

ALEXANDRE FORMOSO DELSIN

**SIMULAÇÃO E CONTROLE DE SISTEMA DE POTÊNCIA TRIFÁSICO COM FILTRO ATIVO
DE HARMÔNICAS BASEADO NA TEORIA DOS VETORES ESPACIAIS**

Guaratinguetá

2017

ALEXANDRE FORMOSO DELSIN

**SIMULAÇÃO E CONTROLE DE SISTEMA DE POTÊNCIA TRIFÁSICO COM FILTRO ATIVO
DE HARMÔNICAS BASEADO NA TEORIA DOS VETORES ESPACIAIS**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para a obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Ribeiro Filadelfo

Guaratinguetá

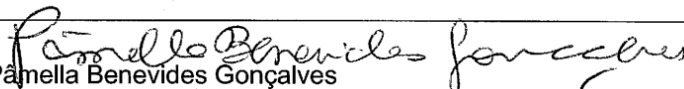
2017

D365s Delsin, Alexandre Formoso
Simulação e controle de sistema de potência trifásico com filtro ativo de harmônicas baseado na teoria dos vetores espaciais / Alexandre Formoso Delsin – Guaratinguetá, 2017.
44 f : il.
Bibliografia: f. 44

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientador: Prof. Dr. Fernando Ribeiro Filadelfo
Coorientador: Prof. Dr. Leonardo Mesquita

1. Filtros eletricos ativos 2. Controle vetorial 3. Análise harmônica. I.
Título

CDU 621.372.54


Pâmella Benevides Gonçalves

Bibliotecária CRB/8: 9203

ALEXANDRE FORMOSO DELSIN

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
Coordenador


BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. FERNANDO RIBEIRO FILADELFO
Orientador – UNESP/FEG



Prof. Dr. SAMUEL E. DE LUCENA
UNESP/FEG



Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
UNESP/FEG

Dezembro de 2017

RESUMO

Cargas não lineares geram componentes harmônicas de tensão e corrente e afetam outros consumidores conectados à mesma rede. Nos últimos anos, um aumento sem precedentes do número de cargas não lineares conectadas a rede, em detrimento da qualidade de energia, ocasionou a busca por soluções financeiramente viáveis para o problema. Filtros ativos são considerados a melhor alternativa para compensação das correntes harmônicas injetadas na rede por uma carga não linear. Eles possuem a capacidade de compensar harmônicas de diversas ordens, sem ser afetados por grandes mudanças nas características da rede de distribuição, eliminando o risco de ressonância entre o filtro e a impedância da rede. O presente trabalho tem como objetivo estudar, projetar e simular um filtro ativo trifásico de potência paralelo. O filtro paralelo implementado pode ser dividido com três subcircuitos principais: o circuito gerador de correntes de referência, o circuito modulador PWM e o circuito inversor que é conectado à rede por meio de indutâncias de acoplamento. Para gerar as correntes de referência, foi utilizada uma variação do algoritmo de quadro de referência síncrona (em inglês *Synchronous Reference Frame Algorithm*) proposto por Bhattacharaya e Divan (1995) e para isso foi abordada a teoria de vetores espaciais para a aplicação das transformadas de Clarke e Park. No projeto do circuito modulador PWM foi usada a técnica da portadora triangular. Para medir a eficácia do filtro ativo, como parâmetro de comparação e para analisar o impacto de harmônicas no sistema, foi realizada também simulação de um sistema afetado por harmônicas, mas sem filtro para compensá-las. A análise dos resultados foi feita por meio da obtenção do espectro de frequência e posterior cálculo da Taxa de Distorção Harmônica (TDH). A modelagem é toda desenvolvida utilizando o software *PSIM* e os resultados de simulação são apresentados e comentados.

Palavras-chave: Filtro Ativo Paralelo. Controle Vetorial. Modulação PWM. Harmônicas.

ABSTRACT

Nonlinear loads generate harmonic components of voltage and current and affect other consumers connected to the same network. On the last years, an unprecedented increase in the number of nonlinear loads connected to the grid, to the detriment of the energy quality, on demand for financially viable solutions for the problem. Active filters are the better alternative for compensating the harmonic currents injected into the network by a non-linear load. They have the ability to compensate harmonics of various orders without being affected by major changes in the characteristics of the distribution network, eliminating the risk of resonance between the filter and the network impedance. The present work has the objective of studying, designing and simulating a three phase shunt active power filter. The implemented parallel filter can be divided into three main subcircuits: the reference current generator circuit, the PWM modulator circuit and the inverter circuit that is connected in a network by coupling inductances. In order to generate the reference currents, a variation of the Synchronous Reference Frame Algorithm proposed by Bhattacharaya and Divan (1995) was used and for this reason it was approached to: space vector theory for the application of the transformations from Clarke and Park. For the PWM modulator circuit design, the triangular carrier technique was used. In order to measure the effectiveness of the active filter, as a parameter of comparison and to analyze the impact of harmonics in the system, a system was also simulated by harmonics, but without a filter to compensate them. The analysis of the results was done by obtaining the frequency spectrum and then calculating the Total Harmonic Distortion (THD). A modeling is developed using the PSIM software, and the simulation results are presented and commented.

Keywords: Shunt Active Filter. Vector Control. PWM Modulator. Harmonics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Formas de onda de corrente requeridas pela carga ao serem alimentadas por uma tensão puramente senoidal(a) cargas lineares, (b) cargas não lineares.....	12
Figura 2.2 - Teorema de Fourier: composição de uma onda não senoidal.....	13
Figura 2.3 - Exemplo Espectro de frequência	14
Figura 3.1 - Topologias filtro ativo: (a) filtro paralelo, (b) filtro série, (c) filtro híbrido.....	20
Figura 3.2 - Filtro paralelo e formas de onda.	21
Figura 3.3 - Topologia de inversor de tensão como filtro ativo paralelo	22
Figura 3.4 - Diagrama de blocos do esquema de controle de um filtro ativo paralelo.....	23
Figura 3.5 – Representação da transformada de Park, com o vetor espacial corrente do estator descrito por duas componentes em um sistema bifásico ortogonal rotativo dq	28
Figura 3.6 – Exemplo de sistema elétrico elaborado para simulação no software <i>PSIM</i> : (a) Sistema trifásico e blocos que efetuam as transformadas de Clarke e Park com base nas correntes de fase medidas; (b) Detalhe do diagrama de blocos para cálculo da transformada de Clarke; (c) Detalhe do diagrama de blocos para cálculo da transformada de Park.....	29
Figura 3.7 – Resultados da simulação do sistema mostrado na Figura 3.5: (a) Formas de onda das correntes trifásicas de fase; (b) Formas de onda dos sinais após a transformação de Clarke; (c) Formas de onda dos sinais após a transformação de Park.....	29
Figura 3.8 - Diagrama de blocos do gerador de correntes de referência.....	30
Figura 3.9 - Diagrama PLL.....	31
Figura 3.10 - Modulador PWM usando portadora triangular.....	32
Figura 3.11 - Forma de onda modulada em PWM	32
Figura 4.1 - Circuito1 de simulação: Sistema elétrico trifásico alimentando uma carga não linear.....	33
Figura 4.2 - Circuito de simulação: filtro ativo paralelo de harmônicas.	34
Figura 5.1 - Resultado da simulação: (a) Formas de onda das tensões de linha fornecidas pela concessionária de energia e onda de tensão na carga; (b) formas de onda das correntes nas três fases e forma de onda da corrente na carga.....	37
Figura 5.2 - Espectro em frequência da corrente de linha, I_a , no sistema simulado, sem filtro.	37
Figura 5.3 - Espectro de Frequência da corrente da fase A.	38

Figura 5.4 - Resultados da simulação do sistema com filtro ativo paralelo com $K_p=50$. (a) correntes nas linhas da rede; (b) correntes injetadas pelo filtro; (c) correntes no plano d-q; (d) corrente na fase A e sua componente fundamental I_{a1}	39
Figura 5.5 - Espectro de frequência da corrente de fase em sistema com $K_p=100$	40
Figura 5.6 - Resultados da simulação 3 do sistema com filtro ativo paralelo com $K_p=100$. (a) correntes das fases; (b) correntes injetadas pelo filtro; (c) correntes no plano d-q; (d) corrente na fase A e sua componente fundamental I_{a1}	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	MOTIVAÇÃO	9
1.2	PROPOSTA	10
2	HARMÔNICAS E QUALIDADE DE ENERGIA	11
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA	11
2.2	COMPONENTES HARMÔNICAS	11
2.2.1	Cargas não lineares e a origem das harmônicas.....	12
2.2.2	Indicadores de Distorção Harmônica.....	14
2.2.2.1	Espectro de Frequência	14
2.2.2.2	Taxa de Distorção Harmônica (THD).....	15
2.2.2.3	Fator de Potencia (FP)	15
2.2.3	Efeito das Harmônicas	16
3	FILTROS ATIVOS PARA HARMÔNICAS	18
3.1	TIPOS DE FILTROS ATIVOS	19
3.2	FILTRO ATIVO PARALELO	21
3.2.1	Topologia do Circuito de Potência.....	22
3.2.2	Esquema de Controle	23
3.2.2.1	Gerador da Corrente de Referência.....	24
3.2.2.1.1	Vetor espacial.....	24
3.2.2.1.2	Transformada de Clarke ($abc \rightarrow \alpha\beta$).....	26
3.2.2.1.3	Transformada de Park ($\alpha\beta \rightarrow dq$).....	27
3.2.2.1.4	Exemplo de aplicação das transformadas de Clarke e Park.....	28
3.2.2.1.5	Algoritmo para geração da corrente de referência.....	30
3.2.2.2	Modulador de corrente:pelo método da portadora triangular	31
4	PROPOSIÇÃO E METODOLOGIA.....	33
4.1	SIMULAÇÃO DE SISTEMA COM DISTÚRBIOS HARMÔNICOS.....	33
4.2	SIMULAÇÃO SISTEMA TRIFÁSICO COM FILTRO ATIVO PARALELO	34
4.3	PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO E CÁLCULO.....	35

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1	SIMULAÇÃO 1: SISTEMA SEM FILTRO	37
5.2	SIMULAÇÃO 2: SISTEMA COM FILTRO ATIVO (KP=50).....	38
5.3	SIMULAÇÃO 3: SISTEMA COM FILTRO ATIVO (KP=100).....	40
6	CONCLUSÃO.....	42

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

O advento da eletrônica é um marco inquestionável na história da humanidade. A invenção do primeiro transistor no final dos anos 40 dava início a uma nova era, na qual os materiais semicondutores ampliariam os horizontes tecnológicos e impactariam desde robustos processos industriais até nosso cotidiano com equipamentos domésticos.

A eletrônica tornou-se indispensável por solucionar muitos dos nossos problemas, tornando mais produtivos os processos industriais e mais confortáveis nossas vidas. Entretanto, as cargas eletrônicas, por serem não lineares, quando conectadas à rede de distribuição CA, provocam a deformação da corrente, que por meio das impedâncias da própria rede dão origem também a deformidades na onda de tensão. Esses distúrbios, nas formas de onda da tensão e da corrente, constituem um dos distúrbios na qualidade de energia elétrica mais relevantes: as componentes harmônicas de tensão e corrente.

O número crescente de equipamentos eletrônicos tem produzido um importante impacto na qualidade do abastecimento de energia elétrica. Tanto as grandes cargas industriais quanto as residenciais causam componentes harmônicas de tensão na rede de distribuição. Ironicamente, os próprios equipamentos que causam a poluição harmônica na rede, em geral, são os mais afetados por apresentarem maior sensibilidade a distúrbios nas ondas senoidais na rede de alimentação.

As harmônicas circulam nas redes de distribuição em detrimento da qualidade de energia, gerando ruído de tensão que, por sua vez, afeta outros equipamentos conectados à mesma rede. Dentre os prejuízos por elas causados, pode-se destacar:

- Sobrecarga das redes de distribuição devido ao aumento da corrente eficaz.
- Sobrecarga dos condutores, em especial dos de neutro em razão da soma das harmônicas de ordem 3 geradas pelas cargas monofásicas.
- Sobrecarga, vibrações e envelhecimento dos alternadores, transformadores, motores e ruídos dos transformadores.
- Sobrecarga e envelhecimento de capacitores de compensação de carga reativa.
- Perturbação de receptores sensíveis a formas de ondas não senoidais.
- Perturbação das redes de comunicação e das linhas telefônicas.

O prejuízo é ainda maior se analisarmos o impacto financeiro destes problemas: o envelhecimento precoce do material demanda manutenção e substituição com maior frequência, ou sobredimensionamento dos equipamentos e condutores, além disso os picos de corrente originadas pelas harmônicas provocam disparos intempestivos provocando o mau funcionamento dos equipamentos ou até a paralisação de sistemas de produção.

Observado o prejuízo causado, foram criadas normas relacionadas ao problema. As concessionárias de energia elétrica passaram a taxar consumidores industriais que gerassem poluição harmônica acima do permitido. Com isso as empresas passaram a investir em pesquisas buscando uma forma eficiente e economicamente viável de solucionar o problema.

1.2 PROPOSTA

A melhor forma de combater harmônicas é utilizando um filtro ativo. Este trabalho tem como objetivo projetar e simular um sistema elétrico com filtro ativo paralelo para a eliminação de distorções harmônicas decorrentes de uma carga não linear conectada à rede trifásica. O projeto do filtro ativo é baseado no método da portadora triangular. Dentre os tópicos pesquisados para realização deste trabalho estão estudo sobre as harmônicas, suas causas, efeitos e normas relacionadas, bem como as principais soluções para combatê-las. Foram também avaliadas as principais técnicas de controle realimentado de tensão e corrente, modulação por largura de pulso (PWM) para o controle do chaveamento do circuito inversor, bem como as transformadas de Clarke e Park, indispensáveis para a familiarização e compreensão do funcionamento de um filtro ativo.

A modelagem do sistema elétrico trifásico com distorções harmônicas, juntamente com o filtro ativo paralelo, foi feita a partir do software PSIM, que permite a construção de blocos que implementam as equações que descrevem os modelos físicos adequados para tal simulação. Os resultados da simulação foram avaliados ao final deste trabalho.

2 HARMÔNICAS E QUALIDADE DE ENERGIA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA

A privatização das concessionárias de energia elétrica no Brasil resultou na flexibilização e regulamentação dessas pela Agência Nacional de Energia Elétrica(ANEEL), órgão regulador do governo brasileiro, que vem aumentando progressivamente as exigências para as concessionárias buscarem cada vez mais melhorar seus padrões de qualidade, confiabilidade e continuidade no fornecimento.

Ao termo "qualidade de energia" são atribuídos diferentes significados. Para os fornecedores de energia, o termo refere-se a qualidade do produto e serviços prestados, passando pela confiabilidade e pelo planejamento. Nesse caso a qualidade de energia serve para medir a capacidade do consumidor usar a energia entregue da maneira desejada. Uma outra definição afirma que: "Um sistema elétrico com excelente qualidade da energia elétrica é caracterizado pelo fornecimento de energia em tensão com forma de onda senoidal pura, sem alterações em amplitude e frequência, como se emanasse de uma fonte de potência infinita."(Rocha, 2016, p 3).

A qualidade da energia pode ser grosseiramente dividida em categorias como:

- Magnitude e frequência da tensão no estado estacionário,
- Afundamentos de tensão,
- Harmônicas,
- Flutuações de tensão e trepidação,
- Transientes.

Neste trabalho, abordaremos em especial as causas e efeitos das harmônicas na rede e, posteriormente, indicaremos as principais medidas para reduzir seus efeitos, bem como o projeto e a implementação de um filtro ativo.

2.2 COMPONENTES HARMÔNICAS

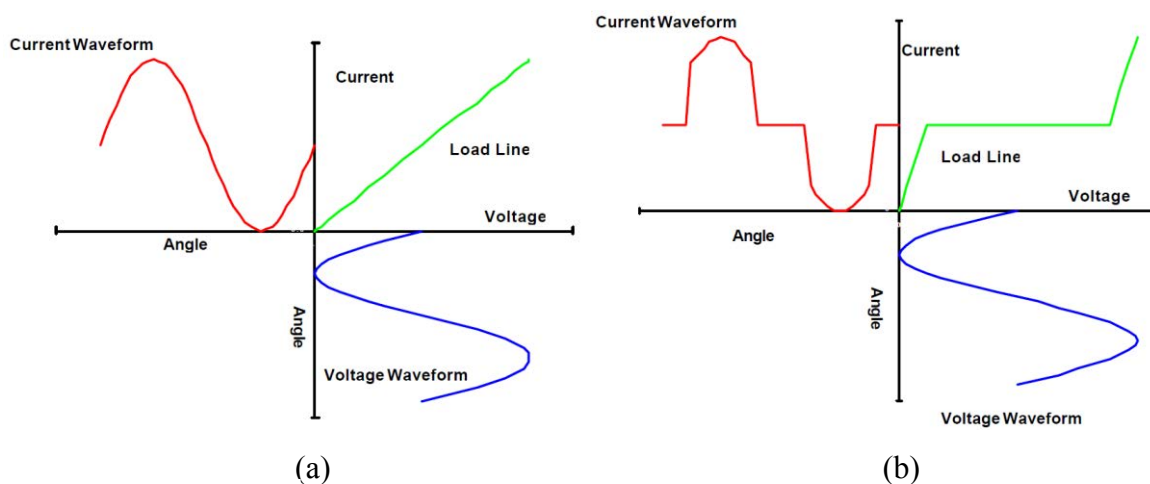
Como visto anteriormente, as componentes harmônicas de tensão e de corrente representam um dos mais relevantes distúrbios na qualidade de energia. A preocupação quanto

a ele deve-se ao aumento sem precedentes da utilização de cargas não lineares o que acarretou em uma mudança indesejável no perfil da carga consumida, afetando outros consumidores.

2.2.1 Cargas não lineares e a origem das harmônicas

Por definição uma carga é dita não linear quando a corrente que ela absorve não tem a mesma forma da tensão que a alimenta. Na figura (2.1a) observa-se o comportamento da forma de onda da corrente exigida por uma carga linear. Da mesma forma a figura (2.1b) permite enxergar a deformação provocada na forma de onda da corrente, quando uma carga não linear é alimentada por uma fonte de tensão puramente senoidal. A deformação da forma de onda de corrente, por meio das impedâncias da própria rede de distribuição, dão origem às deformações nas ondas de tensão. Essa distorção na tensão da rede, gera picos de tensão em diferentes frequências, afetando outros consumidores conectados a mesma rede.

Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..1 - Formas de onda de corrente requeridas pela carga ao serem alimentadas por uma tensão puramente senoidal(a) cargas lineares, (b) cargas não lineares

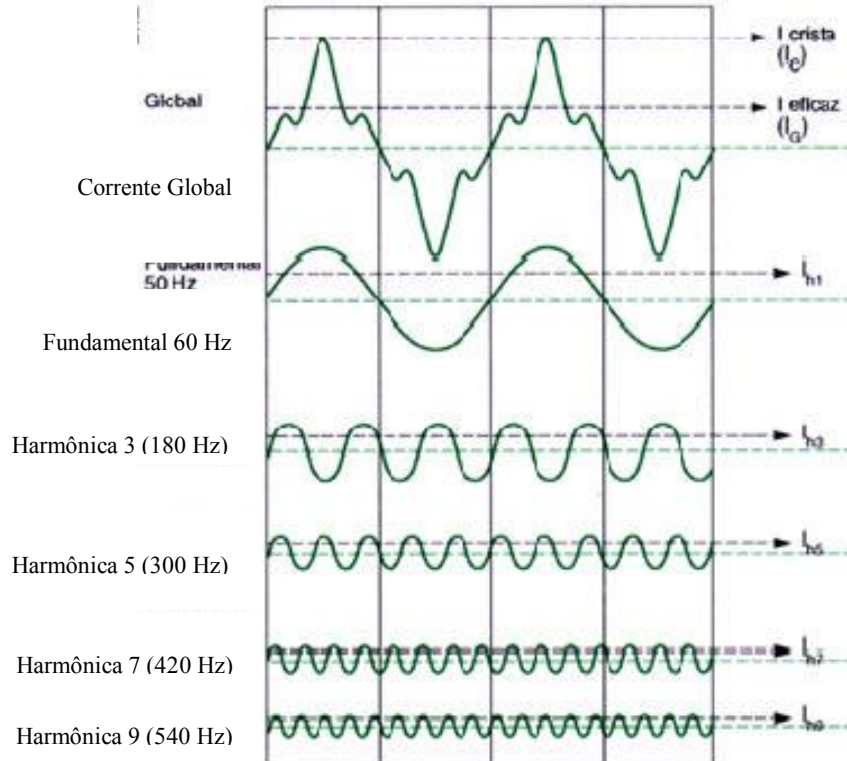


Fonte: Schneider Electric

Para melhor compreender o fenômeno, podemos considerar como se as cargas não lineares injetassem correntes, de diversas frequências múltiplas da frequência fundamental e amplitudes diferentes, na rede, em direção a fonte. Segundo o teorema de Fourier: "Toda função periódica não senoidal pode ser representada sob a forma de uma soma de expressões composta: de uma expressão senoidal em frequência fundamental; de expressões senoidais

cujas frequências são múltiplos inteiros da fundamental(harmônicas); e de eventual componente contínua"(Schneider Electric). Na figura (2.2), é possível observar um exemplo de forma de onda não senoidal, e as com frequências múltiplas da fundamental que a compõe.

Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..2 - Teorema de Fourier: composição de uma onda não



Fonte: Schneider Electric

Os dispositivos geradores de harmônicas são apresentados em todos os setores industriais, comerciais e domésticos. As cargas não lineares, estão cada vez mais abundantes nos sistemas elétricos. Abaixo estão listados alguns exemplos:

- Equipamentos industriais como solda
- Aparelhos domésticos como televisão, forno micro-ondas e iluminação neon.
- Equipamentos de escritório: computadores, maquinas copiadoras, fax.
- *No-breaks*.
- *Drives* e Inversores de frequência para motores assíncronos ou motores de corrente contínua.

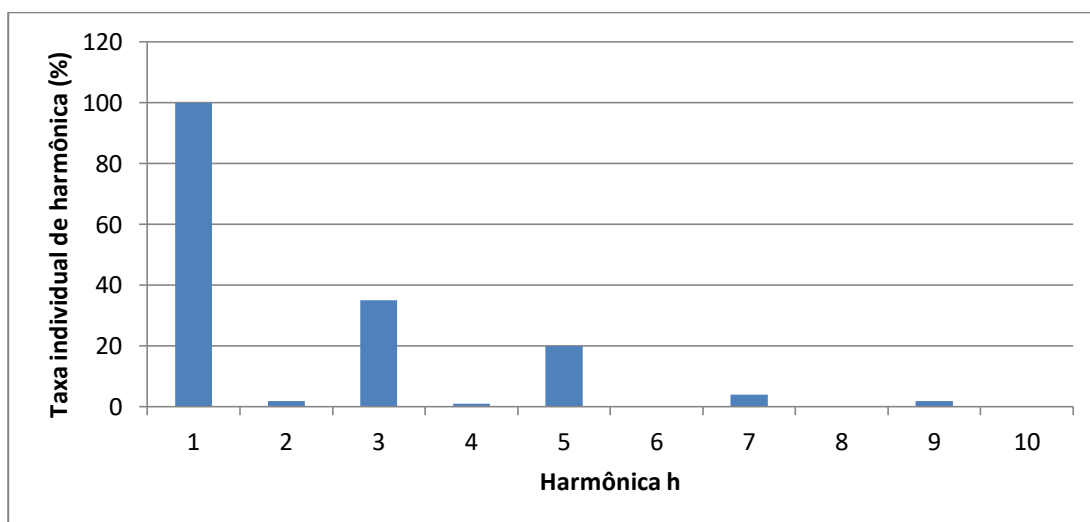
2.2.2 Indicadores de Distorção Harmônica

Para a determinação de eventuais medidas corretivas, é essencial a utilização de indicadores que permitam avaliar e quantificar a distorção harmônica de tensão e de corrente. A seguir são apresentados os principais indicadores de harmônicas.

2.2.2.1 Espectro de Frequência

A análise espectral é uma representação sob forma de histograma, e é obtida representando a amplitude de cada ordem de harmônica, na presença da respectiva frequência conforme a figura (2.3):

Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..3 - Exemplo Espectro de frequência



Autoria própria

Cada tipo de aparelho possui sua própria característica de correntes harmônicas, com amplitudes e frequências deferentes. Estes valores, de amplitude para cada ordem de harmônica, são essenciais para análise do distúrbio.

A taxa individual de harmônica, de tensão ou de corrente, pode ser definida como o valor em porcentagem da componente harmônica de ordem h dividida pela componente fundamental. A equação (2.1) apresenta a taxa individual de tensão e a equação (2.2) a de corrente:

$$u (\%) = 100 \frac{U}{U_1} \quad (2.1)$$

$$(\%) = 100 \frac{I}{I_1} \quad (2.2)$$

2.2.2.2 Taxa de Distorção Harmônica (THD)

A taxa de distorção harmônica é o principal indicador para esse tipo de distúrbio. Podem ser de corrente, equação (2.3), ou de tensão, equação (2.4):

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2} I_h^2}}{I_1} \quad (2.3)$$

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2} U_h^2}}{U_1} \quad (2.4)$$

2.2.2.3 Fator de Potencia (FP)

A equação (2.5) apresenta o fator de potência conforme a definição: a relação entre a potência ativa P e a potência aparente S.

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2.5)$$

Em sistemas com formas de ondas senoidais puras, o fator de potência também é igual ao cosseno do ângulo da defasagem entre a tensão e a corrente: A equação (2.6) é verdadeira somente para ondas puramente senoidais. Por esse motivo, P_1 e S_1 representam respectivamente as potências ativa e aparente relacionadas exclusivamente à frequência fundamental.

$$FP = \frac{P_1}{S_1} = \cos(\varphi) \quad (2.6)$$

Sabendo disso, a presença de harmônicas na rede pode ser identificada caso o cosseno do ângulo da defasagem seja diferente do fator de potência. Nesse caso, as componentes harmônicas de diferentes frequências afetariam o sistema, reduzindo o fator de potência, como demonstrado na equação (2.7).

$$FP = \frac{\cos(\varphi)}{\sqrt{1 + TDH^2}} \quad (2.7)$$

Essa equação permite calcular do fator de potência em um sistema, levando em consideração a taxa de distorção harmônica.

2.2.3 Efeito das Harmônicas

"O grau com que harmônicas podem ser toleradas em um sistema de alimentação depende da susceptibilidade da carga (ou da fonte de potência)." (Pomilho, 1995). Os equipamentos de aquecimento, em geral, são menos sensíveis pois a forma de onda não é relevante para cargas resistivas. Os equipamentos mais sensíveis são aqueles que necessitam de uma onda senoidal pura para funcionar corretamente. Contudo, até para as cargas de baixa susceptibilidade, a presença de harmônicas é prejudicial, por produzir maiores esforços nos condutores, isolantes e componentes.

Cargas indutivas

O maior efeito das harmônicas em motores e geradores é o aquecimento, que é decorrente do aumento das perdas no cobre e no entreferro, em detrimento a sua eficiência e torque. A presença de harmônicas no fluxo é outro fenômeno que produz alterações no acionamento, como componentes de torque que atuam no sentido oposto ao da fundamental (como o 5o e o 7o harmônico). Harmônicas em sistemas turbina-gerador ou motor-carga, podem produzir oscilações mecânicas devido a uma potencial excitação de ressonância mecânica.

Transformadores

Como nas máquinas indutivas, harmônicas na tensão aumentam as perdas no ferro, enquanto harmônicos na corrente elevam as perdas no cobre. Além disso o efeito das reatâncias de dispersão fica ampliado, uma vez que seu valor aumenta com a frequência.

Condutores de alimentação

O efeito pelicular, que restringe a seção condutora para componentes de frequência elevada, sob efeito de harmônicas corrente, tem suas perdas aumentadas. Em caso de cabos longos em sistemas com ressonâncias excitadas por componentes harmônicas, podem surgir elevadas sobretensões ao longo da linha, podendo danificar ou diminuir a vida útil do cabo.

Capacitores

O maior problema provocado por harmônicas em capacitores é a ocorrência de ressonâncias, podendo produzir níveis excessivos de corrente e/ou de tensão. É válido ressaltar que, como a reatância capacitiva diminui com a frequência, tem-se um aumento nas correntes relativas às harmônicas presentes na tensão.

3 FILTROS ATIVOS PARA HARMÔNICAS

Como visto no capítulo anterior, cargas não lineares, quando conectadas à malha de distribuição, provocam deformações nas formas de onda da corrente e tensão. Nas últimas décadas, o número crescente de equipamentos de potência com base eletrônica tem produzido um importante impacto na qualidade do abastecimento de energia elétrica. Tanto as cargas de altas potências industriais, quanto as cargas domésticas geram componentes harmônicas nas tensões da rede elétrica de distribuição. Ironicamente, a maior parte dos equipamentos causadores dos distúrbios são consideravelmente sensíveis a desvios na forma senoidal ideal da tensão de linha. Portanto, os problemas na qualidade de energia podem se originar no próprio sistema ou podem ser causados pelos próprios consumidores. Contudo, nos últimos anos houve um aumento da preocupação relacionada a qualidade de energia, dentre os principais motivos temos:

- A ênfase em aperfeiçoar a produtividade dos processos o que levou a instalação de equipamentos de alta eficiência como *drives* de ajuste de velocidade e correção do fator de potencia. Isso resultou no aumento da injeção de harmônicas no sistema de potência, causando preocupação quanto o seus impactos no comportamento do sistema.
- A proliferação dos equipamentos de carga controlada por microprocessadores e equipamentos eletrônicos de potência, que são sensíveis a muitos tipos de distúrbios na qualidade de energia.
- Consumidores conscientes da importância da qualidade de energia e mais informação sobre as consequências das componentes harmônicas, interrupções, afundamento de tensão e transientes de chaveamento. Motivados pela descalibração e mal funcionamento de equipamentos, os consumidores tem desafiado as concessionárias a melhorar a qualidade de seu produto.

Para o crescente número de aplicações, equipamentos convencionais tem se provado insuficientes para atenuar os problemas de qualidade de energia. Distorções harmônicas são tradicionalmente tratadas com o uso de filtros LCs passivos. Contudo, as aplicações de filtros passivos para redução de harmônicas pode resultar em ressonância paralela com as impedâncias da rede, sobrecompensação da potência reativa na frequência fundamental, e pouca flexibilidade para compensação dinâmica de diferentes frequências de componentes harmônicas.

O aumento da importância da qualidade de energia nas redes de distribuição atraiu a atenção de engenheiros de potência para o desenvolvimento de soluções dinâmicas e ajustáveis para os problemas de qualidade de energia. Tais equipamentos são capazes de compensar correntes e voltagens harmônicas, potência reativa, regular as tensões nos terminais, suprimir trepidação e melhorar o balanço das tensões em sistemas trifásicos. A principal vantagem da filtragem ativa é que ela automaticamente se adapta a mudanças na rede e flutuações na carga. Esse tipo de filtro é capaz de compensar diversas ordens de frequências e, ao mesmo tempo, não é afetado por grandes mudanças nas características da rede, eliminando o risco de ressonância entre o filtro e as impedâncias da rede.

3.1 TIPOS DE FILTROS ATIVOS

A tecnologia de filtros ativos de potência foram desenvolvidas ao longo das últimas duas décadas, atingindo a maturidade para compensação harmônica, potência reativa e balanço de voltagem nas linhas de distribuição alternadas. Todos os filtros ativos de potência são desenvolvidos com Modulação por Largura de Pulso (PWM) e conversores (inversores de tensão ou de corrente). A estrutura em ponte que alimenta com corrente o inversor PWM se comporta como uma fonte de corrente não senoidal para encontrar a corrente harmônica requerida pela carga não linear. Ela tem um próprio reator que assegura a alimentação em corrente contínua, que apresenta boa confiabilidade, mas possui importantes perdas e requer altos valores de capacitores paralelos de filtro nos terminais de corrente alternada (CA) para remover correntes harmônicas indesejáveis. Além disso, eles não podem ser usados em modo multinível para compensar taxas altas de potência.

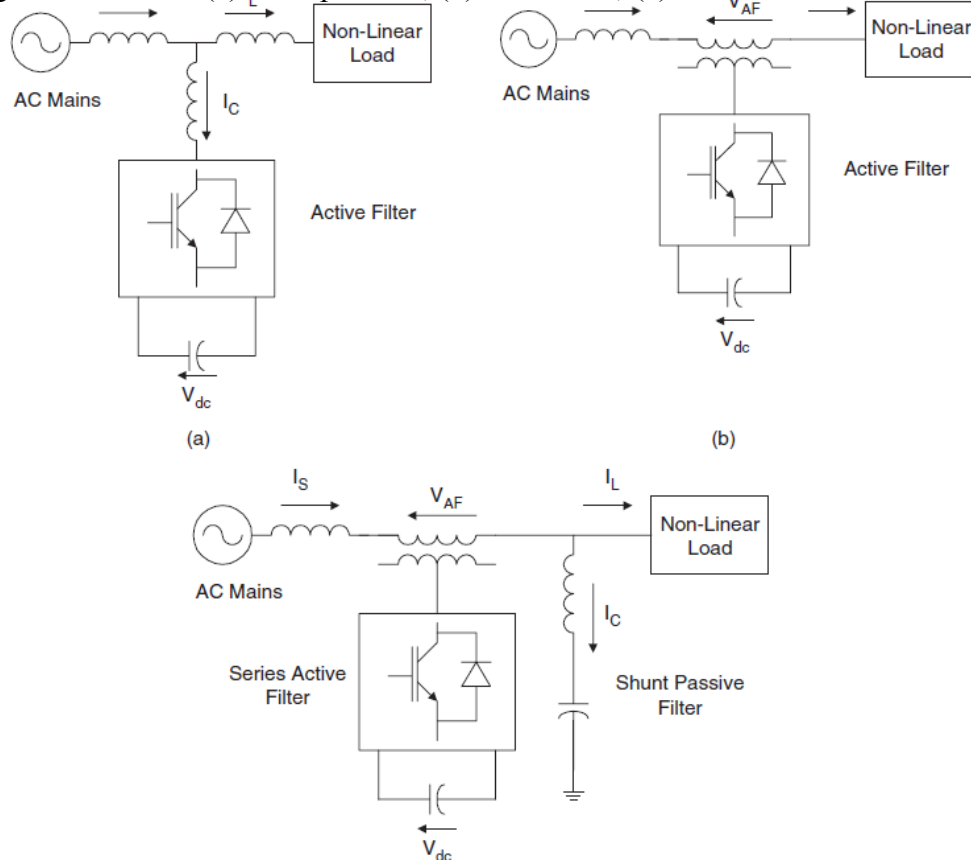
Os outros conversores usados em topologias de filtros ativos são que utilizam Modulação por Largura de Pulso com Inversores de Tensão (PWM-VSI). Esses são mais convenientes para filtragem ativa de potência por serem mais leves mais precisos e expansíveis para multinível, melhorando o desempenho para compensação de taxas de alta potência com frequências mais baixas de chaveamento. O PWM-VSI deve ser conectado à corrente alternada através de reatores de acoplamento com um capacitor eletrolítico para manter uma tensão constante e sem ondulação.

Os filtros ativos de potência podem ser classificados com base no tipo de conversor, topologia, esquema de controle e características de compensação. A classificação mais popular baseia-se na topologia: paralelo, série e híbrido. A configuração híbrida é uma combinação de

compensação passiva e ativa. As diferentes topologias do filtro de potência ativa são mostradas na figura. (3.1).

Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento.4 -

Topologias filtro ativo: (a) filtro paralelo, (b) filtro série, (c) filtro híbrido



Fonte: Dixon, Morán (2007)

Os filtros ativos de potência Shunt, ou paralelo (figura 3.1a) são amplamente utilizados para compensar harmônicos de corrente, potência reativa e corrente de carga desequilibrada.

Os filtros ativos de potencia série (figura 3.1b) estão conectados antes da carga em série com a rede elétrica, através de um transformador de acoplamento para eliminar harmônicos de tensão e equilibrar e regular a tensão nos terminal da carga e na linha.

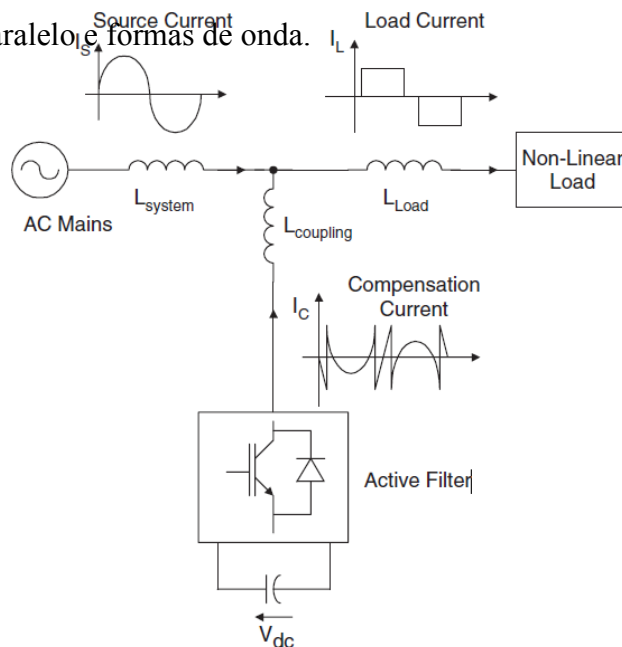
A configuração híbrida é uma combinação de filtro ativo série e filtro de derivação passiva (figura. 3.1c). Esta topologia é muito conveniente para a compensação de sistemas de alta potência, porque a potência nominal do filtro ativo é significativamente reduzida (cerca de 10% da carga), uma vez que a maior parte do filtro híbrido consiste no filtro paralelo passivo LC, usado para compensar harmônicos de corrente de baixa ordem e potência reativa em frequência fundamental.

Neste trabalho, será estudada e simulada apenas a topologia de filtro ativo paralelo. Os princípios de operação deste importante tipo de filtro são descritos nas subseções a seguir.

3.2 FILTRO ATIVO PARALELO

Os filtros ativos paralelos compensam as harmônicas de corrente ao injetar uma corrente de compensação harmônica igual, mas de amplitude oposta. Nesse caso, o filtro ativo paralelo funciona como uma fonte de corrente injetando as componentes harmônicas geradas pela carga, mas a fase é deslocada em 180° . Como resultado, as componentes das correntes harmônicas contidas na corrente de carga são canceladas pelo efeito do filtro ativo e a corrente da fonte permanece senoidal e em fase com a respectiva tensão fase-neutro. As características de compensação do filtro ativo de potência em paralelo são mostradas na figura. (3.2):

Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento. **5** - Filtro paralelo e formas de onda.



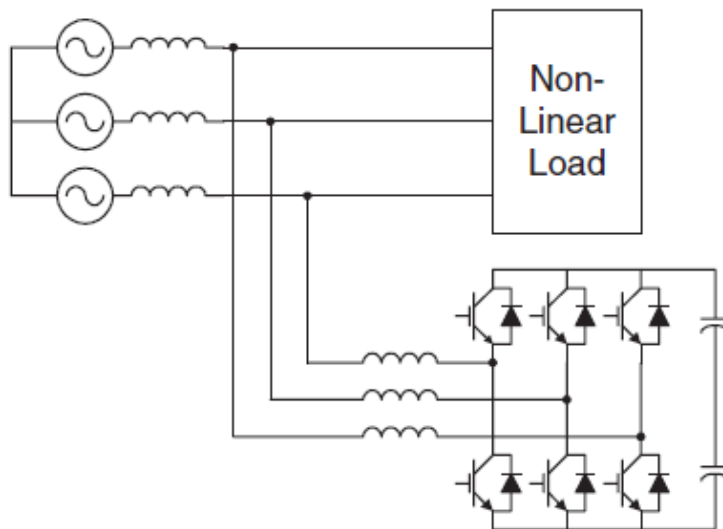
Fonte: Dixon, Morán (2007)

Este princípio é aplicável a qualquer tipo de carga considerada como fonte harmônica. Além disso, com um esquema de controle apropriado, o filtro ativo também pode compensar o fator de potência de carga. Desta forma, o sistema de distribuição de energia vê a carga não linear e o filtro ativo como um resistor ideal.

3.2.1 Topologia do Circuito de Potência

Os filtros ativos paralelos são normalmente implementados com inversores de tensão controlados por uma forma de onda modulada em largura de pulso (PWM). Neste tipo de aplicação, o circuito inversor funciona como uma fonte de tensão controlada por corrente. Tradicionalmente, são usados dois níveis de inversores para implementar esse sistema conectado ao barramento de corrente alternada por meio de um indutor. Este tipo de configuração destina-se a compensar a carga não linear avaliada na faixa de potência média (centenas de kVA) devido a limitações de valores nominais de semicondutores. No entanto, nos últimos anos, inversores de tensão de vários níveis foram desenvolvidos possibilitando a confecção de filtros ativos de potência para aplicações de média e alta potência nominal. A figura (3.3) mostra a topologia mais popular de um inversor de tensão:

Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi



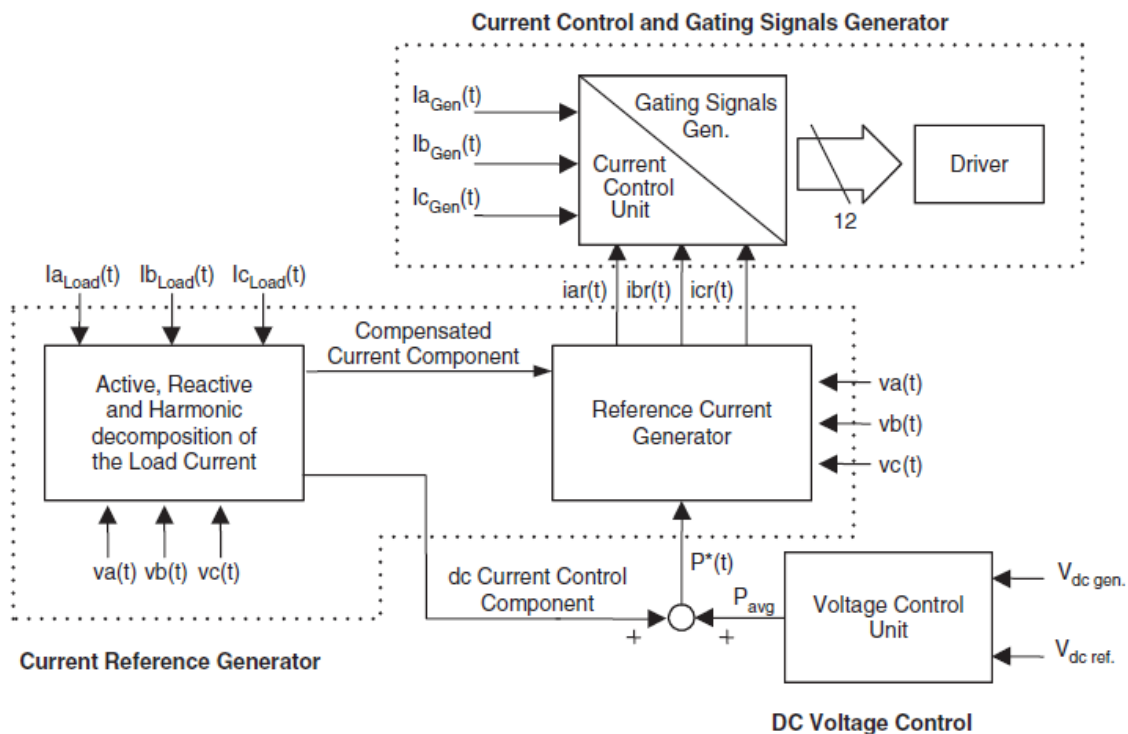
Fonte: Dixon, Morán (2007)

Além disso, os filtros ativos de potência podem ser implementados com múltiplos inversores de tensão conectados em paralelo a um barramento dc, mas em série através de um transformador ou em cascata foi proposto na literatura técnica. O uso do VSI conectado em cascata é uma alternativa interessante para compensar cargas não lineares de alta potência. O uso de dois PWM-VSI com potência nominal diferente permite o uso de diferentes frequências de comutação, reduzindo as tensões de comutação e perdas de comutação no sistema de compensação geral.

3.2.2 Esquema de Controle

O esquema de controle de um filtro ativo paralelo deve ser capaz de calcular a forma de onda de corrente de referência para cada fase do inversor, manter a tensão DC constante e gerar os sinais de entrada do inversor. O diagrama de blocos do esquema de controle de um filtro ativo paralelo é mostrado na figura (3.4).

Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..7 - Diagrama de blocos do esquema de controle de um filtro ativo paralelo



Fonte: Dixon, Morán (2007)

O circuito de corrente de referência gera as correntes de referência necessárias para compensar as harmônicas da corrente e a potência reativa na carga, e também tenta manter constante a tensão de DC nos capacitores eletrolíticos. Existem muitas possibilidades para implementar esse tipo de controle, e a mais popular delas, será explicada neste capítulo. Além disso, a eficácia de compensação de um filtro ativo depende da sua capacidade de seguir com um erro e tempo de atraso mínimos, o sinal de referência calculado para compensar a corrente de carga distorcida.

Finalmente, a unidade de controle de tensão DC deve manter a tensão de barramento DC constante e igual a um valor de referência determinado. O controle de tensão DC é ajustando à

pequena quantidade de potência real absorvida pelo inversor. Esta pequena quantidade de potência real é ajustada, alterando a amplitude do componente fundamental da corrente de referência.

3.2.2.1 Gerador da Corrente de Referência

Existem muitas possibilidades para determinar a corrente de referência necessária para compensar a carga não linear. Normalmente, os filtros ativos paralelos são usados para compensar o fator de potência de deslocamento e os harmônicos de corrente de baixa frequência gerados por cargas não lineares. Uma alternativa para determinar a referência atual exigida pelo inversor é o uso da teoria dos vetores espaciais por meio das transformadas de Clarke e Park.

3.2.2.1.1 Vetor espacial

O conceito de vetor espacial é bastante usado na análise de sistemas elétricos em geral. No contexto deste trabalho, tal conceito é empregado para gerar a corrente de referência e, com ela, controlar vetorialmente a geração de sinais *PWM* para o chaveamento dos inversores de tensão.

π magnéticos e outras grandezas elétricas.

Seja, por exemplo, uma máquina elétrica trifásica e simétrica, cujas correntes aplicadas aos enrolamentos $i_a(t)$, $i_b(t)$ e $i_c(t)$ estão em sequência positiva e são definidas pelas equações (3.1), (3.2) e (3.3). As formas de onda de $i_a(t)$, $i_b(t)$ e $i_c(t)$ são mostradas na figura (3.5).

$$i_a(t) = m \cos(\omega t) \quad (3.1)$$

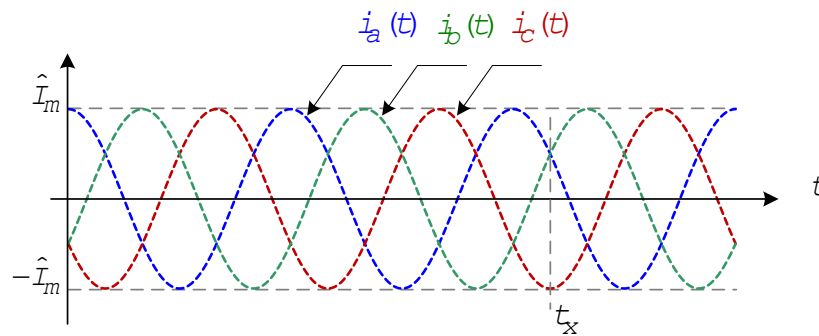
$$i_b(t) = m \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \quad (3.2)$$

$$i_c(t) = m \cos\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) \quad (3.3)$$

Um vetor espacial consiste da combinação linear de componentes de grandezas associadas a um sistema de coordenadas. Para sistemas elétricos trifásicos, o sistema de coordenadas é constituído por três eixos coordenados no plano, a , b e c , defasados um do outro em 120° . Assim, as três correntes nos enrolamentos da máquina elétrica em questão: $i_a(t)$, $i_b(t)$ e

$i_c(t)$ podem ser representadas por um único vetor espacial, \mathbf{I}_s que gira a uma frequência angular em um plano abc . A Figura 3.6(a) ilustra a construção do vetor \mathbf{I}_s a partir de suas componentes $i_a(t)$, $i_b(t)$ e $i_c(t)$ no instante t_x , indicado na figura (3.5).

Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..5 - Correntes cossenoidais trifásicas.



Fonte: Filadelfo (2016)

O vetor espacial \mathbf{I}_s , que representa as correntes no sistema, é definido pela equação (3.4):

$$\mathbf{I}_s = \frac{2}{3} \left(i_a(t) \cdot \mathbf{a}^0 + i_b(t) \cdot \mathbf{a} + i_c(t) \cdot \mathbf{a}^2 \right) ,$$

(Err
o!
Nen
hum
texto
com
o
estil
o
espe
cific

ado
foi
enco
ntra
do
no
docu
ment
o..4)

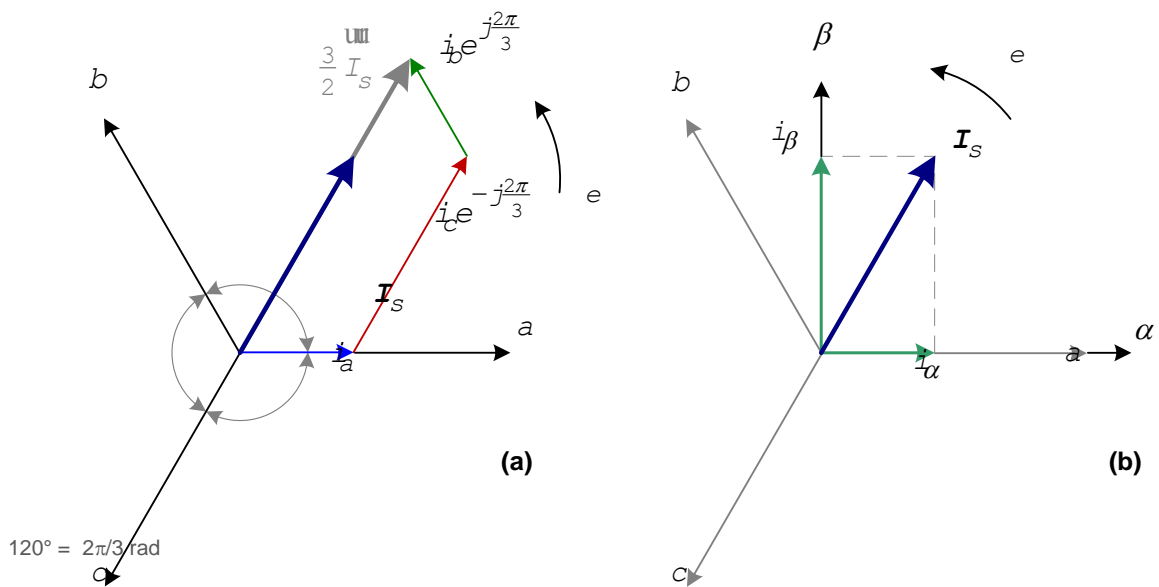
sendo \mathbf{a} o operador para deslocamento de fase tal que $\mathbf{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ e $\mathbf{a}^2 = e^{-j\frac{2\pi}{3}}$, com o termo $e^{j\theta}$ definido pela identidade de Euler $e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta$, onde j é o operador imaginário.

Como a soma $i_a(t) \cdot \mathbf{a}^0 + i_b(t) \cdot \mathbf{a} + i_c(t) \cdot \mathbf{a}^2$ resulta em um vetor cujo módulo é igual a $3 \hat{I}_m / 2$, o termo $2/3$ foi incluído para que o módulo do vetor \mathbf{I}_s seja igual a \hat{I}_m , que é a amplitude das correntes trifásicas.

3.2.2.1.2 Transformada de Clarke ($abc \rightarrow \alpha\beta$)

A transformada de Clarke é uma transformação matemática definida na forma matricial pela equação (3.5), que permite converter vetores espaciais de grandezas elétricas (correntes, tensões, fluxos, etc.) referenciados a um sistema trifásico no plano abc para um sistema de coordenadas bifásico estacionário $\alpha\beta$. Como exemplo das aplicação, a representação do vetor espacial corrente do estator \mathbf{I}_s no sistema de coordenadas $\alpha\beta$ está mostrada na figura (3.6b).

Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..6 - **(a)** Vetor espacial corrente do estator \mathbf{I}_s descrito por componentes em um sistema trifásico no plano abc no instante t_x , indicado na figura (3.2); **(b)** Representação da transformada de Clarke, com o vetor espacial corrente do estator descrito por duas componentes em um sistema bifásico ortogonal estacionário $\alpha\beta$.



Fonte: Filadelfo (2016)

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}(t) \\ i_{\beta}(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Mais uma vez, o fator multiplicativo $2/3$ é utilizado para manter a amplitude das grandezas transformadas, ou seja, se a amplitude de $i_a(t)$, $i_b(t)$ e $i_c(t)$ é igual a I_m , esta é também a amplitude das correntes $i_{\alpha}(t)$ e $i_{\beta}(t)$. Porém, quando se deseja aplicar a transformada de Clarke em sistemas elétricos de modo que o parâmetro a ter o valor mantido seja a potência, usa-se o fator multiplicativo $\sqrt{2/3}$.

Considerando que o sistema trifásico analisado seja simétrico e equilibrado, tem-se que $i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) = 0$ e as equações da transformada de Clarke podem ser escritas de forma simplificada, como apresentado na equação (3.6).

$$\begin{cases} i_{\alpha}(t) = i_a(t) \\ i_{\beta}(t) = \frac{\sqrt{3}}{3} (i_a(t) + 2i_b(t)) \end{cases} \quad (3.6)$$

Já a transformada inversa de Clarke permite converter vetores espaciais de grandezas

expressas no sistema de coordenadas $\alpha\beta$ em grandezas expressas no sistema trifásico abc , definida na forma matricial pela equação (3.7).

$$\begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

3.2.2.1.3 Transformada de Park ($\alpha\beta \rightarrow dq$)

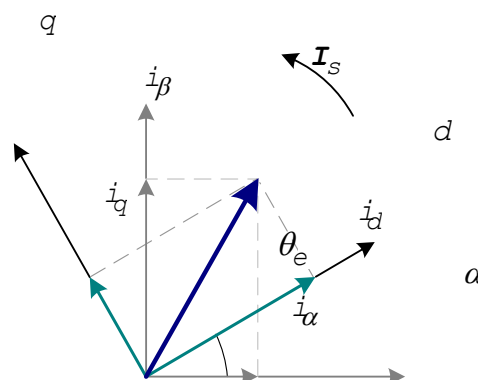
A transformada de Park é uma transformação matemática que permite converter o sistema de coordenadas bifásico estacionário $\alpha\beta$ em um sistema de coordenadas bifásico rotacional $d-q$, como ilustrado na Figura 3.4. A transformada de Park é descrita na forma algébrica a partir da equação (3.8):

$$\begin{cases} i_d(t) = i_\alpha(t) \cos \theta_e + i_\beta(t) \sin \theta_e \\ i_q(t) = -i_\alpha(t) \sin \theta_e + i_\beta(t) \cos \theta_e \end{cases} \quad (3.8)$$

A transformada inversa de Park permite converter o sistema de coordenadas $d-q$ para o sistema $\alpha\beta$ e é descrita na equação (3.9):

$$\begin{cases} i_\alpha(t) = i_d(t) \cos \theta_e - i_q(t) \sin \theta_e \\ i_\beta(t) = i_d(t) \sin \theta_e + i_q(t) \cos \theta_e \end{cases} \quad (3.9)$$

Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..8 – Representação da transformada de Park, com o vetor espacial corrente do estator descrito por duas componentes em um sistema bifásico ortogonal rotativo dq .

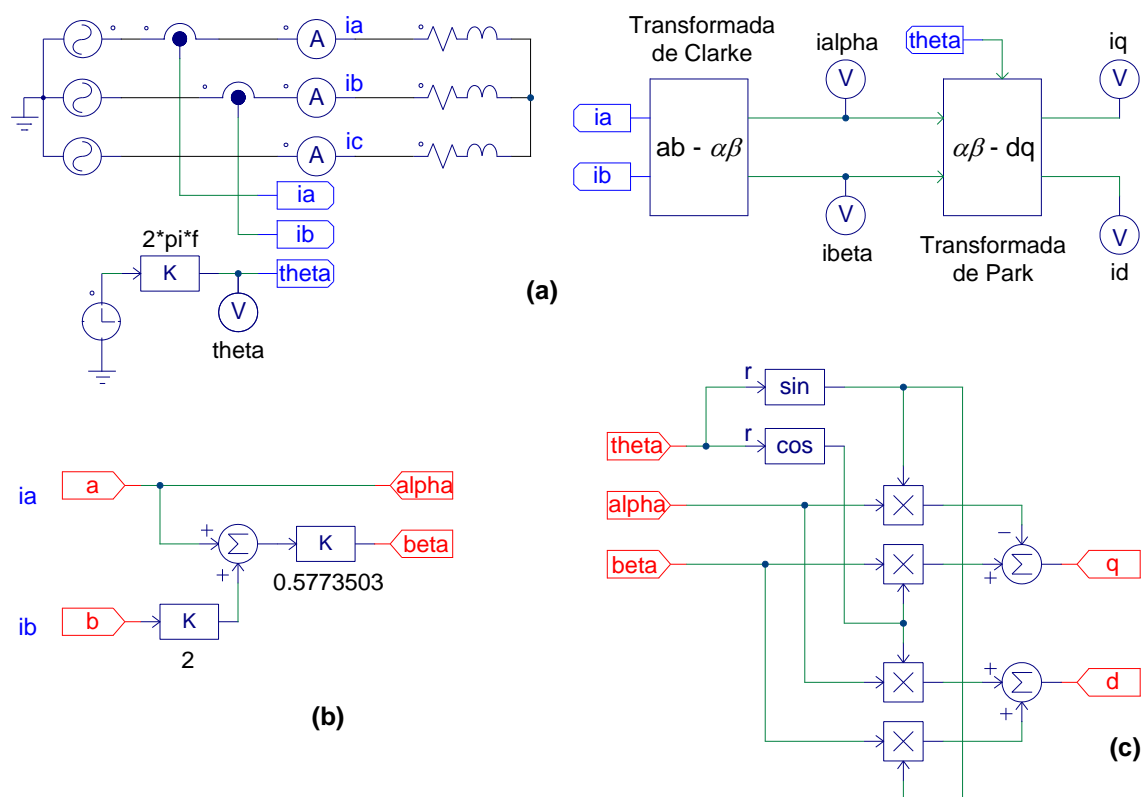


3.2.2.1.4 Exemplo de aplicação das transformadas de Clarke e Park

Os efeitos das transformações de Clarke e Park em sinais trifásicos são mostrados através de simulação utilizando o software *PSIM* do circuito elétrico exibido na figura (3.5). Como exemplo, tem-se uma fonte trifásica cossenoidal com tensão de fase de 127 V(RMS), 60 Hz e sequência positiva alimentando uma carga *RL* trifásica equilibrada $100 + j18,85$ [Ω], onde as transformadas de Clarke e Park são aplicadas às correntes de fase, como mostrado na figura (3.5a). Os diagramas de blocos que efetuam as transformações de Clarke e Park são mostrados em detalhe, respectivamente, nas figuras (3.5b) e (3.5c). O ângulo de rotação que define o referencial síncrono é dado por $\theta(t) = \omega_e t = 2\pi f_e t$.

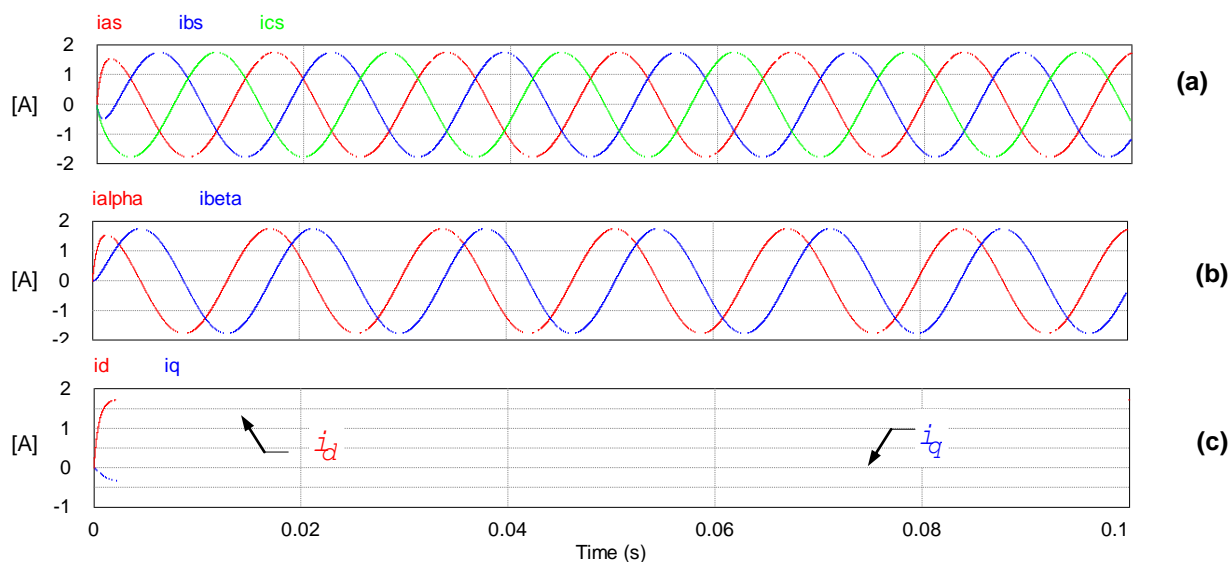
Os resultados gerados pela simulação são exibidos na figura (3.6). Na figura (3.6a) têm-se as formas de onda das correntes de linha, com amplitude 1,765 A. Na Figura 3.6(b), são mostradas as formas de onda das correntes senoidais i_α e i_β , defasadas 90° uma da outra e ambas com amplitude 1,765 A. Na figura (3.6c), são mostrados os sinais i_d e i_q , que após um breve transitório assumem valores constantes, respectivamente 1,733 A e $-0,33$ A. Pode-se verificar que as correntes senoidais no sistema trifásico e no sistema bifásico estacionário α - β aparecem constantes no sistema bifásico rotacional d - q .

Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento.**9** – Exemplo de sistema elétrico elaborado para simulação no software *PSIM*: **(a)** Sistema trifásico e blocos que efetuam as transformadas de Clarke e Park com base nas correntes de fase medidas; **(b)** Detalhe do diagrama de blocos para cálculo da transformada de Clarke; **(c)** Detalhe do diagrama de blocos para cálculo da transformada de Park.



Fonte: Filadelfo (2016)

Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento.**10** – Resultados da simulação do sistema mostrado na Figura 3.5: **(a)** Formas de onda das correntes trifásicas de fase; **(b)** Formas de onda dos sinais após a transformação de Clarke; **(c)** Formas de onda dos sinais após a transformação de Park.



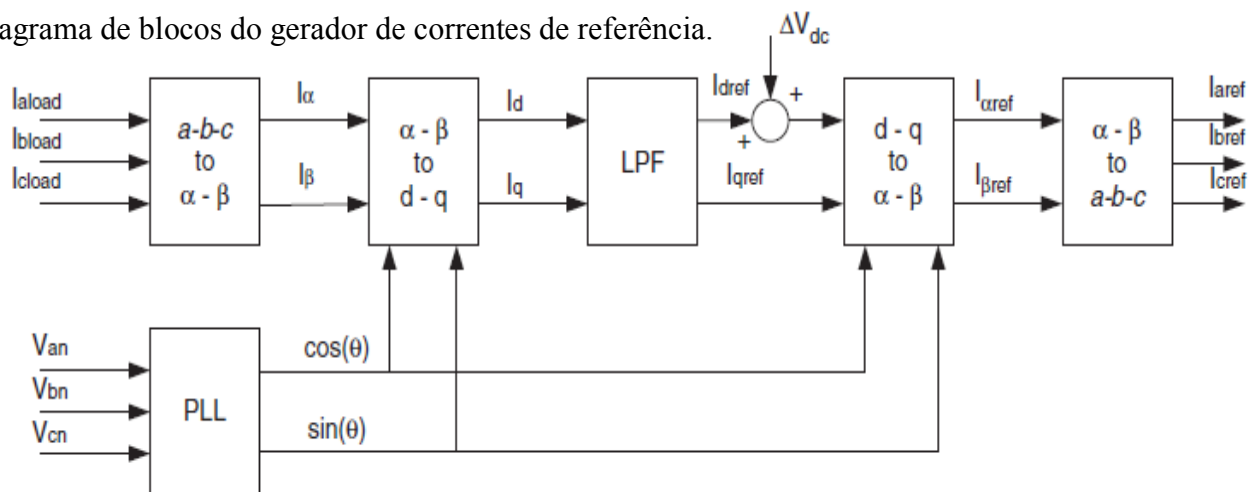
Fonte: Filadelfo (2016)

Tempo (s)

3.2.2.1.5 Algoritmo para geração da corrente de referência

Por meio da utilização das transformadas de Clarke e Park, foi desenvolvido um algoritmo de controle realimentado para o bloco gerador de correntes de referência (Bhattacharaya, 1995) O diagrama de blocos de um gerador de corrente de referência baseado na teoria dos vetores espaciais é mostrado na figura. (3.8).

Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..11 - Diagrama de blocos do gerador de correntes de referência.



Fonte: Dixon, Morán (2007)

Neste caso, as correntes reais são transformadas em um quadro de referência síncrona (Bhattacharaya e Divan, 1995) A moldura de referência é sincronizada com a tensão da rede AC, portanto gira na mesma frequência.

As correntes compensadas geradas pelo filtro ativo paralelo são obtidas da Eq. (3.10).

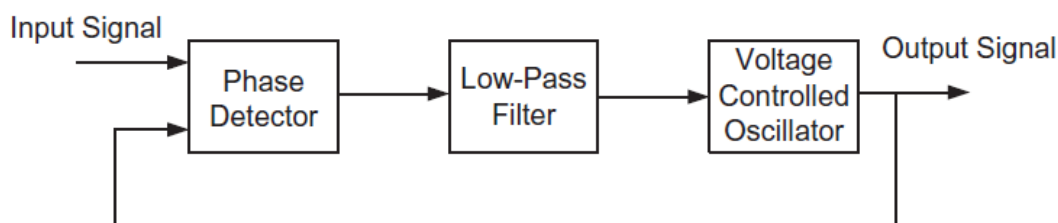
$$\begin{bmatrix} i_{aref} \\ i_{bref} \\ i_{cref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega t) & -\text{sen}(\omega t) \\ 0 & \text{sen}(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_{dref} \\ i_{qref} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Uma das características mais importantes deste algoritmo é que as correntes de referência são obtidas diretamente das correntes de carga sem considerar as tensões da fonte. Esta é uma

vantagem importante uma vez que a geração dos sinais de referência não é afetada por desequilíbrio de tensão ou distorção de tensão, aumentando assim a robustez e o desempenho da compensação.

No entanto, para se transformar do plano α - β para o quadro de referência síncrono d-q, são necessários sinais de seno e cosseno sincronizados com as respectivas tensões fase neutro. Para essa razão, é usado um PLL, como o da figura (3.9), por cada fase.

Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..12 - Diagrama PLL



Fonte: Dixon, Morán (2007)

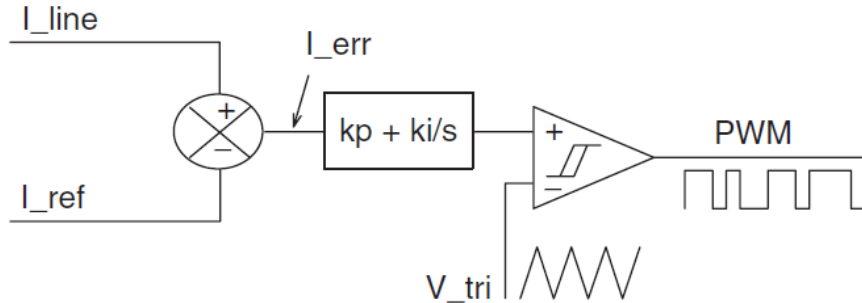
As correntes de carga não equilibradas geram um espectro harmônico diferente no quadro de referência síncrona, e as componentes harmônicas de baixa ordem aparecem no sinal de referência. Para separar essas componentes de corrente de baixa frequência não características, a frequência de corte do filtro passa-baixa deve ser um valor baixo.

3.2.2.2 Modulador de corrente: pelo método da portadora triangular

A eficácia de um filtro ativo de potência depende basicamente das características de projeto do controlador de corrente, o método implementado para gerar o modelo de referência e a técnica de modulação utilizada.

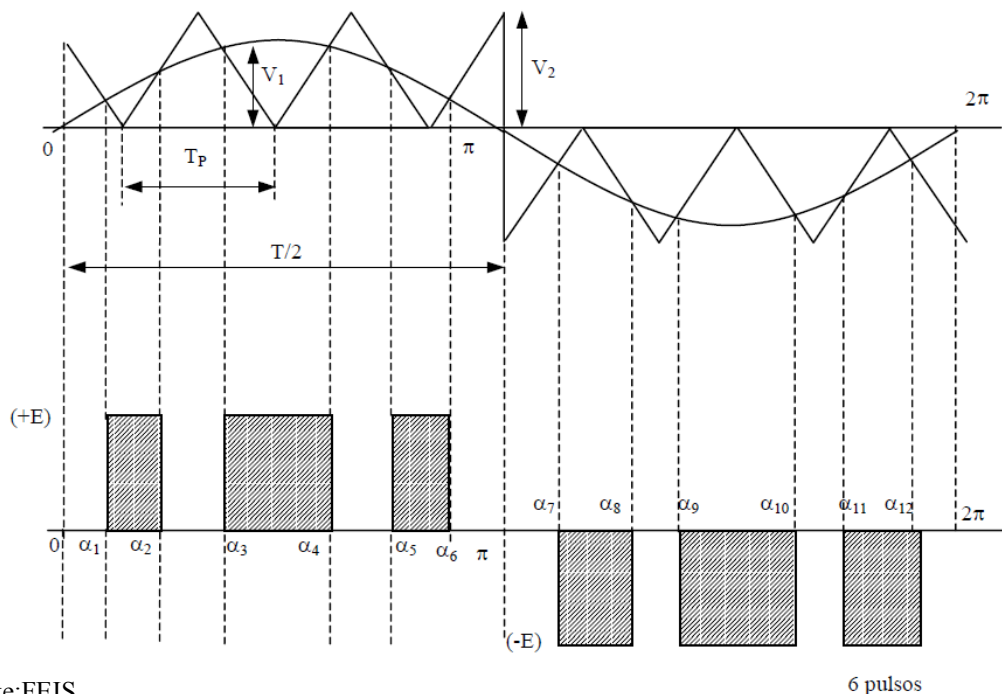
A maioria das técnicas de modulação utilizadas em filtros ativos são baseadas em estratégias de PWM. O método da portadora triangular, mostrado na figuras (3.10) e (3.11), compara o erro da corrente com uma onda triangular de frequência fixa. O erro é processado através de um estágio de ganho proporcional integral (PI) antes da comparação com a onda triangular.. Os valores para o ganho de controle PI K_p e K_i determinam a resposta transitória e o erro de estado estacionário.

Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento. **13** - Modulador PWM usando portadora triangular



Fonte: Dixon, Morán (2007)

Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento. **14** - Forma de onda modulada em PWM



Fonte:FEIS

Empiricamente, verificou-se que os valores para k_p e k_i mostrados nas equações. (3.11) e (3.12) dão uma boa performance dinâmica em condições operacionais transitórias e estacionárias. onde $L + L_o$ é a indutância da série total vista pelo conversor, ω_c é a frequência angular da portadora triangular, cuja amplitude é um pico de pico de um volt e V_{dc} é a tensão de alimentação do inversor.

$$K_p = \frac{(L + L_o) c}{V_{dc}} \quad (3.11)$$

$$K_i = c \cdot kp \quad (3.12)$$

4 PROPOSIÇÃO E METODOLOGIA

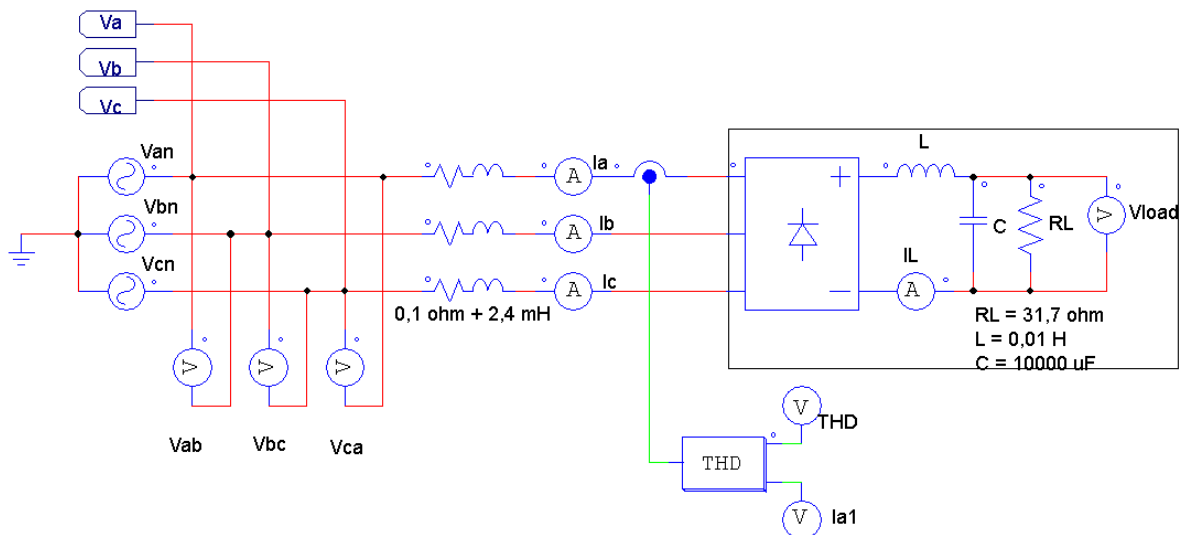
4.1 SIMULAÇÃO DE SISTEMA COM DISTÚRBIOS HARMÔNICOS

Como exposto anteriormente, a proposta do presente trabalho é projetar e simular um sistema elétrico trifásico com filtro ativo paralelo para compensação das distorções harmônicas geradas pelas correntes drenadas da rede elétrica de distribuição por uma carga não linear.

As simulações foram efetuadas com o auxílio do software PSIM, indicado para aplicações de potência e sistemas de controle.

Primeiramente, para observar o comportamento de um sistema elétrico com distúrbios de natureza harmônica, foi efetuada a simulação do sistema da figura (4.1). Nele, a rede

Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..15 - Circuito1 de simulação: Sistema elétrico trifásico alimentando uma carga não linear



Fonte: próprio autor

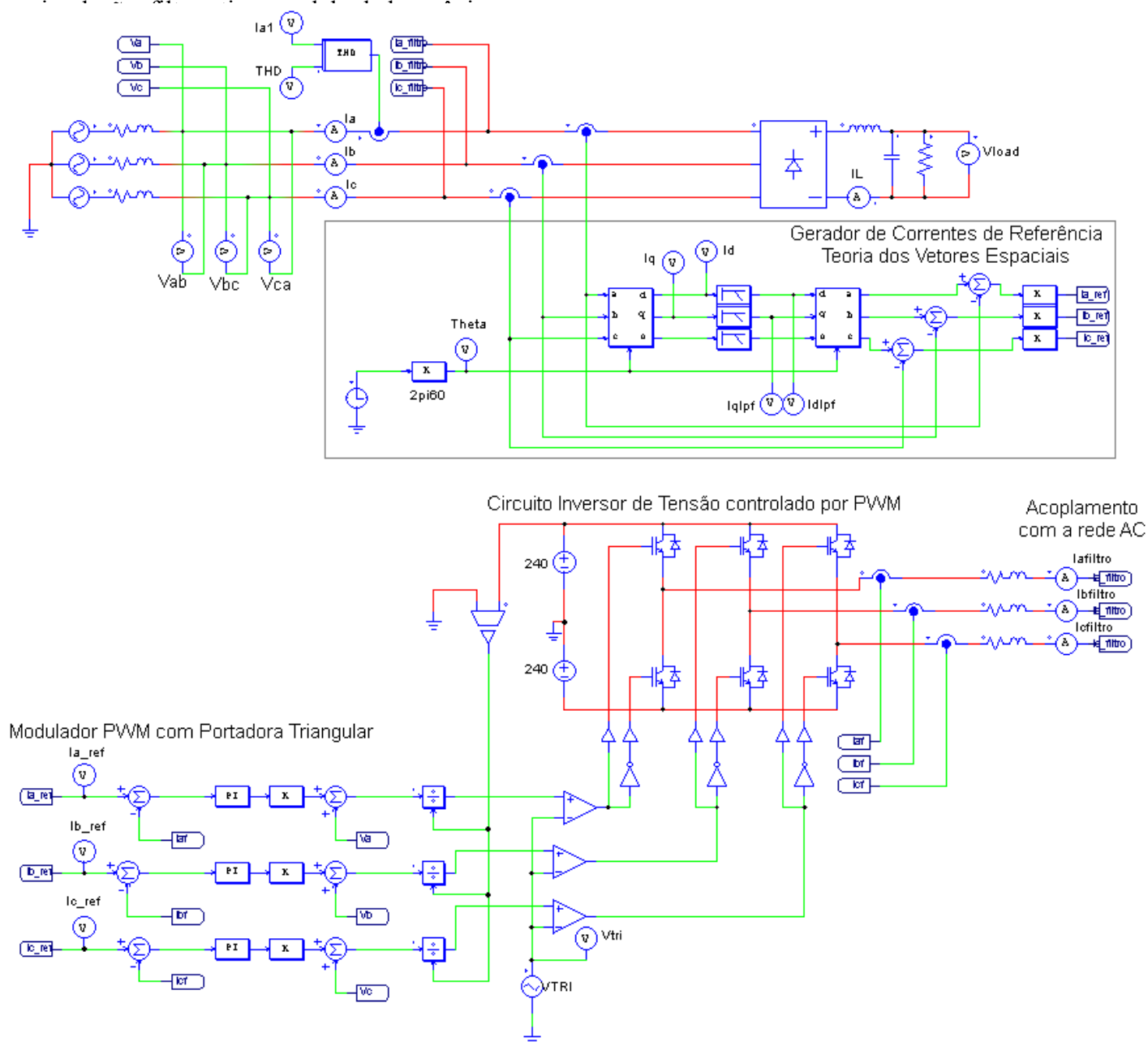
elétrica trifásica com tensões de linha V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} (220 VRMS) alimenta um circuito retificador, responsável por fornecer corrente contínua à carga complexa.

Em seguida, para a mesma alimentação e carga, foi introduzido o filtro ativo para compensação harmônica. Os detalhes são mostrados no tópico a seguir.

4.2 SIMULAÇÃO SISTEMA TRIFÁSICO COM FILTRO ATIVO PARALELO

Para compensar carga da figura (4.1), foi projetado e simulado, dentro da plataforma disponibilizada pelo software PSIM, com base na teoria abordada nos capítulos anteriores, o sistema com filtro ativo paralelo da figura (4.2).

Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..16 - Circuito de



Fonte: próprio autor.

Para cada uma das 3 fases, uma amostra da corrente de linha é obtida por meio dos sensores de corrente, e injetada na entrada do circuito gerador de corrente de referência. O sinal passa pelo bloco que representa a transformada de Clarke e Park, e em seguida passa por um filtro passa baixa ajustado para a frequência de corte de 60 Hz. Após a filtragem das frequências harmônicas, o sinal de onda passa pelo bloco da anti-transformada de Park e Clarke, obtendo os valores das correntes puramente senoidais.

Essa corrente, composta exclusivamente da frequência fundamental, é somada ao inverso da corrente amostrada da linha, como resultado são obtidas as correntes de referência para cada fase. Logo, a corrente de referência é, a grosso modo, a corrente de linha com distorções harmônicas nas mesmas frequências, mas com amplitudes opostas às correntes amostradas. É válido ressaltar que, embora tenha sido abordado na teoria e apareça no diagrama de blocos da figura (3.8), o uso de PLL não se fez necessário, uma vez que o bloco que realiza a transformada abc-dq no software, pode ser alimentado diretamente por θ e realiza automaticamente o tratamento do sinal.

As correntes de referência, são processadas por um controlador PI, de ganho proporcional K_p e ganho integral K_i , e passam pelo circuito modulador PWM, que compara o sinal com uma onda proveniente de uma portadora triangular de frequência 10 kHz. Na saída do amplificador operacional, o sinal modulado em largura de pulso realiza o chaveamento do circuito inversor. Finalmente, as correntes de filtro são injetadas na rede, por meio das indutâncias de acoplamento CA.

Os valores dos ganhos K_i e K_p foram encontrados empiricamente. Inicialmente foram utilizados os valores: $K_i = 0,001$, e $K_p=50$. Para observar os efeitos de cada ganho, os valores foram alterados e outras simulações foram realizadas.

Os resultados das simulações, bem como suas análises, são expostos no próximo capítulo.

4.3 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO E CÁLCULO

O procedimento usado para obtenção dos resultados para análise do sistema com filtro ativo está descrito sequencialmente abaixo:

- 1 Obtenção e análise do espectro de frequência da fase A.
- 2 Cálculo da taxa de distorção harmônica (THD).
- 3 Obtenção e análise das formas de onda:
 - das correntes da rede CA: I_a , I_b e I_c .

- das correntes injetadas pelo filtro na rede: $I_{afiltro}$, $I_{bfiltro}$ e $I_{cfiltro}$.
- da tensão e corrente na carga: V_L e I_L .
- das correntes no plano d-q, antes e depois do filtro passa baixa: I_d , I_{dlpf} , I_q e I_{qlpf}

O software PSIM, por meio das ferramentas virtuais de medição, permite a visualização das formas de onda no domínio do tempo, e também possibilita a obtenção do espectro de frequência das formas de onda de corrente e de tensão.

O espectro de frequência, além de permitir uma interpretação gráfica dos distúrbios harmônicos, permite obter a amplitude com que cada frequência harmônica interfere no sistema.

Para calcular a Taxa de Distorção Harmônica, substitui-se na equação (2.3) os valores das amplitudes e frequências, obtidos do espectro de frequência da corrente na fase A.

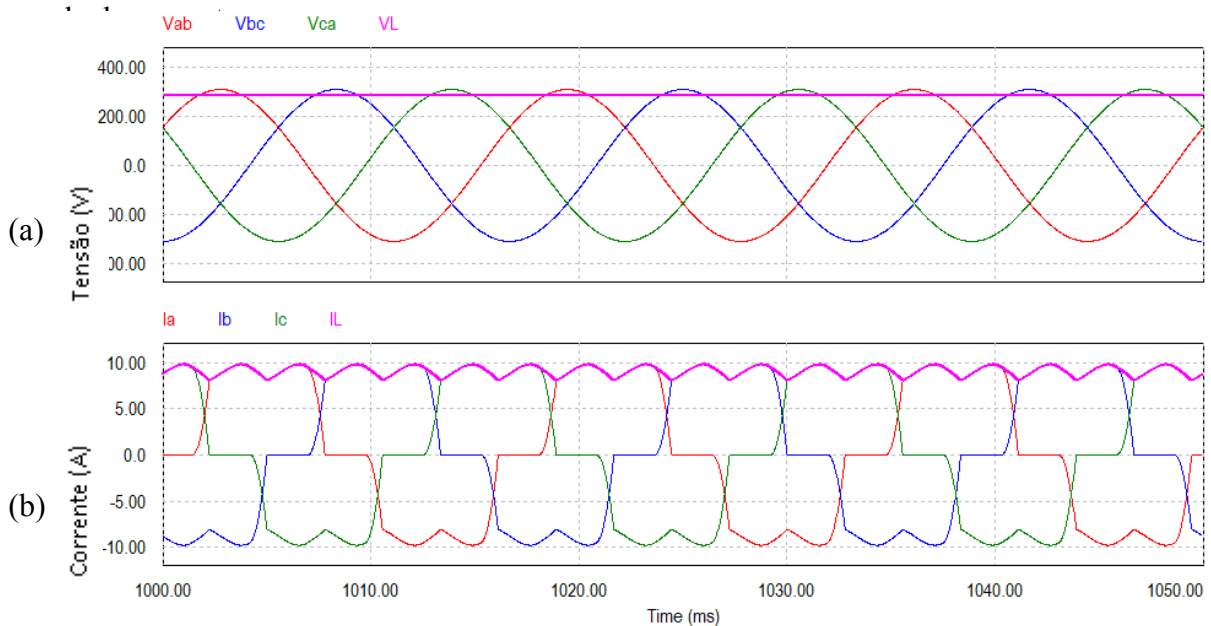
A redução do fator de potência foi avaliada por meio da equação (2.7).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 SIMULAÇÃO 1: SISTEMA SEM FILTRO

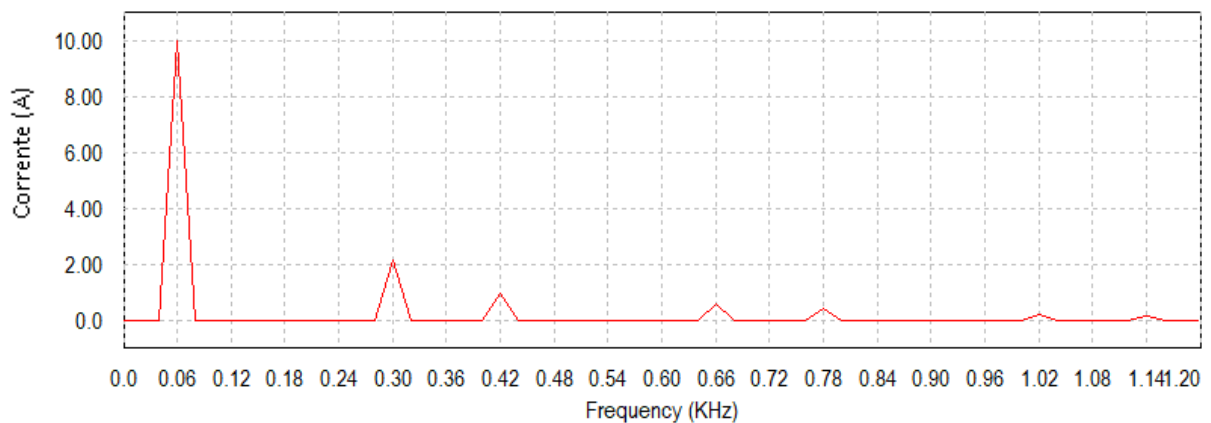
Na simulação do sistema sem filtro, figura (4.1), foram extraídas as formas de onda expostas na figura (5.1) e o espectro em frequência, figura (5.2). Na tabela 1 estão representados os valores das amplitudes do espectro para cada frequência harmônica.

Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..17 - Resultado da simulação: (a) Formas de onda das tensões de linha fornecidas pela concessionária de energia e onda de tensão na carga; (b) formas de onda das correntes nas três fases e forma de



Fonte: próprio autor.

Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..18 - Espectro em



Fonte: próprio autor.

Tabela1 - Contribuição de cada harmônica.

Ordem h	Frequência	Ia (A)
1	60 Hz	9,98
5	300 Hz	2,16
7	420 Hz	0,99
11	660 Hz	0,61
13	780 Hz	0,42
17	1020 Hz	0,22
19	1140 Hz	0,18

Fonte: próprio autor

Aplicando a equação (2.3) até a 19a harmônica, obtém-se a taxa de distorção harmônica:

$$TDH = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{(2,16^2 + 0,99^2 + 0,61^2 + 0,42^2 + 0,22^2 + 0,18^2)}}{9,98}$$

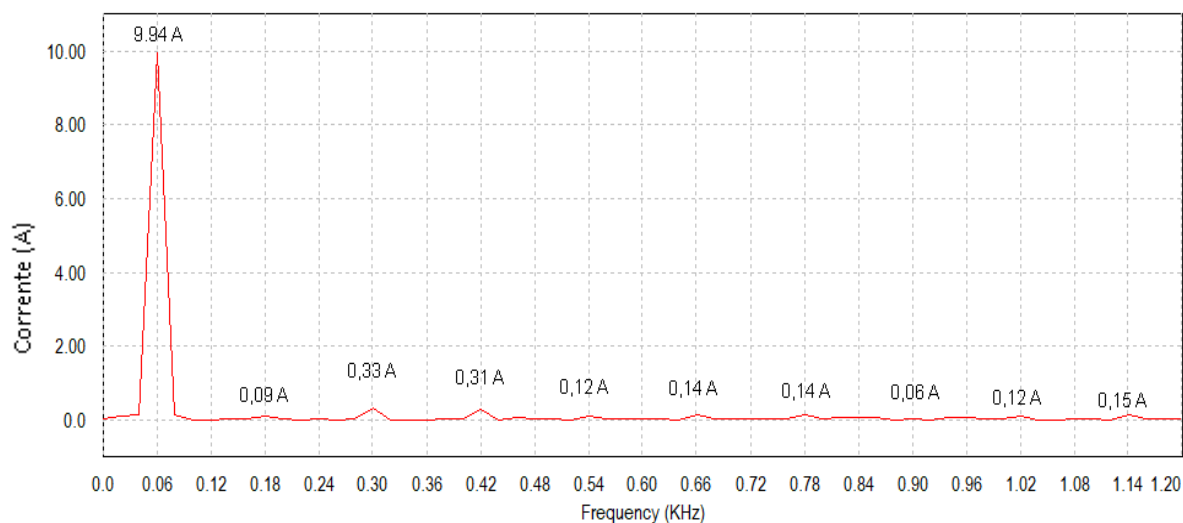
$$TDH = 24.3\%$$

Esse valor é considerado alto, pois representa a relação da contribuição das harmônicas, pela componente fundamental, em um sistema.

5.2 SIMULAÇÃO 2: SISTEMA COM FILTRO ATIVO (KP=50)

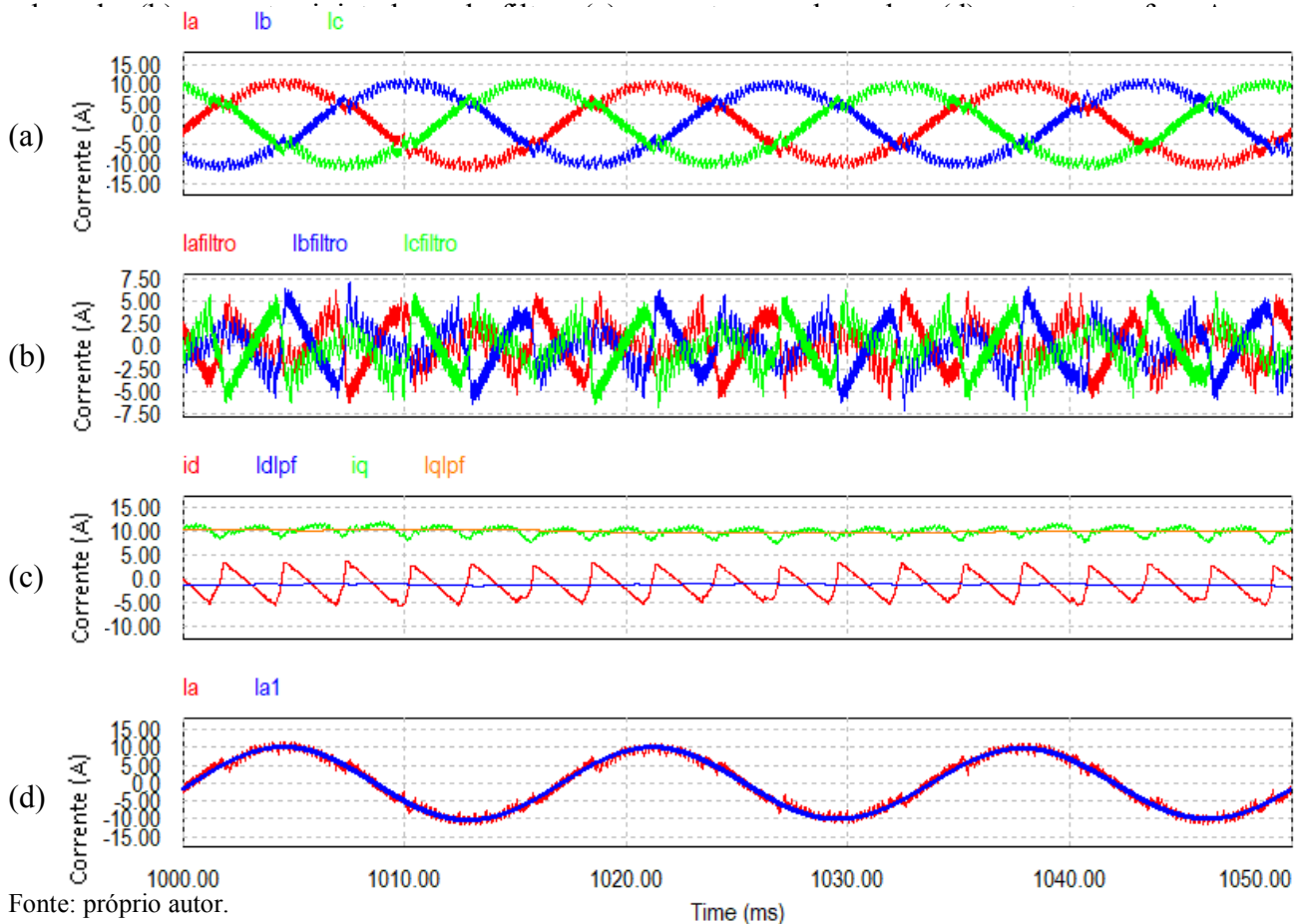
O sistema com filtro ativo, figura (4.2), foi simulado inicialmente com Kp=50 e Ki=0,001. Os resultados da simulação são mostrados nas figuras (5.3) e (5.4).

Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..19 -
la



Fonte: próprio autor.

Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..20 - Resultados da simulação do sistema com filtro ativo paralelo com $K_p=50$.. (a) correntes nas linhas



Analisando as imagens acima e comparando com os resultados obtidos da simulação anterior (sem filtro), observa-se de imediato a melhora brusca, mas não completa, nas formas de onda das correntes de linha e espectro de frequência. Do espectro de frequência, extraem-se os valores das componentes harmônicas para suas respectivas frequências. Aplicando esses valores na equação (2.4), obtemos:

$$TDH = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{0,09^2 + 0,33^2 + 0,31^2 + 0,12^2 + 0,14^2 + 0,14^2 + 0,06^2}}{9,94}$$

$$TDH = \quad ,$$

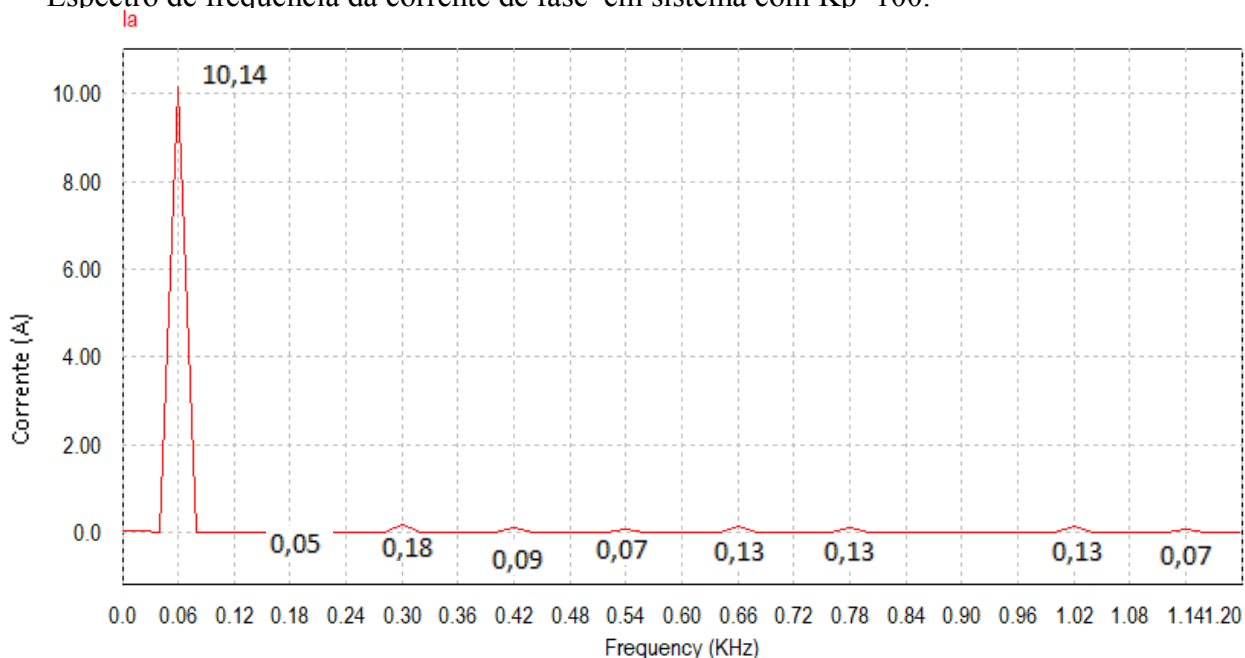
Esse valor demonstra numericamente a diminuição expressiva da distorção harmônica injetada na rede.

5.3 SIMULAÇÃO 3: SISTEMA COM FILTRO ATIVO (KP=100)

Com a finalidade de observar a influência do ganho proporcional, K_p , sobre a compensação do mesmo filtro ativo paralelo da simulação 2, foi realizada uma nova simulação alterando apenas o valor dessa constante de 50 para 100.

As figuras (5.5) e (5.6) representam os resultados da simulação:

Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento. **21** - Espectro de frequência da corrente de fase em sistema com $K_p=100$.

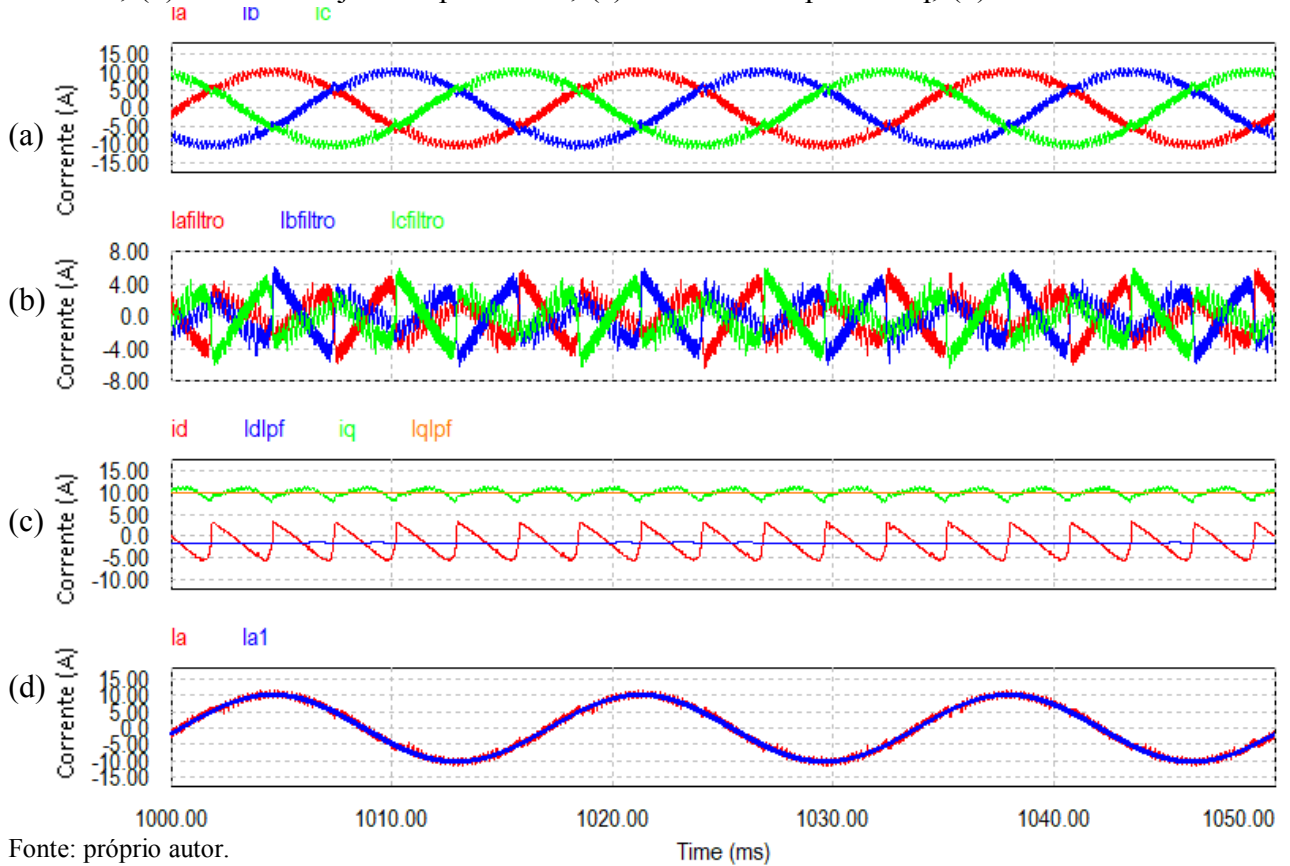


Fonte: próprio autor.

Em comparação com a simulação anterior, percebe-se que os valores das harmônicas diminuíram e a componente fundamental sofreu um leve aumento. O valor calculado da TDH é de 3,13%, o que demonstra uma significativa melhora da resposta do filtro em função do aumento de K_p .

Essa melhora também é significativa se analisado o aspecto das formas de onda das correntes na linha, que estão ainda mais próximas de uma onda senoidal pura.

Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento. **22** - Resultados da simulação 3 do sistema com filtro ativo paralelo com $K_p=100$. (a) correntes das fases; (b) correntes injetadas pelo filtro; (c) correntes no plano d-q; (d) corrente na fase A e



Também foi realizada a simulação alterando o valor de K_i de 0,001 para 0,01, entretanto, os resultados demonstraram que esse tipo de mudança no valor de K_i não apresenta impacto significativo para o filtro.

6 CONCLUSÃO

O objetivo traçado inicialmente para esse trabalho foi atingido. O projeto e as simulações do sistema de filtragem ativa para compensação de correntes harmônicas injetadas pela carga apresentaram resultados satisfatórios e em conformidade com a literatura avaliada durante a pesquisa.

O impacto do filtro no sistema é evidente se analisados os valores de TDH e os espectros de frequência obtidos. As técnicas usadas para gerar a corrente de referência e para controlar o circuito inversor se mostraram eficazes.

O aumento do ganho proporcional, K_p , melhorou a resposta do circuito enquanto a alteração do valor do ganho integral, K_i , não afetou significativamente o sistema.

REFERÊNCIAS

BHATTACHARAYA, S; DIVAN,D. Design and implementation of a hybrid series active filter system. **IEEE Conference Record PESC**, p. 189–195, 1995.

HALPING, S. Mark; CARD, Angela. **Power quality**. Auburn: Academic Press, 2001. p. 1053-1066.

TEORIA Básica dos Inversores de Tensão. Ilha Solteira: FEIS-Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2002. 24p.

MORÁN, Luis; DIXON, Juan. **Active filters**. Santiago: Elsevier Inc,2007. p. 1067-1102.

POMILIO, J. A. **Pré-reguladores de fator de potência**. Campinas: UNICAMP, 2002., 1-13p.

AKAGI, H.; KANZAWA, Y. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy components. **IEEE Trans. Ind. Appl.**, v.20, n. 3, p. 625–630.

FILADELFO, F. R. **Modelagem de controle vetorial orientado pelo fluxo do estator de motor de indução trifásico aplicado em um sistema de propulsão veicular**. 2016. 150f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2016.

ROCHA, J. E. **Qualidade de energia elétrica**. Curitiba: UTFPR, 2016. 37p.

QUALIDADE de energia harmônicas. Schneider Electric, 2003. 19p