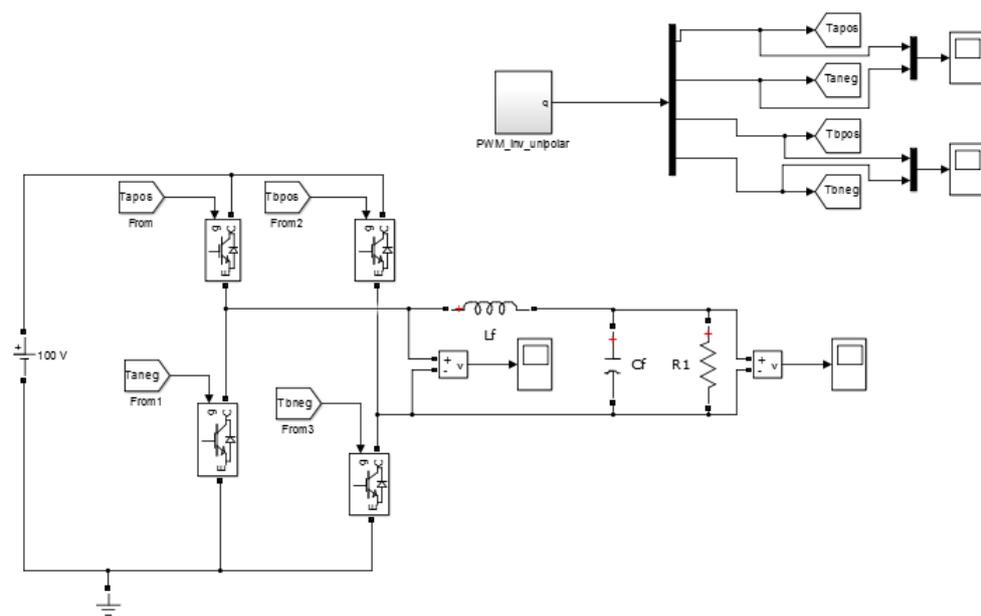
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14: Saída do circuito da Figura 12.



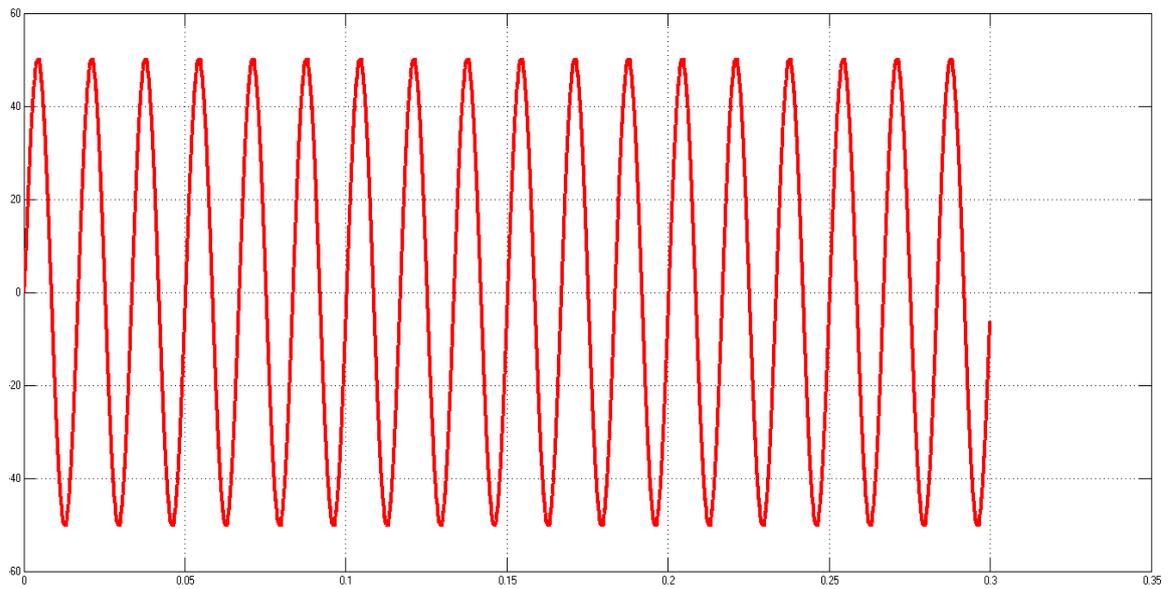
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15: Conversor cc-ca ponte completa



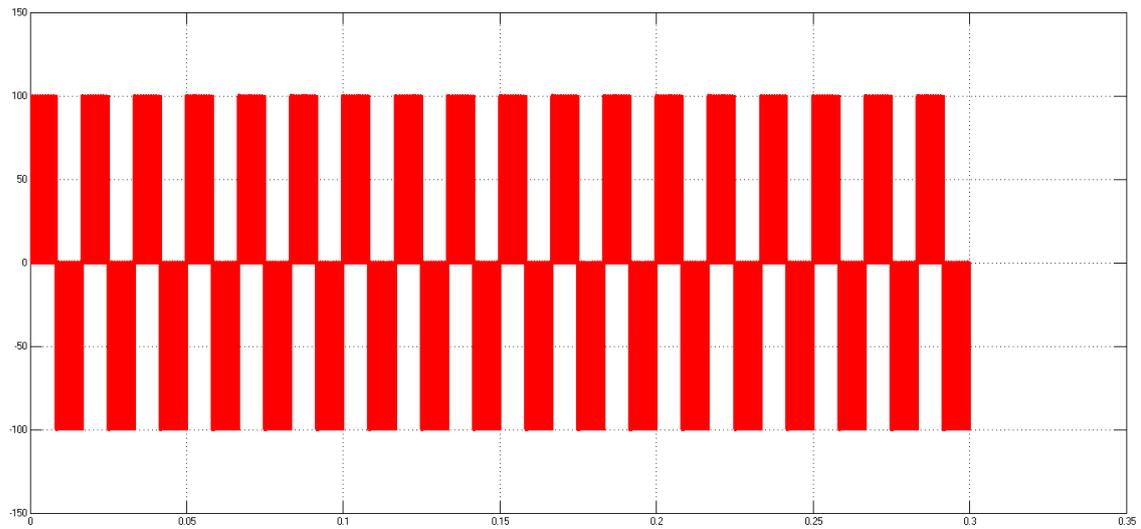
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 16: Saída do circuito da Figura 14



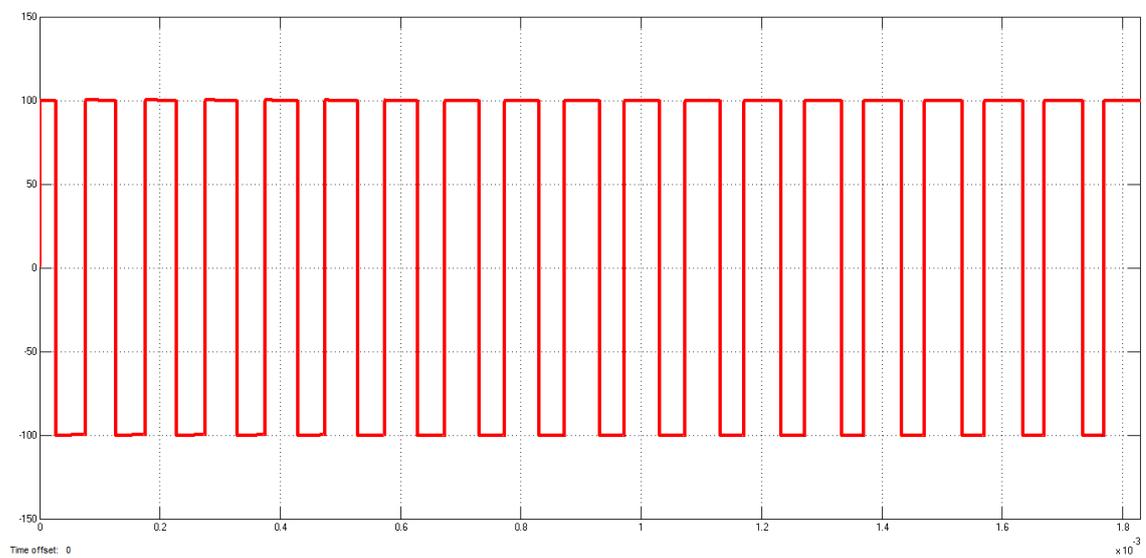
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 17: Modulação unipolar



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18: Modulação bipolar



Fonte: elaborado pelo autor

6.2 ANÁLISE DOS CONTROLADORES

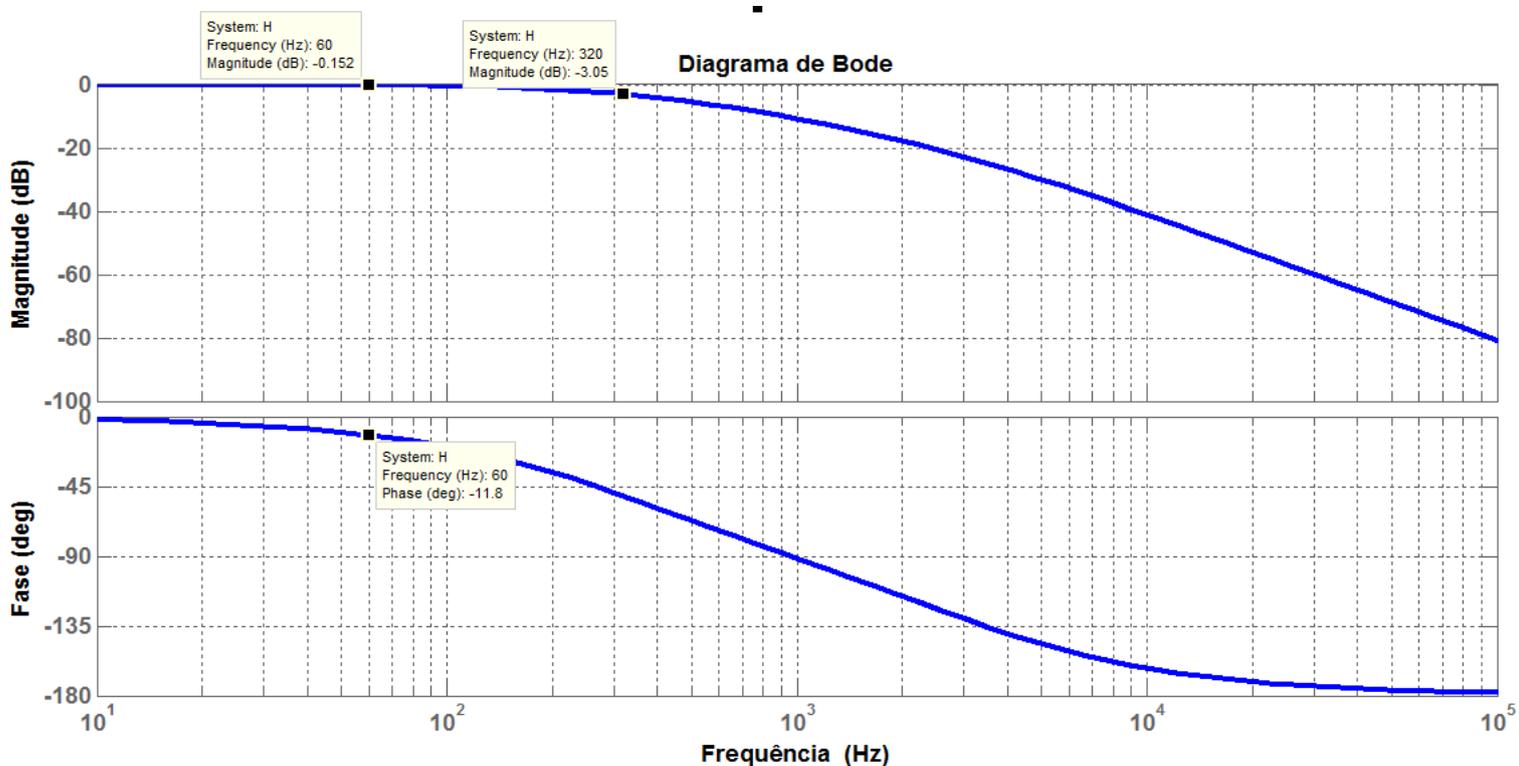
Foi adotado um período de amostragem de $100 \mu\text{s}$ e considerando os valores da Tabela 1 para os componentes do filtro, mais detalhes sobre a obtenção destes componentes em (CARACAS, 2013).

Tabela 1: Valores dos componentes do filtro

Componentes	Valores
L_{f_1} (mH)	7,8
L_{f_2} (mH)	1
R_{L_1} (Ω)	0,24
R_{L_2} (Ω)	0,03

Para o controlador PI no referencial síncrono, foi obtida a resposta em frequência indicada na Figura 18.

Figura 19: Resposta em frequência da malha fechada para o PI estacionário

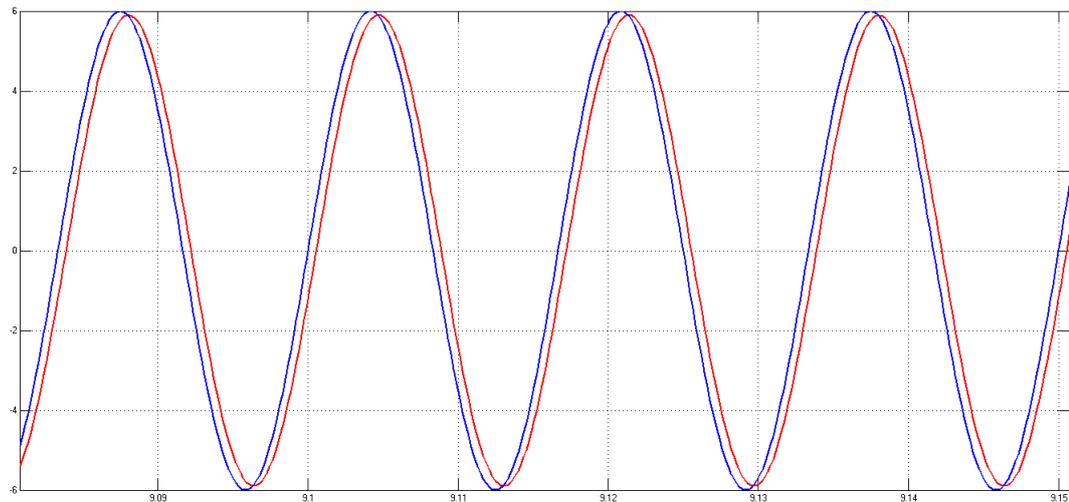


Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se que para -3 dB, a banda passante de malha fechada ficou em 320 Hz (como foi projetado). Na frequência fundamental de 60 Hz a saída apresenta um erro de amplitude de aproximadamente -0.152 dB e uma diferença de fase de -11,8°.

A Figura 19 representa o desempenho do controlador PI no domínio do tempo para uma referência senoidal de 60 Hz com um degrau de amplitude 6 (curva em vermelho).

Figura 20: Resposta no domínio do tempo PI estacionário



Fonte: Elaborado pelo autor.

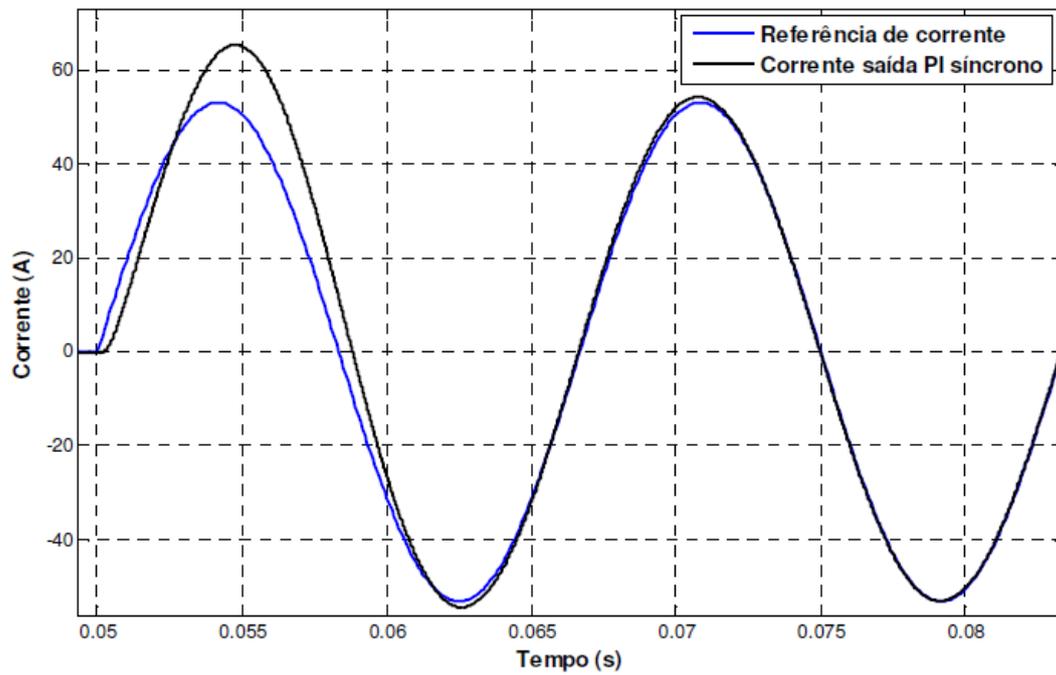
O controlador PI clássico no referencial estacionário não representou uma escolha viável para o sistema de controle de corrente, pois esse controlador não foi capaz de garantir erro de regime permanente nulo.

De acordo com (CARACAS, 2013), com a utilização do controlador no referencial síncrono, pode-se obter erro de regime permanente nulo, conforme indicado na Figura 20. Porém este controlador possui implementação mais complexa quando comparada às demais estratégias.

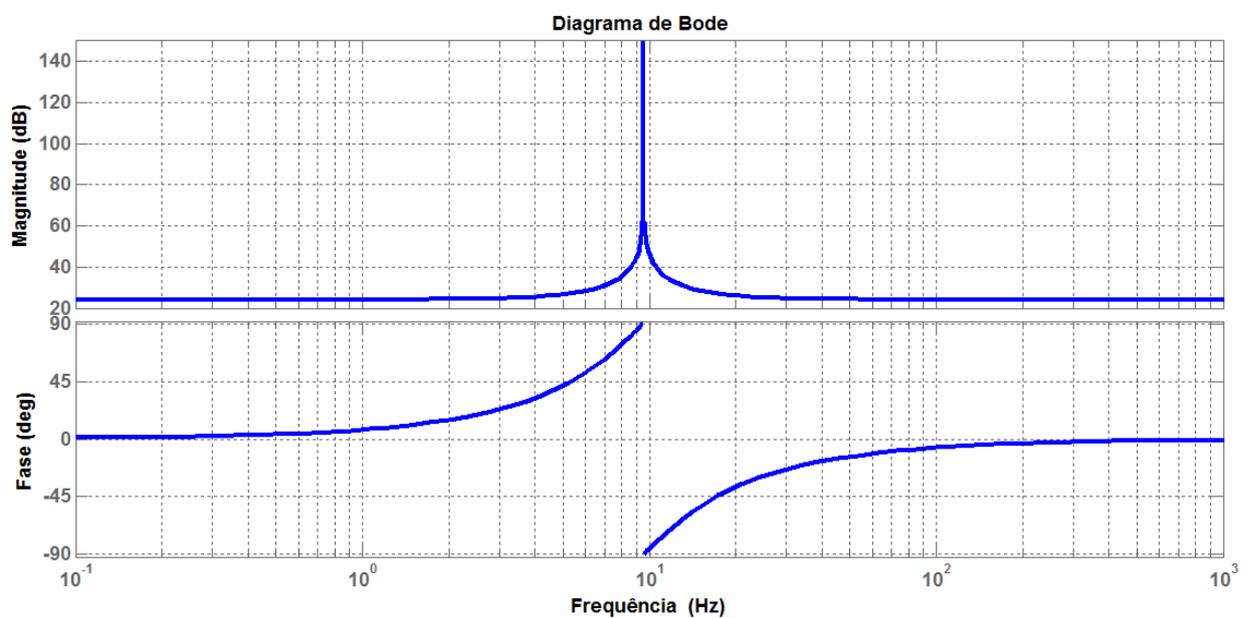
O controlador proporcional ressonante fornece um ganho infinito na frequência de ressonância desejada (ω_o) e ganho nulo para as outras frequências, para que o erro em estado estacionário seja nulo.

Para os valores de K_{pi} e K_{ii} e para uma frequência de ressonância igual a componente fundamental da rede elétrica 60 Hz, foi obtido a resposta em frequência indicada na Figura 21.

Figura 21: Corrente de referência (azul) e corrente de saída (preto)



Fonte: (CARACAS, 2013)

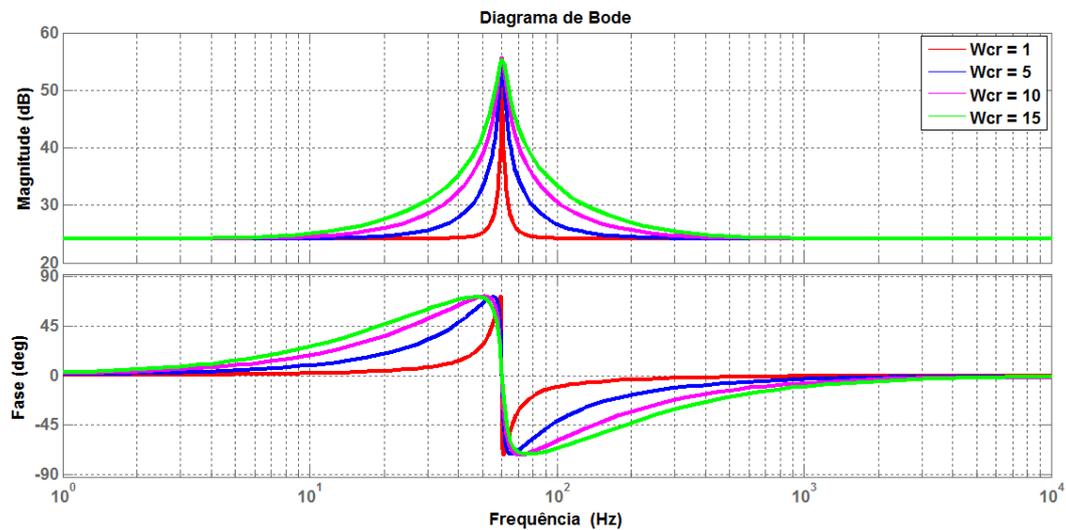
Figura 22: Resposta em frequência para $f = 60$ Hz

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi obtido um ganho infinito um ganho infinito na frequência de ressonância, o que pode causar instabilidades ao sistema. Como solução, deve-se utilizar o controlador proporcional ressonante não ideal, onde o integrador é aproximado por um filtro passa faixa.

A Figura 22, representa a resposta em frequência do controlador proporcional ressonante não ideal para diferentes valores de ω_{cr} . Observa-se que, na frequência de ressonância, o controlador não possui ganho infinito, porém continua possuindo um ganho muito elevado, o que ocasiona um erro de regime permanente muito pequeno.

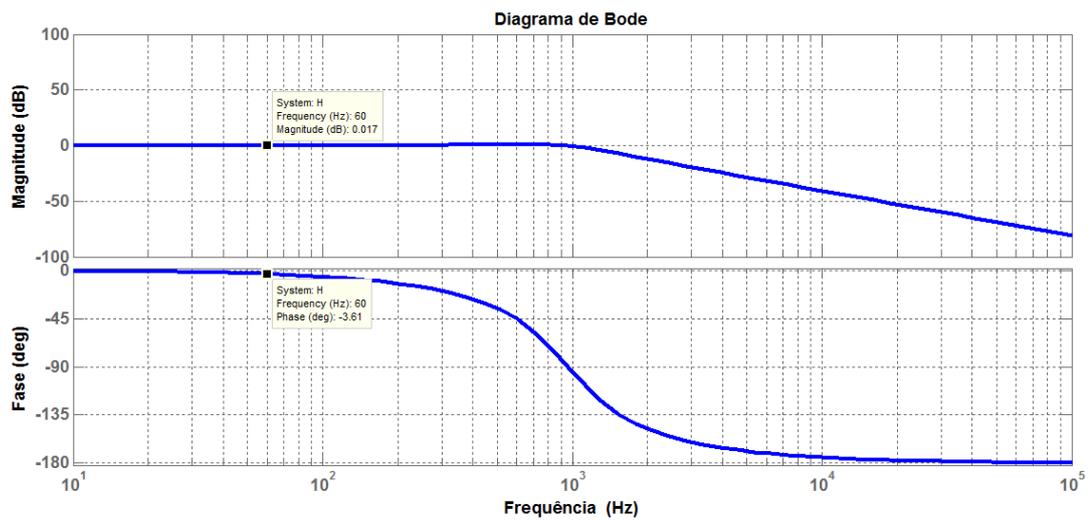
Figura 23: Resposta em frequência do controlador PRES não ideal para diferentes valores de ω_{cr}



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 23 representa a resposta em frequência de malha fechada do controle de corrente usando o controlador PRES não ideal para ω_{cr} igual 10 rad/s. O erro em amplitude e fase são praticamente desprezíveis.

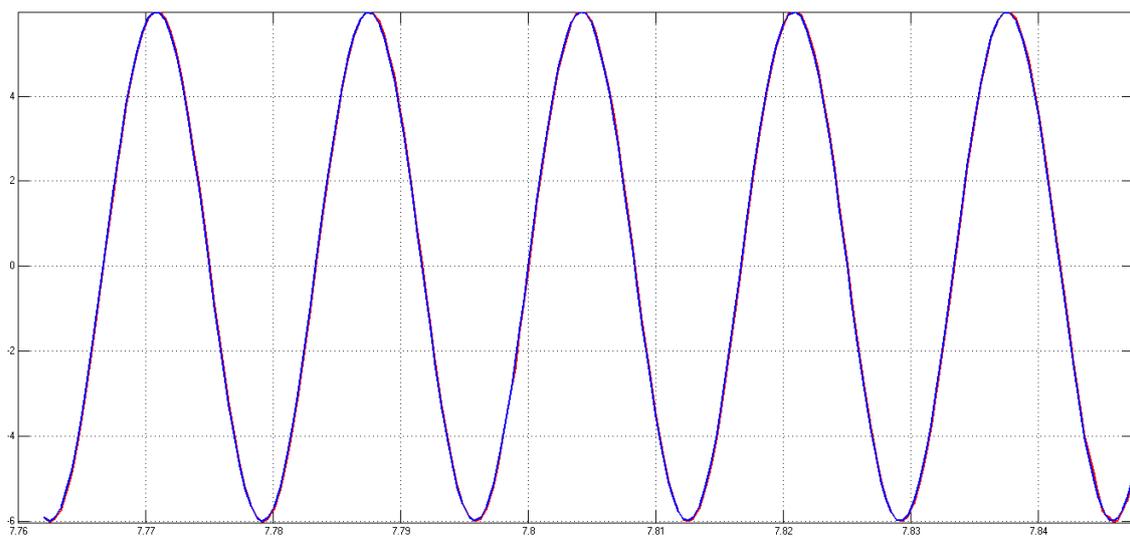
Figura 24: Resposta em frequência da malha fechada com o controlador proporcional não ideal



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 24 representada a resposta do sistema no domínio do tempo quando usado o controlador PRES. Para este caso, a saída segue perfeitamente o sinal de referência, verificando o bom desempenho do controlador PRES. Conclui-se, por tanto, que o controlador PRES garante erro de regime permanente senoidal nulo, sem necessidade de transformação de coordenadas.

Figura 25: Resposta no domínio do tempo da corrente de referência (azul) e da corrente de saída (vermelha) com o controlador PRES



Fonte: Elaborado pelo autor

Os inversores utilizados para a conexão com a rede elétrica, devem satisfazer as condições padrão da rede que eles está sendo instalado, apresentando sistemas de proteção em casos de anormalidades na rede elétrica. Estas condições anormais estão relacionadas a condições de tensão, frequência, reconexão e ilhamento.

No caso de condições anormais de tensão, as normas fornecem ensaios que garantam que o inversor pare de fornecer energia nos casos de sobretensão ou subtensão na rede. O mesmo ocorre para condições de sobre e subfrequência.

Os ensaios relacionados à reconexão tem o objetivo de garantir que o inversor aguarde certo período, após o restabelecimento das condições normais de tensão e frequência, com o intuito de garantir que estas condições serão mantidas e não temporárias. Os ensaios de ilhamento estão relacionados a possibilidade do inversor parar de fornecer energia em casos de perda da rede.

7 CONCLUSÃO

Com a conclusão deste trabalho, ficou evidente que a energia fotovoltaica esta em crescente expansão nos últimos anos. À forte redução de custos, o imenso potencial de aproveitamento em muitas regiões do mundo e o fato de não emitirem poluentes durante sua operação, contribuíram para o surgimento de estudos e investimentos nesta área.

Os surgimentos de normas regulamentadoras, principalmente no cenário nacional, contribuíram para o crescimento da geração distribuída. Estas normas foram criadas como forma de garantir a qualidade da instalação do sistema e como forma de normatizar esses tipos de sistemas. O crescimento nos estudos relacionados a esta área, vem propiciando o surgimento de novas normas regulamentadoras.

Neste trabalho foram feitas análise dos principais componentes que constituem o sistema fotovoltaico conectado a rede, em especial os conversores CC-CC e CC-CA, onde foi possível verificar seu funcionamento e sua utilidade neste sistema.

Em relação aos controladores, o PI no referencial estacionário não representou uma escolha viável, pois este controlador não foi capaz de garantir erro nulo em regime permanente. Apesar do controlador no referencial síncrono garantir erro nulo em regime permanente, ele possui implementação mais complexa em relação a outras estratégias de controle. O controlador proporcional ressonante apresentou erros praticamente desprezíveis, apresentando um bom desempenho, sendo recomendado para o controle em sistemas fotovoltaicos conectados a rede.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. Resolução Normativa nº 687/2015. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em : www.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf. Acesso em 10/12/16.
- ANEEL. Resolução Normativa nº 482/2012. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: www.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf. Acesso em 10/12/16.
- TEODORESCU, R.; et. al. Grid Converters For Photovoltaic And Wind Power Systems. 1st Ed. United Kingdom: John Wiley & Sons, 2011, 398p.
- P. M. ALMEIDA. Modelagem e controle de conversores estáticos fonte de tensão utilizados em sistemas de geração fotovoltaicos conectados à rede elétrica de distribuição. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Juiz de Fora, Abril 2011.
- OGATA. K. Engenharia de Controle Moderno. 4^a edição. Editora Prentice hall, 2003, 794p.
- CARACAS, J.V.M. Avaliação das estratégias de controle e projeto de inversores para conexão de fontes fotovoltaicas à rede CA. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2013.
- FEROLDI. R.T. Modulação senoidal bipolar PWM aplicada em inversores de frequência. Monografia (Grau de Engenheiro Eletricista). Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2011.
- IZIDORO, B.C. et. al. Estudo do panorama nacional para sistemas fotovoltaicos conectados à rede após resolução 482/2012 da ANEEL. Monografia (Grau de Engenheiro Eletricista). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- JANNUZZI, G.M. et. al. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica no brasil: panorama da atual legislação. Relatório, PROCOBRE, Campinas, 2009.
- PINHO, J.T. GALDINO, M.A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. CEPEL-CRESESB, Edição revisada e atualizada. Rio de Janeiro, 2014, 530p.
- CASARO. M. M. MARTINS, D.C. Processamento eletrônico da energia solar fotovoltaica em sistemas conectados à rede elétrica. Revista de controle e automação, vol. 21, nº 2, 2010.
- TOLMASQUIM, Energia renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica. EPE: Rio de Janeiro, 2016, 452 p.
- SANTOS, J.B.M. Conexão de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica e estratégias de controle. Plano de trabalho PIVIC. Campina Grande, 2014.
- MOHAN, N. et al. Power electronics: converters, applications and design. Wiley, 3rdEd. 2002, 815p.
- ZHANG, et. al. A Systematic Method for Designing a PR Controller and Active Damping of the LCL Filter for Single-Phase Grid-Connected PV Inverters. 2014.
- TOUB, D. A review of photovoltaic cells. Department of Electrical and Computer Engineering. Article, University of Rochester, Rochester. New York.