



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

**Implementação de um gerador distribuído
operando como filtro ativo paralelo para
realização de compensação seletiva utilizando a
teoria da potência conservativa**

Fernando Novais Araújo

João Monlevade, MG

2020

Fernando Novais Araújo

**Implementação de um gerador distribuído
operando como filtro ativo paralelo para
realização de compensação seletiva utilizando a
teoria da potência conservativa**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Msc. Rhonei Patric dos Santos.

Coorientador: Prof. Dr. Welbert Alves Rodrigues.

Universidade Federal de Ouro Preto

João Monlevade

2020

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A663i Araujo, Fernando Novais .

Implementação de um gerador distribuído operando como filtro ativo paralelo para realização de compensação seletiva utilizando a teoria da potência conservativa. [manuscrito] / Fernando Novais Araujo. - 2020. 62 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Me. Rhonei Patric dos Santos.

Coorientador: Prof. Dr. Welbert Alves Rodrigues.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia Elétrica .

1. Energia elétrica - distribuição. 2. Filtros elétricos ativos. 3. Sistemas de energia elétrica. 4. Energia elétrica - controle de qualidade. 5. Harmônicos (Ondas elétricas) . I. Rodrigues, Welbert Alves . II. dos Santos, Rhonei Patric . III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 621.31

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Fernando Novais Araújo

Implementação de um Gerador Distribuído Operando como Filtro Ativo Paralelo para Realização de Compensação Seletiva Utilizando a Teoria da Potência Conservativa

Membros da banca

Rhonei Patric dos Santos - Mestre - Universidade Federal de Ouro Preto
Welbert Alves Rodrigues - Doutor - Universidade Federal de Ouro Preto
Marcelo Moreira Tiago - Doutor - Universidade Federal de Ouro Preto
Waner Wodson Aparecido Gonçalves Silva - Doutor - Universidade Federal de Itajubá

Versão final

Aprovado em 16 de Outubro de 2020

De acordo

Rhonei Patric dos Santos



Documento assinado eletronicamente por **Rhonei Patric dos Santos, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/11/2020, às 11:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0102296** e o código CRC **5592DEBA**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.008620/2020-36

SEI nº 0102296

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: - www.ufop.br

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo sobre a aplicação dos geradores distribuídos na compensação de distúrbios de corrente (harmônicas e reativos) provocados por cargas não lineares. A compensação dos distúrbios citados será realizada por um inversor fonte de tensão trabalhando como um filtro ativo paralelo monofásico. Para que o filtro a ser utilizado realize as compensações propostas, estudou-se os princípios da teoria da potência conservativa para que a compensação seja realizada de forma seletiva. Neste modelo de compensação, o filtro ativo paralelo escolhe uma parcela da corrente a ser compensada, melhorando a eficiência do filtro, e proporcionando uma alternativa para melhorar a qualidade de energia nos sistemas elétricos. A validação dos estudos e do uso da teoria da potência conservativa para compensação seletiva nos filtros ativos paralelos será feita através de simulações no ambiente matlab/simulink.

Palavras-chave: Geradores distribuídos, Harmônicos, Reativos, Inversor fonte de tensão, Filtro ativo paralelo, Teoria da potência conservativa e Qualidade de energia.

Abstract

This paper presents a study on the application of distributed generators to current disturbances compensation (harmonic and reactive) caused by nonlinear loads. The compensation of the disturbances mentioned will be performed by a voltage source inverter working as a single phase parallel active filter. In order for the filter to be used to carry out the proposed compensations, the principles of the conservative power theory were studied so that the compensation is performed selectively. In this compensation model, parallel active filter chooses a portion of the current to be compensated, improving filter efficiency, and providing an alternative to improve the quality of energetic electrical systems. The validation of studies and the use of conservative power theory for parallel active filter selective compensation will be done through matlab / simulink simulations.

Keywords: Distributed generators, Harmonics, Reactive, Voltage inverter source, Parallel active filter, Conservative power theory and Power quality.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Estrutura de um sistema de geração distribuída.	13
Figura 2 – Conversor alimentador de rede.	16
Figura 3 – Conversor formador de rede.	17
Figura 4 – Conversor de suporte de rede como fonte de tensão.	19
Figura 5 – Conversor de suporte de rede como fonte de corrente.	19
Figura 6 – Corrente distorcida de um conjunto de cicloconversores.	22
Figura 7 – Sistema sem compensação reativa.	24
Figura 8 – Sistema com compensação reativa.	25
Figura 9 – Filtro ativo série.	26
Figura 10 – Filtro ativo paralelo.	28
Figura 11 – Monitoramento da corrente de carga.	29
Figura 12 – Monitoramento da corrente de rede.	30
Figura 13 – Diagrama de blocos para o controle da corrente do FAP.	30
Figura 14 – Inversor de tensão em ponte completa.	37
Figura 15 – A modulação a dois níveis.	38
Figura 16 – Circuito elétrico equivalente.	38
Figura 17 – Diagrama de blocos da malha de corrente.	41
Figura 18 – Circuito implementado para síntese de corrente.	43
Figura 19 – Síntese de corrente de 60 Hz com controlador PI.	43
Figura 20 – Síntese de corrente de 300 Hz com controlador PI.	44
Figura 21 – Síntese de corrente de 660 Hz com controlador PI.	44
Figura 22 – Síntese de corrente de 60 Hz com controlador PI ressonante.	45
Figura 23 – Síntese de corrente de 300 Hz com controlador PI ressonante.	45
Figura 24 – Síntese de corrente de 660 Hz com controlador PI ressonante.	45
Figura 25 – Malha de tensão.	46
Figura 26 – Circuito implementado com malha de corrente e tensão adicionadas.	47
Figura 27 – Tensão na saída do conversor.	48
Figura 28 – Tensão no barramento do conversor.	48
Figura 29 – Circuito implementado do gerador distribuído.	49

Figura 30 – Corrente ativa.	50
Figura 31 – Corrente reativa.	50
Figura 32 – Corrente não ativa.	51
Figura 33 – Corrente void.	51
Figura 34 – Circuito implementado do gerador distribuído multifuncional.	52
Figura 35 – Corrente da rede sem compensação.	53
Figura 36 – Distorção da corrente da rede não compensada.	53
Figura 37 – Corrente da rede a partir de uma injeção de corrente reativa.	54
Figura 38 – Corrente da rede a partir de uma injeção de corrente não ativa.	54
Figura 39 – Distorção da corrente da rede compensada.	55
Figura 40 – Corrente da rede a partir de uma injeção de corrente void.	55
Figura 41 – Tensão e corrente da rede para uma síntese resistiva.	56
Figura 42 – Tensão e corrente da rede para uma síntese senoidal.	57

Lista de tabelas

Tabela 1 – Valores dos componentes do projeto.	49
--	----

Sumário

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Objetivos	11
1.1.1	Objetivo Geral	11
1.1.2	Objetivos Específicos	11
1.2	Organização do Trabalho	12
2	REVISÃO TEÓRICA	13
2.1	Geração Distribuída	13
2.2	Classificação dos Conversores	15
2.2.1	Conversores Alimentadores de Rede	16
2.2.2	Conversores Formadores de Rede	17
2.2.3	Conversores de Suporte de Rede	18
2.3	Qualidade de Energia Elétrica	20
2.4	Compensação Harmônica	21
2.5	Compensação Reativa	23
2.6	Filtros Ativos	25
2.6.1	Filtro Ativo Série	26
2.6.2	Filtro Ativo Paralelo	27
2.6.2.1	Estratégias de Controle	29
2.6.2.2	Geração do Sinal de Referência para o Filtro Ativo Paralelo	31
2.7	Teoria da Potência Conservativa	31
2.7.1	Potência Ativa Instantânea	32
2.7.2	Energia Reativa Instantânea	32
2.7.3	Potência Ativa Média	32
2.7.4	Energia Reativa Média	32
2.7.5	Decomposição das Correntes	32
2.7.6	Fator de Potência Total	33
3	MODELAGEM MATEMÁTICA DO CONVERSOR C.C.-C.A. OPERANDO COMO FILTRO ATIVO PARALELO	35

3.1	Elementos Passivos	35
3.2	Modelagem do Conversor	36
3.3	Projeto do Controlador Fonte de Corrente	41
3.3.1	Malha de Corrente	41
3.4	Malha de Tensão	46
3.5	Gerador Distribuído	49
4	RESULTADOS	52
4.1	Conclusão	57
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
	REFERÊNCIAS	59

1 Introdução

Com o crescente aumento do consumo de energia elétrica, o esgotamento de alguns recursos naturais, além de preocupações com o aquecimento global, torna-se importante a busca por soluções sustentáveis a estes problemas. Em grande parte do mundo, o sistema elétrico é baseado em uma estrutura centralizada que consiste em centrais geradoras de grande porte, com a energia sendo transmitida a longas distâncias até os consumidores finais. Neste modelo, o sistema elétrico é dependente dos combustíveis fósseis, energia nuclear e centrais hidrelétricas. No contexto atual, uma forma viável de descentralizar o sistema elétrico é a utilização dos geradores distribuídos, baseados em fontes de energia renováveis, diminuindo o impacto ambiental, reduzindo o uso de combustíveis fósseis e diversificando a matriz energética.

Os geradores distribuídos empregados atualmente visam principalmente a economia na fatura de energia. Entretanto, com esta nova estrutura de geração de energia torna-se possível alcançar vantagens adicionais, tais como: compensar reativos e harmônicos, regulação de tensão, redução de perdas na transmissão de energia e diminuição dos investimentos na construção de linhas de transmissão (AZEVEDO, 2011b).

Embora os geradores distribuídos possam trazer diversas vantagens, há desafios que devem ser superados para que os mesmos não venham a prejudicar a qualidade de energia com problemas relacionados a variação de tensão, mal funcionamento dos circuitos de proteção devido ao fluxo de potência bidirecional, desvios na frequência geralmente ocasionado pelo desequilíbrio entre a energia demandada com a energia gerada, etc (PEPERMANS et al., 2005).

Com a finalidade de utilizar a energia produzida por uma fonte renovável, emprega-se um inversor para a conexão com a rede de distribuição. Para conectar o inversor com a rede de distribuição são necessárias algumas exigências na qualidade da energia que é fornecida pelos geradores distribuídos. Os níveis de tensão devem ser estáveis, as distorções harmônicas devem apresentar níveis abaixo das normas estabelecidas e a frequência fundamental deve permanecer o mais próximo do valor nominal (Gonçalves et al., 2010). Além disso, é necessário um estudo prévio sobre o nível de curto circuito,

proteção e local da instalação, para que os geradores distribuídos operem adequadamente.

Com o avanço tecnológico das últimas décadas, principalmente em áreas da eletrônica de potência, estabeleceu-se uma grande mudança nas cargas elétricas, que de lineares passaram a assumir uma característica não linear. Uma carga não linear drena da fonte uma corrente não senoidal, provocando vários distúrbios na rede elétrica, como: distorção harmônica, circulação de reativos e desbalanço.

Nesse contexto, a qualidade de energia elétrica insere-se com grande importância na compatibilização dos geradores distribuídos conectados a rede elétrica, necessitando-se que métodos e elementos sejam inseridos com a capacidade de atuar de forma eficaz frente ao sistema, proporcionando uma solução viável aos distúrbios que degradam a qualidade de energia (BOLLEN, 2000).

Na busca de minimizar os problemas abordados, diversas técnicas de compensação de distúrbios elétricos por meio de geradores distribuídos conectados a rede elétrica vem sendo desenvolvidas.

No trabalho apresentado por Kim, Harley e Regassa (2015) é feito o controle da potência reativa e regulação da tensão a partir de um algoritmo genérico que otimiza o controle de potência reativa, com a finalidade de manter a tensão estável nos barramentos do alimentador, quando os sistemas de geradores distribuídos de energia fotovoltaica injetam potência ativa e reativa na rede elétrica.

Eichkoff (2018) apresenta uma análise do emprego de inversores em sistemas fotovoltaicos para o controle de tensão e potência reativa nos sistemas de distribuição. A capacidade de controle de tensão e reativos a partir dos inversores deve-se a capacidade do mesmo de absorver a potência reativa de maneira distribuída, podendo através do controle de reativos, regular a tensão da rede. Além disso, o controle de tensão permite que o inversor possa injetar ou absorver potência reativa.

Rocha (2017) investiga o emprego de um inversor no modo fonte de tensão, para além da injeção de potência ativa, atenuar as componentes harmônicas da corrente presentes na rede elétrica devido às cargas não lineares conectadas no ponto de acoplamento comum na unidade do gerador distribuído, utilizando como referência para controle a corrente medida na rede. A conexão do sistema de geração distribuída com a rede de distribuição se fez por meio de um conversor trifásico.

Finalmente, Prodanovic et al. (2007) realiza a compensação de reativos e harmônicos utilizando um inversor trifásico conectado à rede por um filtro LC. O controle é baseado na detecção dos componentes harmônicos da tensão e as correntes de saída do filtro. A parcela fundamental da corrente de referência foi obtida através do controle de potência ativa e reativa. O erro entre a corrente de referência e a corrente presente na saída do inversor forma o sinal de entrada para o controlador proporcional de alto ganho, sendo que a saída do controlador é aplicada ao inversor através da modulação PWM.

Diferente das obras anteriores, este trabalho investiga o uso de um inversor conectado à rede operando como um filtro ativo paralelo. Nesta aplicação, o filtro injeta correntes de compensação, com magnitudes iguais e fases opostas capazes de compensar o distúrbio presente na corrente. O objetivo principal desta monografia é explorar a multifuncionalidade de um gerador distribuído na compensação de distúrbios elétricos (harmônicas e potência reativa) através da compensação seletiva. A compensação seletiva é baseada na teoria da potência conservativa, em que é proposto que a corrente pode ser decomposta em componentes ortogonais que estão relacionadas com a característica da carga (consumo de energia, reativos, não linearidades, desbalanço), possibilitando que a compensação dos distúrbios elétricos seja executada de forma seletiva.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal estudar, projetar e simular um gerador distribuído multifuncional para compensação seletiva de distúrbios da corrente, que são os harmônicos e reativos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Contextualização de vários conceitos, como: Geração distribuída, harmônicos, reativos, filtros ativos e teoria da potência conservativa.
- Estudar e aplicar um inversor no modo fonte de tensão conectado à rede elétrica monofásica;
- Realizar a modelagem em pequenos sinais do inversor fonte de tensão;

- Através da teoria da potência conservativa realizar a decomposição da corrente em componentes ortogonais;
- Projetar os ganhos dos controladores das malhas de corrente e tensão;
- Desenvolver as malhas de corrente e de tensão do filtro ativo paralelo;
- Estudar e aplicar a compensação seletiva por meio do filtro ativo paralelo;
- Realizar a simulação do sistema proposto na monografia através do software Matlab/Simulink.

1.2 Organização do Trabalho

No capítulo 1 desta monografia é apresentada uma introdução ao tema, além dos objetivos a serem alcançados.

O capítulo 2 traz uma revisão teórica destacando a geração distribuída, qualidade de energia elétrica, compensação harmônica, compensação reativa, filtros ativos de potência e a teoria da potência conservativa. Além disso, serão introduzidos mais detalhadamente os princípios do funcionamento dos filtros ativos paralelo e às possíveis técnicas de controle.

O capítulo 3 trata a modelagem do filtro ativo paralelo. Também é desenvolvido o projeto dos elementos passivos que integram o filtro, além do desenvolvimento das malhas de corrente e de tensão.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos por meio de simulações realizadas no Matlab/Simulink.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões gerais a respeito do trabalho.

2 Revisão Teórica

2.1 Geração Distribuída

Com o aumento do consumo de energia elétrica, as energias renováveis estão cada vez mais desempenhando um papel fundamental no setor energético mundial. Quando a demanda de energia supera a capacidade do sistema, é necessário a construção de novas unidades de geração com o objetivo de suprir a energia necessária à rede.

Os sistemas de geração distribuída (GD) são adequados para atender as necessidades atuais, pois eles são capazes de utilizar diversas fontes de energias renováveis, sendo muito importantes na redução dos poluentes emitidos na atmosfera, que são um dos principais problemas da geração de energia baseada em fontes não renováveis. Devido a isso, a geração distribuída vem ganhando mais espaço, e uma nova estrutura de sistema elétrico vem se firmando, com unidades de geração distribuída sendo integradas ao sistema elétrico, sendo a maioria proveniente de fontes renováveis. A figura 1 apresenta uma estrutura básica de um sistema de geração distribuída.

Figura 1 – Estrutura de um sistema de geração distribuída.



Fonte: Retirado de (LOPES; FERNANDES; MUCHALUAT-SAADE, 2015).

A definição de geração distribuída presente na literatura ainda não é consistente,

sendo que sua definição provoca divergências entre diversas organizações. Os principais pontos responsáveis por não haver uma definição geral são: a capacidade de geração, o nível de tensão no ponto de acoplamento comum (PAC), modo de operação, impacto ambiental, localização na instalação, tecnologia envolvida, área de fornecimento de energia e o propósito da instalação (ACKERMANN; ANDERSSON; SÖDER, 2001). De acordo com Ackermann, Andersson e Söder (2001) a geração distribuída é definida como uma fonte de energia elétrica conectada diretamente a rede de distribuição ou ao consumidor com o objetivo de fornecer energia ativa. Para o mesmo autor, a GD pode ser classificada de acordo com a capacidade de produção de energia, sendo as seguintes classes:

- Micro GD: Sistema de potência entre 1 W e 5 kW;
- Pequena GD: Sistemas de potência entre 5 kW e 5 MW;
- Média GD: Sistemas de potência entre 5 MW e 50 MW;
- Grande GD: Sistemas de potência entre 50 MW e 300 MW.

Há outras definições para geração distribuída que independem da capacidade instalada. Segundo IEEE (2009), a GD é uma unidade de geração pequena o suficiente para ser conectada na rede de distribuição. Para o CIGRE (International Council on Large Electric System), GD é a geração que não é planejada de modo centralizado (SCHWEER; PLANNING; SYSTEMS, 1999). Para Turkson e Wohlgemuth (2001), GD é definida como uso integrado ou isolado dos recursos modulares de pequeno porte por concessionárias, consumidores e terceiros em aplicações que beneficiam o setor elétrico.

Diante da diversidade de conceitos, necessita-se que haja neste trabalho uma definição geral para geração distribuída. Sendo assim, tendo como base Ackermann, Andersson e Söder (2001) define-se geração distribuída como um sistema de geração de energia conectada diretamente à rede de distribuição ou no lado do consumidor com o objetivo de fornecer energia a cargas locais sem a necessidade de transportá-la por longas distâncias.

A integração dos geradores distribuídos à rede elétrica pode-se trazer muitas vantagens (SANTOS; SANTOS, 2008), tais como:

- redução das perdas por transmissão de energia, devido a proximidade dos geradores distribuídos com a carga.
- facilita a instalação de unidades geradoras, devido ao seu menor porte, em comparação com outras grandes usinas de geração.
- aumento da estabilidade do sistema elétrico devido a existência de reserva de geração distribuída.
- aumento da qualidade de serviço aos consumidores que estão próximos a produção local por adicionar fonte menos suscetíveis a falhas na transmissão e distribuição de energia.
- A capacidade total pode ser aumentada ou diminuída, adicionando ou removendo módulos, respectivamente.
- Suportes nos serviços ancilares da rede elétrica como compensação de harmônicos, de reativos e regulação de tensão.

Após revisar a literatura, comprovou-se a importância das unidades de GD nos sistemas elétricos atuais, entretanto, condições relacionadas a estabilidade de tensão, restrições geográficas e limites do fluxo de potência levantam questões sobre a confiabilidade do sistema (Rocabert et al., 2012).

2.2 Classificação dos Conversores

Nesta seção é feita a classificação dos modos de operação dos conversores que compõem os geradores distribuídos. De acordo com Rocabert et al. (2012) esses conversores podem ser divididos em três classes:

- Alimentador de rede;
- Formador de rede;
- Suporte de rede.

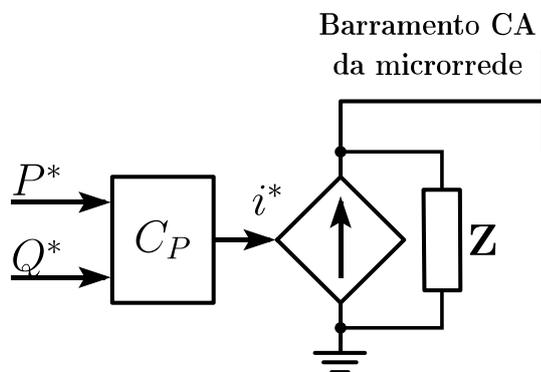
2.2.1 Conversores Alimentadores de Rede

Os conversores alimentadores de rede (CAR's) tem a função de alimentar a microrrede, convertendo a energia produzida por uma microfonte (painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas, microturbinas a gás e outros), e entregando-a à rede elétrica, tendo grande importância no funcionamento dos geradores distribuídos.

O CAR é visto pela rede elétrica como uma fonte de corrente controlada que é conectada com uma alta impedância em paralelo. Ao sincronizar este conversor na rede elétrica, é obtida a capacidade de injetar tanto potência ativa quanto reativa. Esses conversores são adequados para operação em paralelo com outros conversores. Uma questão importante a ser levantada é que o CAR não trabalha de forma independente quando a rede está no modo de operação ilhado (Rocabert et al., 2012).

Uma microfonte de energia conectada ao inversor pode ser classificada como intermitente e não-intermitente. Para o primeiro, a fonte de energia pode não estar disponível por todo o dia, como o vento e o sol. Diferentemente da anterior, as fontes não-intermitentes podem ser utilizadas a qualquer momento do dia, injetando energia na rede elétrica de forma independente a qualquer fenômeno da natureza. Para uma rede de baixa tensão, a intermitência na geração do supridor de energia pode provocar flutuações na tensão, deteriorando a qualidade de energia (ANTUNES, 2018). A figura 2 apresenta o diagrama de um conversor de alimentação de rede.

Figura 2 – Conversor alimentador de rede.



Fonte: Adaptado de (Rocabert et al., 2012).

O CAR pode desempenhar serviços ancilares no PAC da microrrede, tais como:

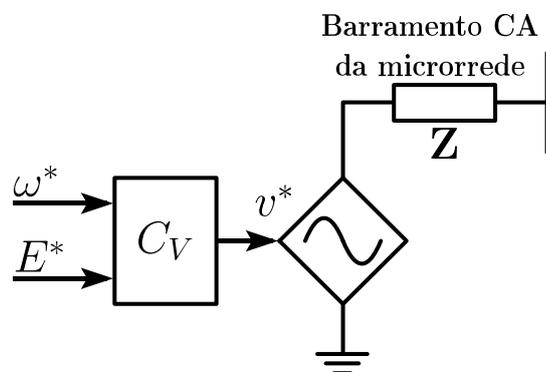
regulação de tensão, correção do fator de potência e serviços que prezam a qualidade de energia. Para exercer as funções citadas anteriormente, este conversor trabalha como um formador de rede, quando associado a um sistema de armazenamento de energia (Rocabert et al., 2012).

2.2.2 Conversores Formadores de Rede

Os conversores formadores de rede (CFR's) são utilizados para formar a microrrede c.a. e controlar os valores de tensão e frequência da rede, para uma rede operando isolada. Esses conversores normalmente são conectados a dispositivos de armazenamento de energia. Os CFR's podem ser representados como uma fonte de tensão controlada em série com uma baixa impedância de saída, regulando a tensão de amplitude E^* e frequência ω^* da rede local usando um circuito de controle adequado (Rocabert et al., 2012).

O conversor formador de rede atua com controle de malha fechada, rastreando uma frequência e tensão de referência no resultado. O princípio de operação desse conversor é semelhante a uma fonte de alimentação ininterrupta (UPS, do inglês *uninterruptible power supply*) que possui sistemas de armazenamento de energia, alimentando as cargas elétricas, mesmo para uma rede elétrica ausente. Portanto, este conversor é capaz de melhorar a confiabilidade e estabilidade da microrrede (Antunes et al., 2017). A figura 3 representa o diagrama do conversor formador de rede.

Figura 3 – Conversor formador de rede.



Fonte: Adaptado de (Rocabert et al., 2012).

No modo ilhado, o inversor fonte de tensão ou VSI (*Voltage Source Inverter*) opera

como fonte de tensão. O formador de rede atua com controle de malha fechada, regulando a tensão e a frequência da rede elétrica. Como estes conversores podem operar em paralelo com outros conversores, necessita-se que o sistema de sincronização seja preciso. Para esse determinado fim, a impedância de saída possui um valor pequeno. Quando a rede elétrica está ausente, o CFR impõe sua tensão de referência para os outros conversores e as cargas conectadas (Rocabert et al., 2012).

Um CFR também pode operar no modo conectado a rede. Neste caso, o conversor impõe a tensão e frequência do PAC, mantendo-se sincronizado com a rede até o momento de sua entrada para o modo ilhado (ZHANG; CHEN; ZHANG, 2014). Portanto, nesse modo de operação o conversor idealiza a função de suporte de rede, contribuindo na regulação do PAC da microrrede, com a presença obrigatória de sistemas de armazenamento de energia, já que pode haver a necessidade de absorver potência da rede (Azevedo et al., 2013).

O CFR mantém a tensão da rede elétrica sempre que a mesma estiver conectada, sendo que ele é capaz de detectar falhas na rede e realizar comandos para desconexão de rede, além da sincronização antes da reconexão. Portanto, o formador de rede deve ser capaz de perceber a mudança de uma rede conectada para uma rede desconectada, sendo capaz de manter a estabilidade do sistema.

2.2.3 Conversores de Suporte de Rede

Os conversores de suporte de rede (CSR's) tem a capacidade de extrair a máxima potência ativa da fonte primária, além de fornecer serviços auxiliares a microrrede. Esses serviços são a regulação da tensão e da frequência, por meio do controle das potências ativa e reativa do conversor (Azevedo et al., 2013). O conversor de suporte de rede pode exercer as funções de supridor e formador de rede. Para esse fim, basta fazer readequações na topologia e nas estratégias de controle do conversor (Filho et al., 2015).

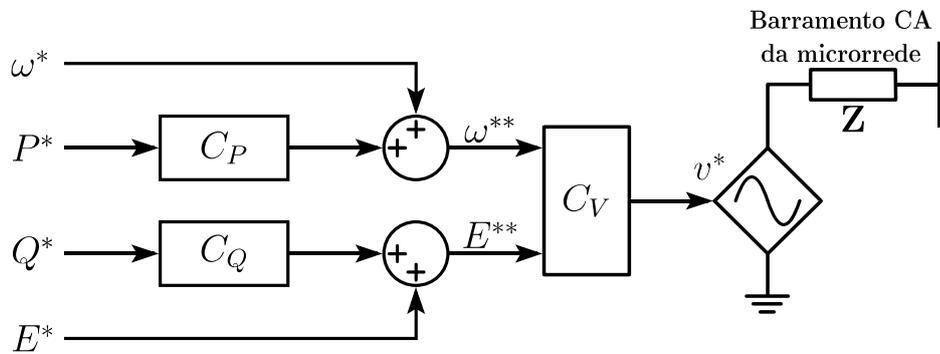
O CSR pode operar em dois modos. No primeiro modo, o conversor tem uma fonte de corrente em paralelo com uma alta impedância. O objetivo principal é a regulação da tensão e da frequência. Nessa estrutura, é necessário que haja pelo menos um formador de rede conectado, ou que a microrrede esteja no modo interligado a rede elétrica. No segundo modo, o controlador emula uma fonte de tensão conectada a uma baixa impedância em série. Essa impedância pode ser do dispositivo entre o VSI e a rede ou um componente

virtual, emulado dentro do loop de controle, não sendo necessário a adição de um formador de rede (Rocabert et al., 2012). Nessa topologia, o conversor pode operar sozinho em uma microrrede isolada, como um gerador síncrono em uma rede convencional.

Independentemente do modo de operação do conversor de suporte, seu principal objetivo é realizar a regulação da frequência e da amplitude da tensão c.a. da microrrede, controlando as potências ativa e reativas entregues à rede elétrica (ARAÚJO et al., 2016).

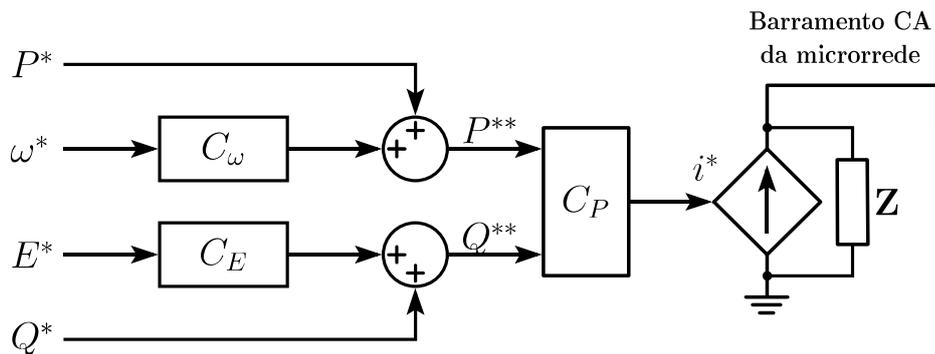
As figuras 4 e 5 apresentam os diagramas do conversor de suporte no modo fonte de tensão e no modo de fonte de corrente, respectivamente.

Figura 4 – Conversor de suporte de rede como fonte de tensão.



Fonte: Adaptado de (Rocabert et al., 2012).

Figura 5 – Conversor de suporte de rede como fonte de corrente.



Fonte: Adaptado de (Rocabert et al., 2012).

2.3 Qualidade de Energia Elétrica

Não há uma definição geral para a qualidade de energia elétrica (QEE). Para o IEEE (1995), QEE é definida como “variedade de fenômenos eletromagnéticos que caracterizam a tensão e corrente em um determinado momento e local no sistema elétrico”. Para Arrillaga, Bollen e Watson (2000) a QEE é definida como uma qualidade do serviço que abrange três aspectos: a confiabilidade do fornecimento, qualidade da energia oferecida e fornecimento de informações. De acordo com Deckmann e Pomilio (2017), QEE é conceituada como uma medida que avalia a qualidade da energia elétrica utilizada pelos seus consumidores. Esta medida inclui a análise e solução dos distúrbios presentes na energia elétrica. Segundo o IEEE (1995) esses distúrbios são:

- Transitórios;
- Variações de curta duração;
- Variações de longa duração;
- Tensões em desequilíbrio;
- Flutuações na tensão;
- Variação na frequência do sistema;
- Distorções na forma de onda.

As anomalias descritas acima são responsáveis por diversas perturbações no sistema elétrico e, por consequência, nos equipamentos conectados a ela. Algumas dessas perturbações são: sobreaquecimento de máquinas elétricas devido a distorções na forma de onda, vibrações de motores devido a desequilíbrios, variações na iluminação devido a flutuações na tensão fornecida, oscilações de potência devido a operação de cargas não lineares e variáveis (DECKMANN; POMILIO, 2017). Para solução destes problemas há certas condições que devem ser aproximadas ao máximo do ideal para melhor funcionamento do sistema elétrico. Considerando um sistema elétrico trifásico tais condições são: tensões e correntes senoidais, amplitudes e frequências constantes, tensões equilibradas em fase, fator de potência unitário e perdas nulas (DECKMANN; POMILIO, 2017).

Em relação aos distúrbios citados, a ênfase da monografia consiste na compensação das distorções de onda da corrente, além da compensação dos reativos excedentes da rede elétrica.

2.4 Compensação Harmônica

Qualquer forma de onda periódica no domínio do tempo no estado estacionário pode se expressa por um somatório infinito de forma de onda senoidais em múltiplos inteiros de frequência fundamental (Phipps; Nelson; Sen, 1994).

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{n\pi t}{L}\right) + b_n \sin\left(\frac{n\pi t}{L}\right) \quad (2.1)$$

$$a_n = \int_{-L}^L f(t) \cos\left(\frac{n\pi t}{L}\right) dt \quad (2.2)$$

$$b_n = \int_{-L}^L f(t) \sin\left(\frac{n\pi t}{L}\right) dt \quad (2.3)$$

onde:

$f(t)$ é a função no domínio do tempo;

n é o índice harmônico;

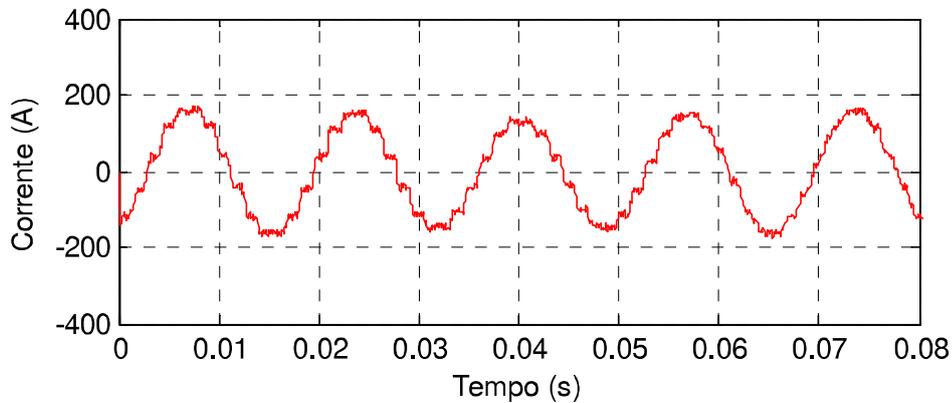
L é a duração do ciclo.

A definição de harmônicas em um sistema de potência é baseada na aplicação da transformada de Fourier e superposição sobre as formas de onda e corrente. Quando existem condições de carga não linear, a distorção de onda pode ser explicada pela transformada de Fourier.

Uma distorção de onda é denominada harmônica se a deformação se apresenta de forma similar em cada ciclo da frequência fundamental (DECKMANN; POMILIO, 2017). Geralmente é causada por cargas não lineares, ou seja, cargas cujo efeito sobre a forma de onda de tensão e corrente não se restringem apenas a alterar sua amplitude, tais como: transformadores e motores cujos núcleos ferromagnéticos estão sujeitos a saturação, reatores controlados por tiristores, fornos a arco, inversores, lâmpadas fluorescentes etc (Phipps; Nelson; Sen, 1994).

A figura 6 exibe o comportamento de uma onda distorcida por harmônicos presentes na corrente.

Figura 6 – Corrente distorcida de um conjunto de cicloconversores.



Fonte: Adaptado de Ferreira, Simonetti e Sousa (2007).

A presença de harmônicos no sistema elétrico nem sempre causa danos imediatos, mas normalmente com o decorrer do tempo a exposição de equipamentos a correntes harmônicas pode levar a vários problemas, tais como (RODRIGUES, 2009; DECKMANN; POMILIO, 2017):

- Ressonância série e paralela;
- Erro no controle de conversores;
- Sobrecorrente de neutro;
- Erros em equipamentos de medição;
- Perdas excessivas;
- Aumentos nos custos de manutenção;
- Falhas de atuação na proteção;
- Interferência e ruídos eletromagnéticos;
- Redução na vida útil de certas cargas (lâmpadas, transformadores, motores, etc.);
- Sobreaquecimento de capacitores e de motores.

A Distorção Harmônica Total (DHT) avalia através de uma equação o nível de distorção da onda, sendo que, na equação é associado a componente fundamental com as demais componentes. Abaixo a DHT da tensão é representada pela equação (2.4) e a DHT da corrente é representada pela equação (2.5).

$$DHT_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} V_h^2}}{V_l} \quad (2.4)$$

$$DHT_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_l} \quad (2.5)$$

Normalmente a DHT da tensão é bem precisa no valor das harmônicas, uma vez que o valor da componente fundamental é relativamente constante. O mesmo não vale para a corrente, já que a alteração da componente fundamental pode ser significativa (DECKMANN; POMILIO, 2017).

A compensação harmônica é realizada através da instalação de filtros que absorvam harmônicos da corrente, proporcionando um caminho de baixa impedância para os mesmos. Portanto, é possível atenuar a amplitude das frequências harmônicas das tensões e da corrente (TEIXEIRA, 2009). Inicialmente, têm-se como uma estratégia de compensação mais antiga os filtros passivos. Eles são compostos por indutores e capacitores, que desempenham a função de filtragem dos harmônicos da corrente que deseja-se eliminar. Harmônicos de ordem mais altas são eliminadas através de um filtro passa baixa (MODESTO, 2007).

Uma estratégia atual e mais eficiente em relação a anterior consiste na compensação de harmônicas por filtros ativos de potência. Eles são constituídos por inversores de tensão ou de corrente que são conectados a carga e à rede elétrica, sendo que são capazes de filtrar as harmônicas da rede, além de outras funções importantes para melhoria da qualidade de energia. Os filtros ativos serão melhor estudados nas próximas seções.

2.5 Compensação Reativa

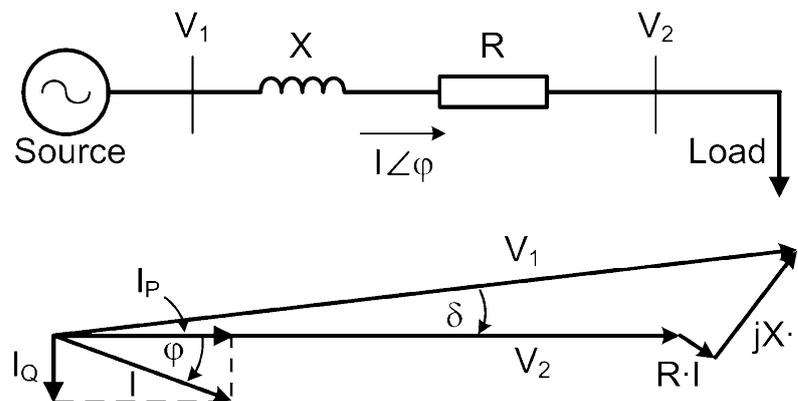
A corrente reativa é a parcela da corrente responsável por sustentar o campo magnético de equipamentos magnéticos, como motores, fornos a arco, sistemas de iluminação e transformadores. Diferentemente da corrente ativa, a parcela reativa não é capaz de realizar trabalho. Geralmente, esta parcela é fornecida por geradores e condensadores

síncronos, banco de capacitores, etc. Os reativos na rede estão diretamente associados as variações de tensão presentes no sistema elétrico (Majumder, 2013).

A compensação reativa consiste no controle da potência reativa a fim de melhorar o desempenho do sistema c.a., como aumento na capacidade máxima de potência ativa transmitida e maior estabilidade na rede elétrica. A compensação de reativos impacta na qualidade de energia, já que a maioria dos problemas que envolvem a qualidade de energia podem ser atenuados controlando os reativos na rede (Dixon et al., 2005). Portanto, a finalidade da compensação reativa é retirar a responsabilidade da fonte de fornecer energia reativa demandada pela carga.

A figura 7 apresenta uma fonte de energia, linha de transmissão e uma carga, além do seu respectivo diagrama fasorial. Pelo diagrama, observa-se que a corrente ativa I_P está em fase com a tensão V_2 . Como a carga é tipicamente indutiva, é requerida energia reativa para uma operação adequada, e portanto, a fonte fornece essa energia, aumentando a corrente do gerador e as perdas na linhas de transmissão (Dixon et al., 2005).

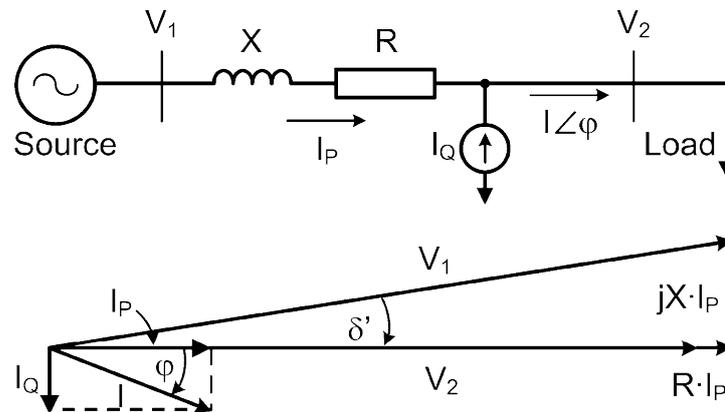
Figura 7 – Sistema sem compensação reativa.



Fonte: Retirado de (Dixon et al., 2005).

Aplicando um compensador em paralelo neste sistema, a componente reativa I_Q passa a ser suprida pelo compensador, reduzindo a corrente de linha e conseqüentemente as perdas (Dixon et al., 2005). A figura 8 apresenta um sistema compensado, com uma fonte de energia, linha de transmissão, um compensador conectado em paralelo e uma carga, além do seu respectivo diagrama fasorial.

Figura 8 – Sistema com compensação reativa.



Fonte: Retirado de (Dixon et al., 2005).

Portanto, os compensadores suprem a energia reativa demandada pela carga, e a fonte fica encarregada de fornecer a energia ativa necessária. Deste modo, é possível obter uma melhora considerável na qualidade de energia.

Como o foco deste trabalho é explorar a multifuncionalidade do conversor c.c.-c.a., a compensação reativa será feita por um filtro ativo paralelo.

2.6 Filtros Ativos

Os filtros ativos (FA's) são equipamentos baseados em circuitos eletrônicos, semicondutores de potência, filtros e elementos armazenadores de energia, normalmente usados para compensar harmônicos e reativos na rede elétrica. Esses dispositivos apresentam outros benefícios (Singh; Al-Haddad; Chandra, 1999), tais como:

- Regulação de tensão;
- Diminuição da corrente de neutro;
- Balanceamentos de correntes e tensões;
- Eliminação de *flickers*¹ de tensão.

¹ é o efeito da variação de emissão luminosa percebida visualmente, em decorrência de flutuações da tensão. O fenômeno está associado à operação de cargas variáveis (DECKMANN; POMILIO, 2017).

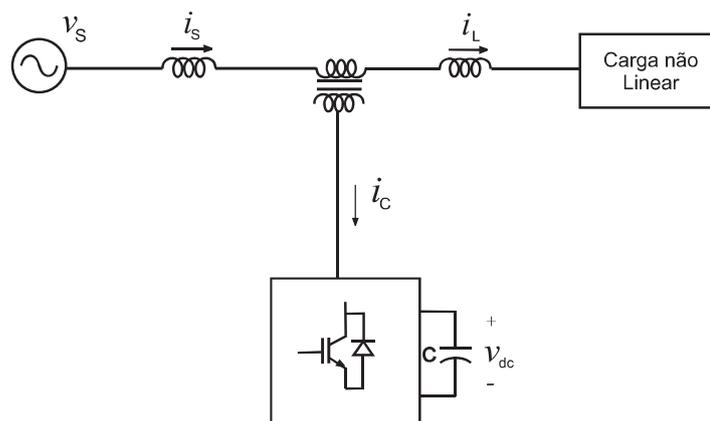
A finalidade do FA é injetar uma corrente/ou tensão com mesma amplitude e fase oposta em relação as harmônicas e reativos da corrente da carga, minimizando o fluxo da corrente harmônica, além de aumentar o fator de potência da carga (ARBEX, 2011).

O FA é instalado entre a fonte e a carga. Basicamente, há duas topologias de filtros ativos, o Filtro Ativo Série (FAS), para o filtro conectado em série com a carga, e o Filtro Ativo Paralelo (FAP), para o filtro conectado em paralelo com a carga. O FAP atua como uma fonte de corrente controlada capaz de compensar a corrente da carga. O FAS atua como fonte de tensão controlada, fornecendo tensões senoidais e balanceadas para a carga (AZEVEDO, 2011a).

2.6.1 Filtro Ativo Série

O FAS é conectado em série com a carga, e geralmente com um transformador de acoplamento. Sua finalidade é compensar afundamentos na tensão, harmônicos de tensão e desbalanço da tensão. A estrutura desse filtro é representado na figura 9. Sendo que, I_s é a corrente da fonte, I_c é a corrente de compensação gerada pelo filtro e I_L é a corrente da carga.

Figura 9 – Filtro ativo série.



Fonte: Retirado de (LIMONGI, 2006).

O FAS possui dois modos de operação. No primeiro modo o FAS atua como uma impedância variável capaz de bloquear as correntes harmônicas com alta impedância e permite a passagem da corrente fundamental de baixa impedância. Já no segundo modo, o FAS atua como uma fonte variável de tensão, capaz de impor o negativo das tensões

harmônicas, resultando em uma tensão na carga puramente senoidal. Como o filtro está conectado em série com a carga, qualquer falha interna pode gerar interrupção do processo (FILHO; BRAGA; SILVA, 2008).

O fato do filtro série injetar harmônicos de tensão pelo transformador de acoplamento causa altas perdas e superaquecimento, reduzindo seu ciclo de vida. Além disso, os equipamentos usados são mais caros. Portanto, conclui-se que é necessário uma topologia de filtros que apresenta melhores resultados, motivando a utilização dos filtros ativos paralelos.

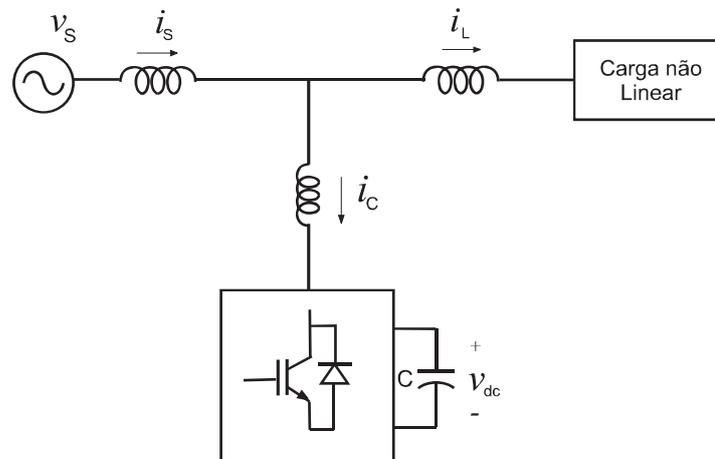
2.6.2 Filtro Ativo Paralelo

O FAP opera em paralelo com a carga, sendo que pode ser modelado como uma fonte de corrente controlada. Sua finalidade é compensar correntes de neutro, desbalanços de corrente, harmônicos presentes na corrente e potência reativa (LIMONGI, 2006). Esses filtros injetam correntes de compensação com a mesma magnitude e com fase oposta. O controle é feito pela extração das correntes harmônicas da carga, formando correntes de referência do inversor, e uma malha de controle para o barramento de tensão c.c. do inversor. O circuito de realimentação do barramento c.c. regula a tensão e uma pequena corrente fundamental em fase com a tensão de terminal do filtro para compensar as perdas no inversor (Bhattacharya; Divan, 1996).

O FAP trabalha como uma fonte de corrente que injeta corrente na rede elétrica. Para esse fim, geralmente o filtro é composto por um capacitor no barramento c.c., um VSI - (*Voltage Source Inverter*) e um indutor de acoplamento. Com esses componentes, o FAP torna-se uma fonte de corrente controlada via PWM. Há também os FAP's com inversor fonte de corrente (CSI - *Current Source Inverter*) (AZEVEDO, 2011a).

Os FAP's com VSI são mais utilizados, já que os módulos de IGBT's disponíveis no mercado são mais adequados para utilização no VSI, pois o IGBT já vem com um diodo de roda livre ligado em anti-paralelo, enquanto o CSI necessita de um diodo de bloqueio ligado em série com o IGBT, aumentando as perdas na condução (AZEVEDO, 2011a). Os VSI's necessitam de capacitores de armazenamento, já os CSI's utilizam indutores para a mesma função, tornando-os mais caros e volumosos que o FAP com VSI (Routimo; Salo; Tuusa, 2007). A estrutura de um filtro ativo paralelo é apresentado na figura 10.

Figura 10 – Filtro ativo paralelo.



Fonte: Retirado de (LIMONGI, 2006).

Observando a figura 10 fica claro que a corrente drenada da rede é a soma da corrente drenada da carga mais a corrente injetada pelo filtro.

Para utilizar o filtro ativo paralelo em correntes mais elevadas, são conectados vários desses filtros em paralelos, tornando-o adequado para uma faixa maior de potência. A instalação de FAP's também traz outras vantagens (AZEVEDO, 2011a), tais como:

- a instalação do equipamento em derivação não interfere na operação do sistema, restringindo defeitos no equipamento que possam interromper a energia que é suprida à carga;
- maximiza o fator de potência da rede, reduzindo a corrente do sistema, e portanto, a capacidade de transmissão das linhas é liberada;
- não modificam significativamente as correntes da carga, pois geralmente a tensão no PAC é mantida estável;
- este filtro é capaz de suprir à carga toda a potência não ativa.

O filtro ativo paralelo não processa potência ativa. Pelo filtro circula apenas potência reativa para compensar harmônicas ou reativos. Portanto, as perdas do FAP são reduzidas em relação ao FAS, já que o último processa toda a corrente de carga.

Um componente indispensável nos FAP é o controlador de corrente, que tem a função de fazer com que a corrente controlada siga sua respectiva referência. Esses

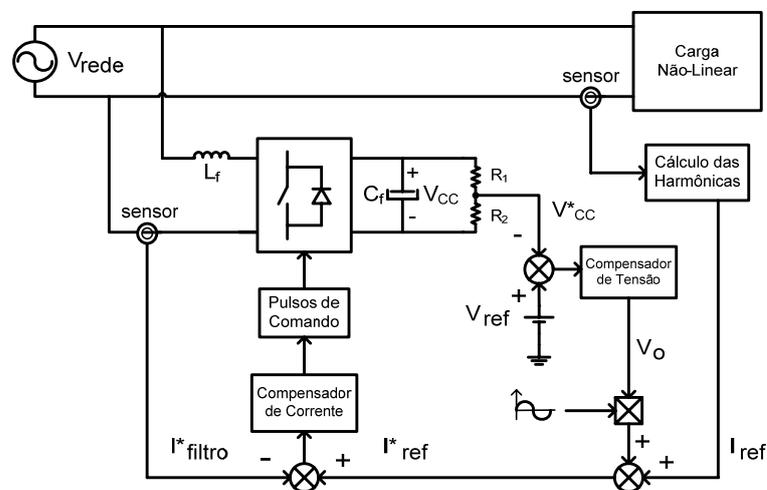
controladores são capazes de controlar a corrente de saída do filtro, essas correntes são compostas por componentes harmônicas e potência reativa (AZEVEDO, 2011a).

2.6.2.1 Estratégias de Controle

Basicamente há duas estratégias de controle que são utilizadas em um filtro ativo paralelo: controle por monitoramento de corrente de carga e o controle por monitoramento de corrente de rede.

Para realizar o monitoramento da corrente de carga são necessários dois sensores de corrente, de acordo com a figura 11. A utilização deste tipo de estratégia não é muito atrativa, devido ao preço dos sensores. Neste tipo de monitoramento são utilizados filtros seletivos para extrair as componentes harmônicas da corrente de carga, levando pelo menos um período de operação da rede, o que compromete o desempenho dinâmico da malha de corrente (FENILI, 2007).

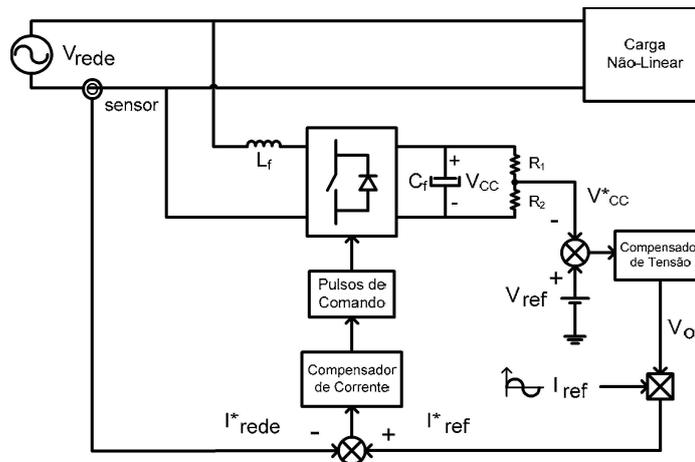
Figura 11 – Monitoramento da corrente de carga.



Fonte: Retirado de (FENILI, 2007).

O monitoramento da corrente de rede utiliza apenas um sensor. Neste tipo de monitoramento não se faz necessário um período da rede para geração do sinal de referência, melhorando o funcionamento da malha de controle (FENILI, 2007). A figura 12 ilustra este tipo de estratégia.

Figura 12 – Monitoramento da corrente de rede.

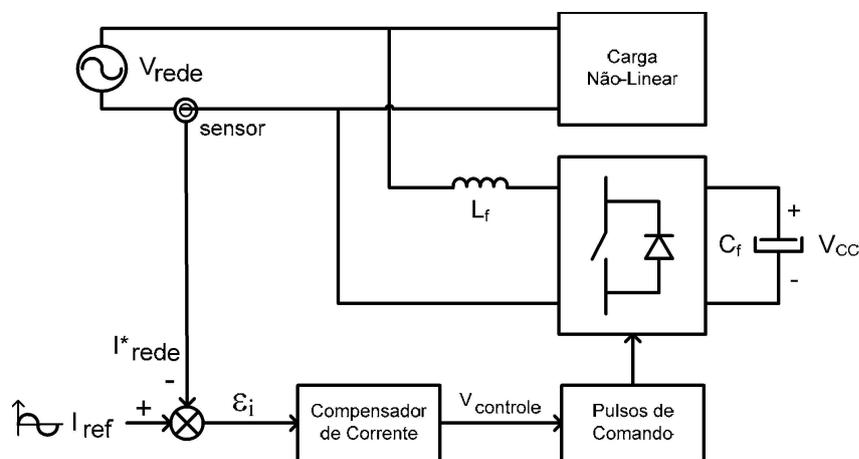


Fonte: Retirado de (FENILI, 2007)

De acordo com as características das duas estratégias abordadas anteriormente, observa-se que esta possui um sensor de corrente a menos, resultando em um menor gasto para a implementação deste método de controle. Além disso, como nessa estratégia não é preciso de um período da rede para geração do sinal de referência, o desempenho do filtro é melhor, portanto qualquer variação na carga o FAP atuará rapidamente para compensar as harmônicas presentes na corrente.

O diagrama de blocos do controle de corrente do filtro ativo paralelo é apresentado na figura 13. Nela observa-se que a corrente de rede é monitorada e comparada com uma corrente de referência senoidal e em fase com a tensão da rede.

Figura 13 – Diagrama de blocos para o controle da corrente do FAP.



Fonte: Retirado de (FENILI, 2007).

A corrente de referência é quem determina o tipo de compensação a ser aplicada pelo FAP, sendo assim, a geração desta corrente de referência torna-se de fundamental importância para o funcionamento do filtro.

2.6.2.2 Geração do Sinal de Referência para o Filtro Ativo Paralelo

A finalidade do sinal de referência de um FAP é determinar que tipo de compensação deve ser realizada pelo filtro. As técnicas para geração de referência mais comuns são a síntese de corrente senoidal e a síntese de carga resistiva.

A síntese de corrente senoidal consiste no FA injetar uma corrente que anule as distorções de corrente produzidas por cargas não lineares. Mesmo que as tensões não sejam senoidais e equilibradas o filtro é capaz de compensar as distorções presentes na corrente, fazendo com que corrente do lado gerador tenha uma forma de onda senoidal (ARBEX, 2011).

A síntese da carga resistiva consiste em impor que a corrente de referência do FAP siga a forma de onda da tensão. Neste caso, a tensão e a corrente estão em fase, e portanto, o comportamento da forma de onda é de uma carga resistiva. A amplitude da corrente está relacionada com o balanço de potência e é regulada até que potência ativa consumida na rede seja exatamente igual à potência ativa consumida pela carga. Enquanto este equilíbrio não é alcançado, a diferença instantânea é controlada pelo capacitor do barramento CC. Para tensões com distorção na onda, a corrente acompanhará o aspecto da onda, entretanto não manterá a forma senoidal (ARBEX, 2011).

As estratégias de compensação são baseadas pelas teorias de potências (instantâneas) e as parcelas de corrente que devem ser compensadas dependem diretamente da teoria de potência a ser aplicada.

2.7 Teoria da Potência Conservativa

A Teoria da Potência Conservativa (TPC) permite a decomposição das correntes em componentes ortogonais que podem estar associadas a características do sistema elétrico, tais como: consumo de energia ativa, circulação de reativos na rede, desequilíbrio nos condutores, não linearidades da carga, etc. A decomposição das correntes é baseada nas Leis de Kirchoff e no Teorema de Tellegen (BRANDÃO, 2013).

2.7.1 Potência Ativa Instantânea

A potência ativa instantânea é definida pelo produto dos vetores instantâneos da corrente e da tensão, de acordo com a equação (2.6).

$$p = v \cdot i \quad (2.6)$$

2.7.2 Energia Reativa Instantânea

A energia reativa instantânea é definida como sendo o produto dos vetores instantâneos da integral imparcial da tensão com a corrente, de acordo com a equação (2.7).

$$q = \hat{v} \cdot i \quad (2.7)$$

Sendo \hat{v} a representação do vetor instantâneo da integral imparcial da tensão.

2.7.3 Potência Ativa Média

A potência ativa média é definida como a potência média transferida para carga em um período de tempo. Ela é obtida através do valor médio da equação (2.6), como mostra a equação (2.8).

$$P = \bar{p} = \langle v, i \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt \quad (2.8)$$

2.7.4 Energia Reativa Média

A energia reativa média é definida como a energia média armazenada na rede polifásica, em condições genéricas, incluindo: desbalanços, distorções de onda, etc. É obtida por meio da equação (2.7) e é expressa por (2.9).

$$W = \bar{w} = \langle \hat{v}, i \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{v}(t) \cdot i(t) dt \quad (2.9)$$

2.7.5 Decomposição das Correntes

Baseado nas definições da TPC, as correntes de fase podem ser decompostas em sub-componentes denominadas de corrente ativa (I_a), corrente não ativa (I_{na}), corrente reativa (I_r), e corrente void (I_v) (BRANDÃO, 2013).

$$i = i_a + i_{na} = i_a + i_r + i_v \quad (2.10)$$

A corrente ativa é definida como a projeção da corrente i sobre a tensão v , de acordo com a equação (2.11).

$$i_a = \frac{P}{\|v\|^2} \cdot v \quad (2.11)$$

A corrente não ativa é a porção excendente de i_a , portanto ela representa os distúrbios não ativos do sistema. Essa corrente pode ser expressa pela equação (2.12).

$$i_{na} = i - i_a \quad (2.12)$$

A corrente reativa é definida como a projeção da corrente i sobre a integral sem valor médio da tensão, \hat{v} , de acordo com a equação (2.13).

$$i_r = \frac{W}{\|\hat{v}\|^2} \cdot \hat{v} \quad (2.13)$$

A corrente void depende da distorção da tensão e da corrente. Esta sub-componente representa as não linearidades da carga, ou seja os harmônicos e é expressa pela equação (2.14).

$$i_v = i_{na} - i_r = i - i_a - i_r \quad (2.14)$$

Por fim, vale destacar que para compensar os distúrbios propostos nesta monografia basta o compensador usado injetar corrente reativa definida pela equação (2.13) para compensar reativos, no caso de compensar harmônicos injeta-se corrente void, definida pela equação (2.14) e para compensar qualquer distúrbio contido na corrente, injeta-se corrente não ativa, definida pela equação (2.12).

2.7.6 Fator de Potência Total

A partir das componentes decompostas da corrente, é possível definir outras parcelas de potência, as quais estão relacionadas às características específicas dos circuitos.

Pela definição, todos os termos da corrente são ortogonais.

$$\|i^2\| = \|i_a^2\| + \|i_r^2\| + \|i_v^2\| \quad (2.15)$$

A potência aparente representa a potência total do sistema, sendo definida pela equação (2.16).

$$A = \|i^2\| \cdot \|v^2\| = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (2.16)$$

Sendo que P é a potência ativa ($P = VI_a$), Q é a potência reativa ($Q = VI_r$) e D é a potência de distorção ($D = VI_v$)

A potência complexa (S), compreende as parcelas da potência ativa (P) e da potência reativa (Q), de acordo com a expressão (2.17).

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.17)$$

O fator de potência é um novo conceito desenvolvido a partir da teoria da potência conservativa, em que leva-se em consideração a presença de elementos armazenadores de energia, além dos impactos de assimetrias e não linearidades do circuito.

O fator de potência é designado por λ , e sua equação expressa a razão da potência ativa P com a potência aparente A , de acordo com (2.18).

$$\lambda = \frac{P}{A} \quad (2.18)$$

A teoria da potência conservativa pode ser estendida para o domínio polifásico, readequando os valores dos vetores de tensão e corrente por fase, medidos no ponto de acoplamento comum.

3 Modelagem Matemática do Conversor c.c.- c.a. Operando como Filtro Ativo Paralelo

Neste capítulo será apresentada a modelagem do conversor c.c.-c.a. fonte de tensão operando como filtro ativo paralelo com o objetivo de encontrar as funções de transferências que formam as malhas de controle da corrente e da tensão.

O FAP trabalha como uma fonte de corrente para injetar corrente na rede elétrica. Para realizar esta função, geralmente o filtro é composto por um capacitor no barramento c.c., um inverter fonte de tensão e um indutor de acoplamento. Com esses componentes, o FAP torna-se uma fonte de corrente. Portanto, para que o FAP execute suas funções de forma correta torna-se importante encontrar expressões para o cálculo dos dispositivos passivos do FAP. Além do cálculo dos elementos passivos, a modelagem do conversor é essencial para que o controle da corrente do filtro ativo paralelo seja realizado corretamente.

3.1 Elementos Passivos

A presença de um filtro passivo na saída do conversor c.c.-c.a. tem a função de atenuar as componentes de alta frequência, causadas pela comutação dos semicondutores. Neste contexto, a definição dos valores para indutância e capacitância são necessários.

O cálculo do indutor(L) pode ser dado pela equação (3.1).

$$L = \frac{\overline{\Delta I_{inv-max}} \cdot V_{CC}}{2 \cdot f_s \cdot \Delta_{inv-max}} \quad (3.1)$$

onde $\Delta I_{inv-max}$ é a máxima corrente de ondulação desejável no indutor do conversor, $\overline{\Delta I_{inv-max}}$ é a máxima corrente da ondulação de corrente parametrizada, V_{CC} é a tensão no barramento c.c. e f_s é a frequência de comutação (BRANDÃO, 2013).

O valor do capacitor eletrolítico do barramento c.c. pode ser definido através da equação (3.2), que calcula a capacitância de um retificador monofásico de onda completa, com filtro capacitivo, baseado na ondulação de baixa frequência da tensão de saída

(BRANDÃO, 2013).

$$C_{CC} = \frac{A_{inv}}{2 \cdot f \cdot V_{CC} \cdot \Delta V_{CC}} \quad (3.2)$$

Para suprir a demanda de corrente proveniente da carga, o valor da tensão de barramento deve ser superior (pelo menos 30%) à tensão de pico da rede.

O cálculo do capacitor é muito importante, pois a ondulação de baixa frequência na tensão do barramento c.c. poderá se propagar na tensão e na corrente dos outros conversores eletrônicos chaveados de potência, conectados no barramento.

O próximo passo é definir o cálculo para encontrar o capacitor de saída do filtro ativo paralelo, de acordo com a equação (3.3), que calcula a capacitância de um retificador monofásico de onda completa com filtro capacitivo (FENILI, 2007).

$$C_f = \frac{Q_{filtro}}{f_{rede} \cdot (V_{CCmax}^2 - V_{CCmin}^2)} \quad (3.3)$$

As tensões máximas e mínimas no barramento CC são calculados através das equações (3.4) e (3.5).

$$V_{CCMAX} = V_{CC} \cdot \left(1 + \frac{\Delta V_{CC}}{2}\right) \quad (3.4)$$

$$V_{CCMIN} = V_{CC} \cdot \left(1 - \frac{\Delta V_{CC}}{2}\right) \quad (3.5)$$

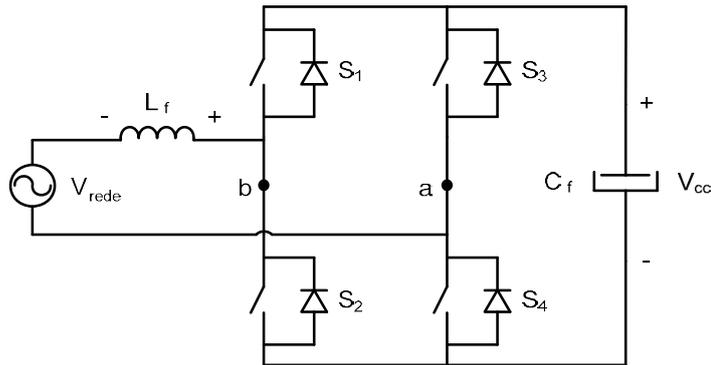
A potência Q_{filtro} presente no cálculo do capacitor C_f representa a máxima potência que o filtro deverá manipular.

3.2 Modelagem do Conversor

Os inversores bidirecionais em corrente podem ser aplicados como filtros ativos. Esta aplicação vale tanto para os inversores de corrente, quanto para os inversores de tensão.

O inversor escolhido neste trabalho é o inversor de tensão em ponte completa (*VSI-FB - Voltage Source Inverter - Full Bridge*) apresentado na figura 14.

Figura 14 – Inversor de tensão em ponte completa.



Fonte: Retirado de (FENILI, 2007).

Diversas técnicas de modelagem podem ser aplicadas a fim de obter uma função de transferência que represente o inversor fonte de tensão da figura 14. A técnica adotada baseia-se em utilizar os princípios do modelo por valores instantâneos, considerando a tensão de barramento V_{CC} isenta de ondulação, facilitando os cálculos para modelagem do conversor.

A modelagem em pequenos sinais é importante para encontrar uma função de transferência que possa representar de forma correta a resposta dinâmica e o valor estacionário de uma variável de saída com relação às pequenas perturbações presentes em uma variável de entrada.

Para utilizar este modelo, serão considerados os valores médios das grandezas de interesse dentro do período de comutação. Sendo assim, assume-se que a tensão de rede (V_{rede}) permanece constante durante um intervalo de comutação, de acordo com a equação (3.6).

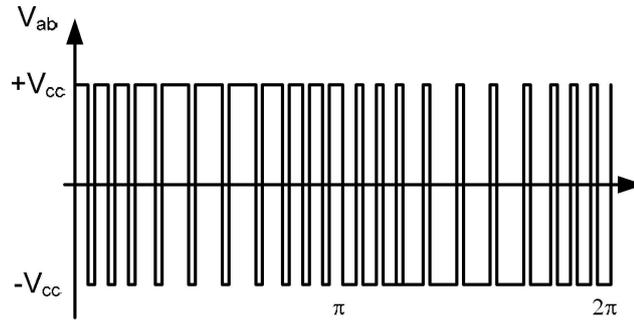
$$V_{rede} = V_S \quad (3.6)$$

A tensão entre os pontos a e b do inversor da figura 14 (V_{ab}) pode apresentar dois ou três níveis, dependendo da modulação a ser adotada para realizar o controle do FAP.

Na modulação a dois níveis, a frequência de comutação desta tensão é a metade da frequência para a modulação a três níveis, gerando uma maior indutância de acoplamento.

Na modulação senoidal a dois níveis tem-se a tensão V_{ab} variando entre $-V_{CC}$ e $+V_{CC}$, de acordo com a figura 15, que apresenta a forma de onda da tensão (V_{ab}) para uma modulação senoidal a dois níveis.

Figura 15 – A modulação a dois níveis.



Fonte: Retirado de (FENILI, 2007).

Tendo como base a forma de tensão V_{ab} da figura 15, pode-se calcular o valor médio em um período de comutação, de acordo com a expressão (3.7).

$$V_{abmed} = \frac{1}{T_s} \left(\int_0^{DT_s} V_{CC} dt + \int_0^{(1-D)T_s} -V_{CC} dt \right) \quad (3.7)$$

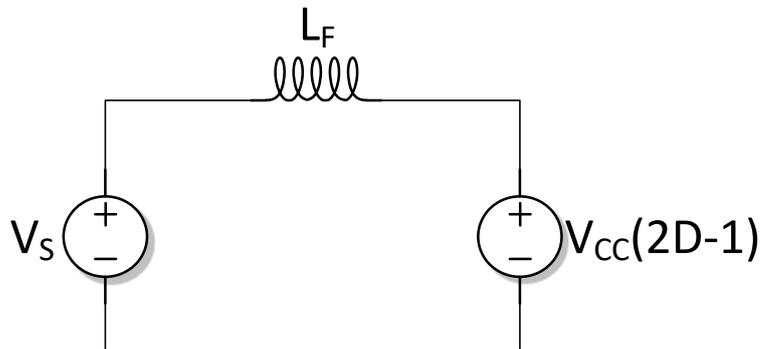
Resolvendo as integrais obtêm-se o valor da tensão V_{ab} para a modulação a dois níveis, de acordo com a equação (3.8).

$$V_{abmed} = \frac{1}{T_s} (V_{CC} \cdot DT_s - V_{CC}(1 - D)T_s) = V_{CC}(2D - 1) \quad (3.8)$$

Portanto, V_{abmed} representa o valor médio de V_{ab} para um período de comutação.

De acordo com a expressão a (3.6) e o valor de V_{ab} obtido pela equação (3.8) pode-se formar o modelo elétrico equivalente para o conversor em função da variável de controle "D". A figura 16 apresenta este modelo.

Figura 16 – Circuito elétrico equivalente.



Fonte: Do autor.

Aplicando a lei de Kirchhoff das tensões (LKT) no circuito elétrico equivalente da figura 16 obtêm-se as equações (3.9) e (3.10).

$$V_s + V_{LF} = V_{CC}(2D - 1) \rightarrow V_s + L_F \frac{di_F(t)}{dt} = V_{CC}(2D - 1) \quad (3.9)$$

Isolando V_s da expressão (3.9) encontra-se a equação (3.10):

$$V_s = V_{CC}(2D - 1) - L_F \frac{di_F(t)}{dt} \quad (3.10)$$

A função de transferência da tensão V_s em função da razão cíclica D é obtida aplicando-se uma perturbação destas duas grandezas ao sistema, de acordo com a expressão (3.11).

$$V_s + \Delta V_s = V_{CC}(2(D + \Delta D) - 1) - L_F \frac{di_F(t)}{dt} \quad (3.11)$$

Substituindo (3.10) em (3.11) tem-se a expressão (3.12).

$$V_{CC}(2D - 1) - L_F \frac{di_F(t)}{dt} + \Delta V_s = V_{CC}(2(D + \Delta D) - 1) - L_F \frac{di_F(t)}{dt} \quad (3.12)$$

Readequando a equação (3.12) obtém-se (3.13).

$$\Delta V_s = 2V_{CC} \cdot \Delta D \quad (3.13)$$

A função de transferência do inversor fonte de tensão é obtida isolando ΔV_s em relação a ΔD , de acordo com a equação (3.14).

$$G_{conv}(s) = \frac{\Delta V_s}{\Delta D} = 2V_{CC} \quad (3.14)$$

A próxima etapa neste processo de modelagem é encontrar a função de transferência que relaciona a corrente do indutor $I_L(t)$ com a variação de tensão ΔV_s .

Isolando a derivada da corrente da equação (3.10) tem-se a equação (3.15)

$$\frac{di_F(t)}{dt} = \frac{V_{CC}(2D - 1) - V_s}{L_F} \quad (3.15)$$

A função de transferência da corrente do filtro I_F em função da razão da tensão V_S é obtida aplicando-se uma perturbação destas duas grandezas ao sistema, de acordo com a equação (3.16), e que reescrita forma (3.17).

$$\frac{d[i_F(t) + \Delta i_F(t)]}{dt} = \frac{V_{CC}(2D - 1) - V_s + \Delta V_s}{L_F} \quad (3.16)$$

$$\frac{di_F(t)}{dt} + \frac{d\Delta i_F(t)}{dt} = \frac{V_{CC}(2D - 1) - V_s + \Delta V_s}{L_F} \quad (3.17)$$

Substituindo (3.15) em (3.17) tem-se (3.18).

$$\frac{d\Delta i_F(t)}{dt} = \frac{\Delta V_s}{L_F} \quad (3.18)$$

A transformada de Laplace transforma equações diferenciais do espaço real (tempo) em funções algébricas no plano complexo s . Aplicando a transformada de Laplace na função de transferência da corrente do filtro, de acordo com a equação (3.19).

$$\frac{sI_F(s)}{\Delta V(s)} = \frac{1}{L_F} \quad (3.19)$$

Readequando a equação (3.19) de forma que a função transferência seja expressa pela equação (3.20).

$$G_i(s) = \frac{I_F(s)}{\Delta V(s)} = \frac{1}{sL_F} \quad (3.20)$$

Neste capítulo foram vistos alguns tópicos importantes para projetar um filtro ativo paralelo, tais como: estrutura que será utilizada como FAP (VSI-FB), tipo de modulação empregada, modelagem do VSI para obtenção das funções de transferência da planta, além dos cálculos dos elementos passivos (capacitor e indutor) que fazem parte do estágio de potência do filtro.

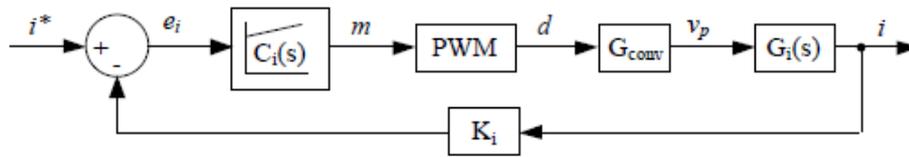
A próxima seção consistirá em uma das mais importantes deste trabalho, onde será desenvolvidas as malhas de corrente e de tensão, que são fundamentais para que o filtro ativo realize as compensações desejadas. Para o desenvolvimento das malhas de controle, os ganhos dos seus respectivos controladores deverão ser encontrados.

3.3 Projeto do Controlador Fonte de Corrente

3.3.1 Malha de Corrente

A malha de corrente tem a função de fazer com que a corrente drenada da rede elétrica siga uma referência amostrada da rede pelo sensor de tensão c.a.. Essa malha deve ser rápida o suficiente para compensar todo o conteúdo harmônico da corrente da carga. A função de transferência em malha aberta (FTMA) da corrente é composta pelo modelo da planta, pelo compensador de corrente e pelos ganhos associados do modulador PWM e do sensor de corrente (BRANDÃO, 2013). A estrutura de controle da malha de controle pode ser vista na figura 17.

Figura 17 – Diagrama de blocos da malha de corrente.



Fonte: Adaptado de (BRANDÃO, 2013).

Os blocos no domínio S, apresentados na figura 17, são definidos como:

- $C_i(s)$ é a função de transferência do controlador;
- PWM - o ganho que representa o modulador PWM;
- $G_{conv}(s)$ - função de transferência entre a tensão pulsada e o duty cycle:

$$G_{conv}(s) = \frac{v_p(s)}{d(s)} = 2 \cdot V_{CC} \quad (3.21)$$

- $G_i(s)$ - função de transferência entre a corrente e a tensão pulsada nos terminais do inversor:

$$G_i(s) = \frac{i(s)}{v_p(s)} = \frac{1}{sL_F} \quad (3.22)$$

- K_i é o ganho do sensor de corrente;

Para encontrar os ganhos do controlador, é necessário obter a função de transferência da planta em malha aberta, sem o controlador (BRANDÃO, 2013). A equação (3.23) representa o cálculo da função de transferência em malha aberta (FTMA).

$$FTMA = PWM \cdot G_{conv}(s) \cdot G_i(s) \cdot K_i \quad (3.23)$$

Substituindo na equação (3.23) as funções de transferência já encontradas neste trabalho, temos a equação (3.24).

$$FTMA = PWM \cdot 2 \cdot V_{CC} \cdot \frac{1}{sL_F} \cdot K_i \quad (3.24)$$

O cálculo da função de transferência da planta será realizada de acordo com os dados de projeto fornecidos abaixo:

- frequência de chaveamento entre 10 – 20 kHz;
- frequência de corte em 1/10 da frequência de chaveamento;
- margem de fase entre 50 – 70°;
- tensão de barramento c.c., $V_{CC} = 400V$;
- ganho do sensor de corrente, $K_i = \frac{1}{35}$
- ganho do modulador, $PWM = 0.2$;
- indutância do projeto, $L = 1.5 \text{ mH}$.

Tendo os valores do ganho do modulador e do sensor de corrente, da indutância e da tensão de barramento, pode-se encontrar a FT da planta. Substituindo estes valores na equação (3.24) obtêm-se a equação (3.25).

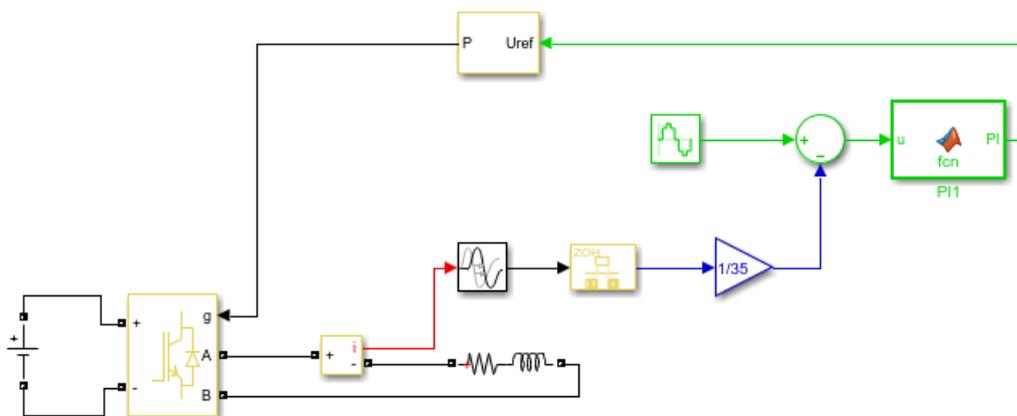
$$G(s) = 0.2 \cdot 2 \cdot 400 \cdot \frac{1}{0.0015s} \cdot \frac{1}{35} = \frac{4.571}{0.0015s} \quad (3.25)$$

Após encontrar $G(s)$, o próximo passo será obter os ganhos do controlador PI da malha de corrente. Para isso, será utilizado a ferramenta *Sisotool* do software Matlab. Adotando uma frequência de chaveamento de 12 kHz, uma frequência de corte de 1.2 kHz

e uma margem de fase de 60° , foram encontrados os seguintes ganhos para o controlador da malha de corrente: $K_p = 2.14$ e $K_i = 9.3208 \cdot 10^3$.

Após obter os ganhos do controlador, será implementado o circuito responsável pela síntese de corrente. A principal função do circuito é fazer com que a corrente de saída siga a forma de onda da corrente de referência. A figura 18 apresenta o circuito referido.

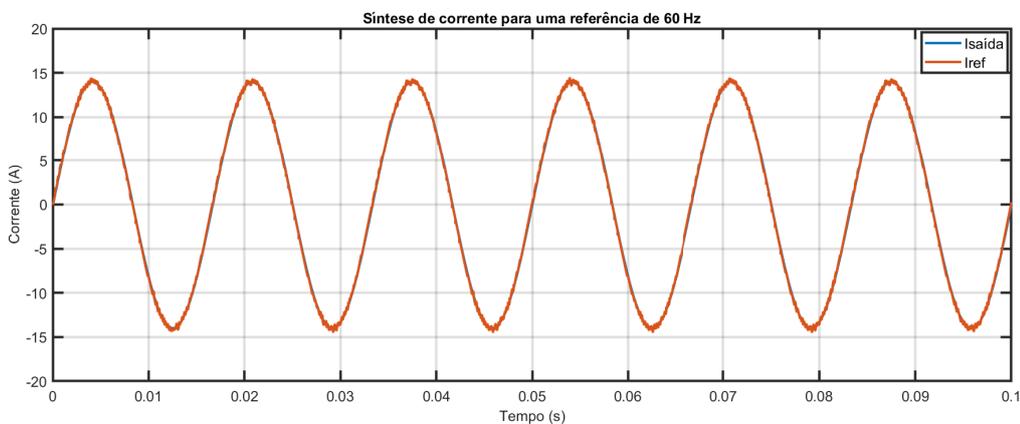
Figura 18 – Circuito implementado para síntese de corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos para esta simulação serão apresentados nas figuras 19, 20 e 21.

Figura 19 – Síntese de corrente de 60 Hz com controlador PI.



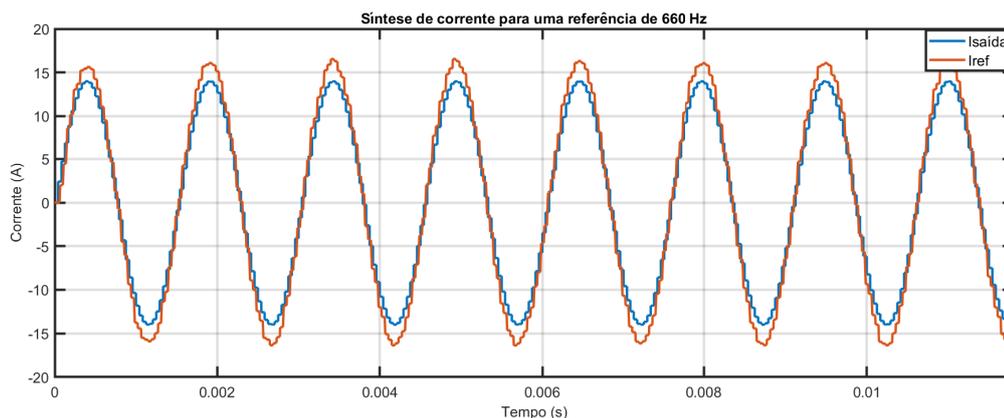
Fonte: Do autor.

Figura 20 – Síntese de corrente de 300 Hz com controlador PI.



Fonte: Do autor.

Figura 21 – Síntese de corrente de 660 Hz com controlador PI.

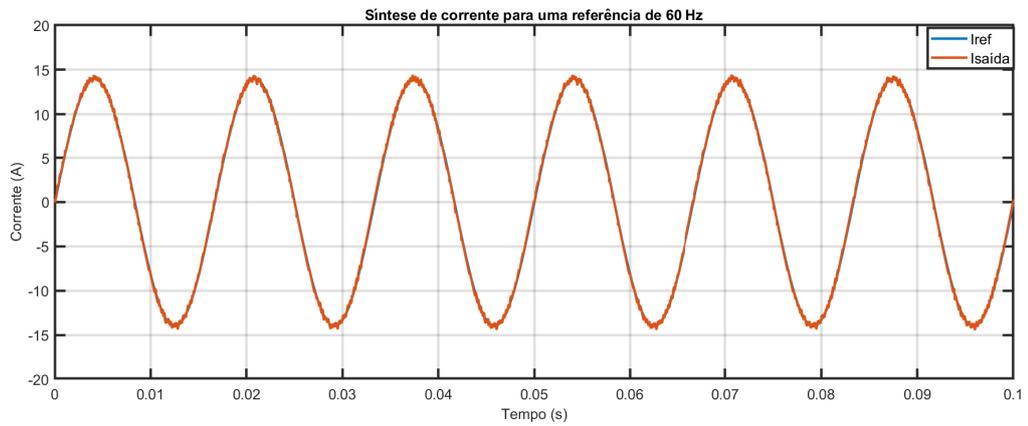


Fonte: Do autor.

Analisando as figuras é possível verificar a baixa performance do PI em frequências mais altas. Uma solução para o problema descrito é a substituição de um controlador PI por um controlador PI ressonante.

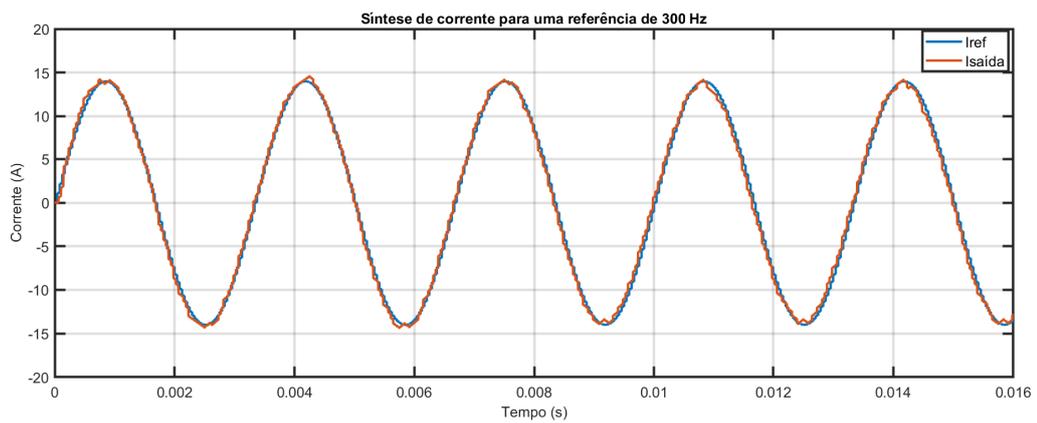
Para o mesmo circuito implementado foi projetado um controlador PI ressonante afim de melhorar o desempenho para altas frequências. O controlador PI ressonante é projetado utilizando o mesmo ganho do controlador PI. Esse tipo de controlador tem a capacidade de elevar o ganho nas frequências de ressonância. Os resultados obtidos para a síntese de corrente com controlador PI ressonante podem ser conferidos nas figuras 22, 23 e 24.

Figura 22 – Síntese de corrente de 60 Hz com controlador PI ressonante.



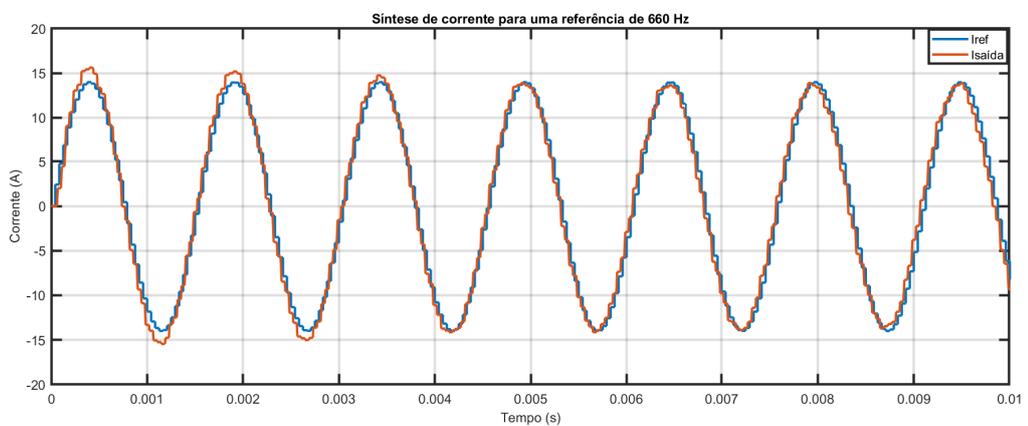
Fonte: Do autor.

Figura 23 – Síntese de corrente de 300 Hz com controlador PI ressonante.



Fonte: Do autor.

Figura 24 – Síntese de corrente de 660 Hz com controlador PI ressonante.



Fonte: Do autor.

De acordo com as figuras 22, 23 e 24, com a utilização de um controlador PI ressonante a performance é melhorada, já que ele foi capaz de manter com que a corrente de saída seguisse uma referência, mesmo em frequências mais altas, como apresentado na figura 24.

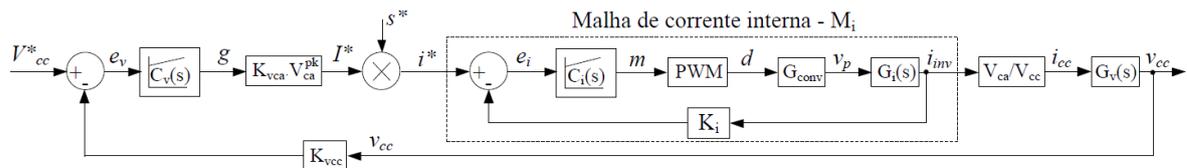
3.4 Malha de Tensão

A malha de tensão é responsável por manter constante a tensão no barramento c.c. do filtro ativo. O controlador de tensão funciona atuando na amplitude da corrente de referência do filtro de modo que, assim, ele determina o fluxo de potência ativa no sistema e conseqüentemente no FAP (LINDEKE, 2003).

A malha de tensão deve ser muito lenta, pois ela tem como função atuar na amplitude da corrente senoidal que é drenada da rede e, portanto, se esta malha for rápida ela fará com que a corrente drenada da rede fique distorcida devido ao surgimento de picos de corrente em diferentes amplitudes e de distorções na corrente de referência (LINDEKE, 2003).

A estrutura de controle da malha de tensão pode ser representada pela figura 25 .

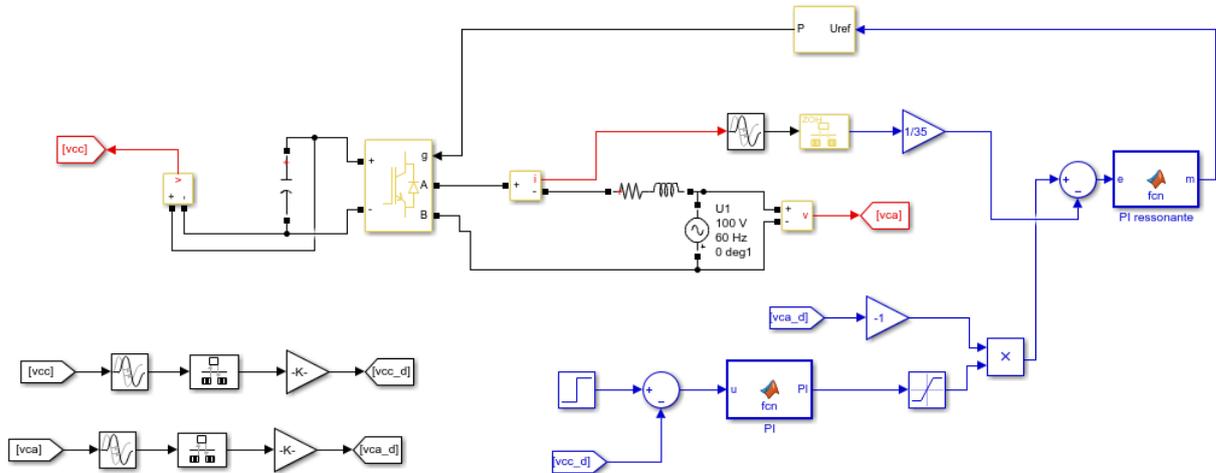
Figura 25 – Malha de tensão.



Fonte: Adaptado de (BRANDÃO, 2013).

Ao implementar o circuito no Matlab foi retirada a fonte c.c. do barramento contínuo do conversor c.c.-c.a, que foi substituída por um capacitor ($C = 4.7mF$), pois o FAP praticamente não processa potência ativa. A malha de corrente continuará trabalhando com um controlador PI ressonante, já para malha de tensão que têm um dinâmica mais lenta, será usado um controlador PI convencional. A figura 26 mostra o circuito elétrico desenvolvido.

Figura 26 – Circuito implementado com malha de corrente e tensão adicionadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O circuito da figura 26 é denominado de retificador controlado, e tem como objetivo principal testar e avaliar o projeto da malha de tensão do barramento c.c., a qual será a malha externa e mais lenta do filtro ativo de potência.

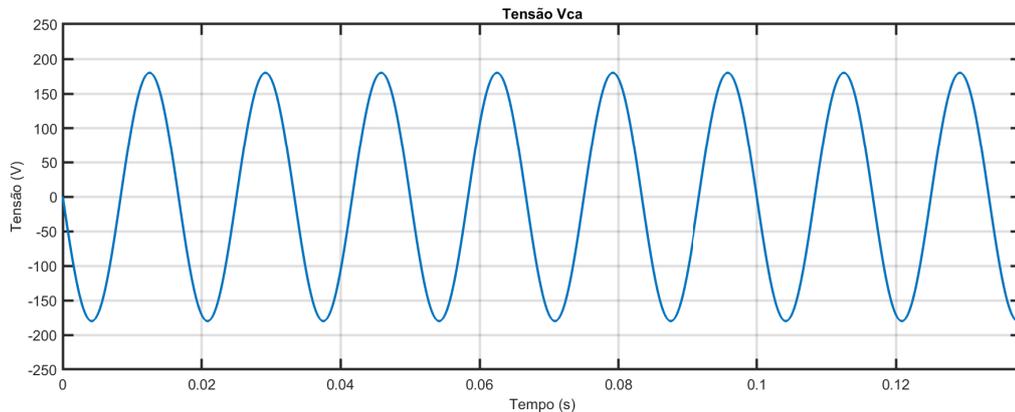
Para obter os ganhos do controlador da malha de tensão alguns dados foram fornecidos.

- Função de transferência da planta $G_{Planta} = \frac{1}{0,48s}$;
- Frequência de corte de 1/10 da frequência de corte da malha de corrente;

Com os dados acima fornecidos, foram encontrados os ganhos do controlador da malha de tensão. Os valores são um $K_p = 3,45 \cdot 10^3$ e um $K_i = 1,5 \cdot 10^6$.

Após obter os ganhos do controlador pode-se partir para o processo de simulação. Nesta etapa foi monitorada a tensão c.a. na saída do conversor com a rede. A figura 27 mostra o resultado.

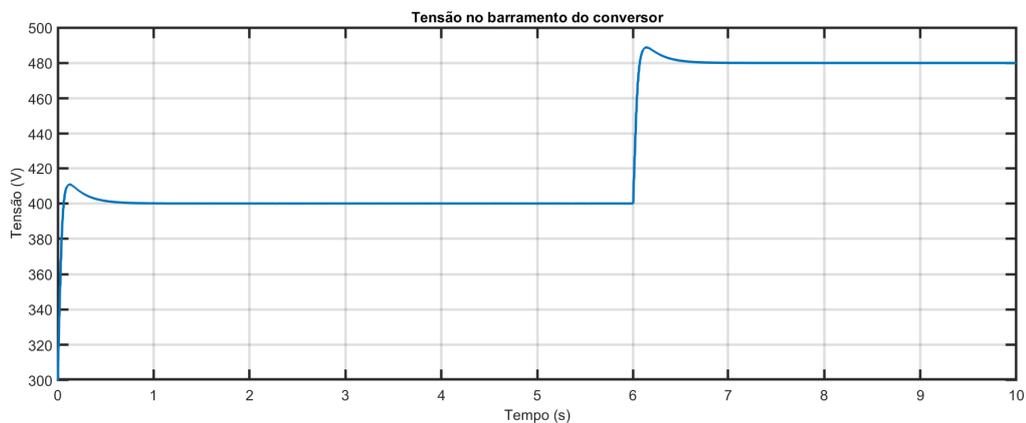
Figura 27 – Tensão na saída do conversor.



Fonte: Do autor.

Para verificar se a tensão no capacitor do barramento c.c. segue uma nova referência foi adicionado um degrau na referência da tensão. O resultado obtido está na figura 28.

Figura 28 – Tensão no barramento do conversor.



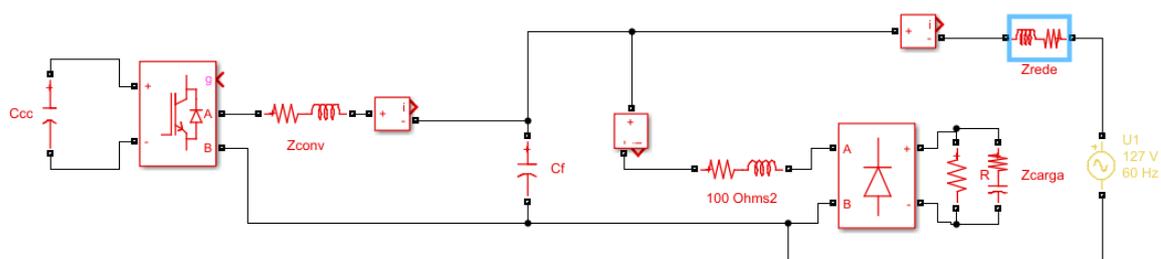
Fonte: Do autor.

Verificando o comportamento do sinal na figura 28 é nítido que uma nova referência foi seguida a partir de um degrau aplicado, demonstrando que a malha de tensão está funcionando de forma adequada. Além disso, é visto na figura que a tensão demora quase 1 segundo para atingir o regime permanente, enquanto a corrente demora cerca de 0,1 segundos. A partir destes resultados, demonstra-se que a malha de tensão tem uma resposta de aproximadamente 10 vezes mais lenta em relação a malha de corrente, o que coincide com a teoria estudada.

3.5 Gerador Distribuído

Com a finalização do projeto das malhas de tensão e de corrente para compensação seletiva, pode-se partir para o desenvolvimento do gerador distribuído multifuncional. O circuito implementado pode ser visto na figura 29.

Figura 29 – Circuito implementado do gerador distribuído.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela abaixo apresenta os valores dos componentes utilizados para implementação do circuito do gerador distribuído. Onde Z_{conv} é a impedância de saída do conversor, C_{CC} é o capacitor do barramento, C_F é o capacitor de saída, Z_{Rede} é a impedância da rede e R e Z_{Carga} são os valores da resistência e impedância da carga.

Tabela 1 – Valores dos componentes do projeto.

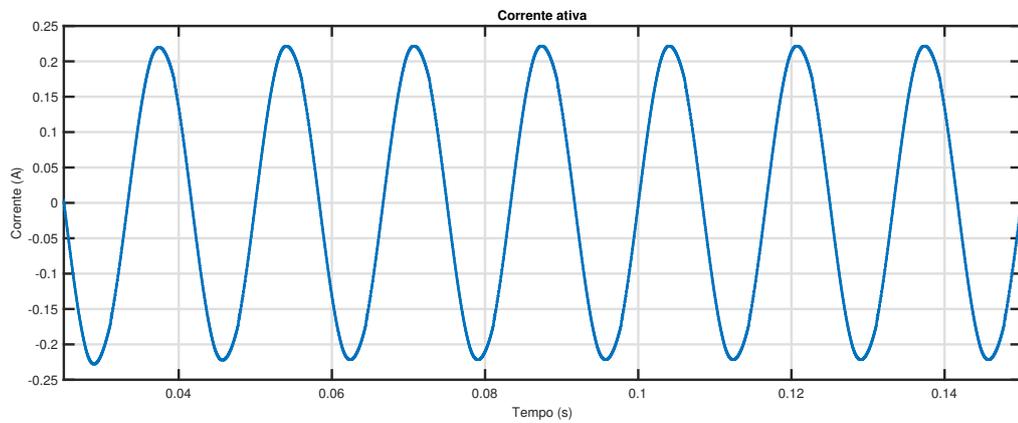
Componentes	Valor
Z_{conv}	$0.05 + j0.0015$
C_{CC}	$4.7\mu F$
C_F	$4.2\mu F$
Z_{Rede}	$0.12 + j60\mu$
R	40
Z_{Carga}	$0.002 + j0.002$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para realizar a compensações seletiva, torna-se necessário a obtenção das componentes ortogonais da corrente. Portanto, após implementar o circuito do gerador distribuído, o mesmo foi simulado com o objetivo de apresentar as sub-componentes da corrente,

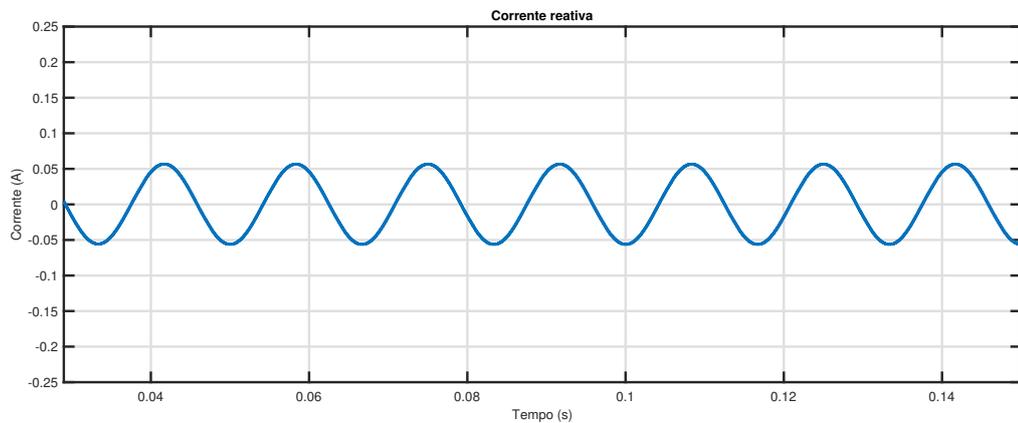
extraídas de acordo com a teoria da potência conservativa. A figura 30 apresenta a corrente ativa, responsável pela transferência de potência ativa da fonte para a carga. Já a figura 31 apresenta a corrente reativa, responsável pela transmissão da energia reativa, a qual não realiza trabalho. A figura 32 mostra a sub-componente não ativa, que é a porção excedente da corrente ativa. Já a figura 33 mostra a corrente void, que não é capaz de transmitir potência ativa, nem energia reativa. Esta sub-componente representa as correntes harmônicas produzidas pela carga e as não linearidades do circuito.

Figura 30 – Corrente ativa.



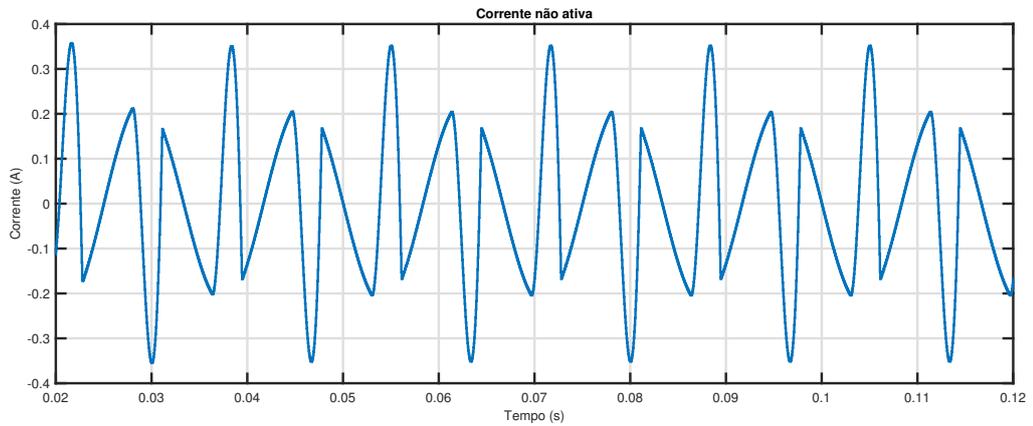
Fonte: Do autor.

Figura 31 – Corrente reativa.



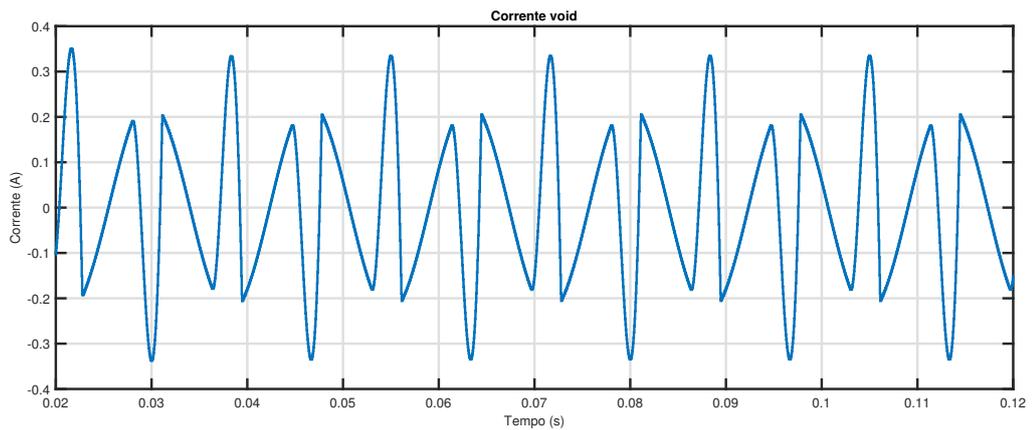
Fonte: Do autor.

Figura 32 – Corrente não ativa.



Fonte: Do autor.

Figura 33 – Corrente void.



Fonte: Do autor.

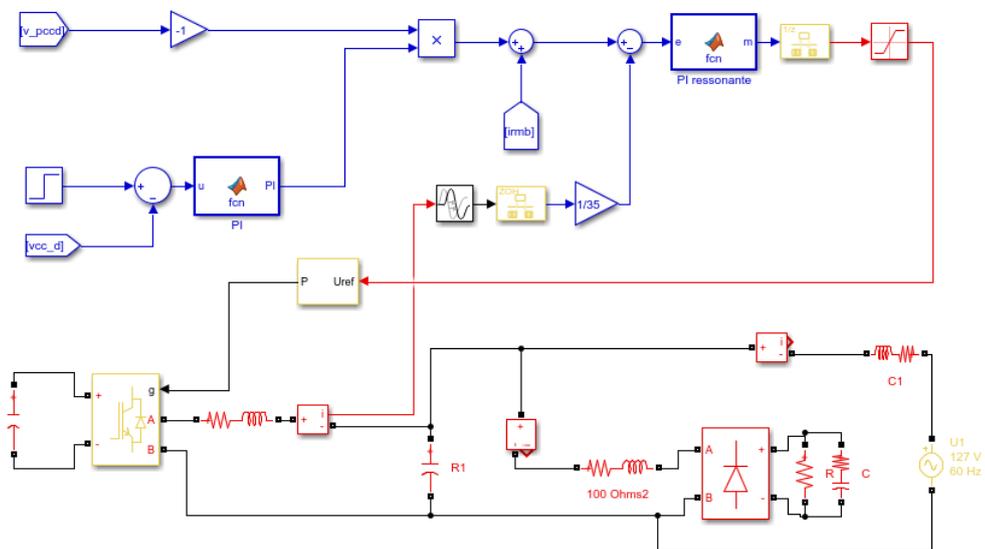
As figuras 30, 31, 32 e 33 mostraram todas as sub-componentes da corrente de carga decompostas pela teoria da potência conservativa. Posteriormente, serão apresentados os resultados finais da simulação, aplicando as correntes reativa, não ativa e void para compensação dos harmônicos e reativos, oriundos da conexão de cargas não lineares.

4 Resultados

As simulações que serão apresentadas foram realizadas através do software Matlab/Simulink, onde será simulado um gerador distribuído conectado à rede elétrica, com um FAP monofásico que realizará de forma seletiva a compensação de harmônicos e reativos gerados por cargas não lineares monofásicas. A utilização deste software se mostrou eficiente, tendo como base uma análise qualitativa e quantitativa de toda a estrutura em funcionamento.

A figura 34 apresenta o circuito implementado para obtenção dos resultados. Em relação ao circuito da figura 29, neste circuito acrescentou-se as malhas de corrente e tensão, responsáveis pelo controle do FAP.

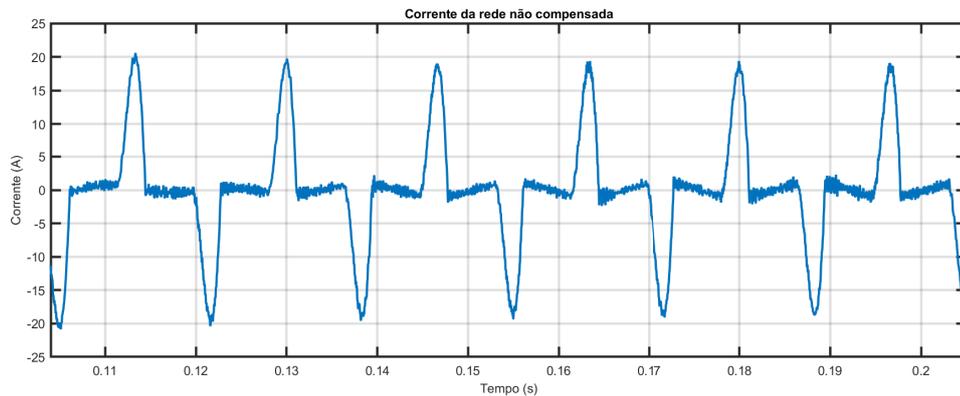
Figura 34 – Circuito implementado do gerador distribuído multifuncional.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como já discutido, este trabalho se propõe aplicar um gerador distribuído na rede elétrica capaz de compensar distúrbios na corrente de forma seletiva. Inicialmente, para efeito de comparação, a figura 35 apresentará a corrente da rede sem nenhuma compensação.

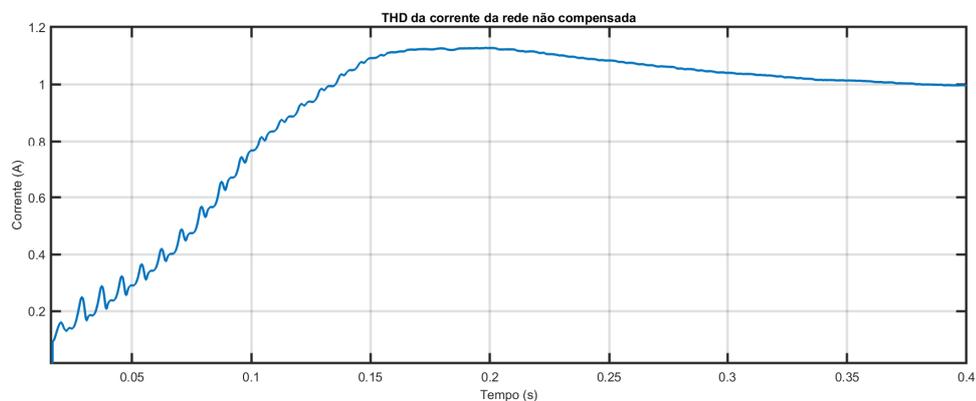
Figura 35 – Corrente da rede sem compensação.



Fonte: Do autor.

Para uma melhor análise, a figura 36 apresenta a distorção harmônica da corrente da rede sem compensação.

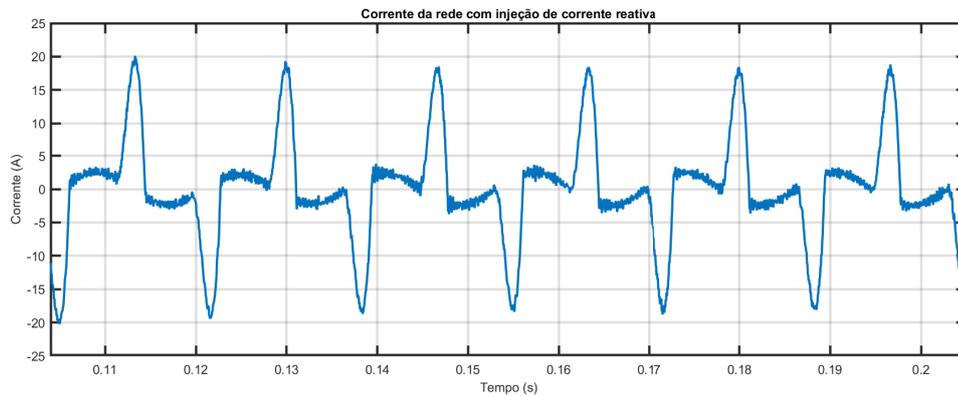
Figura 36 – Distorção da corrente da rede não compensada.



Fonte: Do autor.

Na figura 35, a corrente da rede não compensada apresenta alto conteúdo harmônico, além de conter reativos. Para solução destes problemas, será aplicado pela estrutura de controle do FAP as correntes reativa, não ativa e void para compensação dos distúrbios observados. Inicialmente, será aplicada uma corrente reativa, o resultado pode ser visto na figura 37.

Figura 37 – Corrente da rede a partir de uma injeção de corrente reativa.

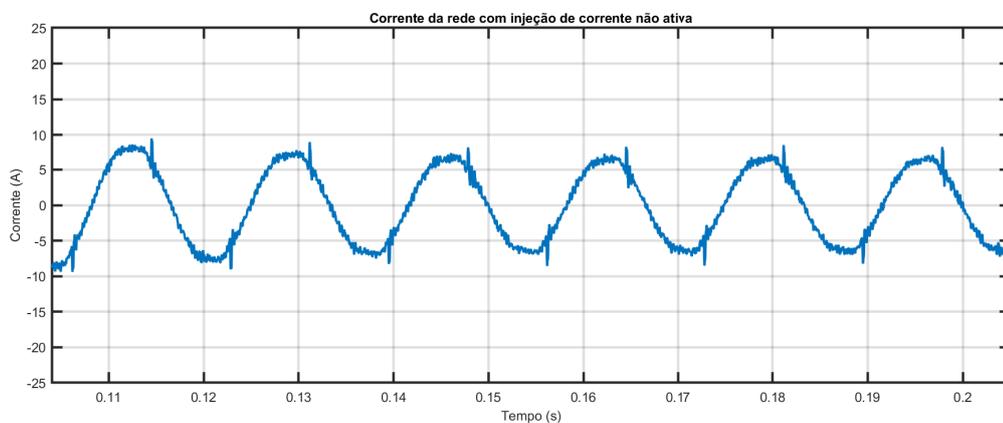


Fonte: Do autor.

Comparando as figuras 35 e 37 observa-se que a injeção de uma corrente reativa por parte do filtro foi capaz de compensar parte dos reativos contidos na corrente da rede.

Em seguida será aplicada uma corrente não ativa, onde o resultado pode ser visto na figura 38.

Figura 38 – Corrente da rede a partir de uma injeção de corrente não ativa.

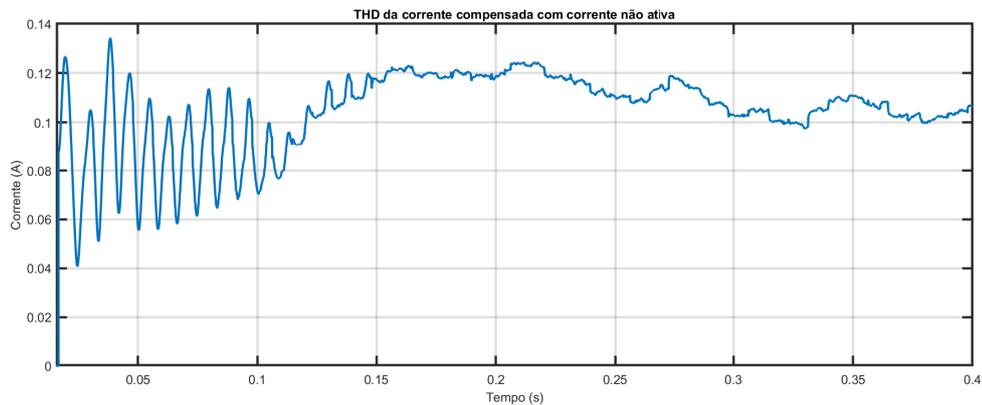


Fonte: Do autor.

De acordo com a figura 38, a injeção de corrente não ativa compensou de forma satisfatória os harmônicos e reativos contidos na corrente da rede. Isso já era esperado, pois a corrente não ativa é uma porção excedente da corrente ativa, o que a torna viável para a compensação de qualquer distúrbio não ativo.

A figura 39 apresenta o nível de distorção harmônica para a corrente da rede compensada a partir da injeção de corrente não ativa.

Figura 39 – Distorção da corrente da rede compensada.

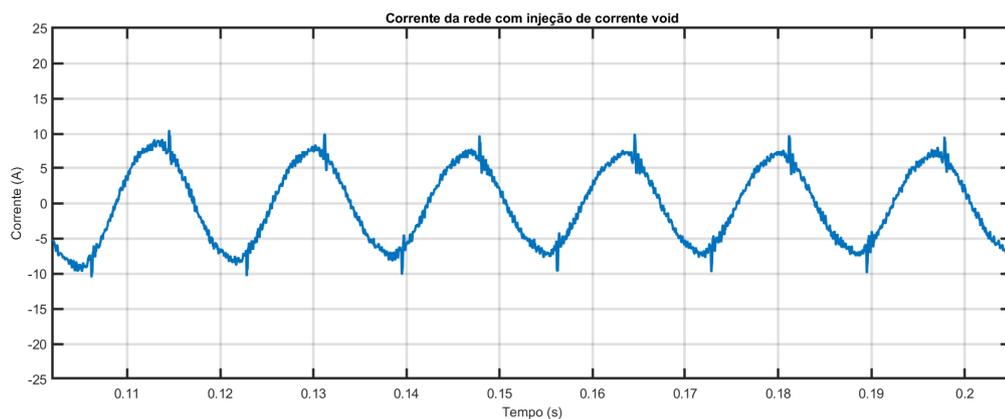


Fonte: Do autor.

Analisando as figuras 36 e 39 pode-se verificar que, considerando quando a onda entra em regime permanente, o THD da corrente compensada é aproximadamente 10 vezes menor do que o da corrente não compensada, comprovando que o FAP conseguiu atenuar uma boa parte do conteúdo harmônico.

Por fim, aplicou-se a corrente void para realizar a compensação dos harmônicos na corrente da rede. O resultado pode ser visto na figura 40.

Figura 40 – Corrente da rede a partir de uma injeção de corrente void.



Fonte: Do autor.

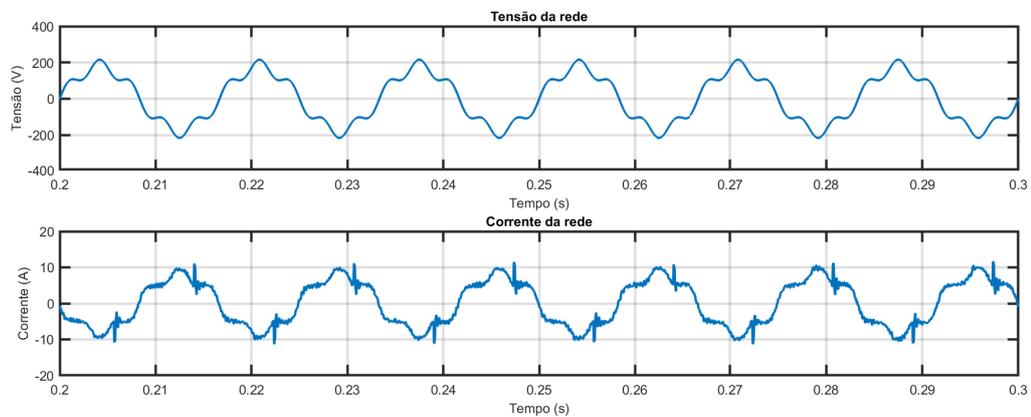
Analisando a forma de onda da corrente de rede na figura 40, percebe-se que a mesma apresenta comportamento senoidal, o que comprova que houve a atenuação do conteúdo harmônico contido na corrente.

Após verificar que a compensação seletiva funcionou-se como o esperado, agora

será testado o funcionamento da síntese de carga resistiva. Neste modo de funcionamento, a forma de onda da corrente da rede deve seguir a forma de onda da tensão.

Para verificar o funcionamento da síntese resistiva basta incluir uma distorção de 20% da tensão da rede com frequência de 300Hz e aplicar corrente não ativa como referência para o FAP. Isso foi implementado no circuito através da adição de um bloco de fonte de tensão em série com o bloco já existente. A figura 41 mostra o resultado desta etapa do projeto.

Figura 41 – Tensão e corrente da rede para uma síntese resistiva.

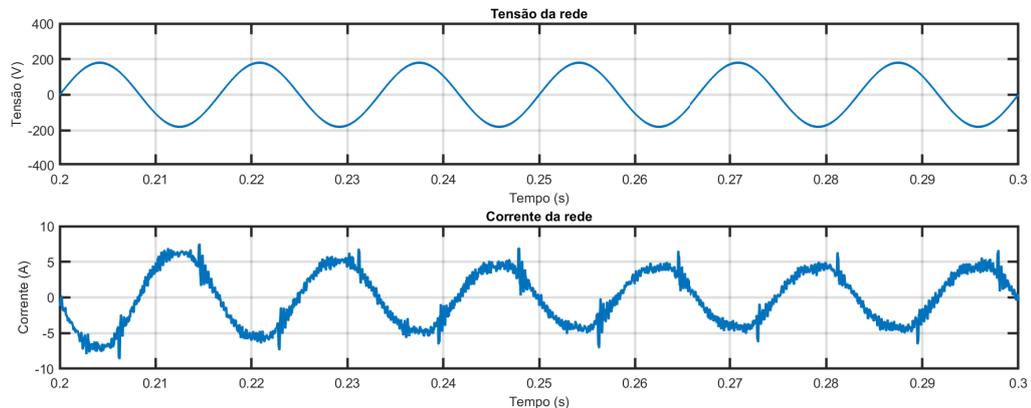


Fonte: Do autor.

Como pode ser visto na figura 41 a forma de onda da corrente seguiu a forma de onda da tensão da rede, além de ambas estarem em fase. Portanto, pode-se concluir que o filtro funcionou bem para o método de síntese resistiva. Uma desvantagem deste método é que se a forma de onda da tensão apresentar deformações, a forma de onda da corrente apresentará também, como na figura abordada.

Por fim, será avaliado a síntese de corrente senoidal. Para isso, basta usar apenas a componente fundamental de tensão como entrada para o cálculo da TPC, e aplicar corrente não ativa no sistema de compensação. O resultado obtido pode ser visto na figura 42.

Figura 42 – Tensão e corrente da rede para uma síntese senoidal.



Fonte: Do autor.

Analisando a figura 42, pode ser visto que o filtro ativo reduziu os distúrbios na corrente da rede provocados pela carga não linear. Diferentemente do caso anterior, neste caso, mesmo que as tensões do sistema não sejam senoidais e equilibradas o filtro ativo é capaz de compensar as distorções de corrente, fazendo com que a corrente da rede tenha forma senoidal.

Em relação aos dois métodos analisados, pode-se concluir que em casos onde a tensão apresente deformações na sua forma de onda, será mais interessante adotar a síntese de corrente senoidal, já que esta proporcionará uma corrente de rede com menor conteúdo harmônico.

4.1 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os resultados do FAP atuando na compensação de harmônicos e reativos produzidos por cargas não lineares. O método utilizado para gerar as referências de corrente e fazer as devidas compensações foi o método baseado da decomposição da corrente em componentes ortogonais, de acordo com a teoria da potência conservativa.

Com base nos resultados obtidos, e com a teoria apresentada nos capítulos anteriores, pode-se concluir que as simulações apresentaram resultados condizentes com o que foi proposto, sendo que a aplicação das correntes decompostas pela teoria da potência conservativa mostraram-se eficazes na compensação dos harmônicos e reativos.

5 Considerações Finais

Nesta monografia foi proposta o estudo, a análise e a implementação de um gerador distribuído multifuncional com o objetivo de compensar harmônicos e reativos na corrente elétrica, através de um filtro ativo paralelo. O filtro ativo paralelo mostrou-se uma alternativa interessante para atenuar os efeitos de cargas não lineares e dos distúrbios elétricos presentes na corrente. Com a aplicação de um sistema de controle eficiente, através das malhas de tensão e corrente, foi possível compensar os efeitos da carga não linear através de uma referência de corrente calculada através da teoria da potência conservativa.

Pode-se concluir que para que o filtro proposto alcance seus objetivos é fundamental o conhecimento dos distúrbios a serem compensados, por isso esta revisão teórica foi de extrema importância para o desenvolvimento da monografia.

Com o auxílio de uma ferramenta computacional foi possível determinar os ganhos do controlador PI ressonante, para malha de corrente, e os ganhos do controlador PI para a malha de tensão do barramento c.c..

De acordo com os resultados obtidos, o controle do FAP funcionou adequadamente e os distúrbios foram compensados satisfatoriamente.

A decisão de utilizar a teoria da potência conservativa para gerar as referências de corrente para uma compensação seletiva dos distúrbios propostos se mostrou uma escolha acertada, pois através deste método possibilita-se que o sistema seja mais flexível, principalmente em condições em que não é possível compensar todos os distúrbios contidos na corrente.

Por fim, pode-se concluir que a maior contribuição deste trabalho foi na melhoria da qualidade de energia elétrica. Através da compensação seletiva tornou-se possível escolher o distúrbio a ser compensado, melhorando a eficiência do filtro, e por consequência, os resultados obtidos são satisfatórios para a proposta desenvolvida.

Referências

- ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. Distributed generation: a definition. *Electric power systems research*, Elsevier, v. 57, n. 3, p. 195–204, 2001. 14
- Antunes, H. et al. A new configuration for a grid forming converter in ac islanded microgrid. In: *PCIM Europe 2017; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–8. 17
- ANTUNES, H. M. A. *Conversor Multifuncional Reconfigurável e Tolerante a Falhas para Microrredes de Energia Elétrica*. Tese (Doutorado) — Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2018. 16
- ARAÚJO, L. S. de et al. Controle droop para conversor de suporte conectado a bateria em microrrede monofásica de baixa tensão. *VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 2016. 19
- ARBEX, C. J. N. *Aplicação da teoria de potência conservativa para compensação de distúrbios de corrente*. Dissertação (Mestrado) — Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Bauru, Brasil, 2011. 26, 31
- Arrillaga, J.; Bollen, M. H. J.; Watson, N. R. Power quality following deregulation. *Proceedings of the IEEE*, v. 88, n. 2, p. 246–261, Feb 2000. 20
- AZEVEDO, C. C. d. *Controle Adaptativo Robusto para Filtros Ativos de Potência Paralelo*. Tese (Doutorado) — Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2011. 26, 27, 28, 29
- AZEVEDO, G. M. d. S. *Controle e operação de conversores em microrredes*. Tese (Doutorado) — Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Recife, Brasil, 2011. 9
- Azevedo, G. M. S. et al. A control of microgrid power converter with smooth transient response during the change of connection mode. In: *2013 Brazilian Power Electronics Conference*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1008–1015. 18
- Bhattacharya, S.; Divan, D. Active filter solutions for utility interface of industrial loads. In: *Proceedings of International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth*. [S.l.: s.n.], 1996. v. 2, p. 1078–1084 vol.2. 27
- BOLLEN, M. H. Understanding power quality problems. In: *Voltage sags and Interruptions*. [S.l.]: IEEE press, 2000. 10
- BRANDÃO, D. I. *Sistema de geração fotovoltaico multifuncional*. Dissertação (Mestrado) — Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Bauru, Brasil, 2013. 31, 32, 35, 36, 41, 42, 46
- DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. Avaliação da qualidade da energia elétrica. *available in <http://www.dsce.fee.unicamp.br/antenor/pdf/qualidade/b5.pdf>*, 2017. 20, 21, 22, 23, 25

- Dixon, J. et al. Reactive power compensation technologies: State-of-the-art review. *Proceedings of the IEEE*, v. 93, n. 12, p. 2144–2164, Dec 2005. 24, 25
- EICHKOFF, H. S. Análise da geração distribuída para o controle de tensão e potência reativa em sistemas modernos de distribuição. Universidade Federal do Pampa, 2018. 10
- FENILI, M. d. P. *Estudo e Implementação de um Filtro Ativo Paralelo Monofásico de 8KVA*. Dissertação (Mestrado) — Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2007. 29, 30, 36, 37, 38
- FERREIRA, C.; SIMONETTI, D.; SOUSA, G. Estudo da compensação harmônica na aplicação de cicloconversores em uma planta siderúrgica. In: *Anais do VII Congresso Brasileiro de Qualidade de Energia, Santos-SP*. [S.l.: s.n.], 2007. 22
- Filho, E. M. V. et al. Bidirectional converter for distributed generation with grid-supporting capacity. In: *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6. 18
- FILHO, R. D.; BRAGA, M.; SILVA, S. Aplicação de filtros ativos e passivos de potência: Estudo de caso. In: *VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais, Poços de Caldas*. [S.l.: s.n.], 2008. 27
- Gonçalves, A. F. Q. et al. Análise de conversores cc-ca conectados em redes de distribuição e utilizados em sistemas de geração distribuída. In: *2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON 2010*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–6. 9
- IEEE. Ieee recommended practice for monitoring electric power quality. *IEEE Std 1159-1995*, p. 1–80, Nov 1995. 20
- IEEE. Application guide for ieee std 1547(tm), ieee standard for interconnecting distributed resources with electric power systems. *IEEE Std 1547.2-2008*, p. 1–217, April 2009. 14
- Kim, I.; Harley, R. G.; Regassa, R. The investigation of the maximum effect of the volt/var control of distributed generation on voltage regulation. In: *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6. 10
- LIMONGI, L. R. *Filtros Ativos de Potência para Compensação de Harmônicos de Corrente e Potência Reativa*. Dissertação (Mestrado) — Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 2006. 26, 27, 28
- LINDEKE, D. *Projeto de um Filtro Ativo Paralelo de 1kVA Usando Técnicas de Controle Analógico e Digital*. Dissertação (Mestrado) — Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2003. 46
- LOPES, Y.; FERNANDES, N. C.; MUCHALUAT-SAADE, D. C. Geração distribuída de energia: Desafios e perspectivas em redes de comunicação. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, v. 33, 2015. 13
- Majumder, R. Reactive power compensation in single-phase operation of microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 60, n. 4, p. 1403–1416, April 2013. 24

- MODESTO, R. A. *Método de compensação ativa de potência aplicado a um filtro ativo paralelo monofásico*. Dissertação (Mestrado) — Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Brasil, 2007. 23
- PEPERMANS, G. et al. Distributed generation: definition, benefits and issues. *Energy policy*, Elsevier, v. 33, n. 6, p. 787–798, 2005. 9
- Phipps, J. K.; Nelson, J. P.; Sen, P. K. Power quality and harmonic distortion on distribution systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 30, n. 2, p. 476–484, March 1994. 21
- Prodanovic, M. et al. Harmonic and reactive power compensation as ancillary services in inverter-based distributed generation. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 1, n. 3, p. 432–438, May 2007. 11
- Rocabert, J. et al. Control of power converters in ac microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 27, n. 11, p. 4734–4749, Nov 2012. 15, 16, 17, 18, 19
- ROCHA, J. P. M. *Compensação de harmônicos como serviço ancilar em geração distribuída*. Universidade Federal da Paraíba, 2017. 10
- RODRIGUES, A. M. *Influência da distorção harmônica e de desequilíbrios em medidores de energia elétrica ativa*. *Trabalho de conclusão de curso—Universidade Federal do Paraná-2009*, 2009. 22
- Routimo, M.; Salo, M.; Tuusa, H. Comparison of voltage-source and current-source shunt active power filters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 22, n. 2, p. 636–643, March 2007. 27
- SANTOS, F. A.; SANTOS, F. M. *Geração distribuída versus centralizada*. m, Instituto Politécnico de Viseu, 2008. 14
- SCHWEER, A.; PLANNING, S. C. P. S.; SYSTEMS, D. I. C. on L. H. V. E. *Impact of increasing contribution of dispersed generation on the power system*. [S.l.]: Cigré, 1999. 14
- Singh, B.; Al-Haddad, K.; Chandra, A. A review of active filters for power quality improvement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 46, n. 5, p. 960–971, Oct 1999. 25
- TEIXEIRA, D. Â. *Análise das distorções harmônicas: Estudo de caso de um sistema industrial*. Dissertação (Mestrado) — Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2009. 23
- TURKSON, J.; WOHLGEMUTH, N. Power sector reform and distributed generation in sub-saharan africa. *Energy Policy*, Elsevier, v. 29, n. 2, p. 135–145, 2001. 14
- ZHANG, Z.; CHEN, W.; ZHANG, Z. A new seamless transfer control strategy of the microgrid. *The Scientific World Journal*, Hindawi, v. 2014, 2014. 18