

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CAMPUS TIMÓTEO**

Davidson Estole Rodrigues

**REDUÇÃO DE DISTORÇÃO HARMÔNICA INJETADA NA REDE POR
SISTEMAS EÓLICOS DE PEQUENO PORTE**

Timóteo

2019

Davidson Estole Rodrigues

**REDUÇÃO DE DISTORÇÃO HARMÔNICA INJETADA NA REDE POR
SISTEMAS EÓLICOS DE PEQUENO PORTE**

Monografia apresentada à Coordenação de Engenharia de Computação do Campus Timóteo do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Rodrigo Gaiba de Oliveira

Timóteo

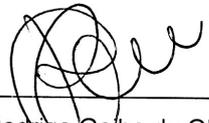
2019

Davidson Estole Rodrigues

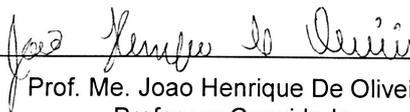
**REDUÇÃO DE DISTORÇÃO HARMÔNICA INJETADA NA REDE POR
SISTEMAS EÓLICOS DE PEQUENO PORTE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia de Computação
do Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais, campus Timóteo, como requisito
parcial para obtenção do título de Engenheiro de
Computação.

Trabalho aprovado. Timóteo, 10 de Julho de 2019:



Prof. Dr. Rodrigo Galba de Oliveira
Orientador



Prof. Me. Joao Henrique De Oliveira
Professor Convidado



Prof. Dr. Elder de Oliveira Rodrigues
Professor Convidado

Timóteo
2019

Dedico a Maria Cristina de Jesus.

Agradecimentos

Um agradecimento especial ao meu amigo Victor Zanetti Drumond e ao meu estimado amigo Warley Nazareth.

Agradeço à Isabela Peixoto por todo auxílio, revisão e apoio prestados durante a execução deste trabalho.

*“É um erro acreditar que é possível resolver qualquer problema importante usando batatas.”
Douglas Adams*

Resumo

A crescente demanda por recursos energéticos renováveis, juntamente com a diversificação da matriz energética nacional, tem intensificada a participação de fontes renováveis de energia, sendo uma tendência percebida em diversos países pelo mundo. Entre as fontes renováveis, a geração eólica se destaca por ter um grande potencial ainda não explorado, além de incentivos governamentais dirigidos à microgeração. Porém, na atualidade não existem fabricantes nacionais de inversores de potência, tornando esse equipamento um fator proibitivo para a implementação do sistema, devido seu alto custo nativo, agravado pelas ocorrências de variação cambial, taxas alfandegárias e demais encargos desta natureza. Diante destes fatos, o trabalho propõe simular um conversor buck ligado em série a um inversor desdobrador de corrente, juntamente com a definição de uma estratégia para mitigar a distorção harmônica total gerada pelo conversor. Foi utilizado o software Matlab/Simulink como ferramenta de modelagem e simulação do sistema de geração eólica, e também para análise dos dados resultantes desta. A análise das simulações mostraram que a aplicação de filtros passivos, para atenuar a distorção harmônica total do sinal da corrente na entrada da malha de controle, reduz significativamente a distorção harmônica total da corrente injetada na rede.

Palavras-chave: Inversores de frequência, Desdobrador de corrente, Energia eólica.

Abstract

The growing demand for renewable energy resources, associated with the diversification of the national energy matrix, had increased the participation of renewable energy sources, being a perceived trend in many countries around the world. Between the renewable sources, the wind generation stands out for its unexplored potential, besides the governmental subsidies for the microgeneration. But there is no local power inverter manufacturers, making this equipment a restrictive factor for the system implementation, because its high commercial price, aggravated by the exchange variation, custom taxes and other related charges. By these facts, the project propose the simulation of a buck converter in series with a current source inverter, associated with a strategy to mitigate the total harmonic distortion generated by the converter. The Matlab/Simulink software was used as a modelling and simulation tool of wind generation and also for the data analysis resultant from it. Simulation analysis showed that applying passive filters to attenuate the total harmonic distortion of the current signal at the control loop input, reduces significantly the Total Harmonic Distortion of the injected current into the grid.

Keywords: Power inverter, Current source inverter, Wind energy.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Distribuição geral dos ventos.	11
Figura 2 – As dez maiores capacidades instaladas.	12
Figura 3 – Capacidade acumulada instalada no mundo de 2001 a 2017.	13
Figura 4 – Capacidade anual instalada no mundo de 2001 a 2017.	13
Figura 5 – Capacidade anual instalada por região de 2009 a 2017.	14
Figura 6 – Atlas do potencial eólico brasileiro.	15
Figura 7 – Conversor operando em malha fechada.	17
Figura 8 – Conversor buck.	18
Figura 9 – Principais arranjos de sistemas eólicos.	20
Figura 10 – Turbinas verticais modelo savonius e modelo darrieus.	21
Figura 11 – Turbinas de eixo horizontal com uma pá, duas pás e três pás.	21
Figura 12 – Turbinas pequeno porte nacional.	22
Figura 13 – Funcionamento básico do conversor CC-CA.	22
Figura 14 – Inversor desdobrador de corrente.	23
Figura 15 – Estratégia de modulação.	24
Figura 16 – Semiciclo positivo.	24
Figura 17 – Semiciclo negativo.	25
Figura 18 – Filtro-passa-baixas.	26
Figura 19 – Filtro-passa-altas.	26
Figura 20 – Filtro-passa-bandas.	27
Figura 21 – Filtro-rejeita-bandas.	27
Figura 22 – Harmônico.	28
Figura 23 – Limites de distorção harmônicas para sistemas de distribuição.	29
Figura 24 – Buck ligado em série com um inversor desdobrador de corrente.	32
Figura 25 – Malha de controle.	32
Figura 26 – Corrente na entrada do inversor sem a utilização de filtro.	33
Figura 27 – THD corrente no inversor sem a utilização de filtro.	33
Figura 28 – THD da corrente injetada na rede sem a utilização de filtro.	34
Figura 29 – Corrente injetada na rede sem a utilização de filtro.	34
Figura 30 – Corrente na entrada do inversor utilizando filtro do filterPro.	35
Figura 31 – TDH corrente na entrada do inversor utilizando filtro do filterPro.	36
Figura 32 – Corrente na entrada do inversor.	36
Figura 33 – THD corrente na entrada do inversor.	37
Figura 34 – Corrente injetada na rede.	37
Figura 35 – THD corrente injetada na rede.	38
Figura 36 – THD corrente na entrada do inversor.	38
Figura 37 – Corrente na entrada do inversor.	39
Figura 38 – THD da corrente injetada na rede.	39
Figura 39 – Corrente injetada na rede.	40
Figura 40 – Corrente injetada na rede com utilização de um filtro RC.	41
Figura 41 – THD da corrente injetada na rede com utilização Filtro RC.	41

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Contextualização	11
1.2	Motivação	15
1.3	Objetivos	16
1.4	Estrutura da monografia	16
2	TRABALHOS CORRELATOS	17
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
3.1	Tipos de sistemas eólicos	19
3.2	Componentes do sistema eólico	19
3.3	Inversor	22
3.3.1	Estratégia de modulação	23
3.3.2	Etapas de operação	24
3.3.3	Filtro L, LC ou LCL	25
3.4	Filtro de sinal	25
3.4.1	Definições de tipos de filtros	25
3.4.1.1	Filtro-passa-baixas	26
3.4.1.2	Filtro-passa-altas	26
3.4.1.3	Filtro-passa-banda	27
3.4.1.4	Filtro-rejeita-banda	27
3.4.1.5	Filtros-passa-tudo	28
3.4.2	Respostas dos filtros	28
3.5	Harmônico	28
3.6	Distorção harmônica total	29
3.7	Transformada rápida de fourier	29
4	MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1	Procedimentos metodológicos	30
4.2	Ambiente de desenvolvimento e testes	30
4.2.1	MATLAB	30
4.2.2	FilterPro	31
5	DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS	32
5.1	Simulação	32
5.1.1	Análise da simulação	33
5.2	Filtro projetado no FilterPro	35
5.2.1	Análise da simulação com filtro projetado no FilterPro	35
5.3	Filtro projetado no simulink sem atraso	35
5.4	Filtro projetado no simulink com atraso	38
5.5	Filtro de potência RC	40
6	CONCLUSÃO	42
6.1	Contribuições	42
6.2	Considerações e limitações	42

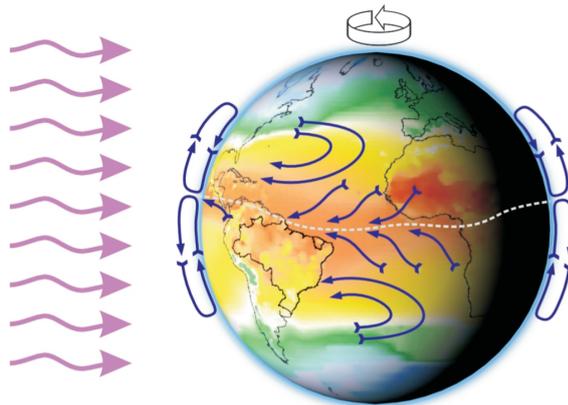
6.3	Trabalhos futuros	43
	REFERÊNCIAS	44

1 Introdução

1.1 Contextualização

O fenômeno conhecido como vento é um evento natural que, para ocorrer, depende da associação de vários fatores: a energia irradiada pelo sol, a rotação planetária, as irregularidades na composição da superfície dos planetas e a morfologia símil às esferas que os mesmos assumem. O somatório dessas condições dá origem ao movimento de convecção: massas de ar com maior temperatura se aloçam em pontos mais altos da atmosfera e, como consequência, geram regiões de baixa pressão junto à superfície. As massas de ar com temperaturas menores deslocam-se para essas zonas de baixa pressão e dão origem ao evento conhecido como vento. Levando em consideração os mecanismos descritos, é possível concluir que, o fenômeno abordado trata de um mecanismo solar-planetário, que possui duração estimada na ordem de bilhões de anos. Esse sistema é ilustrado na Figura 1. Em todos os planetas envoltos por gases existe circulação atmosférica (MME, 2015).

Figura 1 – Distribuição geral dos ventos.

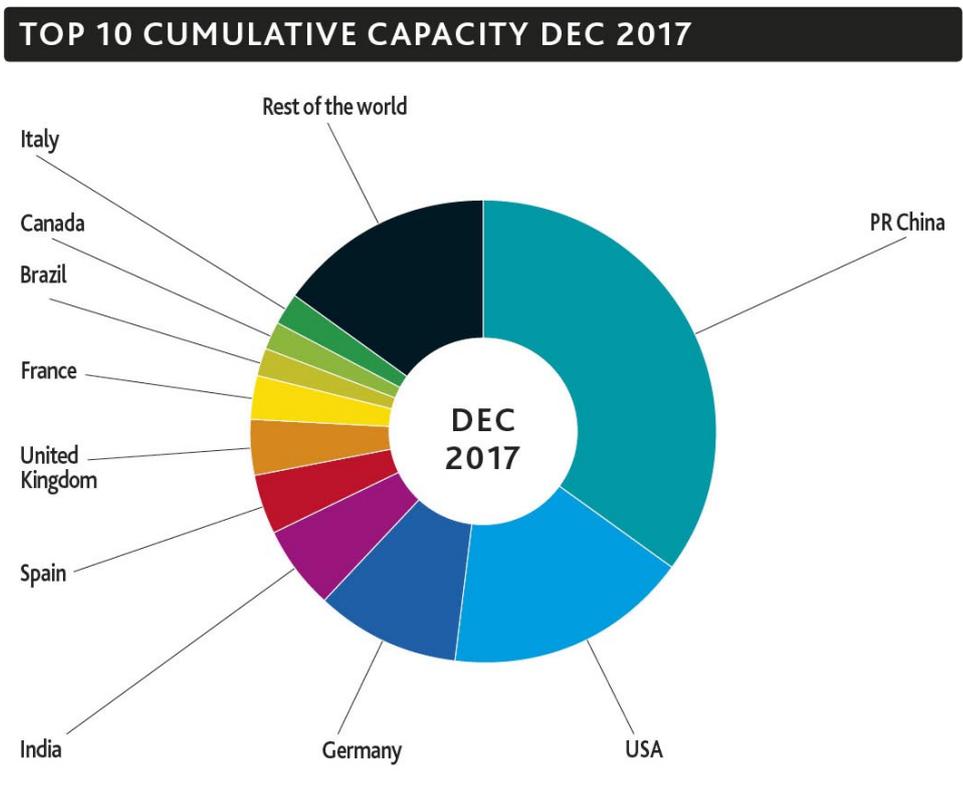


Fonte – (CEPEL, 2001).

A energia proveniente dos ventos é conhecida como energia eólica. A obtenção dessa forma de energia se dá através da utilização dos movimentos provenientes da circulação das massas de ar que acionam as turbinas, transformando a energia cinética dos ventos em energia mecânica, que por sua vez é transformada em energia elétrica, através da ação de geradores elétricos (TIBOLA, 2009).

A energia eólica atualmente constitui uma das opções de energia de fonte renovável. Essa modalidade já integra parte da matriz energética de mais de cinquenta países, dentre eles, os que apresentam maior capacidade instalada são: China, Estados Unidos, Alemanha, Índia, Espanha, Reino Unido, França, Brasil, Canadá e Itália. A Figura 2 ilustra as dez maiores capacidades instaladas no mundo.

Figura 2 – As dez maiores capacidades instaladas.



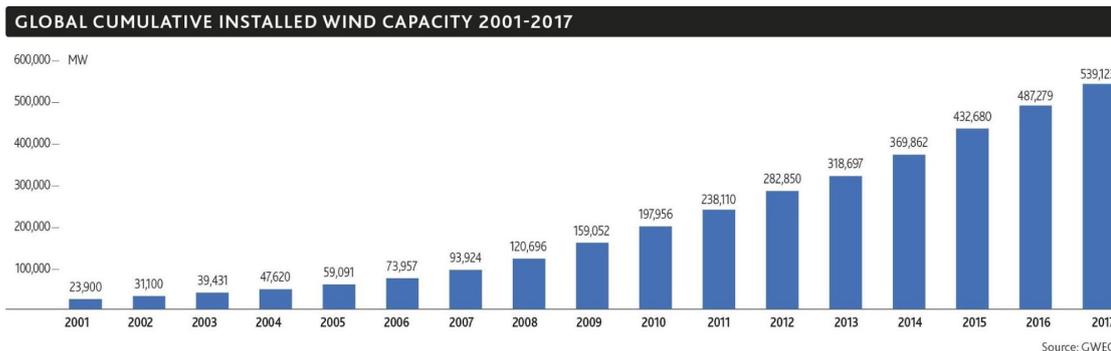
Country	MW	% Share
PR China	188,392	35
USA	89,077	17
Germany	56,132	10
India	32,848	6
Spain	23,170	4
United Kingdom	18,872	4
France	13,759	3
Brazil	12,763	2
Canada	12,239	2
Italy	9,479	2
Rest of the world	82,391	15
Total TO P10	456,732	85
World Total	539,123	100

Source: GWEC

Fonte – (GWEC, 2018).

Embora a indústria eólica tenha se desenvolvido inicialmente na união europeia, a ásia assumiu o posto de maior mercado para energia eólica na última década, com maior capacidade instalada anualmente desde 2009. O gráfico da Figura 3 apresenta a capacidade global acumulada, onde se observa um aumento constante desde 2001. Este aumento, em 2017, é de aproximadamente 22 vezes em relação aos valores de 2001.

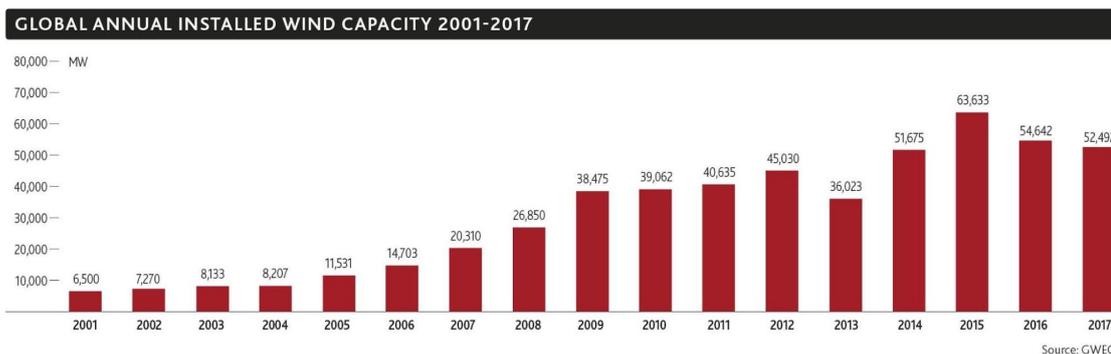
Figura 3 – Capacidade acumulada instalada no mundo de 2001 a 2017.



Fonte – (GWEC, 2018).

A Figura 4 apresenta os novos valores instalados, no mundo, a cada ano, de geração eólica. É possível observar uma pequena redução de unidades em 2013, assim como uma estagnação em 2016 e 2017, porém o comportamento é crescente no âmbito geral.

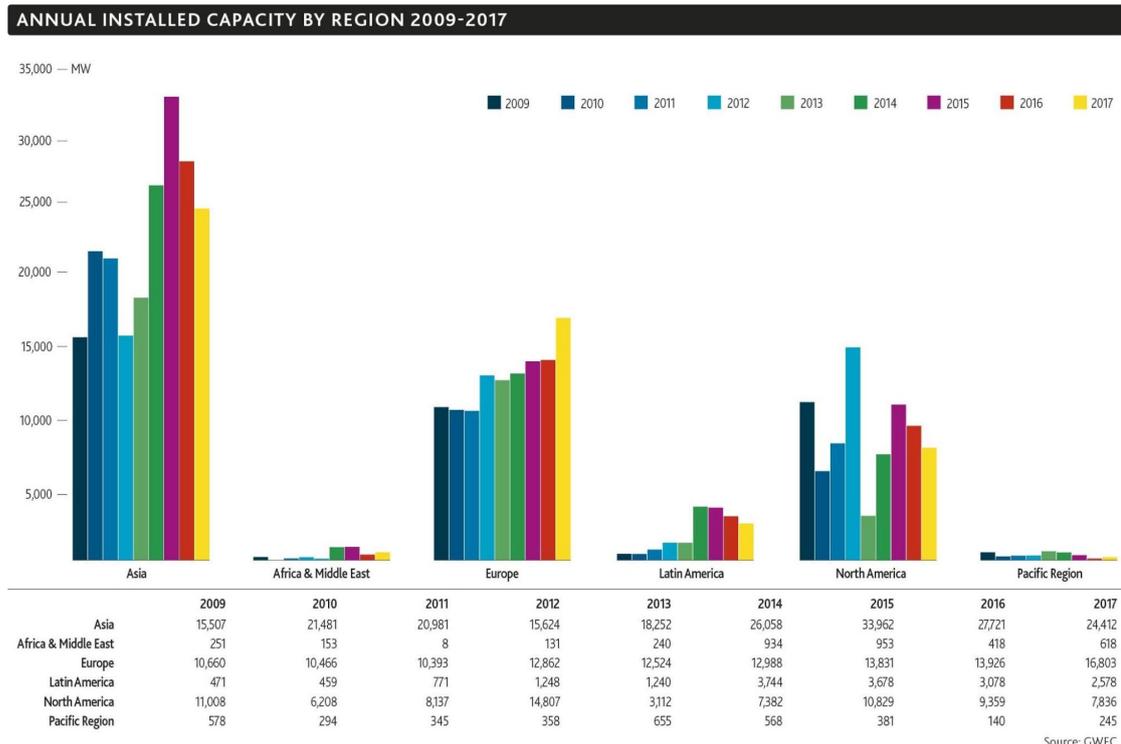
Figura 4 – Capacidade anual instalada no mundo de 2001 a 2017.



Fonte – (GWEC, 2018).

A Figura 5 apresenta a capacidade anual instalada por região. É possível ranquear de maneira geral as regiões, com isso temos ásia como maior produtora, europa como segunda, seguidas de america do norte, américa latina, áfrica e oriente médio e, por fim, a região do pacífico.

Figura 5 – Capacidade anual instalada por região de 2009 a 2017.

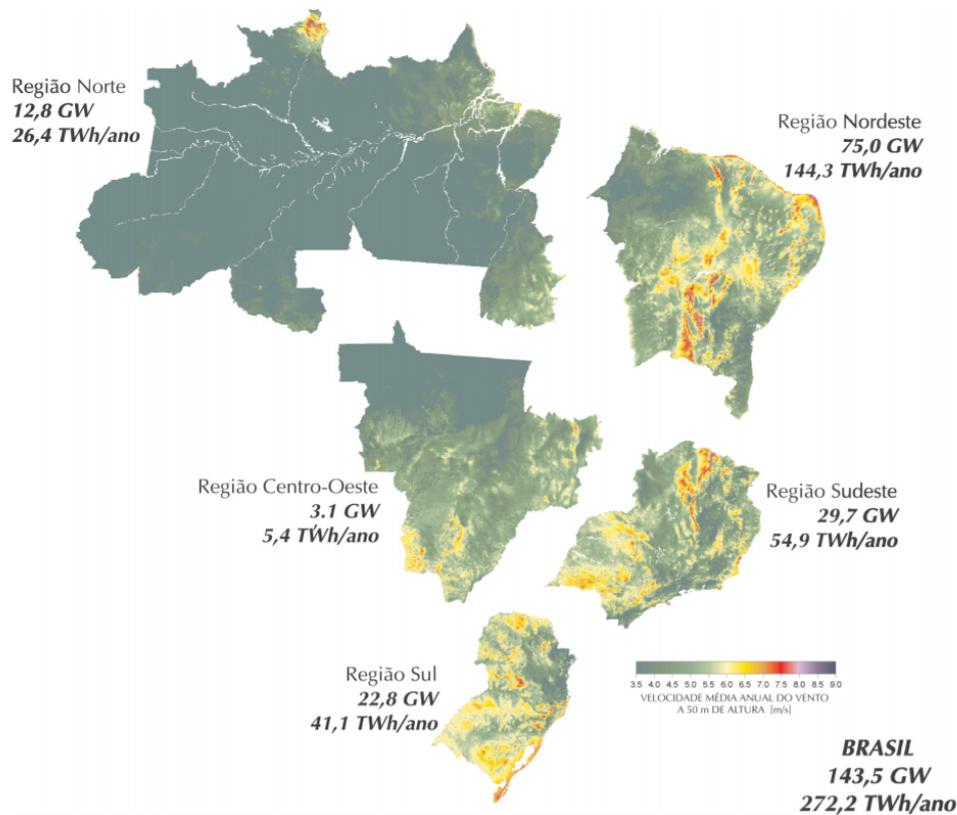


Fonte – (GWEC, 2018).

A partir da análise dos dados expostos é evidente a existência do aumento gradual no que se refere ao uso de energia eólica. Este aumento tende a se manter, devido à iminente escassez dos recursos energéticos não renováveis e a criação de acordos internacionais, por exemplo o Protocolo de Kyoto, que visa a redução da emissão de gases que agravam o efeito estufa.

No Brasil, um grande potencial eólico foi confirmado através de medidas precisas do vento, realizadas recentemente e publicadas no Atlas do Potencial Eólico Brasileiro em 2012. O mesmo demonstra que o país possui um potencial eólico de 143 GW, número obtido levando em consideração torres com até 50 metros de altura. A Figura 6 ilustra o potencial eólico brasileiro por região (CEPEL, 2001). Levando em conta tal potencial, o Brasil demonstra ter uma enorme capacidade de mercado para produtos de geração eólica, chamando a atenção dos países que dominam tal tecnologia (BORGES, 2018).

Figura 6 – Atlas do potencial eólico brasileiro.



Fonte – (CEPEL, 2001).

A produção brasileira de energia eólica alcançou 15.099 GWh em 2019, com uma totalidade de 614 empreendimentos em operação, contando ainda com 50 equipamentos em construção e 148 por iniciar a construção (ANEEL, 2019). Um aumento de 23,6% na geração eólica é percebido quando comparado um período de cinco anos, sendo que em 2014 a produção brasileira era de 12.210 GWh (EPE, 2016).

O crescimento da capacidade instalada deve-se em grande parte a incentivos do governo federal, por exemplo o Programa de Incentivo a Fontes Alternativas de Energia Elétrica (EPE, 2016).

A única empresa de fabricação de geradores eólico de pequeno porte no Brasil é a ENERSUD, fundada em 2002 com o propósito de pesquisar, desenvolver e distribuir soluções energéticas, focadas na geração a partir de fontes renováveis. Para garantir um índice de inovação elevado a empresa tem parcerias com universidades e centros de pesquisas nacionais (ENERSUD, 2018).

1.2 Motivação

O crescimento da geração de energia eólica brasileira não foi acompanhado pelo desenvolvimento de tecnologia nacional na área e, com isso, não foi desenvolvido um conversor de potência de origem brasileira para conexão com a rede elétrica. Esta ausência leva à utilização de conversores importados, que apresentam as seguintes desvantagens: custo elevado, taxas de importação e estarem sujeitos flutuação cambial (BORGES, 2018).

O Brasil apresenta um potencial energético eólico expressivo e ainda não explorado, além de possuir um crescente desenvolvimento da geração de energia eólica. Somando-se os dois fatos expostos, pressupõe-se que exista um mercado a ser explorado nesse segmento.

Além dos fatores supracitados, existem políticas de incentivo referentes ao uso e geração de energia proveniente de fontes renováveis. A agência Nacional de Energia Elétrica, por meios da resolução normativa nº 482/2012 (ANEEL, 2012), em vigor desde 17 de abril de 2012, e da resolução normativa nº 687/2015 (ANEEL, 2015), publicada posteriormente, estabelece as regras para que o consumidor brasileiro possa gerar, através de fontes renováveis, sua própria energia elétrica, com a possibilidade de fornecer o excedente para a rede elétrica local, desde que sua unidade geradora não ultrapasse os 5 MW. O excedente gerado é revertido em créditos que têm validade de 60 meses e podem ser usados para abater a despesa de outras unidades consumidoras, que estejam localizadas na área de atendimento de uma mesma distribuidora. Este estímulo para geração distribuída tem como principais atrativos o adiamento de investimento em expansão dos sistemas de distribuição e transmissão, o baixo impacto ambiental, a minimização das perdas e a diversificação da matriz energética (ANEEL, 2017).

As condições naturais do território brasileiro, favoráveis à geração de energia eólica, somadas às políticas de incentivo e ao interesse existente do consumidor, revelam a importância da implementação de pesquisas que busquem o aperfeiçoamento da integração de sistemas geradores de pequeno porte com a rede elétrica local.

1.3 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho consiste em aumentar a qualidade da energia produzida por geradores eólicos de pequeno porte. Essa melhoria está ligada principalmente a redução da distorção harmônica da corrente injetada na rede, assim como:

- Investigar uma abordagem de implementação simplificada das técnicas de filtros de sinais e filtros passivos de potência.
- Simular um sistema eólico ligado a rede de distribuição através de um conversor buck em série com um inversor desdobrador de corrente.
- Implementar estratégias de filtragem da medição da corrente, para suavizar a entrada do controle.
- Realizar a análise comparativa dos resultados em termos da distorção harmônica total.

1.4 Estrutura da monografia

Este trabalho está estruturado em 6 capítulos. O presente capítulo trata da introdução ao problema e propõe soluções. O capítulo 2 discute trabalhos correlatos, ao passo que o capítulo 3 apresenta as bases teóricas que foram fundamentais para construção do trabalho, incluindo os conceitos segmentados referentes aos tipos de sistemas eólicos, os componentes envolvidos e as estratégias aplicadas na construção.

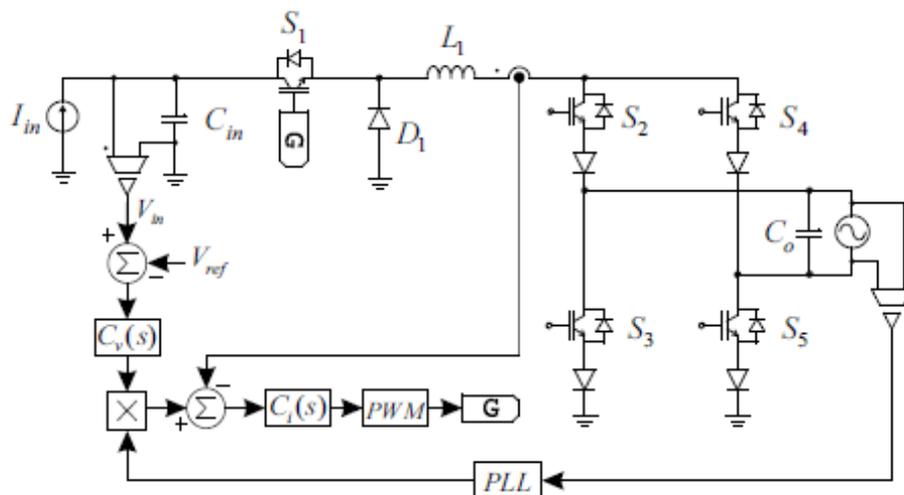
O capítulo 4, por sua vez, apresenta os procedimentos metodológicos de maneira geral, enquanto o capítulo 5 detalha o desenvolvimento e os resultados obtidos ao longo do percurso. Finalmente, o capítulo 6 agrega as considerações finais.

2 Trabalhos Correlatos

Este capítulo aborda alguns trabalhos que tratam da temática estudada, especialmente aqueles que diretamente expõem conceitos referentes aos aerogeradores. Os achados foram fundamentais para execução do projeto, principalmente por nortear o avanço das pesquisas, tal como a execução do levantamento de dados proposto neste trabalho de conclusão de curso.

BORGES (2018) apresentou o estudo e a implementação de um inversor para conexão de um aerogerador de pequeno porte à rede elétrica. Este inversor é o segundo estágio do conversor de potência que realiza a conexão do sistema eólico à rede elétrica. A topologia foi estudada detalhadamente, sendo composta por um conversor buck em série com um CSI (current source inverter), no qual a estratégia de modulação empregada faz com que a maioria das chaves comutem de forma síncrona com a rede elétrica, para assim efetuar o desdobramento da corrente. Após a definição do modelo teórico e dedução das equações, foi apresentado o processo de desenvolvimento de um protótipo com potência nominal de 5 kW, que se conecta à rede elétrica com tensão de 220 V e frequência de 60 Hz. Por fim, a análise teórica foi validada por meio da experimentação, onde se confirmou algumas vantagens da topologia, tais como simples controle e filtro de saída. A Figura 7 mostra uma visão geral sobre a estrutura do conversor implementado por Borges.

Figura 7 – Conversor operando em malha fechada.

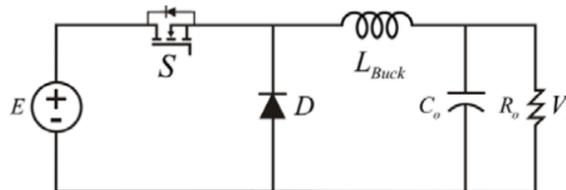


Fonte – (BORGES, 2018).

TIBOLA (2009) apresentou uma pesquisa que teve com o objetivo principal o estudo e a análise da estrutura eólica de pequeno porte para geração de energia elétrica, a fim de se obter um modelo de simulação que possibilite o projeto e o dimensionamento de conversores, capazes de rastrear a máxima potência e otimizar o sistema. Com o foco nos sistemas eólicos de pequeno porte, Tibola realizou a construção de um modelo para turbinas de três pás com gerador síncrono a ímã permanente, para o carregamento de um banco de baterias. Após a implementação do modelo, foram aplicados métodos de rastreamento de máxima potência em simulação. Tais métodos integraram parte do estágio de controle dos converso-

res de potência aplicados ao sistema. Três conversores básicos foram abordados, sendo eles Boost, SEPIC e Buck, sendo que para o último foi realizada uma implementação prática. A estrutura clássica do conversor Buck é apresentada na Figura 8.

Figura 8 – Conversor buck.



Fonte – (TIBOLA, 2009).

Reis (2015) apresentou em sua tese de doutorado um estudo pontual focado em estabelecer uma estratégia de controle operativo, para sistemas de geração eólica com geradores sincronizados e conversores completos, com o objetivo de que a instalação geradora participe do processo de regulação de tensão em seu ponto de conexão e também no processo da redução das distorções harmônicas produzidas pela mesma. Os trabalhos considerados em sua pesquisa contemplaram atividades relacionadas com o desenvolvimento de estratégias, modelagens e implementação computacional.

Segundo Moura (2017), a operação de parques eólicos está vinculada com fenômenos diretamente ligados com a área de qualidade da energia elétrica, a exemplo das distorções harmônicas de tensão/corrente, que podem interagir e causar impactos nas redes elétricas às quais esses parques estão ligados. Os trabalhos considerados em sua dissertação de mestrado contemplam atividades relacionadas com o desenvolvimento de modelos matemáticos, implementação computacional, montagens laboratoriais e estudos de desempenho, tendo como objetivo principal a implementação experimental de uma unidade eólica em uma estrutura laboratorial de escala reduzida.

Oliveira (2016) apresentou em seu trabalho os procedimentos de inicialização e operação de um conversor estático de potência, desenvolvido para aplicações em turbinas eólicas de pequeno porte, conectadas à rede elétrica. No sistema de geração estudado, uma máquina síncrona trifásica a ímãs permanentes é acionada em laboratório por uma máquina de indução trifásica nos mesmos moldes de uma turbina eólica de pequeno porte. A potência ativa produzida pelo sistema de geração eólico e controlada pelo conversor de potência implementado possui três características, sendo elas: a simplicidade de execução do projeto, o baixo custo de fabricação e a robustez. As produções de (OLIVEIRA, 2016) e (BORGES, 2018) constituem obras fundamentais para a elaboração desse trabalho de conclusão de curso.

3 Fundamentação teórica

O objetivo principal deste capítulo é apresentar os fundamentos teóricos e metodológicos sobre os quais esta pesquisa é executada, além de situar o leitor sobre a geração de energia eólica, apresentando os principais conceitos relacionados a esse processo.

3.1 Tipos de sistemas eólicos

Os sistemas de geração eólica podem ser encontrados em basicamente 3 configurações, sendo elas: isolado, conectado à rede elétrica e o híbrido.

O sistema isolado é composto por aerogerador, inversor, carregador e banco de baterias. Ele é adequado para instalações em localidades ermas, nas quais a possibilidade de acesso à rede elétrica pelo consumidor é inexistente. Neste sistema, o aerogerador fornece energia para o usuário e deve gerar um excedente que por sua vez é armazenado no banco de baterias. A quantidade armazenada pode ser utilizada nos momentos em que não é possível gerar energia. O principal ônus deste tipo de sistema se dá devido ao custo elevado das baterias estacionárias (BORGES, 2018).

O sistema eólico conectado à rede elétrica é composto por aerogerador e Grid Power Converter. A quantidade reduzida de equipamentos aumenta a confiabilidade e robustez do sistema. O principal gravame do sistema advém da ausência de um meio de armazenamento próprio, o que deixa o proprietário dependente da disponibilidade da rede, ocasionando falta ou desperdício de energia elétrica, em uma eventual indisponibilidade da rede. A ausência de um banco de baterias tem como vantagem a redução do custo do sistema (BORGES, 2018).

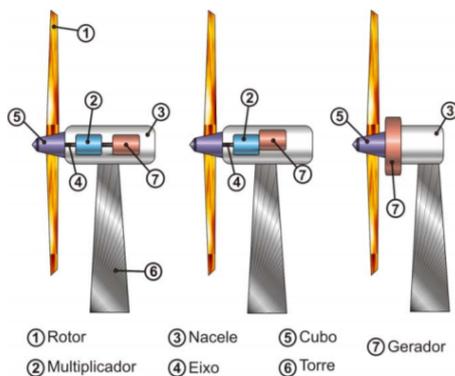
O sistema híbrido consiste na união dos sistemas anteriormente citados, com isso acumula as vantagens e desvantagens de ambos. Tendo como principal desvantagem o custo elevado devido ao uso do banco de baterias e maior número de equipamentos, tornando-o um sistema mais complexo. A existência de um banco de baterias, que é carregado com o excedente da geração, permite ao usuário ter energia elétrica caso a rede esteja indisponível e em casos de ausência de ventos para geração. Caso não exista energia disponível no banco de baterias nem condições para geração, o usuário tem a possibilidade de utilizar a energia provida pela rede. Esse sistema é mais robusto em termos de disponibilidade energética (BORGES, 2018).

3.2 Componentes do sistema eólico

De modo geral sistemas eólicos são formados por componentes similares em arranjos distintos, alguns desse arranjos são apresentados na Figura 9. O objetivo dos arranjos variados é fazer com que o sistema eólico trabalhe de forma harmônica, tendo como consequência um maior rendimento (TIBOLA, 2009). Os principais componentes de um sistema eólico são:

- Nacele - Em aerogeradores de pequeno porte é o local onde se encontram o gerador elétrico, o sistema de proteção e a cauda. Em geradores de grande porte o nacele abriga essencialmente o gerador, caixa de transmissão, sistema de freios, de controle, de direção e o sistema de proteção (BORGES, 2018).

Figura 9 – Principais arranjos de sistemas eólicos.



Fonte – (TIBOLA, 2009).

- Geradores - Os geradores elétricos são os responsáveis por converter a energia mecânica de rotação, entregue em seu eixo pelo rotor eólico, em energia elétrica (BORGES, 2018).
- Torre - A torre é responsável por sustentar o rotor e proteger os cabos que transmitem a energia gerada pelo sistema.
- Rotores - Os rotores são responsáveis por transformar a energia cinética capturada dos ventos em energia mecânica rotacional e entregá-la ao gerador elétrico (TIBOLA, 2009).

Rotores têm duas formas básicas, são elas: rotores de eixo horizontal e os de eixo vertical. Essas definições foram feitas levando em consideração a posição do eixo do rotor em relação ao solo, sendo a primeira com eixo perpendicular e a segunda com eixo paralelo ao solo, cada um com suas características distintas.

Os rotores de eixo vertical são indicados para aplicações em áreas urbanas, onde os ventos tendem a ser turbulentos, pois estes são capazes de atuar sob quaisquer direções de incidência de vento. A vantagem de aproveitar ventos turbulentos está relacionada à frequente mudança no ângulo de ataque das pás do rotor em relação à direção do vento. Em consequência, ocorre a geração de forças resultantes que ocasionam vibração na estrutura da turbina e limita sua velocidade, induzindo uma limitação de seu rendimento (BORGES, 2018). Os principais modelos de rotores de eixo vertical são Savonius e Darrieus, demonstradas na Figura 10.

Figura 10 – Turbinas verticais modelo savonius e modelo darrieus.



Fonte – (TIBOLA, 2009).

Os rotores de eixo horizontal podem ser encontrados com distintos números de pás conforme demonstrado na Figura 11.

Figura 11 – Turbinas de eixo horizontal com uma pá, duas pás e três pás.



Fonte – (TIBOLA, 2009).

Os rotores de pá única fazem uso de um contrapeso para eliminar vibração, isso limita seu desempenho e conseqüentemente seu uso. Os de duas pás, são resistentes, simples e utilizam menos material em sua construção, quando comparados aos de três pás. Esses por sua vez, tem uma melhor distribuição de massa e por isso distribui melhor as tensões quando a máquina gira em consequência das mudanças na direção do vento. Essa vantagem faz com que as turbinas de 3 pás sejam as mais utilizadas em todo o mundo (RIBEIRO, 2014).

Os rotores de geradores de pequeno porte são encontrados nas duas configurações, entretanto a principal empresa nacional disponibiliza para o mercado modelos com rotores na configuração horizontal, sendo a distinção dentre seus modelos feita pelo tamanho e potência dos mesmos. A Figura 12 apresenta três dos principais modelos do fabricante sendo eles, Verner 555, Notus Marine, Gerar 246 (ENERSUD, 2019).

Figura 12 – Turbinas pequeno porte nacional.

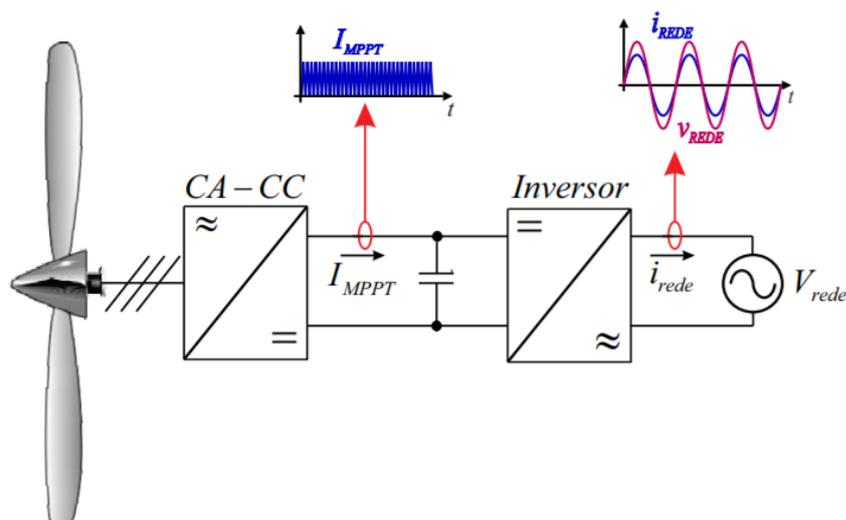


Fonte – (ENERSUD, 2019).

3.3 Inversor

O GPC (*grid power converter*) é o equipamento utilizado para condicionar a energia proveniente de geradores elétricos conectados a uma fonte de energia qualquer, transferindo essa energia para a rede elétrica. Normalmente um GPC pode ter um ou dois estágios. No presente trabalho vamos voltar nossa atenção para os com dois estágios. Nestes conversores, o primeiro estágio, CA-CC, realiza a função de elevar a tensão produzida pelo gerador, esse estágio possui elevado ganho estático, pois no segundo estágio se faz necessário uma tensão de entrada maior que a tensão de pico da rede elétrica. No segundo estágio, CC-CA, é feita a conformidade da corrente introduzida na rede elétrica, onde tem-se como objetivo, baixa ocorrência de harmônicas e um elevado fator de potência. Na Figura 13 é demonstrado o princípio de operação de um conversor com dois estágios (BORGES, 2018).

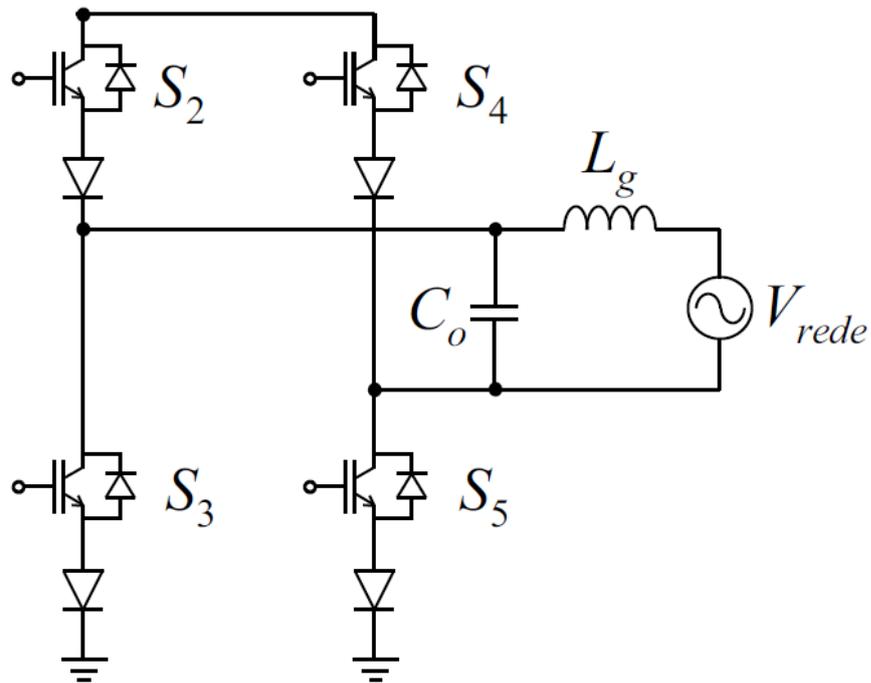
Figura 13 – Funcionamento básico do conversor CC-CA.



Fonte – (BORGES, 2018).

O inversor desdoblador de corrente é a topologia mais empregada atualmente no mercado. Ele é um conversor com particularidade estática de um abaixador de tensão, sendo este o motivo pelo qual a tensão na entrada do segundo estágio do GPC deve ser maior que a tensão de pico da rede elétrica, o inversor desdoblador de corrente é apresentado na Figura 14 (BORGES, 2018).

Figura 14 – Inversor desdoblador de corrente.

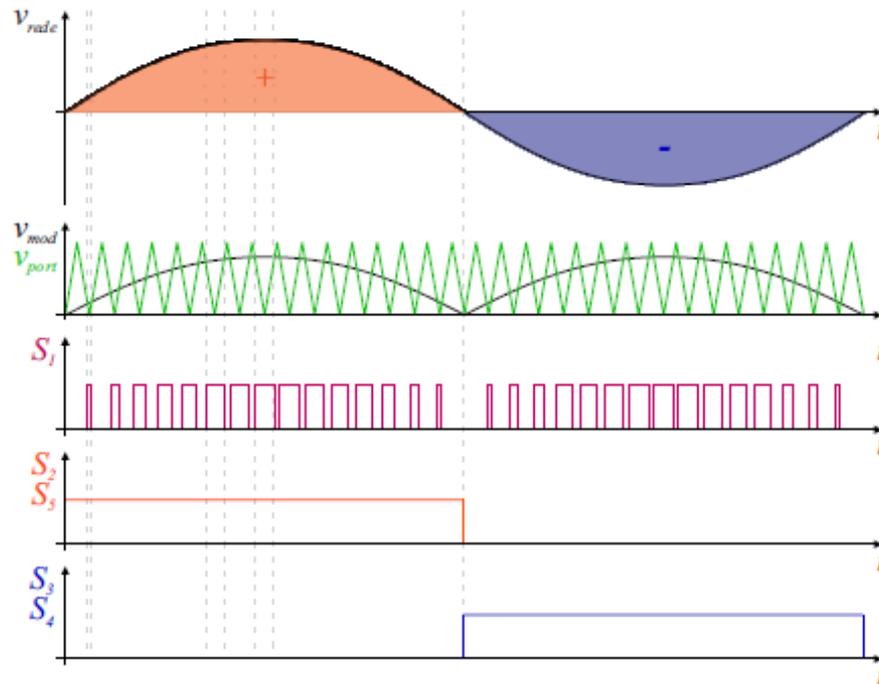


Fonte – (BORGES, 2018).

3.3.1 Estratégia de modulação

A Figura 15 apresenta uso da modulação PWM senoidal para o chave S1 (Buck), na qual um sinal senoidal é comparado a um sinal triangular (portadora). Como complemento, para as chaves do inversor de corrente, o acionamento é efetuado de forma coordenada com a da rede. Quando a tensão da rede é positiva, S2 e S5 entram em condução. No instante em que ocorre a inversão da polaridade da rede, S2 e S5 são bloqueados e S3 e S4 são colocadas em condução, concluindo assim o processo de desdoblamento da corrente do indutor (BORGES, 2018).

Figura 15 – Estratégia de modulação.

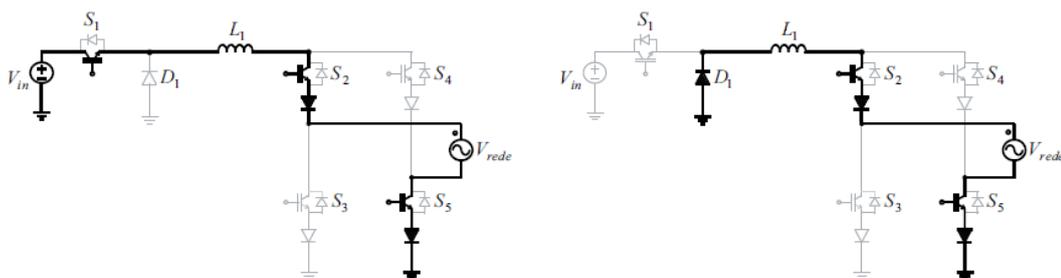


Fonte – (BORGES, 2018).

3.3.2 Etapas de operação

O conversor possui duas etapas de operação para o semiciclo positivo e duas para o semiciclo negativo da rede elétrica. Na primeira destas etapas, considera-se que a tensão da rede está no semiciclo positivo e a chave S1 está em condução. Essa etapa pode ser chamada de magnetização do indutor, pois nela a fonte de entrada fornece energia para o indutor e para a rede elétrica. A transição para a próxima etapa de operação acontece quando a chave S1 é bloqueada. Isso corta a corrente no indutor, o qual, para conservar a continuidade do fluxo de corrente, inverte sua polaridade de tensão, isto posto, D1 entra em condução. Nesta etapa é efetuada a desmagnetização do indutor, também nomeada como etapa de roda livre, na qual a energia fornecida para a rede elétrica é provida pelo indutor. Os circuitos equivalentes destas etapas são apresentados na Figura 16 (BORGES, 2018).

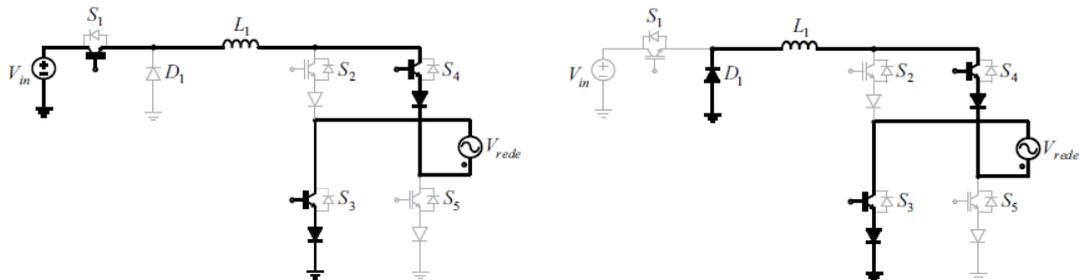
Figura 16 – Semiciclo positivo.



Fonte – (BORGES, 2018).

Durante o semiciclo negativo da rede, os interruptores S2 e S5 permanecem bloqueados, enquanto S3 e S4 são comandados a conduzir. O circuitos equivalentes destas etapas são apresentados na Figura 17.

Figura 17 – Semiciclo negativo.



Fonte – (BORGES, 2018).

3.3.3 Filtro L, LC ou LCL

As topologias mais comumente utilizadas de filtro passivo são filtro indutivo (L), indutivo-capacitivo (LC) e indutivo-capacitivo-indutivo (LCL). Filtros passivos são utilizados para minimizar correntes harmônicas injetadas na rede pelo inversor.

Os filtros L são de primeira ordem, possuindo a atenuação na região de altas frequências de 20 dB/década. Os filtros LC são de segunda ordem e tem atenuação de 40 dB/década. Conectar um capacitor direto em paralelo com a rede gera transitórios de conexão e uma frequência de ressonância que tem a tendência de desestabilizar o controle de corrente.

Filtro LCL são de terceira ordem, tem indutores menos volumosos e uma atenuação de 60 dB/década. Além disso, a utilização de uma segunda indutância diminui os transitórios de conexão. Porém, o filtro LCL apresenta também uma frequência de ressonância natural, que tende a desestabilizar o controle de corrente do conversor conectado à rede (GOMES; CUPERTINO; PEREIRA, 2017).

3.4 Filtro de sinal

Os filtros eletrônicos são empregues em aplicações em que um comportamento específico de sinal é exigido de um circuito. Os filtros atuam na relação amplitude versus frequência do sinal, tratando-o de forma a proporcionar correto funcionamento do circuito que o gera ou que através dele funciona. Existem outras aplicações onde mudanças de fase específicas ou atrasos de tempo precisam ser incorporados em um circuito e um filtro pode ser usado nessas aplicações. O software Texas Instruments FilterPro™ foi projetado para sintetizar filtros que alteram as características de frequência ou tempo de um sinal. Tal aplicativo facilita a criação de filtros tipo passa-baixas, passa-altas, passa-banda, rejeita-banda e passa-tudo. Esses cinco tipos de filtro são definidos abaixo nesta seção (TEXAS, 2011).

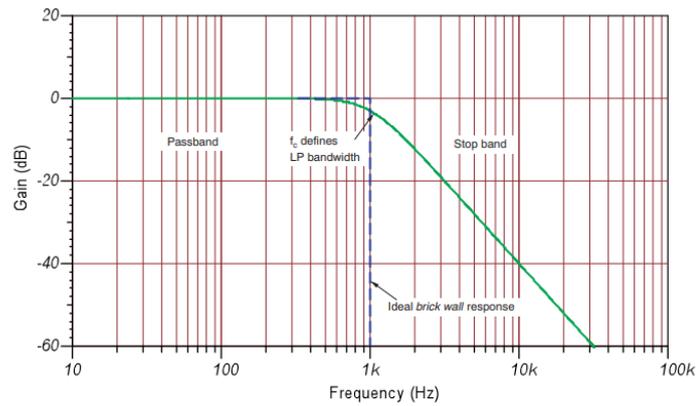
3.4.1 Definições de tipos de filtros

Os filtros podem ser clasificados de acordo com a forma que modificam suas entradas:

3.4.1.1 Filtro-passa-baixas

Os filtros passa-baixas são o tipo de filtro mais amplamente utilizado. Eles são projetados para permitir a passagem das frequências até uma frequência de corte definida f_c , mostrado na Figura 18. Esta região onde as frequências passam pelo filtro é chamada de banda passante, e é definida como a largura de banda do filtro. Uma vez que a frequência de corte é atingida, o filtro começa a atenuar as demais frequências maior que f_c . A região após f_c é chamada de banda rejeitada. (TEXAS, 2011)

Figura 18 – Filtro-passa-baixas.

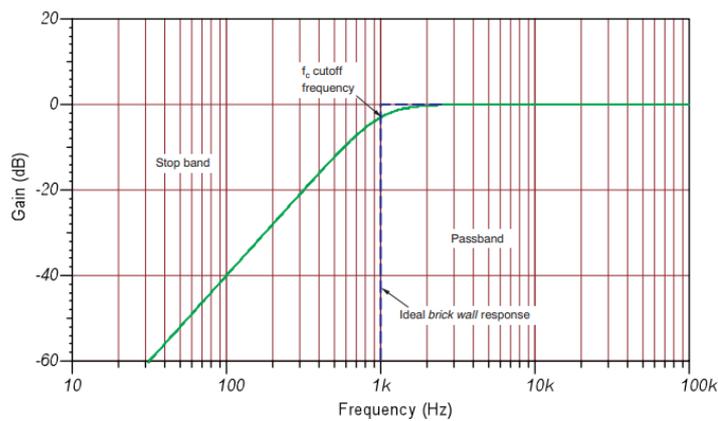


Fonte – (TEXAS, 2011).

3.4.1.2 Filtro-passa-altas

O filtro passa-altas, como mostrado na Figura 19, tem uma banda passante onde todas as frequências acima do limite da frequência f_c passem com pouca ou nenhuma atenuação. Abaixo de f_c , dentro da banda rejeitada do filtro, os sinais são atenuados a níveis cada vez maiores à medida que a frequência se move para longe da f_c . (TEXAS, 2011)

Figura 19 – Filtro-passa-altas.

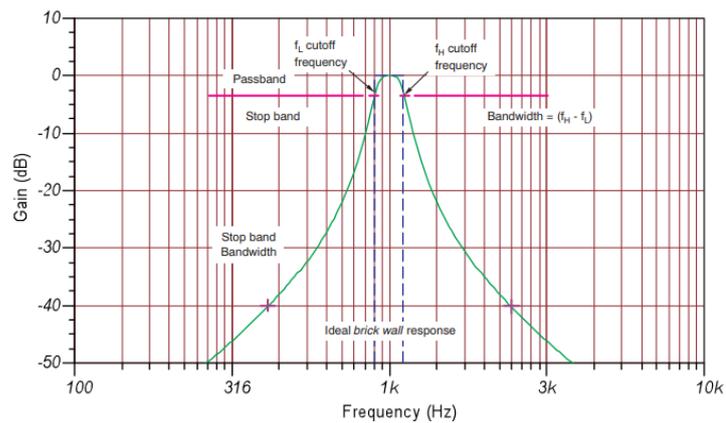


Fonte – (TEXAS, 2011).

3.4.1.3 Filtro-passa-banda

O filtro de passagem de banda possui uma faixa de passagem que permite que uma banda selecionada de frequências passem com pouca ou nenhuma atenuação (vide a Figura 20). Uma frequência de corte superior (f_H) e inferior (f_L) definem a largura de banda do filtro (f_H a f_L). frequências além da banda passante ficam nas duas réguas de freio e recebem maior atenuação à medida que a frequência se distancia da banda de passagem em qualquer direção (TEXAS, 2011).

Figura 20 – Filtro-passa-bandas.

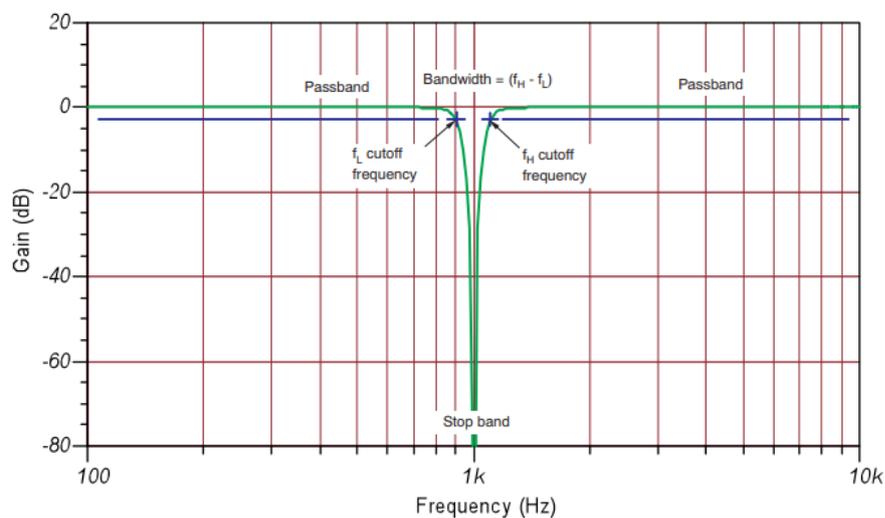


Fonte – (TEXAS, 2011).

3.4.1.4 Filtro-rejeita-banda

O filtro de rejeição de banda, Figura 21, às vezes é chamado de "filtro notch", devido a seu ganho de entalhe característico de faixa de frequência versus frequência, ilustrada na Figura 21. A finalidade deste tipo de filtro é atenuar ou rejeitar frequências que se encaixam na banda determinada. A largura de banda do filtro é definida por uma frequências de corte mais baixas, como o filtro de passagem de banda (TEXAS, 2011).

Figura 21 – Filtro-rejeita-bandas.



Fonte – (TEXAS, 2011).

3.4.1.5 Filtros-passa-tudo

A função do filtro de passa-tudo é passar todas as frequências igualmente, porém criando um comportamento de mudança de fase ou tempo específico. Por exemplo, um filtro passa-tudo pode ser projetado com um deslocamento de fase de entrada-para-saída especificado de -45° a 1 kHz (TEXAS, 2011).

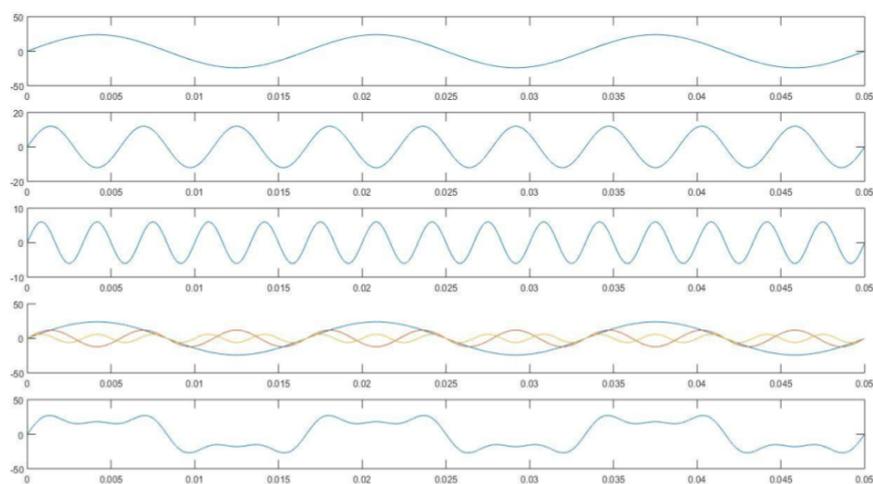
3.4.2 Respostas dos filtros

Um filtro passa-faixa ideal eliminaria completamente os sinais acima da frequência de corte e passaria perfeitamente os sinais abaixo deste limite. Esta resposta ideal é apenas teórica. Em filtros reais, várias aproximações são realizadas para aproximar o comportamento destes filtros do ideal, as principais aproximações são Chebyshev, Bessel, Gaussian e Linear-Phase (TEXAS, 2011).

3.5 Harmônico

Um harmônico é qualquer membro da série harmônica. O termo é utilizado em várias disciplinas, incluindo, mas não se limitando a música, física, acústica, transmissão de energia, eletrônica, tecnologia de rádio e outros. Um harmônico de uma onda com uma frequência que é um múltiplo inteiro positivo da frequência da original, esta conhecida como frequência fundamental. A onda original também é conhecida como 1ª harmônica. Como todos os harmônicos são periódicos na frequência fundamental, a soma dos harmônicos também é periódica nessa frequência. Como exemplo, se a frequência fundamental é 60 Hz, as frequências dos harmônicos serão 120 Hz (2º harmônico), 180 Hz (3º harmônico), 240 Hz (4º harmônico) e qualquer onda com frequências múltipla de 60 Hz (WIKI, 2005). Na Figura 22 é demonstrado uma onda com frequência fundamental de 60 Hz e suas duas primeiras harmônicas ímpares, juntamente com a sobreposição das ondas e a forma de onda resultante de suas somas.

Figura 22 – Harmônico.



Fonte – Elaborada pelo autor.

3.6 Distorção harmônica total

Segundo (BHATTACHARJEE; JAMIL; JANA, 2018) a presença de dispositivos não lineares conectados a rede de potência causa distorção harmônica. Componentes não lineares são dispositivos em que a corrente não é proporcional à tensão aplicada.

De acordo com (MOURA, 2017) dos vários critérios estabelecidos para as conexões das fontes de geração a rede, as distorções harmônicas produzidas se apresentam como fator extremamente relevante. O autor ainda ressalta que as principais fontes de distorção harmônica estão ligadas a estratégia de chaveamento (PWM), uso de tempo morto no chaveamento do inversor e condições preexistentes na rede.

A quantidade de distorção na forma de onda de tensão ou de corrente pode ser quantificada através de um índice, denominado de Distorção Harmônica Total (THD). A análise THD é relevante para medir a qualidade da corrente e tensão fornecida pelo inversor (HARTMANN; STRATFORD; DUFFEY, 1998).

Na Figura 23 são apresentadas as recomendações da IEEE para distorções harmônicas, proposta no documento IEEE, 519, 1992 *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems* (HARTMANN; STRATFORD; DUFFEY, 1998).

Figura 23 – Limites de distorção harmônicas para sistemas de distribuição.

Current Distortion Limits for General Distribution Systems (120 V Through 69 000 V)

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Fonte – (HARTMANN; STRATFORD; DUFFEY, 1998).

3.7 Transformada rápida de fourier

A análise de Fourier de uma função periódica refere-se à extração da série de senos e cossenos que compõem a função. Esta análise pode ser expressa como uma série de Fourier. A transformada rápida de Fourier (FFT) é um método matemático para transformar uma função do tempo em uma função de frequência. Às vezes é descrito como transformando do domínio do tempo para o domínio da frequência. É muito útil para análise de fenômenos dependentes do tempo (HYPERPHYSICS,).

4 Materiais e Métodos

4.1 Procedimentos metodológicos

Foi realizado o levantamento bibliográfico nas principais plataformas de pesquisa, com o levantamento verificou-se a existência de políticas de incentivo à microgeração de energia eólica no país (ANEEL, 2012), combinado com a iminente ausência de tecnologia nacional na área. Verificou-se também um grande potencial de geração de energia eólica em território nacional, no que se refere a aspectos naturais fundamentais para aplicação da energia (CEPEL, 2001).

Tomando como base o trabalho de (BORGES, 2018) foi realizada a simulação de um conversor buck ligado em série com um inversor desdobrador de corrente, porém tendo escolhido para a realização desta simulação o software MATLAB® da MathWorks® juntamente com o simulink, ao contrário de (BORGES, 2018), que utilizou o PSIM. Com a realização da simulação coletou-se os resultados a fim de averiguar os padrões de sinal da corrente injetada na rede, bem como analisar a corrente fornecida pelo conversor buck ao inversor desdobrador de corrente. Os resultados foram obtidos utilizando a ferramenta FFT análise do simulink, as frequências foram analisadas até uma faixa de 10 KHz.

Na sequência, foi realizado o estudo da ferramenta FilterPro™, da Texas Instruments. Esta ferramenta é amplamente utilizada no mercado para facilitar o processo de criação de filtros de sinais. Com o auxílio do FilterPro™, foi realizada o projeto de um filtro, posteriormente incorporado à simulação. Utilizando o Simulink, foram simulados mais dois filtros com parâmetros distintos. Por fim, foi realizada a simulação de um filtro RC na saída do inversor. Os resultados de todos os filtros foram analisados quanto à diminuição da ocorrência de harmônicos da corrente injetada na rede.

4.2 Ambiente de desenvolvimento e testes

As características mais relevantes do ambiente utilizado para o desenvolvimento da simulação são as listadas abaixo:

- CPU Intel(R) Core(TM) i7-6500U CPU @ 2.50GHz, 2 Núcleos Físicos, 4 Processadores Lógicos;
- SSD 120GB + HD 1TB;
- Sistema Operacional Microsoft Windows 10 Home, Versão 1809 Build 17763.557;
- Memória RAM física instalada: 12.0 GB DDR4-2134;
- MATLAB 8.5 versão R2015a;

4.2.1 MATLAB

O MATLAB é uma plataforma de programação desenvolvida especialmente para engenheiros e cientistas. O núcleo do MATLAB é a linguagem MATlab. Esta por sua vez é uma linguagem com ênfase em matrizes, tal característica permite que a matemática computacional seja expressa de maneira mais natural.

A linguagem, os aplicativos e as funções matemáticas internas permitem que o usuário explore rapidamente várias abordagens para chegar a uma solução.

A plataforma é utilizada por milhões de engenheiros e cientistas, tanto na academia quanto na indústria. Apresenta um amplo campo de aplicações, incluso mas não restrito a aprendizado de máquina, processamento de sinais, processamento de imagem e vídeo, sistemas de controle (MATHWORKS, 2019).

Os requisitos mínimos para execução do MATLAB são:

- Qualquer processador Intel ou AMD compatível com arquitetura x86;
- 2GB de memória RAM;
- 4GB de espaço disponível em disco;
- Microsoft® Windows® 7 com SP1;
- Qualquer chip gráfico.

4.2.2 FilterPro

O software da Texas Instruments FilterPro™ facilita a criação de filtros de sinais de passagem baixa, passagem alta, passagem de banda, rejeição de banda e passagem ativa. Trata-se de um software lançado em 1991 pela empresa Burr-Brown como uma aplicação DOS. Quando a Burr-Brown foi comprada pela Texas Instruments em 2000, algumas de suas ferramentas foram atualizadas para o Windows® e FilterPro™ foi incluído nessas atualizações. O código-fonte foi escrito originalmente em Q-Basic e atualizado posteriormente para Visual Basic®. As principais atualizações realizadas em comparação com a versão anterior, foram referentes aos menus. Na versão antiga são visíveis em uma única tela, ao contrário da nova versão, que exibe os circuitos esquematicamente em vez de se referir a esquemas de notas (TEXAS, 2005).

Os requisitos mínimos para execução do FilterPro™ são:

- Processador de 1GHz;
- 2GB de memória RAM;
- 250MB de espaço disponível em disco;
- Monitor de pelo menos 1024 x 768 pixels de resolução;
- Microsoft® Windows® XP com SP3.

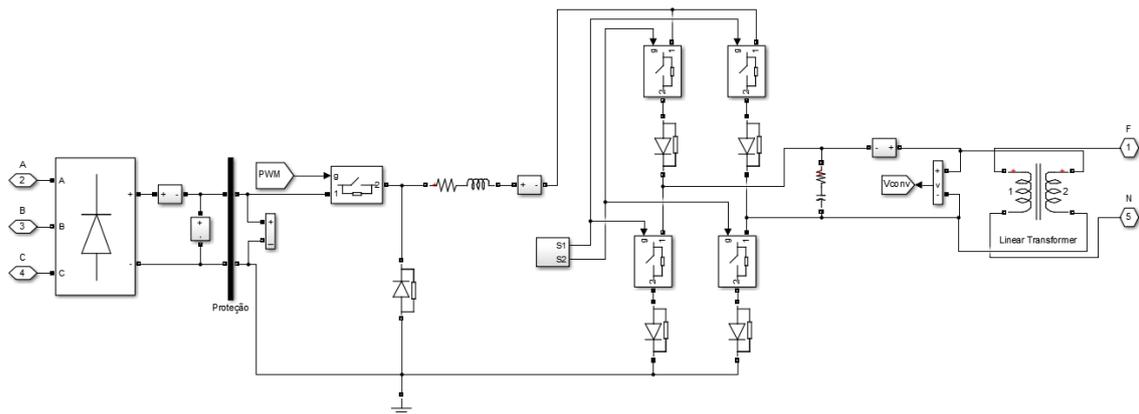
5 Desenvolvimento e Resultados

Neste capítulo serão relatados as técnicas de filtragem de sinal e de corrente realizadas neste trabalho. Os resultados de simulações serão comparados em termos de THD da corrente injetada na rede

5.1 Simulação

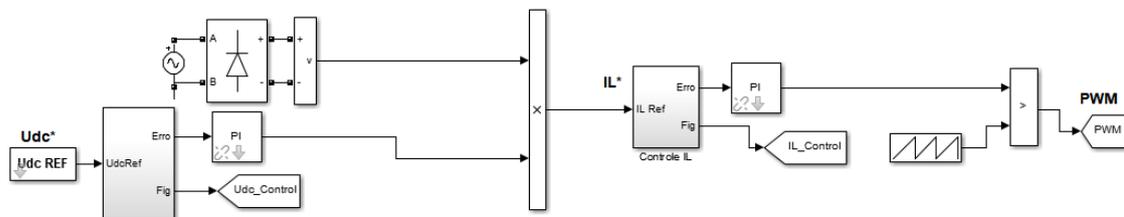
Foi realizada a simulação de uma turbina eólica de pequeno porte utilizando um conversor buck ligado em série com um inversor desdoblador de corrente. São apresentadas nas imagens seguintes as principais estruturas de interesse deste trabalho: o conversor buck ligado em série com um inversor desdoblador de corrente na Figura 24 e a malha de controle na Figura 25.

Figura 24 – Buck ligado em série com um inversor desdoblador de corrente.



Fonte – Elaborada pelo autor.

Figura 25 – Malha de controle.

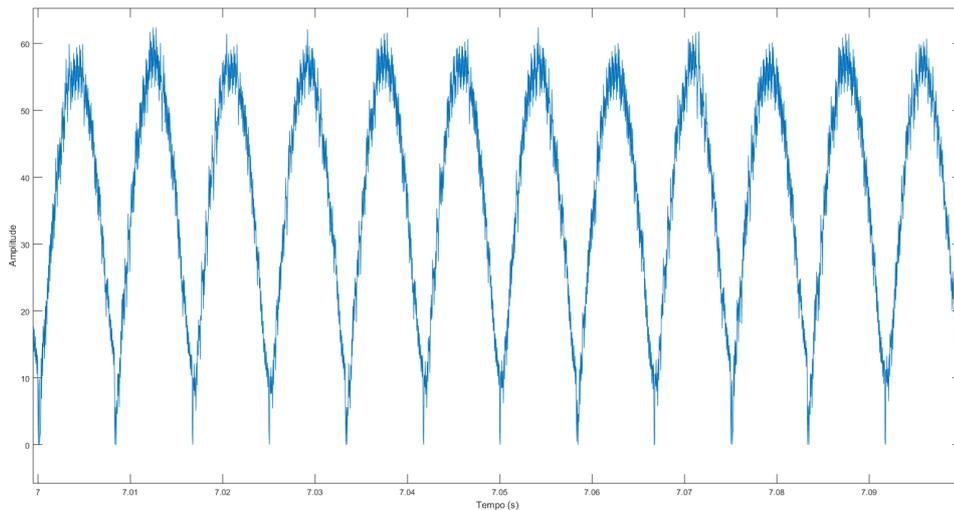


Fonte – Elaborada pelo autor.

5.1.1 Análise da simulação

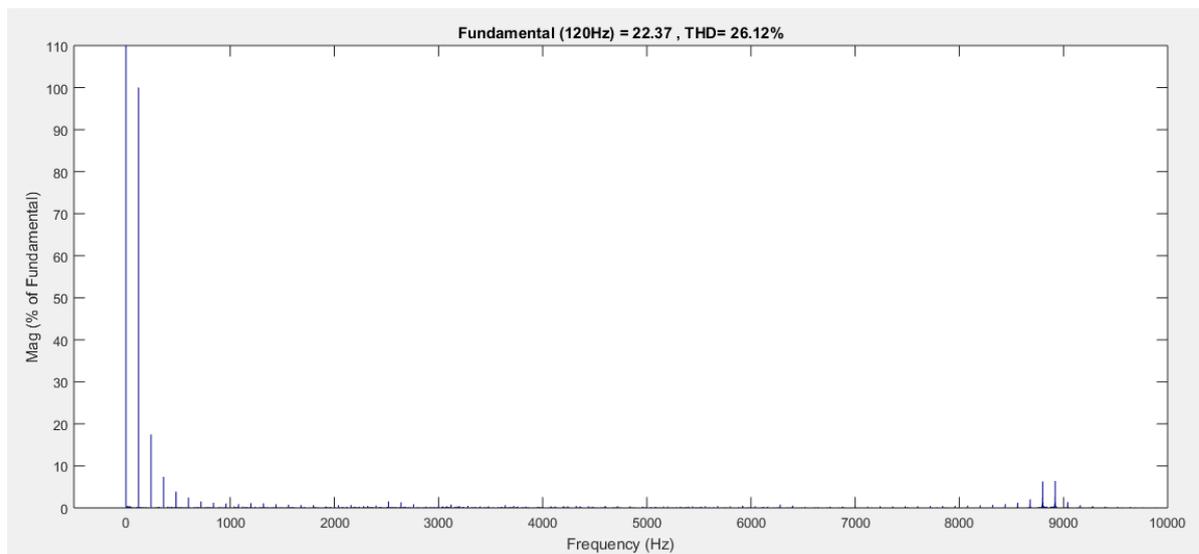
Através da simulação, foram coletados dados para a análise e definição dos parâmetros básicos requeridos para o filtro, este que foi definido como um passa-baixa, pois as frequências a serem atenuadas estão acima de uma faixa a de interesse. A frequência de corte ficou definida em 120 Hz, que é a frequência fundamental da corrente entregue pelo buck. A Figura 26 representa o comportamento da corrente na entrada do inversor sem nenhuma estratégia de filtragem aplicada. A Figura 27 mostra que o valor da THD da corrente no inversor sem estratégia de filtro é igual a 26.12%

Figura 26 – Corrente na entrada do inversor sem a utilização de filtro.



Fonte – Elaborada pelo autor.

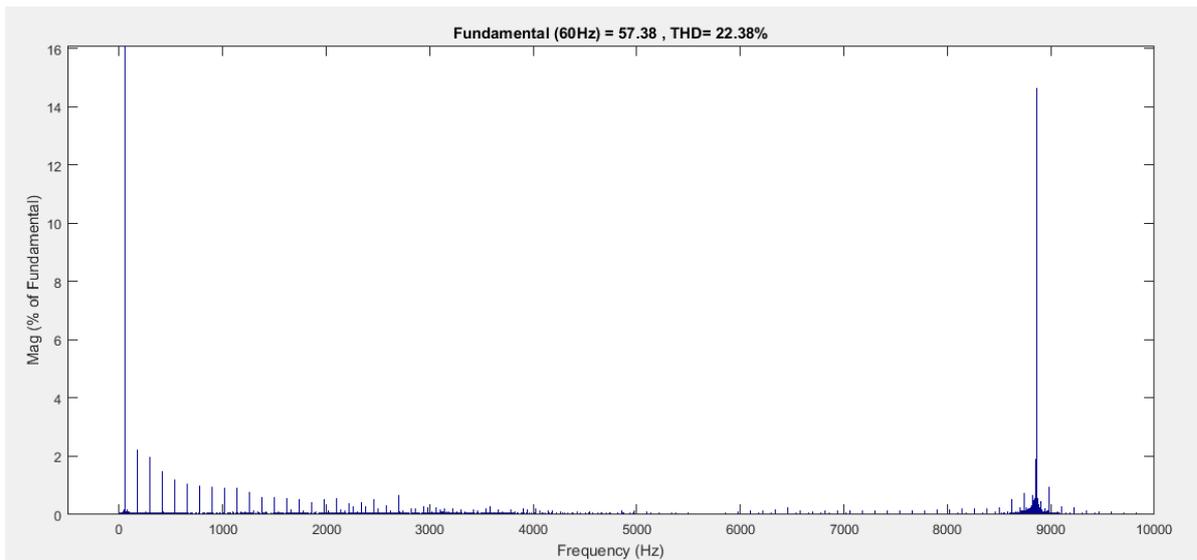
Figura 27 – THD corrente no inversor sem a utilização de filtro.



Fonte – Elaborada pelo autor.

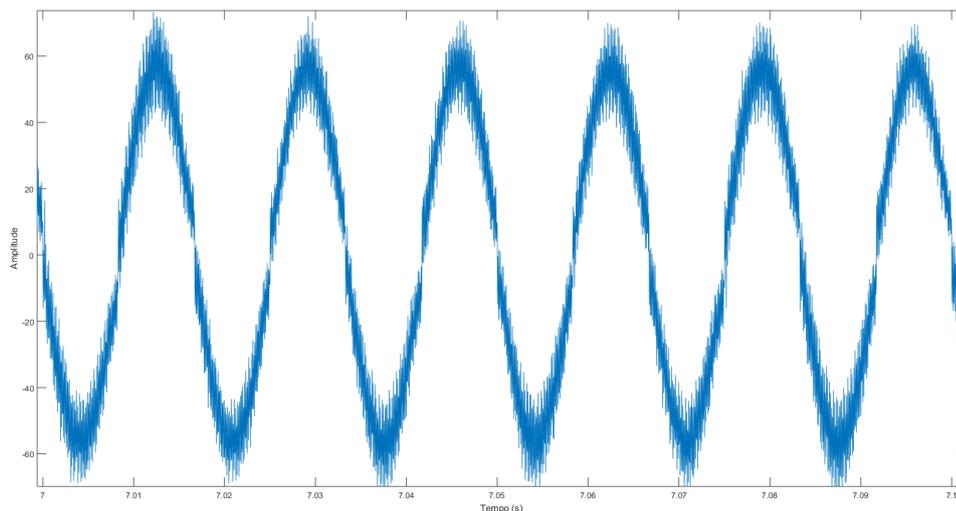
Através da ferramenta FFT do Matlab, foi realizada uma análise da THD da corrente injetada na rede com a finalidade de estabelecer padrões para comparação. Conforme mostra a Figura 28, o valor total de distorção harmônica injetado na rede pelo conversor simulado foi de 22.38%. Analisando a Figura é possível perceber uma grande componente harmônica em 8.86kHz e uma miríade de componentes situadas entre 120hz e 3khz. Na Figura 29 é demonstrado o comportamento dessa corrente.

Figura 28 – THD da corrente injetada na rede sem a utilização de filtro.



Fonte – Elaborada pelo autor.

Figura 29 – Corrente injetada na rede sem a utilização de filtro.

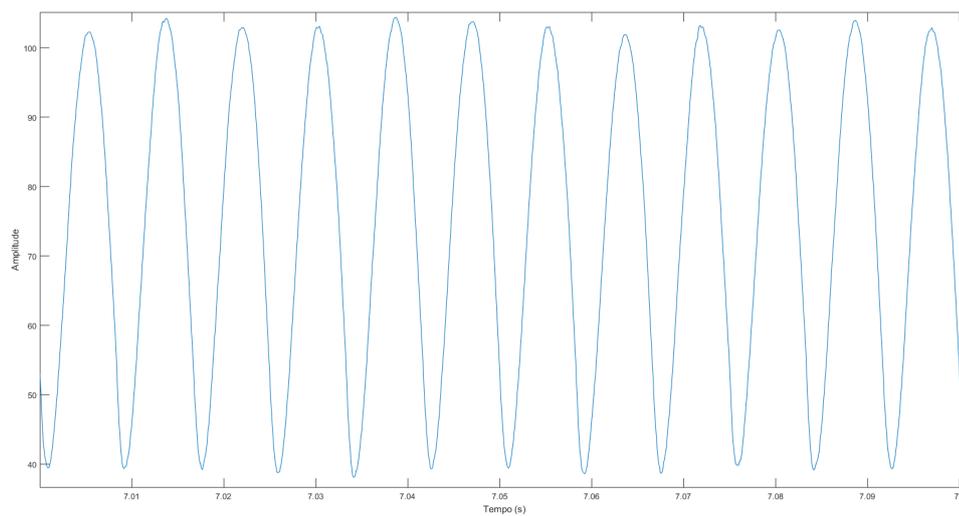


Fonte – Elaborada pelo autor.

5.2 Filtro projetado no FilterPro

Uma vez estabelecidos os parâmetros com o auxílio da simulação, foi realizado o projeto de um filtro com o software FilterPro, da Texas Instruments. O filtro foi definido como tipo passa-baixas, com a frequência de corte definida em 120 Hz, atenuação de 10dB e uma *ripple* de 3 dB (sendo esse o maior valor máximo disponível no *software*). O comportamento da corrente filtrada pode ser analisado na Figura 30.

Figura 30 – Corrente na entrada do inversor utilizando filtro do filterPro.



Fonte – Elaborada pelo autor.

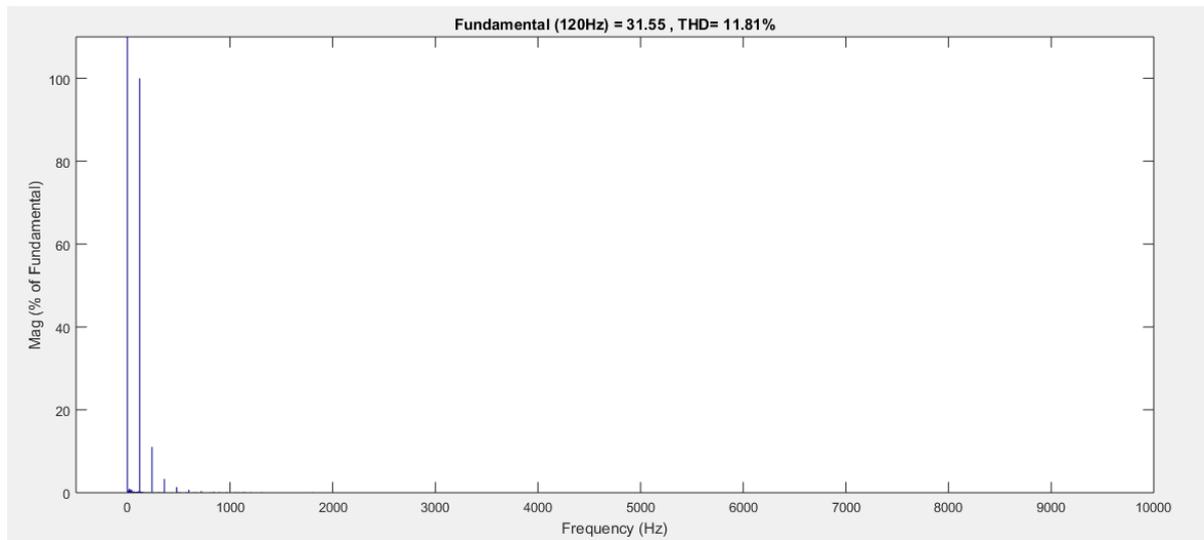
5.2.1 Análise da simulação com filtro projetado no FilterPro

A análise da THD da corrente filtrada apresentada na Figura 31 mostra uma THD de 11.81% - uma redução de 14.37% em comparação à corrente sem aplicação do filtro, onde é possível perceber que a componente harmônica em 8.86kHz foi eliminada, bem como a maioria das componentes de menor frequência. Porém, essa filtragem acarretou um atraso considerável na medição da corrente utilizada pela malha de controle, ocasionando um não-funcionamento da simulação. Após essa tentativa de simulação, se definiu que a não-ocorrência de atraso é condição *sine qua non* para um correto funcionamento da malha de controle, e conseqüentemente da simulação.

5.3 Filtro projetado no simulink sem atraso

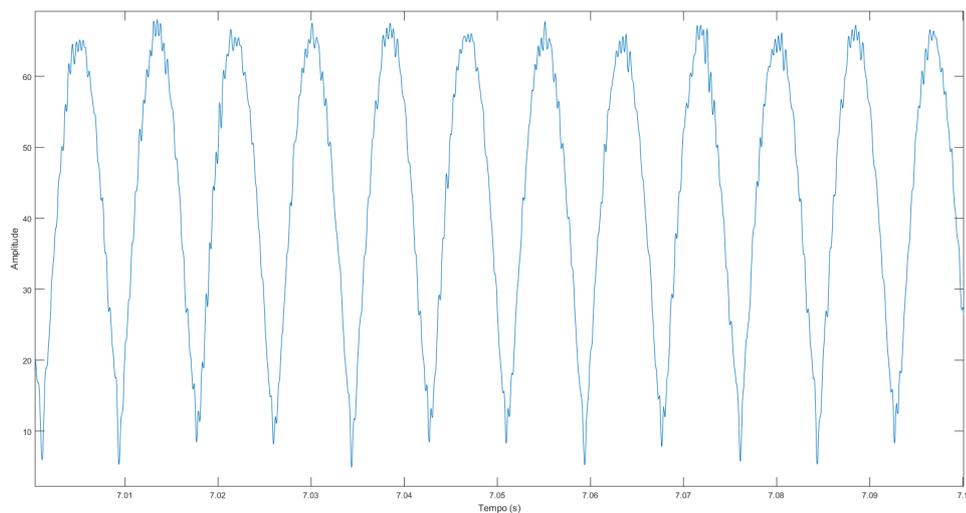
Após tentativa infrutífera com o FilterPro, logrou-se necessário a realização do projeto do filtro em uma ferramenta distinta. Para esse propósito, utilizou-se o Simulink. O filtro foi definido com parâmetros distintos da tentativa anterior, desta vez buscando a redução drástica ou extinção do atraso causado pela filtragem em detrimento da efetividade do filtro. Os parâmetros para esse filtro são: frequência de corte em 120 Hz, *ripple* de 15 dB e atenuação da banda rejeitada em 6dB. Com esses parâmetros, obteve-se a forma de onda vista na Figura 32.

Figura 31 – TDH corrente na entrada do inversor utilizando filtro do filterPro.



Fonte – Elaborada pelo autor.

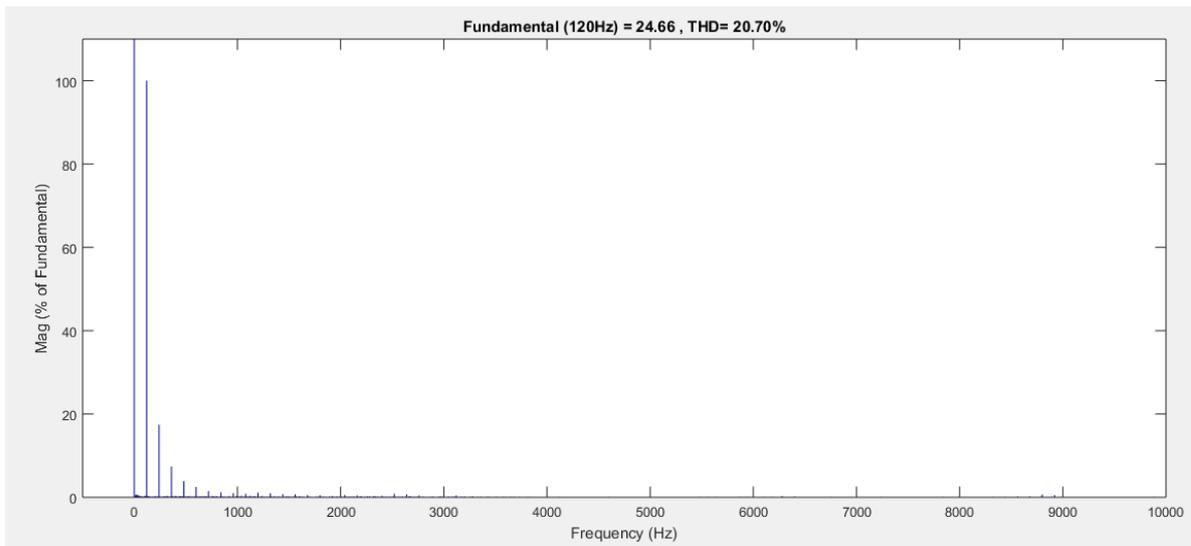
Figura 32 – Corrente na entrada do inversor.



Fonte – Elaborada pelo autor.

Esta forma de onda, quando analisada no aspecto de THD, exibe uma redução de 26.18% para 20.70%, como pode ser visto na Figura 33, que mostra o THD da onda filtrada, e visível um aumento dos harmônicos de frequência até 1kHz.

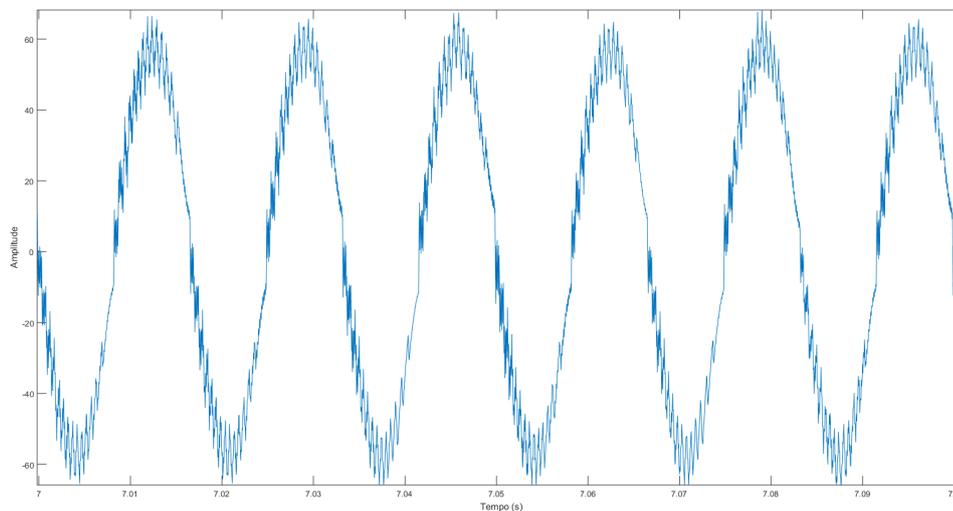
Figura 33 – THD corrente na entrada do inversor.



Fonte – Elaborada pelo autor.

Utilizando essa onda como entrada para a malha de controle, obteve-se a corrente injetada na rede com a forma de onda que pode ser observada na Figura 34.

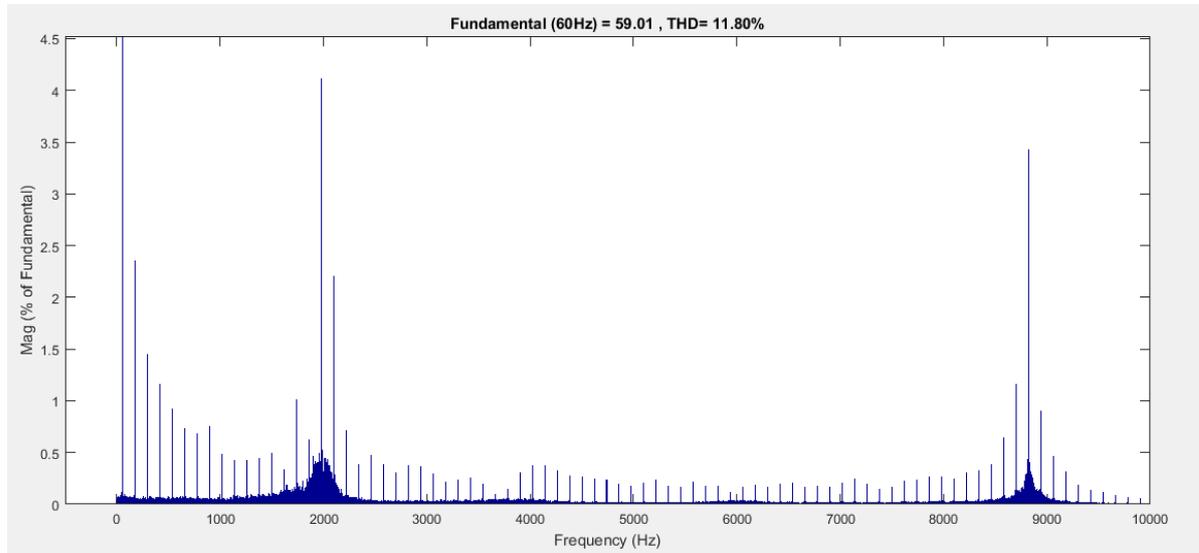
Figura 34 – Corrente injetada na rede.



Fonte – Elaborada pelo autor.

A corrente injetada na rede após a aplicação do filtro apresentou uma redução de 10.76% THD, passando de 22.56% para 11.80%. A análise realizada com a ferramenta FFT (Fast Fourier Transform) demonstra tal redução, como pode ser visto na Figura 35. Analisando os resultados é possível observar duas componentes harmônicas de maior amplitude em 2 kHz e 8.8 kHz. É perceptível também uma grande quantidade de harmônicas de amplitude menor ao longo de todo espectro de frequência analisado, porém a amplitude de todas é consideravelmente menor.

Figura 35 – THD corrente injetada na rede.

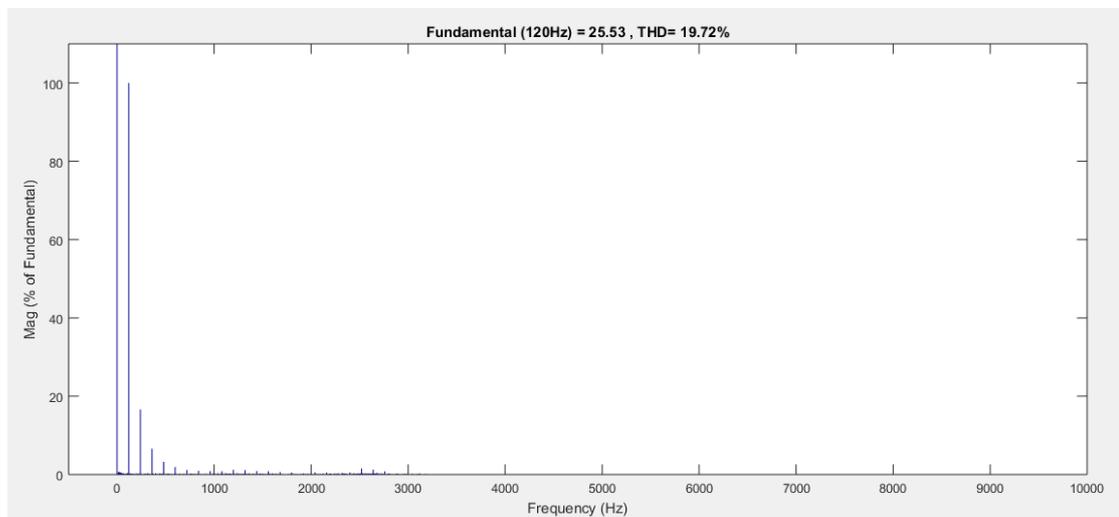


Fonte – Elaborada pelo autor.

5.4 Filtro projetado no simulink com atraso

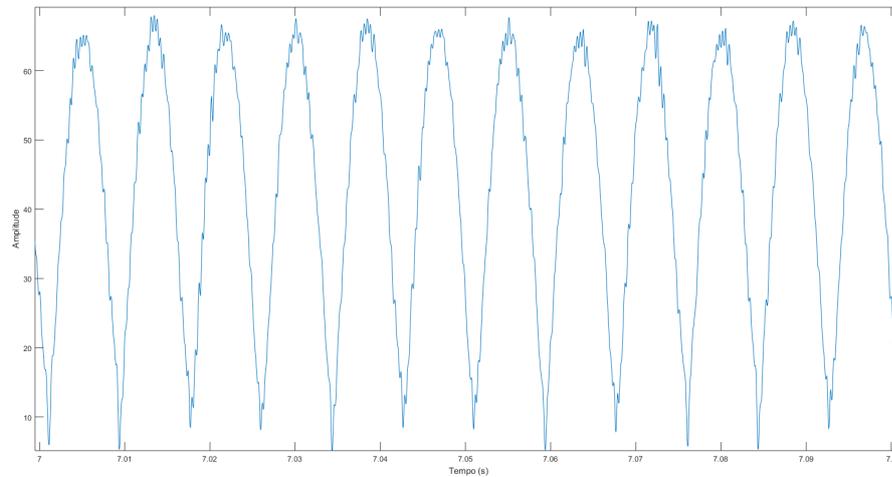
Após a simulação de um filtro com ênfase na redução do atraso, levando em consideração a redução de 50% do THD na corrente injetada na rede obtida com o mesmo, logrou-se necessário a busca por uma melhora na filtragem. Com isso em vista, foi realizada uma nova parametrização no filtro passa baixas em busca da uma melhor atenuação dos harmônicos da corrente fornecida à rede. Os novos parâmetros foram definidos da seguinte forma frequência de corte em 120 hz, atenuação da banda rejeitada maior que 30 db, *ripple* máximo em 3db. Com essa nova parametrização, o THD da corrente fornecida ao inversor foi reduzido de 20,67% para 19,71%. Esta aferição é mostrada na Figura 36. A forma de onda após a filtragem pode ser observada na Figura 37.

Figura 36 – THD corrente na entrada do inversor.



Fonte – Elaborada pelo autor.

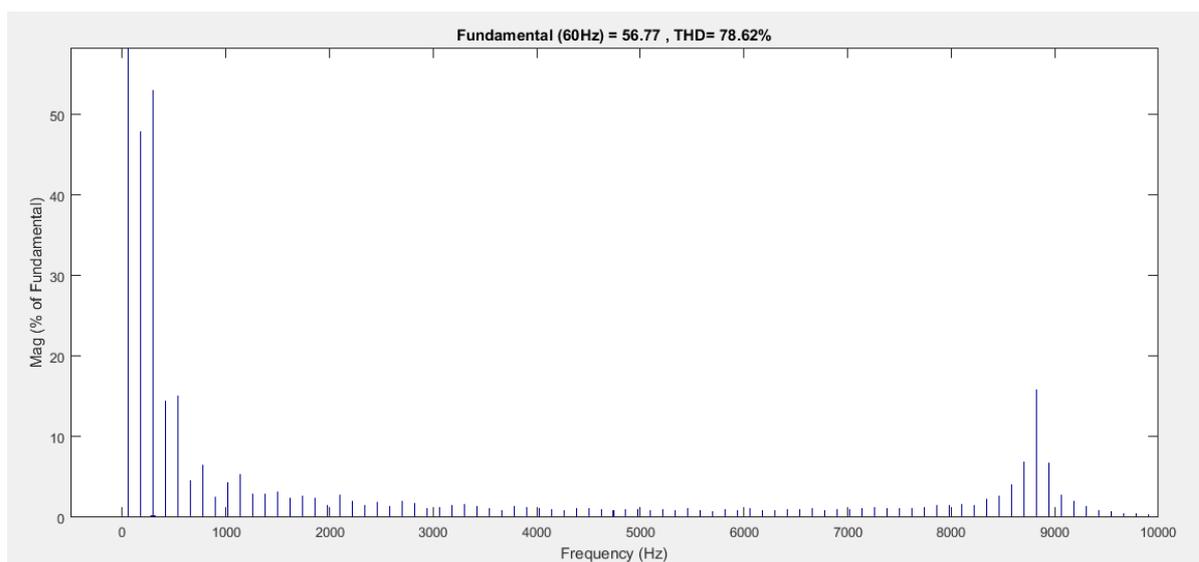
Figura 37 – Corrente na entrada do inversor.



Fonte – Elaborada pelo autor.

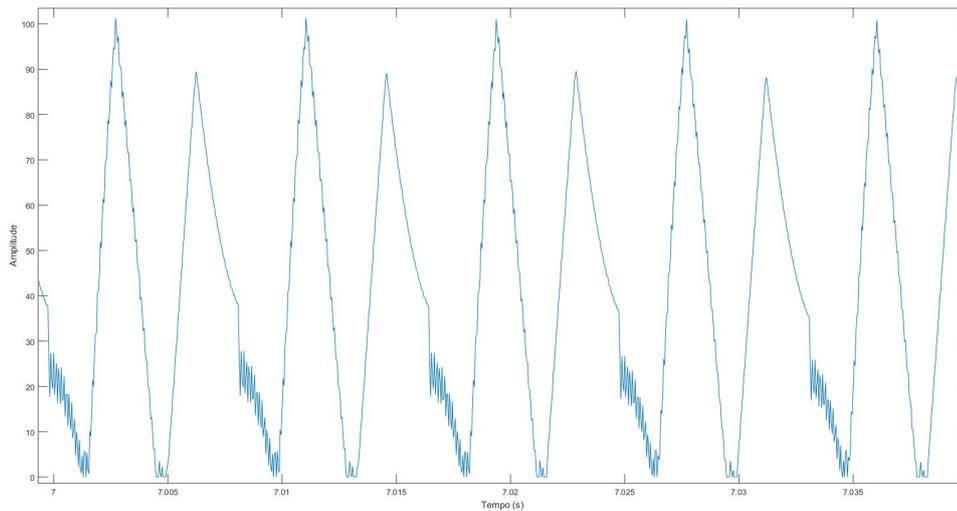
Utilizando a resposta do filtro como entrada para a malha de controle foi obtido um THD da corrente injetada na rede de 78.62% apresentado na Figura 38, onde é visível o grande aumento da ocorrência de harmônicos bem como o aumento de suas respectivas amplitudes. Este resultado indica que, a acentuação da estratégia de filtragem não é um caminho válido para maior mitigação dos harmônicos injetados na rede pelo inverso. A forma da corrente injetada na rede é apresentada na Figura 39.

Figura 38 – THD da corrente injetada na rede.



Fonte – Elaborada pelo autor.

Figura 39 – Corrente injetada na rede.



Fonte – Elaborada pelo autor.

5.5 Filtro de potência RC

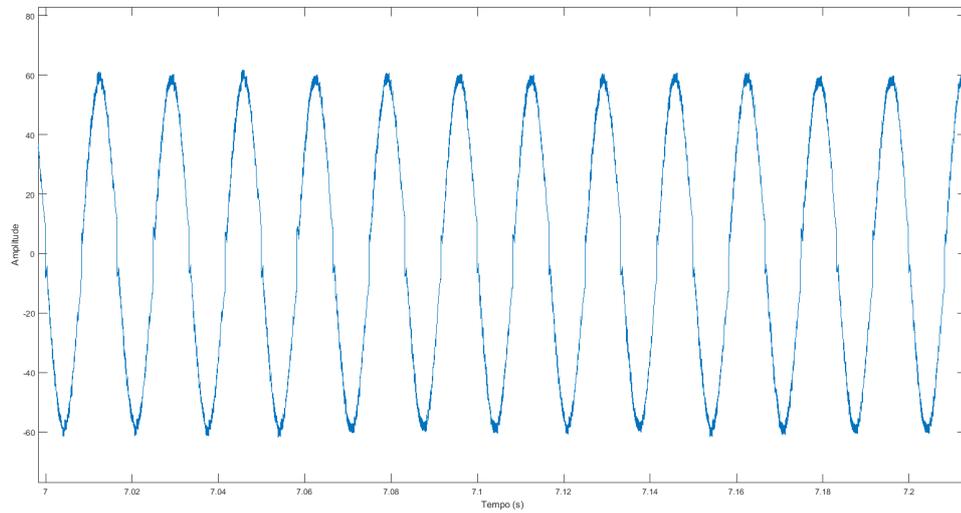
Após os resultados obtidos com a filtragem do sinal na entrada da malha de controle realizou-se uma nova tentativa de reduzir os harmônicos injetados na rede pelo inverso desta vez com uma abordagem distinta, foi realizado uma simulação com um filtro RC na saída do inversor. A frequência de corte de um filtro RC é dado pela equação 5.1.

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (5.1)$$

Com a utilização de um capacitor de 30 μF e um resistor de 10 ohms temos uma frequência de corte de aproximadamente 530 Hz. Utilizando esse filtro na simulação, obteve-se um corrente injetada na rede que pode ter seu comportamento observado na Figura 40.

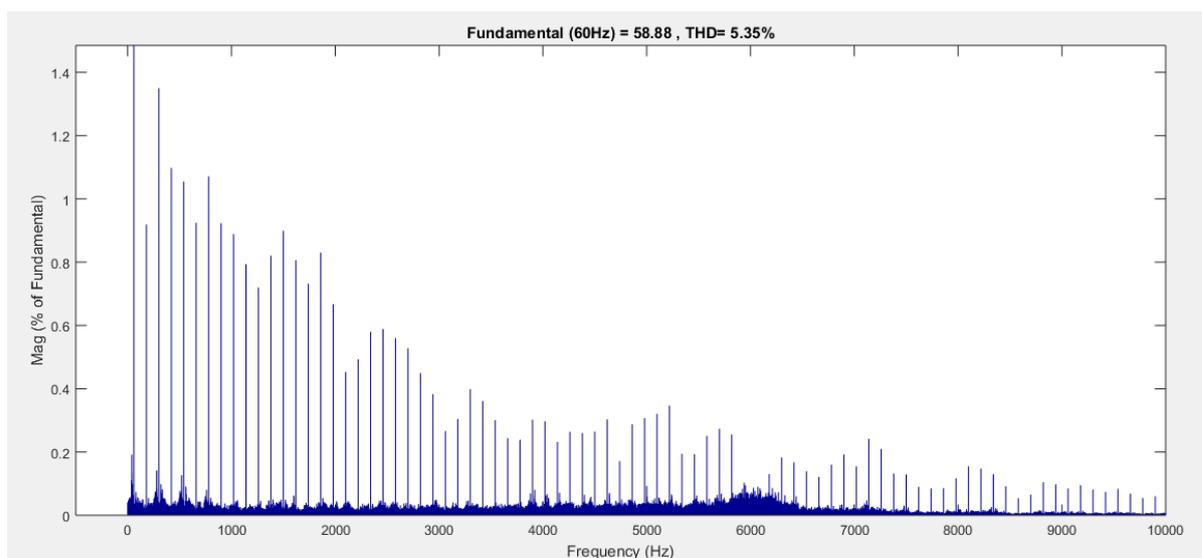
A análise desta corrente demonstrou uma TDH de 5.35%. A Figura 41 apresenta a amplitude dos harmônicos restantes. É possível observar que todos estão abaixo de 1.4% da magnitude da frequência fundamental.

Figura 40 – Corrente injetada na rede com utilização de um filtro RC.



Fonte – Elaborada pelo autor.

Figura 41 – THD da corrente injetada na rede com utilização Filtro RC.



Fonte – Elaborada pelo autor.

6 Conclusão

Este trabalho mostrou ser importante no ramo de micro geração conectada à rede, porque o desenvolvimento de tecnologia nacional influenciará positivamente no custo de aerogeradores de pequeno porte, com isso tornando mais viável a adesão de consumidores a essa modalidade de geração. O adiamento de investimento em expansão dos sistemas de distribuição e transmissão, o baixo impacto ambiental, a minimização das perdas, a diversificação da matriz energética e o aumento da robustez da matriz energética nacional são as maiores vantagens na geração distribuída de pequeno porte baseada em fontes renováveis de energia. Com isso posto, é plausível afirmar a importância do assunto tratado no presente trabalho, sendo que estudar estratégias de melhoria da qualidade da energia fornecida pelos sistemas de microgeração é um fator importante para desenvolvimento de tecnologia nacional.

Os resultados apresentados nas simulações mostraram que a aplicação de filtros de sinal, para atenuar a THD, na entrada da malha de controle reduz significativamente a THD da corrente injetada na rede. Através da análise da simulação é possível afirmar também que o atraso ocasionado por uma estratégia de filtragem muito acentuada é uma característica que deve ser evitada.

6.1 Contribuições

Tendo em vista o trabalho desenvolvido, é possível citar os seguintes pontos como contribuições realizadas:

- Entendimento do funcionamento de uma turbina eólica de pequeno porte.
- Análise sobre a qualidade da energia produzida utilizando um conversor buck quanto a THD.
- Análise sobre a qualidade de energia de um conversor buck ligado em série a um inversor desdobrador de corrente quanto a THD.
- Análise sobre a redução de THD aplicando técnicas de filtragem.

6.2 Considerações e limitações

Uma das limitações encontradas para a realização deste trabalho está ligada ao fato de que, os parâmetros disponíveis na ferramenta escolhida para o projeto dos filtros (Filter-Pro) não permitem a obtenção de um filtro com as características necessárias para o tratamento adequado do sinal de entrada da malha de controle da simulação. Este problema levou à utilização de um recurso nativo do Simulink, com características distintas da ferramenta inicialmente pretendida. Os resultados obtidos são comparados e analisados apenas em relação à THD de corrente da saída do inversor e na saída do buck, de maneira que o THD da tensão nestes pontos não foram avaliados. As estratégias de filtragem não foram comparadas de forma experimental. Todos os resultados analisados sobre as técnicas de filtragem foram obtidos através de simulações.

6.3 Trabalhos futuros

Tendo como base o exposto na revisão de literatura realizada, aliados aos resultados obtidos através das simulações computacionais, torna-se possível especular certas linhas de pesquisa que podem ser consideradas, por exemplo estudos que possam ser direcionados para melhoria da qualidade da energia dos sistemas de geração de pequeno porte e redução de custos de manufatura dos mesmos. Assim sendo, podemos citar como eventuais trabalhos futuros:

- A análise da THD pode ser feita em relação à tensão de saída do inversor.
- As estratégias de filtragens podem ser implementadas de forma experimental.
- Estratégias de filtragens distintas podem ser simuladas e ou experimentadas.

Referências

- ANEEL. *Resolução Normativa N 482, de 17 de Abril de 2012*. 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 29 out. 2018. Citado nas páginas 16 e 30.
- ANEEL. *Resolução Normativa No 687, de 24 de Novembro de 2015*. 2015. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 29 out. 2018. Citado na página 16.
- ANEEL. *Informações Técnicas - Geração Distribuída*. 2017. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-/asset_publisher/CegkWaVJWF5E/content/geracao-distribuida-introduc-1/656827?inheritRedirect=false>. Acesso em: 29 out. 2018. Citado na página 16.
- ANEEL. *Capacidade de Geração do Brasil*. 2019. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 22 June. 2019. Citado na página 15.
- BHATTACHARJEE, T.; JAMIL, M.; JANA, A. *Design of SPWM Based Three Phase Inverter Model*. 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8376696>>. Acesso em: 22 June. 2019. Citado na página 29.
- BORGES, V. L. F. *Inversor Para Conexão com rede elétrica de aerogeradores de pequeno porte*. 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/194230?show=full>>. Acesso em: 03 dez. 2018. Citado nas páginas 14, 15, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25 e 30.
- CEPEL. *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*. 2001. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico>. Acesso em: 29 out. 2018. Citado nas páginas 11, 14, 15 e 30.
- ENERSUD. *Quem Somos*. 2018. Disponível em: <<http://www.enersud.com.br/quem-somos/>>. Acesso em: 29 out. 2018. Citado na página 15.
- ENERSUD. *Products*. 2019. Disponível em: <<http://www.enersud.com.br/products/>>. Acesso em: 29 out. 2018. Citado nas páginas 21 e 22.
- EPE. *Empresa de Pesquisa Energética Balanço Energético Nacional*. 2016. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf>. Acesso em: 29 out. 2018. Citado na página 15.
- GOMES, C. C.; CUPERTINO, A. F.; PEREIRA, H. A. Damping techniques for grid-connected voltage source converters based on Icl filter: An overview. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117311206>>. Acesso em: 22 June. 2019. Citado na página 25.
- GWEC. *Global Wind Energy Council*. 2018. Disponível em: <<http://www.gwec.net>>. Acesso em: 29 out. 2018. Citado nas páginas 12, 13 e 14.
- HARTMANN, D. P.; STRATFORD, R. P.; DUFFEY, C. K. Ieee recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems. 1998. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/210894>>. Acesso em: 22 June. 2019. Citado na página 29.

HYPERPHYSICS. *Fast Fourier Transforms*. Disponível em: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Math/fft.html>>. Acesso em: 29 June. 2019. Citado na página 29.

MATHWORKS. *What is MATLAB? - MATLAB & Simulink*. 2019. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>>. Acesso em: 25 set. 2018. Citado na página 31.

MME. *Energia Eólica no Brasil e Mundo*. 2015. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/documents/10584/3894319Energia+Eólica+-+ano+ref++2015+\(3\).pdf](http://www.mme.gov.br/documents/10584/3894319Energia+Eólica+-+ano+ref++2015+(3).pdf)>. Acesso em: 29 out. 2018. Citado na página 11.

MOURA, L. P. *Avaliação Experimental do Desempenho de Unidades Eólicas Quanto à Geração de Distorções Harmônicas*. 2017. Acesso em: 29 out. 2018. Citado nas páginas 18 e 29.

OLIVEIRA, R. G. d. *Desenvolvimento de Tecnologia para Conexão com a Rede Elétrica de Aerogeradores de Pequeno Porte*. 2016. Citado na página 18.

REIS, A. *Uma Contribuição para o Controle Operativo de Unidades Eólicas: Modelagem, Regulação de Tensão e Minimização das Distorções Harmônicas*. 2015. Acesso em: 29 jul. 2019. Citado na página 18.

RIBEIRO, C. G. *Rastreamento do Ponto de Máxima Potência de Turbinas Magnus Acionando Geradores Elétricos*. 2014. Acesso em: 29 out. 2018. Citado na página 21.

TEXAS, I. *FilterPro™ low-pass design tool*. 2005. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/an/slyt113/slyt113.pdf>>. Acesso em: 29 June. 2018. Citado na página 31.

TEXAS, I. *FilterPro™ User's Guide*. 2011. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/an/sbfa001c/sbfa001c.pdf>>. Acesso em: 29 June. 2018. Citado nas páginas 25, 26, 27 e 28.

TIBOLA, G. *SISTEMA EÓLICO DE PEQUENO PORTE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA*. 2009. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/123456789/92426/1/265533.pdf>>. Acesso em: 29 out. 2018. Citado nas páginas 11, 17, 18, 19, 20 e 21.

WIKI. *Harmonic*. 2005. Disponível em: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Harmonic>>. Acesso em: 29 May. 2019. Citado na página 28.