

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Compensação de Harmônicas Utilizando Máquina Síncrona

Pedro Eugênio Marcondes Justino Ribeiro

Itajubá, Março de 2019

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

Pedro Eugênio Marcondes Justino Ribeiro

Compensação de Harmônicas Utilizando Máquina Síncrona

**Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos
para obtenção do Doutor em Engenharia Elétrica.**

**Área de Concentração: Automação e Sistemas
Elétricos Industriais**

Orientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo B. da Silva

Co-orientador: Prof. Dr. João Onofre P. Pinto

Março de 2019

Itajubá

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por ter me dado saúde, força e disposição para completar esse trabalho.

A minha amada esposa, Mariana Ferelli de Souza Ribeiro, por estar sempre ao meu lado quando precisei, por entender a minha ausência quando necessário e acima de tudo pela cumplicidade, sempre.

Um agradecimento especial a meus pais Sebastião Eugenio Justino Ribeiro e Zilda Marcondes Justino Ribeiro, pelo apoio incondicional por toda a minha vida, pelos ensinamentos transmitidos e pelo carinho com o qual me criaram. Às minhas irmãs Carolina Marcondes Justino Ribeiro e Isabela Marcondes Justino Ribeiro pela convivência e apoio.

Agradeço também ao meu co-orientador Dr. João Onofre Pereira Pinto, não só pelas orientações indispensáveis, mas também por incentivar e apoiar meu progresso profissional, sempre e acima de tudo por acreditar.

Agradeço ao meu orientador Dr. Luiz Eduardo Borgues da Silva pelos ensinamentos e pela paciência.

Ao doutor Marcio Luiz Magri Kimpara, um amigo que não mediu esforços para me ajudar. Aos amigos do laboratório de pesquisa BATLAB da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

A todos o meu muito obrigado.

Resumo

O advento da eletrônica e dos semicondutores trouxe consigo a produção de conteúdo harmônico circulante nas redes elétricas de energia. Essas correntes podem causar aumento de perdas nos condutores e ressonâncias indesejadas se tornando um dos maiores problemas nos sistemas de energia elétrica. Inúmeros trabalhos já propuseram soluções para este problema, entre elas: i) transformadores com enrolamentos especialmente conectados; ii) reatores; iii) filtros ressonantes passivos; iv) filtros ativos paralelos; v) filtros híbridos, iv) outros. Porém nenhuma dessas soluções encontra boa aplicabilidade a medida que os níveis de tensão e potência são elevados. Neste trabalho propõe-se o uso de máquinas síncronas para a compensação de harmônicas através do controle da corrente de excitação da máquina. A este equipamento está sendo proposto o nome de Filtro Ativo Supersíncrono (FAZ). O mesmo pode ser implementado “*retrofitting*” máquinas síncronas já instaladas, ou em projetos novos.

Para verificar a viabilidade de uso da máquina síncrona para compensação de reativos, foi apresentada a modelagem da mesma, com foco no campo eletromagnético gerado no entreferro da máquina. Então foi realizada uma simulação de compensação de harmônica com máquina síncrona e comparação com um modelo de referência (filtro ativo paralelo). Ao final, discussões apresentando dificuldades de implementação e temas de pesquisas futuras são apresentadas.

Palavras-Chave: Compensador Síncrono, Compensação Harmônicas, Máquina Síncrona.

Abstract

The development of electronics and semiconductors brought the circulating of harmonic currents in the electric power grids. These currents can cause losses in conductors and unwanted resonances and have become one of the biggest problems in electric power systems. Therefore, many solutions are presented in the literature, such as, i) special design transformers windings; ii) reactors; iii) passive resonant filters; iv) parallel active filter; v) hybrid filters. However, none of these solutions has good applicability in high-voltage high-power systems. This dissertation proposes an alternative method of using a synchronous machine to compensate the harmonic content of a non-linear load, by controlling its field current. For this equipment, it is being proposed the name of Supersynchronous Active Filter (FAZ). This equipment can be implemented by retrofitting of installed synchronous machines, or in new projects.

The viability of the synchronous operation for the reactive power compensation is described; it was presented the field and flux machine modeling. The simulation of the operation is shown, for a compensation of a non-linear load, and a comparison with a reference model (parallel active filter) was done. Finally, discussions are made considering the results and the implementation difficulties.

Keywords: Synchronous Compensation, Harmonics Compensation, Synchronous Machine.

SUMÁRIO

Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1 Contextualização.....	1
1.2 Organização do trabalho	7
Capítulo 2 – Máquina Síncrona	9
2.1 Máquina Síncrona - Modelagem.....	9
2.2 Operação como Compensador Síncrono e compensação de harmônicas	12
2.3 Modelagem da Máquina – Reconstrução de Campo	14
2.4 Determinação do Fluxo Concatenado.....	19
Capítulo 3. Compensação de Harmônicos.....	28
3.1 Origem de Harmônicas	28
3.2 Filtragem de harmônicas.....	29
Capítulo 4. Filtro Ativo Paralelo	36
4.1 Introdução ao FAP	36
4.2 Topologia.....	36
4.3 Estratégia de controle.....	38
4.4 Dimensionamento dos Componentes físicos	38
4.5 Projeto das Malhas de Controle	40
Capítulo 5. Filtro Ativo Supersíncrono (FAZ).....	42
5.1 Compensador síncrono	42
5.2 Compensador supersíncrono.....	46
5.3 Análise da operação	54
Capítulo 6. Resultados Simulação.....	57
6.1 Resultados de Simulação com FAP	57
6.2 Resultados de Compensação de Harmônica com FAZ.....	64

6.3 Discussões e Análise.....	70
Capítulo 7. Considerações Finais	71
Referências Bibliográficas	73
Anexo - A	77
Anexo – B.....	89

Capítulo 1 - Introdução

1.1 *Contextualização*

No sistema elétrico de potência os fatores preponderantes buscados na operação são confiabilidade e eficiência. Na medida que o perfil de carga e geração do sistema elétrico é alterado com a inserção de equipamentos de novas tecnologias (como equipamentos de fontes chaveadas), o gerenciamento técnico das redes de distribuição e transmissão se tornam cada vez mais custosas devido ao aparecimento de conteúdo harmônico circulante na rede que pode ocasionar problemas em diversos componentes da rede elétrica como cargas, fontes, geradores e cabeamento.

As cargas não-lineares presentes no sistema elétrico podem causar inúmeras perturbações à rede elétrica, devido não apenas à potência reativa associada a elas, mas principalmente por causa das correntes harmônicas injetadas por elas no sistema de alimentação. Fornos à arco, conversores estáticos de sistemas de iluminação com lâmpadas fluorescentes e outras lâmpadas de descarga, fontes de alimentação com retificador de entrada, presentes em muitos equipamentos eletrônicos estão entre as principais fontes geradoras de harmônicos.

O conteúdo harmônico gerado pelas cargas não-lineares circula pela rede elétrica de energia podendo causar perdas, mal funcionamento e danos aos equipamentos presentes na rede elétrica.

Em conversores eletromecânicos de energia como máquinas de indução, máquinas síncronas e transformadores, a principal consequência é o aquecimento de gerado pelas correntes harmônicas circulantes. Estas perdas ocorrem principalmente no cobre dos enrolamentos e no ferro do núcleo da máquina. Tem-se uma perda de eficiência e capacidade de torque nas máquinas (BROWN, 1979).

O maior efeito dos harmônicos em máquinas rotativas (indução e síncrona) é o aumento do aquecimento devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre. Afeta-se, assim, sua eficiência e o torque disponível. Além disto, tem-se um possível aumento do ruído audível, quando comparado com alimentação senoidal.

A operação da máquina e de transformadores de modo contínuo com sobreaquecimento ocasiona perdas cumulativas que depreciam a eficiência permanente desses equipamentos e sua vida útil.

Nas máquinas, a indução de componentes harmônicos no fluxo concatenado do estator gera consequente alteração do perfil de torque causando o aparecimento de oscilações mecânicas e vibrações na máquina. Em sistemas motor-carga estas vibrações podem causar perdas em processos produtivos de precisão afetando a qualidade de produtos e em sistemas turbina-gerador podem ocasionar ressonâncias destrutivas.

Nos transformadores ainda se acentua o efeito da dispersão de fluxo dado que as suas reatâncias terão valores maiores para componentes harmônicos e também o efeito de capacitâncias parasitas que podem induzir ressonâncias no equipamento e rede elétrica.

Para o cabeamento da rede elétrica de energia há aumento de perdas ôhmicas devido a presença de correntes harmônicas que elevam a corrente eficaz real. Também há elevação de perdas devido ao efeito pelicular e ao efeito de proximidade. O efeito pelicular acarreta deslocamento das correntes de maior frequência para a área mais externa do cabo, o que restringe a área condutora efetiva, elevando-se assim a resistência do cabo equivalente para aquela componente harmônica. O efeito de proximidade também aumenta a resistência equivalente do cabo devido ao efeito de campos magnéticos oriundos de outros cabos paralelos com correntes harmônicas.

Para cargas como equipamentos eletrônicos as distorções harmônicas de tensão representam normalmente são muito prejudiciais ao seu funcionamento, pois estes usualmente

se utilizam de aspectos da onda de tensão para sua atuação, tais como valor de pico, cruzamento pelo zero e valor eficaz. Assim o seu funcionamento fica suscetível a distorções na forma de onda da alimentação.

Sistemas de instrumentação e medição também podem ser afetados e por grandes distorções harmônicas. Erros significativos de medição de componentes analógicas foram observados em sistemas de medição com distorções maiores de 20% pois podem ocorrerem ressonâncias que afetam a grandeza medida.

Devido aos problemas causados pela contaminação harmônica da rede, várias técnicas de compensação são propostas na literatura, as principais utilizadas podem ser divididas em filtros passivos, filtros ativos e filtros híbridos.

Dentre os filtros passivos podemos destacar a utilização de: i) transformadores com enrolamentos especialmente conectados; ii) reatores; iii) filtros ressonantes passivos;

Os transformadores podem ser usados para mitigação de componentes harmônicas em diversas situações; primário com enrolamento em delta para evitar propagação de harmônicas homopolares, primário com enrolamento estrela sem neutro e secundário com enrolamento *zigzag*.

Os reatores, normalmente posicionados do lado CA de conversores estáticos de potência, também são utilizados para a atenuação de componentes harmônicas de alta frequência visto que sua reatância aumenta consideravelmente para essas componentes.

Os filtros ressonantes, ou filtros sintonizados, são compostos por capacitores, indutores e resistência associadas em série ou paralelo a fim de serem conectados na rede elétrica e formarem um caminho de baixa impedância para correntes em uma frequência específica. Para esta solução é necessário o dimensionamento, projeto e implementação de um filtro para cada harmônica que se deseja compensar.

As soluções passivas apresentam resultados satisfatórios de desempenho e tem as vantagens de projeto e implementação simplificados, porém normalmente resultam em soluções volumosas, com peso elevado e custosas.

Os filtros ativos atuam de forma a emular fontes de tensão harmônicas em série ou fontes de corrente harmônicas em paralelo com a rede que as distorções sejam mitigadas.

Dentre os filtros ativos destaca-se a utilização de:

- i) Filtro ativo série (FAS)
- ii) Filtro ativo paralelo (FAP).

O filtro ativo série possui um enrolamento de transformador de acoplamento em série com a tensão da rede e carga ao qual está conectado. O secundário do transformador de acoplamento está ligado a um conversor estático que atua de forma a controlar a tensão gerada no primário a fim de que essa tensão se some a da rede e elimine harmônicos indesejáveis na tensão. Sua principal desvantagem é que tem que suportar a corrente de carga do sistema.

Uma das formas de correção deste conteúdo harmônico é com a utilização do Filtro Ativo Paralelo (FAP). Para esta correção controla-se o FAP de tal forma que o sistema da rede elétrica enxergue o conjunto FAP e carga, como uma carga linear de característica resistiva. Para a geração das referências de correntes do FAP pode-se utilizar diversas teorias de potência, dentre as quais se destaca a teoria PQ (AKAGI, 1983). Esta teoria destaca-se por ser uma teoria essencialmente trifásica (e não uma monofásica estendida a 3 fases), capaz de ser aplicada nas mais diversas configurações de sistemas trifásicos: de três ou quatro fios, balanceados ou não.

A utilização de FAP para essa correção é bem aceita e disseminada na bibliografia do tema, porém encontra dificuldades em casos específicos como em sistemas de alta tensão ou sistemas de alta potência, processamento de grande quantidade de reativo na frequência fundamental.

Alguns trabalhos propõem a implementação de filtros híbridos (FUJITA, 1998) a fim de dirimir as desvantagens de cada tipo de filtro. Nestas aplicações um conversor estático é conectado em conjunto com um filtro passivo sintonizado, de forma que a sua operação conjunta seja melhorada. Estas iniciativas apresentam bons resultados à medida que se aproveitam das vantagens de cada tipo de filtro, porém é a escolha da topologia pode trabalhosa e específica para cada tipo de carga para que o controle não seja excessivamente complexo, tornando essa solução muitas vezes pouco abrangente (ÖZKAYA, 2007).

Para algumas aplicações onde o FAP tem dificuldade de ser implementado devido a níveis de potência reativa a ser compensada e níveis de tensão do sistema soluções como a aplicação de máquina síncrona operando como compensador síncrono podem ser viáveis.

Alguns trabalhos já propuseram a redução do conteúdo harmônico da tensão gerada em máquinas síncronas, através da modificação da corrente de campo no rotor da máquina (NAGANO, 2002 e KIMPARA, 2013). Estes trabalhos abriram um campo de pesquisa para uma utilização inovadora deste tipo de máquina, como pode-se melhorar a tensão gerada, poder-se-ia também aplicá-la em sistema de compensação de harmônicas ativas, onde seria uma tecnologia a competir com o filtro ativo de paralelo.

A máquina síncrona apesar de ter sua maior aplicação ser no modo gerador, também podem ser aplicadas em funções específicas na operação como motor. Os motores síncronos podem ser utilizados em grandes fábricas para cargas que necessitam de velocidade constante e altamente regulada. Podem ser aplicados também a para a correção de fator de potência e controle de tensão de barramentos de potência.

Poucos trabalhos no âmbito de aplicação máquinas síncronas na compensação de correntes harmônicas foram desenvolvidas. (TAKASE, 1997). As literaturas existentes propõem mitigação do conteúdo harmônico gerado pela própria máquina devido as

características construtivas não-ideias da máquina síncrona. As propostas se restringem a alteração de projeto da máquina, como modificações no enrolamento do estator ou projeto otimizado da sapata polar (ZANETTA, 2006), soluções estáticas que demandam grande esforço de projeto e inviáveis para máquinas já em operação.

Este tipo de máquina é comumente modelada desprezando-se as não-linearidade de sua construção, tais como a distribuição senoidal imperfeita de seus enrolamentos e ranhuras do rotor e estator. Estas imperfeições geram consequências na operação da máquina, tais como: aparecimento de componentes harmônicas na tensão induzida e campo magnético no entreferro com parcela não radial, sendo formado por uma composição de um campo normal e outro tangencial (KIMPARA, 2012; ZHU, 2006 e WU, 2009).

Para o funcionamento da máquina como compensadora de correntes harmônicas é necessário que a mesma seja capaz de produzir tensões induzidas harmônicas, logo pe necessário reconstruir o fluxo concatenado nos enrolamentos do estator e no entreferro da máquina para que se verifica a capacidade da mesma de produção de fluxos nas frequências harmônicas

A reconstrução de campo na modelagem de máquinas foi apresentada em trabalhos anteriores para vários tipos de máquinas (KHOOBROO, 2008; LIN, 2006). O objetivo é a determinação do campo do entreferro com a consideração dos aspectos não-ideais da máquina. Comumente utilizava-se método dos elementos finitos (BASTOS, 1992) para este fim, porém relata-se na literatura a dificuldade devido a esforços computacionais demasiados para operacionalização destes modelos.

Como esse método apresenta a particularidade de modelagem da máquina tendo em vista o campo gerado, algumas literaturas propõem a sua aplicação em situações específicas de operação da máquina como controle otimizado de motores, verificação de faltas e redução de vibrações (LIN, 2012; KIMPARA, 2013). Neste trabalho propõe-se a utilização desse método

para verificação da capacidade da máquina de gerar em seu campo o conteúdo harmônico necessário para compensação de harmônicas da rede elétrica a qual está conectada.

Dada essa verificação, propõe-se a modelagem da máquina para a operação como compensador de conteúdo harmônico da rede elétrica, uma operação estendida da sua função de compensador síncrono.

Esse processo de utilização de máquina síncrona para atenuação de harmônicos foi avaliado em trabalhos como (TAKASE, 2006), utilizando-se circuitos ressonantes no enrolamento de campo, por exemplo, porém hoje com o advento da eletrônica de potência é possível melhorar o desempenho dessas pesquisas [problemas e desvantagens]

Dentro deste contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar uma solução para a compensação de correntes harmônicas da rede utilizando-se uma máquina síncrona. Busca-se mostrar que a máquina é capaz de produção de correntes harmônicas para atendimento de conteúdo harmônico das cargas não-lineares através de modelagem de reconstrução do campo no entreferro da máquina dada uma corrente adequada de excitação do campo. São apresentados resultados de simulação e comparação o desempenho dessa máquina com um benchmark através de resultados de simulação.

1.2 *Organização do trabalho*

O trabalho se propõe a provar o conceito de utilização da máquina síncrona para a compensação de harmônicos em cargas não lineares e em comparação com um *o filtro ativo paralelo*. Para tanto organizou-se da seguinte forma a apresentação do problema no capítulo introdutório, seguido de uma fundamentação teórica da máquina síncrona no capítulo 2, onde também se apresenta a modelagem da máquina síncrona com vistas ao campo. No capítulo 3 faz-se um levantamento bibliográfico das principais metodologias de compensação de harmônicas.

No capítulo 4 são apresentados os dimensionamento e teoria de controle do filtro ativo paralelo. No capítulo 5 é apresentado os modos de operação da máquina na síncrona, sua forma de compensação de reativos na frequência fundamental e compensação de harmônicas. No capítulo 6 apresenta-se os resultados de simulação da operação da máquina como compensador de harmônicos na corrente da rede e filtro ativo, e os resultados são comparados para mostrar a efetividade da proposta. Finalmente, no capítulo 7 são apresentadas conclusões propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2 – Máquina Síncrona

2.1 *Máquina Síncrona - Modelagem*

Uma máquina síncrona é um conversor eletromecânico de energia em corrente alternada cuja velocidade em regime permanente é constante e proporcional ao número de polos. É realizada uma distribuição de enrolamentos de armadura em torno do núcleo ferromagnético do estator com disposição espacial simétrica. O enrolamento de campo produz um campo rotativo na velocidade base devido a excitação do rotor em corrente contínua (CHAPMAN, 2005).

Em modo motor uma tensão é aplicada aos terminais dos enrolamentos do estator, produzindo um campo magnético girante que atrai o campo magnético do rotor induzido pela corrente de campo. As correntes de armadura são dependentes da carga mecânica no eixo da máquina síncrona.

As equações que descrevem a corrente do estator e rotor da máquina podem ser expressas em função da tensão aplicada, do fluxo gerado no rotor e da resistência dos enrolamentos do respectivos (Krause, 2002):

$$i_{abc} = \frac{\dot{\lambda}_{abc} - v_{abc}}{r_s} \quad (2.1)$$

$$i_{qdr} = \frac{\dot{\lambda}_{qdr} - v_{qdr}}{r_r} \quad (2.2)$$

Os índices s e r apontam respectivamente para as variáveis associadas aos enrolamentos do estator e do rotor. As matrizes r_r e r_s são matrizes diagonais da resistência dos enrolamentos e λ_{abc} e λ_{qdr} são os fluxos concatenados dependentes das corrente e das matrizes de indutâncias mútuas e autoindutâncias. A equação dos fluxos concatenado é apresentada na equação (2.3).

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{qdr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{abc} \\ i_{qdr} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Considerando a rotação do eixo do rotor da máquina podemos observar a distribuição ilustrativa do fluxo na Figura 2.1 e Figura 2.2:

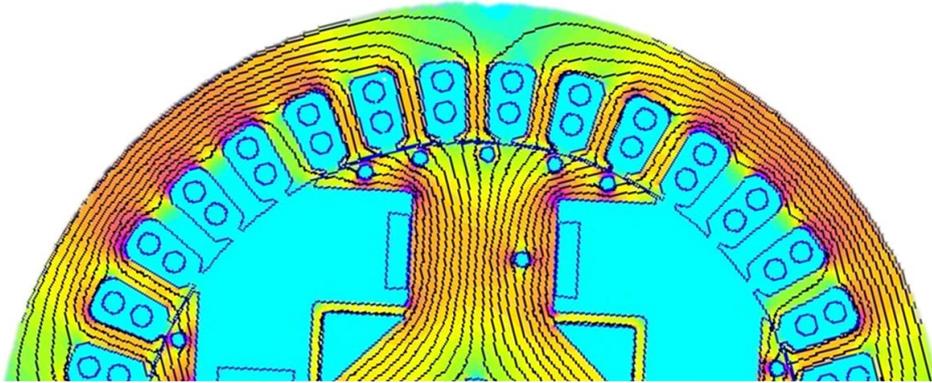


Figura 2.1- Corte Máquina Síncrona
Fonte: Próprio autor

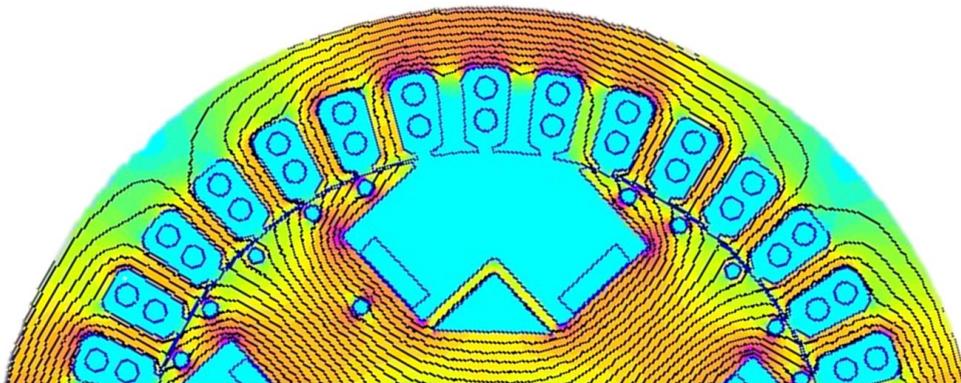


Figura 2.2- Corte Máquina Síncrona com rotor em deslocamento
Fonte: Próprio autor

Conforme o rotor gira o fluxo concatenado varia com o cosseno do ângulo entre os eixos do rotor e do estator:

$$\lambda = N\Phi \cos(\omega t) \quad (2.4)$$

Onde, λ é o fluxo concatenado, N é o número de espiras do enrolamento do campo, ω é a velocidade angular elétrica síncrona e t é o tempo considerado nulo quando o pico da onda de indução coincide com o eixo magnético da bobina do estator.

Considerando que o fluxo Φ é a integral de superfície da densidade de fluxo, tem-se que

$$\Phi = \iint \vec{B} dS \quad (2.5)$$

Dado que a densidade de fluxo varia com um ângulo θ (ângulo medido a partir do eixo do rotor).

$$B = B_{pico} \cos(\theta) \quad (2.6)$$

Considerando a área polar o fluxo pode ser considerado em um valor constante para uma densidade de Fluxo B .

Pela lei de Faraday, temos que a tensão induzida pode ser expressa por:

$$e = - \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.7)$$

Substituindo a expressão (2.4) e (2.7), e resolvendo a derivada via regra da derivada do produto:

$$e = \omega N \Phi_{max} \sin(\omega t) - N \frac{d\Phi}{dt} \cos(\omega t) \quad (2.8)$$

A expressão (2.8) mostra que a tensão gerada possui duas componentes. Uma componente chamada de tensão de velocidade e uma componente chamada de tensão de transformador, que somente está presente quando a amplitude da onda de indução variar com o tempo.

2.2 Operação como Compensador Síncrono e compensação de harmônicas

A máquina síncrona oferece uma grande vantagem para os sistemas de potência interligados, pois esta pode ser operada como motor com ou sem carga em seu eixo mecânico e com uma corrente CC diferente de sua nominal em seu campo para se tornar um compensador síncrono.

Nesta configuração a máquina pode compensar o reativo necessário do sistema interligado tanto indutivo ou capacitivo. São utilizados para controle de fatores de potência, controle de tensão em barramento, melhoria de estabilidade, aumento de capacidade de curto circuito e redução de perdas de condução (FITZGERALD, 2003).

O aumento da corrente de campo quando o motor está sem torque de carga, aumenta a tensão da induzida gerada da máquina modificando diferença de potencial no enrolamento da máquina permitindo que corrente reativa circule para suprimento da potência reativa do sistema, funcionando como uma carga reativa capacitiva. Se a corrente de campo for reduzida, a máquina se torna subexcitada e passa a se comportar como uma carga reativa indutiva, consumindo reativo da rede.

Esse comportamento da máquina a torna versátil inclusive para sistemas de *microgrid* isolados ou conectados à rede. Essa compensação é feita para potências reativas na frequência fundamental.

Neste trabalho está sendo proposto avaliar esta máquina para cenários onde frequências harmônicas da rede sejam compensadas pela mesma, através da excitação da máquina com corrente com conteúdo harmônico apropriado.

A modelagem apresentada na seção 2.1 mostra a tensão gerada devido a variação do fluxo induzido:

$$e = \omega N \Phi_{max} \text{sen}(\omega t) - N \frac{d\Phi}{dt} \cos(\omega t) \quad (2.9)$$

Se considerarmos que a corrente de campo possui um valor médio e mais uma componente harmônica de frequência ω_h , o fluxo gerado no rotor dependeria dessa harmônica de excitação, sem perda de generalidade:

$$\Phi = \Phi_{max} \cos(\omega_h t) \quad (2.10)$$

Assim substituindo na equação (2.10) em (2.9) temos:

$$e = \omega N \Phi_{max} \text{sen}(\omega t) - N \frac{d(\Phi_{max} \cos(\omega_h t))}{dt} \cos(\omega t) \quad (2.11)$$

Resolvendo a derivada:

$$e = \omega N \Phi_{max} \text{sen}(\omega t) + \omega_h N \Phi_{max} \text{sen}(\omega_h t) \cos(\omega t) \quad (2.12)$$

Pela identidade trigonométrica do seno de soma de arcos, tem-se:

$$\text{sen}(\omega_h t) \cos(\omega t) = \frac{1}{2} [\text{sen}((\omega_h + \omega)t) + \text{sen}((\omega_h - \omega)t)] \quad (2.13)$$

Assim substituindo (2.13) em equação (2.12)

$$e = \omega N \Phi_{max} \text{sen}(\omega t) + \frac{1}{2} \omega_h N \Phi_{max} \text{sen}((\omega_h + \omega)t) + \frac{1}{2} \omega_h N \Phi_{max} \text{sen}((\omega_h - \omega)t) \quad (2.14)$$

A equação (2.14) evidencia que é possível gerar tensões harmônicas de frequência $(\omega_h - \omega)$ e $(\omega_h + \omega)$ se uma corrente harmônica de frequência ω_h for inserida na corrente de campo. E ainda que estas tensões são pares harmônicos equidistantes da frequência harmônica ω_h .

Necessita-se também a modelagem da máquina com vistas ao campo para que se possa garantir que os fluxos concatenados nas bobinas de campo realmente contenham o conteúdo harmônico derivado da corrente de campo.

2.3 Modelagem da Máquina – Reconstrução de Campo

Para operação da máquina síncrona em compensação de harmônicos é necessário que esta seja capaz de induzir fluxos em frequências harmônicas (múltiplas da frequência síncrona). Para verificar essa capacidade da máquina é necessário que seja realizada uma modelagem com vistas ao funcionamento magnético da operação da máquina. Para isso deve-se considerar os aspectos construtivos das máquinas como projeto físico, os materiais, projeto dos enrolamentos e a resposta dos campos e fluxos gerados.

A metodologia mais disseminada para a análise das máquinas com vista ao campo e fluxos gerados é a método dos elementos finitos. Este método subdivide espacialmente o interior da máquina em um *grid* de n pequenas partes (elementos) subdividindo o problema complexo de cálculo do campo na distribuição espacial de infinitos pontos em n problemas de solução mais simplificada. Este método demanda um grande esforço computacional, e portando não da para ser utilizado em aplicações em tempo real, sendo mais utilizado em projetos de máquinas.

O método dos elementos finitos possui grande aplicabilidade em diversos setores (TAN, 2011), tais como, máquinas elétricas em cálculos de fluxos magnéticos, eletrostática, sistemas de dispersão de calor, projeto e cálculo de cargas estruturais edificações. Em todas as aplicações é relatado que a característica de ser computacionalmente custosa, sendo aplicada essencialmente em na fase de projetos ou sistemas off-line (KHOOBROO, 2008).

Para aplicação de sistemas online algumas técnicas de modelagem derivadas do método de elementos finitos foram desenvolvidas. O método de reconstrução de campo é um destes métodos que tem grande aplicabilidade em máquinas elétricas (LIN, 2011).

Nesta metodologia busca-se o armazenamento de um número de soluções para o campo, afim de se obter uma *função base* obtida através da solução pelo próprio método dos elementos finitos para resposta e da corrente base. Determinadas estas funções base o campo e fluxo da máquina podem ser reconstruídos para as condições de correntes quaisquer.

Para a máquina síncrona alguns trabalhos já aprestam essa modelagem via método de reconstrução de campo (KIMPARA, 2014). Propõe-se aqui a utilização desta modelagem para verificar a capacidade da máquina para geração dos fluxos concatenados em frequências harmônicas também.

Para a modelagem da máquina necessita-se determinar das densidades de fluxo (B) no estator da máquina. A densidade de fluxo pode ser decomposta em componentes normal e tangencial. Tanto as correntes do estator da máquina quanto a corrente do rotor influenciam as componentes normal e tangencial. Como os vetores possuem mesma direção pode-se somar as influências do estator e rotor para cada componente (KIMPARA, 2012):

$$B_n = B_{nS} + B_{nR} \quad (2.15)$$

$$B_t = B_{tS} + B_{tR} \quad (2.16)$$

onde B_{nS} , B_{tS} e B_{nR} , B_{tR} , a são as componentes de densidades de fluxo normal e tangencial do estator e rotor, respectivamente.

O cálculo das componentes da densidade de fluxo pode ser realizado pelo produto das funções pelas correntes respectivas. Para o estator as componentes individuais de cada fase

podem ser somadas (KIMPARA, 2012), já para o rotor a única corrente integrante é a corrente de campo:

$$B_{nS} = \frac{i_a}{i_{base}} \times K_{nA} + \frac{i_b}{i_{base}} \times K_{nB} + \frac{i_c}{i_{base}} \times K_{nC} \quad (2.17)$$

$$B_{tS} = \frac{i_a}{i_{base}} \times K_{tA} + \frac{i_b}{i_{base}} \times K_{tB} + \frac{i_c}{i_{base}} \times K_{tC} \quad (2.18)$$

$$B_{nR} = \frac{i_f}{i_{fbase}} \times K_{nR} \quad (2.19)$$

$$B_{tR} = \frac{i_f}{i_{fbase}} \times K_{tR} \quad (2.20)$$

Como a máquina de polo salientes possui variação do comprimento do entreferro, a determinação da função base é dependente de *theta* (*ângulo de posição do rotor*)

Ao contrário da máquina de polos não saliente, uma vez que o comprimento do entreferro não é agora constante, a função de base do estator será dependente da posição mecânica do rotor. Como resultado, para cada posição do rotor é necessária uma função de base (Kimpara, 2014).

O levantamento das funções de base deve ser realizado via software de elementos finitos (conforme anexo 1). Ajusta-se a posição inicial do rotor para que $\theta_r = 0$ sendo um ângulo arbitrário em relação a qualquer eixo. Então aplica-se corrente de 1A para somente para a fase A. Apura-se a solução de método dos elementos finitos considerando as características construtivas e de materiais da máquina. A solução aponta a densidade de fluxo do entreferro para o ângulo determinado (no caso, $\theta_r = 0$) assim pode-se armazenar a função $K_{nA}(\phi_{sm}, 0)$ e $K_{tA}(\phi_{sm}, 0)$.

Então é aplicado uma rotação no eixo da máquina determinando uma nova posição do rotor. Como a solução dos fluxos magnéticos também se alteram, aplica-se a solução de elementos finitos novamente para a determinação de uma nova função K_{ia} . Este procedimento é repetido por uma volta completa do rotor da máquina. Pela simetria da máquina é possível otimizar o procedimento com soluções de 1 par de polo e determinar o restante da função analiticamente. A figura 2.3 mostra um corte transversal do projeto físico da máquina, mostrando os polos do rotor, os enrolamentos, os dentes e ranhuras do estator.

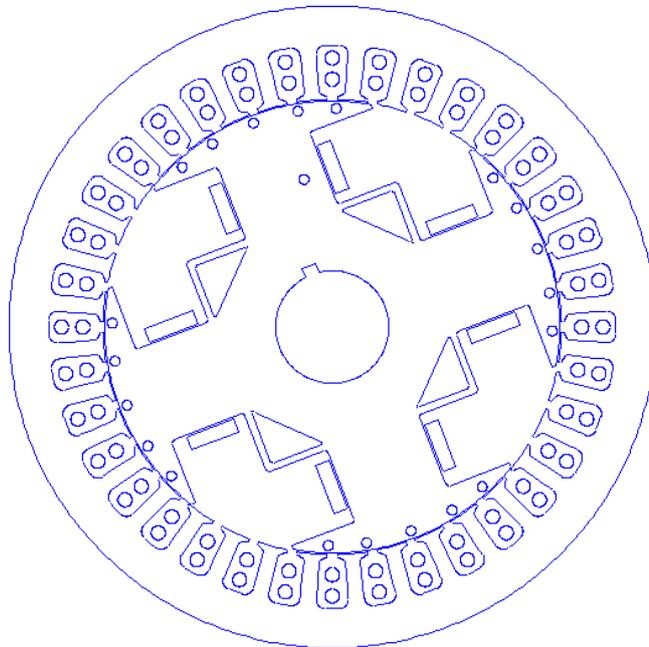


Figura 2.3 - Vista em corte transversal da máquina síncrona de polo saliente.

Fonte: Próprio autor

Cada posição do rotor possui uma geometria definida do entreferro e conseqüente uma solução via método dos elementos finitos. O posicionamento inicial permite otimizar o processo para que menos soluções de elementos finitos sejam necessárias. Pela similaridade espacial da máquina e dos enrolamentos, após determinar para uma fase, A por exemplo, é possível deduzir analiticamente para as fases B e C (KHOOBROO, 2006):

$$K_{nB}(\phi_s, \theta_r) = K_{nA}\left(\phi_s - \frac{2\pi}{3}, \theta_r + 2\gamma^\circ\right) \quad (2.21)$$

$$K_{nC}(\phi_s, \theta_r) = K_{nA}\left(\phi_s + \frac{2\pi}{3}, \theta_r + \gamma^\circ\right) \quad (2.22)$$

onde:

$$\gamma = \frac{s}{P \times q} \times \alpha \quad (\text{ângulo mecânico entre as fases do estator});$$

s = número de ranhuras do estator slots;

P = número de polos;

q = número de fases;

α = ângulo mecânico entre ranhuras adjacentes.

As componentes tangenciais têm equações semelhantes. O mesmo procedimento é aplicado para o rotor (mantendo-se as correntes do estator nulas. A solução de elementos finitos também é adquirida para uma porção da rotação e determinada analiticamente para o restante baseando-se na simetria da máquina.

Assim é possível determinar as funções base do rotor, dado que se levantou as soluções para cada posição do rotor, realizando-se uma discretização do contorno especificado no do entreferro determinado $K_{nR}(\phi_{sm}, \theta_r)$ e $K_{tR}(\phi_{sm}, \theta_r)$.

2.4 *Determinação do Fluxo Concatenado*

Para que a máquina possa ser usada como compensador de harmônicos é necessário que esta seja capaz de induzir tensões harmônicas em seus enrolamentos de estator. Para tanto é necessário que a mesma induza fluxos concatenados nos enrolamentos do estator na frequência harmônica necessária. Esta análise deve ser feita considerando-se as características construtivas da máquina, suas matérias e seu campo internamente gerado pela operação eletromagnética interna. Logo há necessidade de utilização de uma modelagem com vistas a esta operação eletromagnética para que se possa reconstruir o campo (e fluxo) e determinar a capacidade da máquina de operar como compensador de harmônicos.

Para a reconstrução do fluxo, a corrente de base atual foi aplicada aos enrolamentos de campo no modelo da máquina em um software de elementos finitos (FEMM®). Dada as soluções que o software apresenta, a densidade de fluxo B é amostrada no ponto médio de cada dente do estator. Tomando este procedimento para todo ângulo do rotor, podemos determinar o fluxo através da integral da densidade de fluxo na área S conforme equação (2.5).

Para a determinação do fluxo concatenado por espiras de uma fase, basta somar os fluxos relativos aos dentes respectivos daquela fase.

$$\lambda_A = \frac{P}{2} \sum_{j=1}^m N_j \Phi_j(\theta_r) \quad (2.23)$$

Onde, P é o número de polos, N é o número de condutores em cada ranhura do estator e m representa o número de ranhuras do estator que formam um passo de polo completo. A Figura 2.4 mostra o detalhe dos dentes, enrolamentos e do polo do rotor. A Figura 2.5 demonstra o fluxo correspondente a um polo que atravessa os dentes do estator relativos aos enrolamentos da fase A (concatenando $A1-A1'$, $A2-A2'$ e $A3-A3'$).

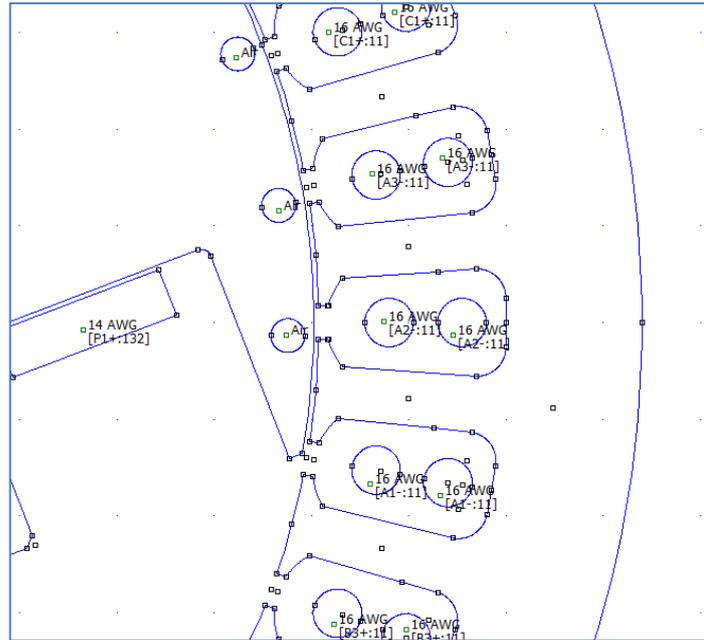


Figura 2.4 - Dentes do Estator
Fonte: Próprio autor

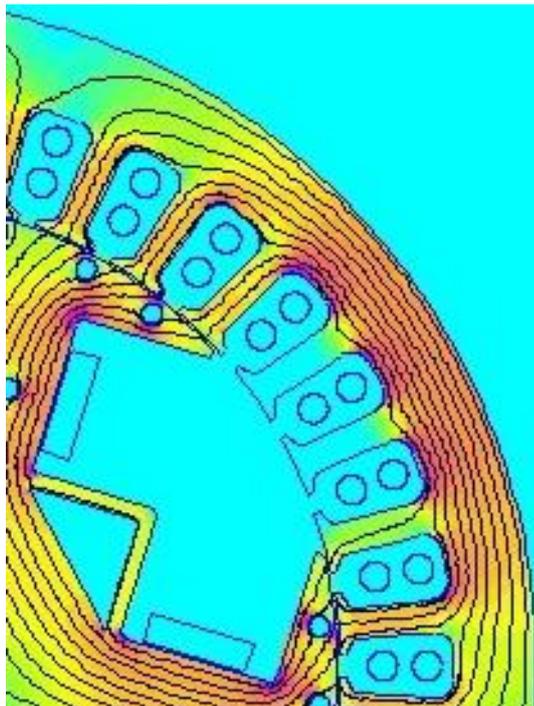


Figura. 2.5 –Fluxo aos dentes do Estator
Fonte: Próprio autor

As Figuras 2.6 e 2.7 mostram a distribuição de densidade de campo para duas posições distintas do rotor. Nota-se que distribuição no rotor é constante (devido corrente contínua no rotor constante). No estator para um mesmo dente a distribuição muda para cada posição do rotor, pois muda-se o caminho do fluxo.

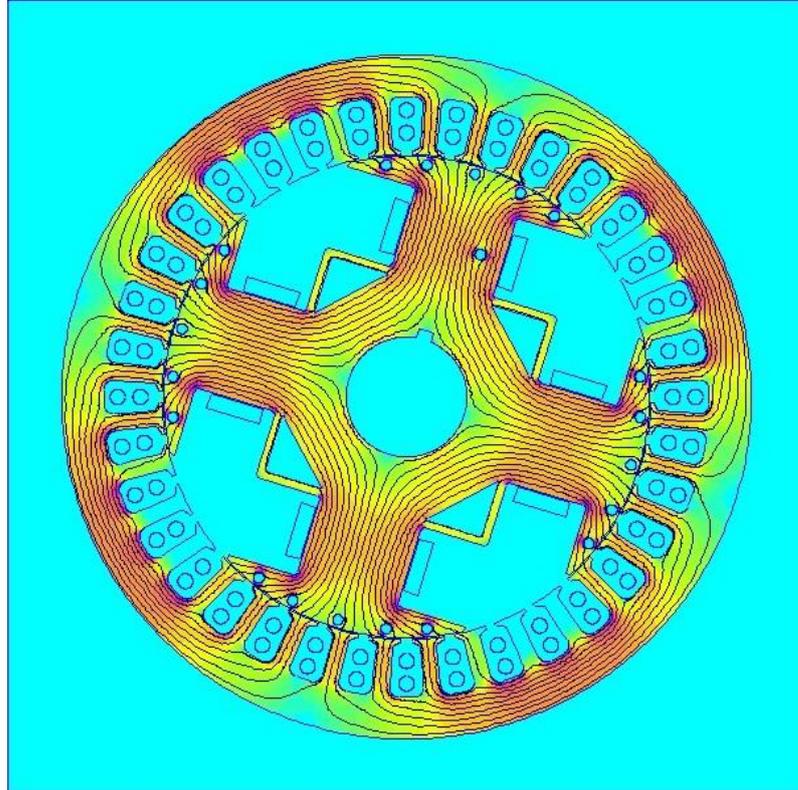


Figura. 2.6 – Solução dos Método dos elementos finitos para uma posição de Rotor
Fonte: Próprio autor

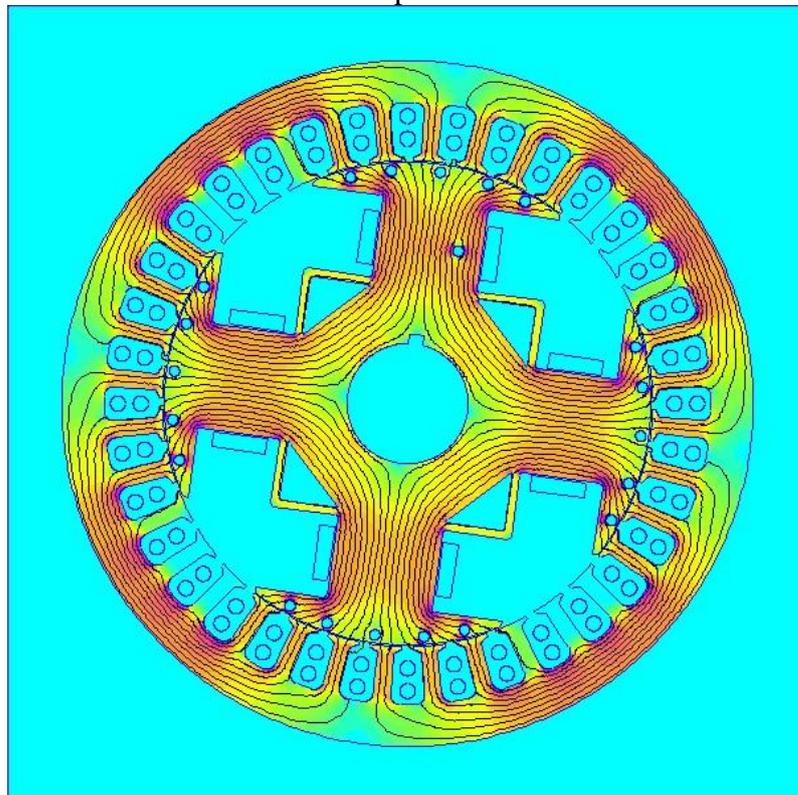


Figura. 2.7 – Solução dos Método dos elementos finitos para uma posição de Rotor
Fonte: Próprio autor

Quando o campo é alimentado e a máquina se encontra na velocidade síncrona, o campo magnético girante induz tensão nos enrolamentos do estator através pelas linhas de campo.

Determinada a densidade de fluxo resultante do modelo de método de elementos finitos determina-se as funções base para se determinar o fluxo. O ponto escolhido para a determinação do fluxo foi o ponto central de cada dente do estator, pois este ponto está envolto em do estator.

A determinação do fluxo no ponto de interesse é necessária a amostragem da densidade de campo na face do dente do estator e integra-la em relação a esta superfície. Este resultado é o fluxo neste dente específico, para determinar o fluxo concatenado no enrolamento da fase soma-se todos os fluxos dos dentes respectivos a esta fase conforme (equação 2.23).

Determinado o fluxo, a tensão induzida tem a mesma frequência, só se diferenciando em fase devido ao operador derivada conforme expressão (2.7) que pode ser expandida para as três fases do estator.

$$e_{abc} = \frac{d\lambda_{abc}}{dt} \quad (2.24)$$

Simulou-se pelo método dos elementos finitos em duas situações:

- Corrente de campo contínua para verificação se o modelo gera o fluxo concatenado senoidal na frequência síncrona (para fins de validação do modelo)
- Corrente de campo contínua acrescida de uma corrente da 6^a harmônica para verificar se a máquina tem capacidade induzir fluxos harmônicos nos enrolamentos do estator.

A Figura 2.8 mostra o resultado dos fluxos concatenados nas fases dos enrolamentos do estator utilizando-se o método de reconstrução de o gerador de polos salientes quando é aplicada uma corrente de campo arbitrária. Observa-se que os fluxos determinados não são totalmente senoidais.

Utilizando-se a mesma modelagem pode-se ajustar a corrente de campo para a inserção de uma componente harmônica é possível verificar se o fluxo concatenado também apresentará a harmônica correspondente.

Aplica-se então um valor constante mais uma componente harmônica de frequência igual a seis vezes o valor da frequência síncrona (6^a harmônica)

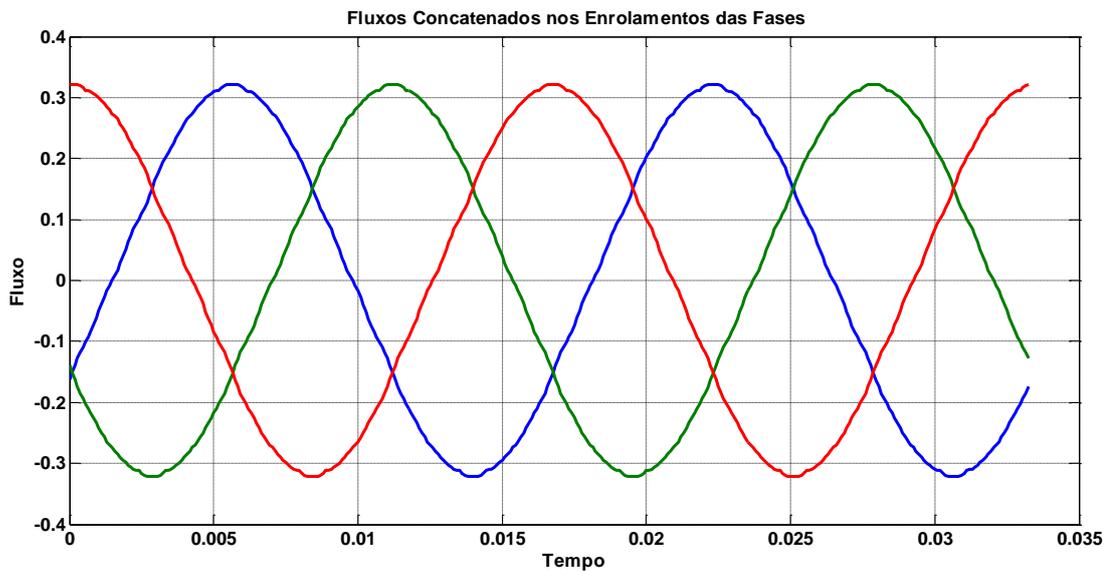


Figura 2.8. Fluxos concatenados nos enrolamentos das fases do gerador síncrono de polos salientes com corrente em corrente contínua.

Fonte: Próprio autor

Aplica-se então um valor constante mais uma componente harmônica de frequência igual a seis vezes o valor da frequência síncrona (6^a harmônica).

Novamente aplica-se o modelo das soluções em método dos elementos finitos com a técnica de reconstrução de campo para a verificação do fluxo concatenado resultante.

A figura 2.9 mostra a solução do método dos elementos finitos para uma posição de rotor com corrente harmônica no campo. Na figura 2.10 observa-se uma alteração na posição do rotor e também na distribuição de densidade de campo do mesmo, devido a presença da componente harmônica na corrente de campo que modifica a indução de densidade de campo no rotor.

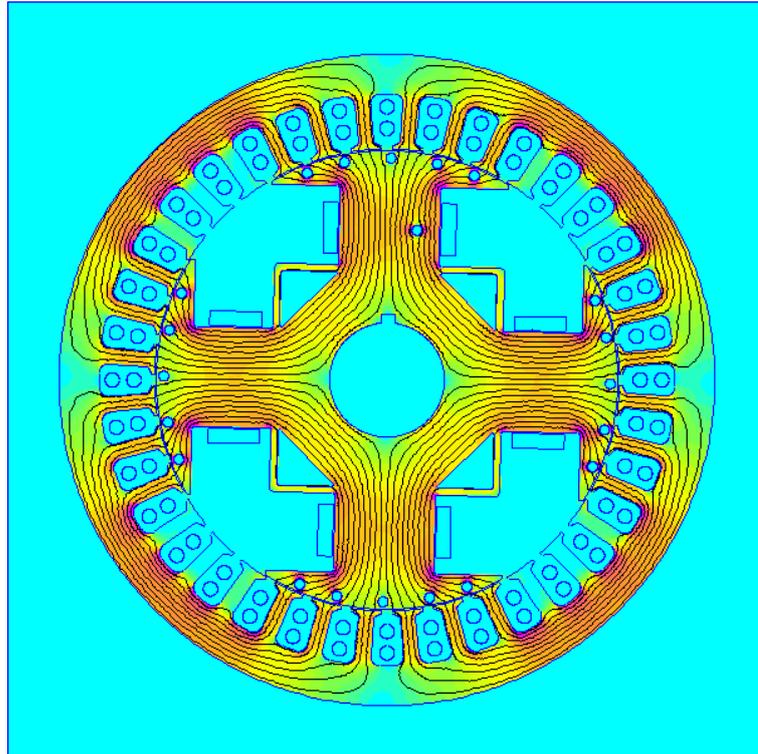


Figura. 2.9 – Solução dos Método dos elementos finitos para uma posição de Rotor com corrente harmônica no campo
Fonte: Próprio autor

Na Figura 2.11 novamente a posição do rotor tem alteração e também a densidade de campo do rotor mostrando que a frequência aplicada na corrente de campo é superior a frequência síncrona.

Analisando as imagens da resposta do método dos elementos finitos (Figuras 8, 9 e 10), é possível notar claramente a influência da corrente harmônica no campo gerado. Para cada figura o rotor está com uma densidade de fluxo. Integrando-se as densidades de campo dos dentes do estator e somando-se os dentes de cada fase respectiva é possível determinar o fluxo concatenado em cada fase. A figura 2.12 mostra o fluxo concatenado no tempo para as três fases do estator.

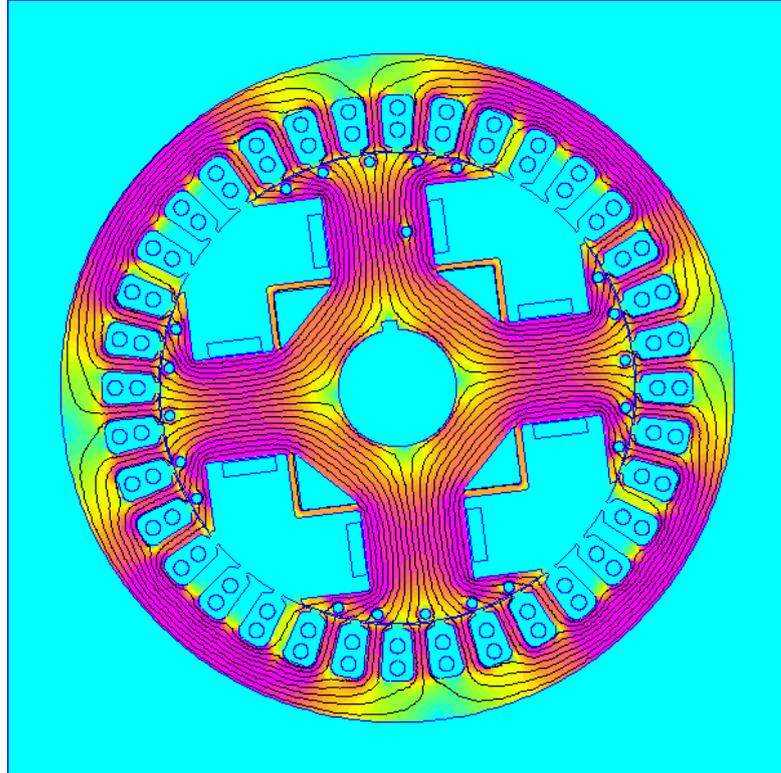


Figura. 2.10 – Solução dos Método dos elementos finitos para uma posição de Rotor com corrente harmônica no campo

Fonte: Próprio autor

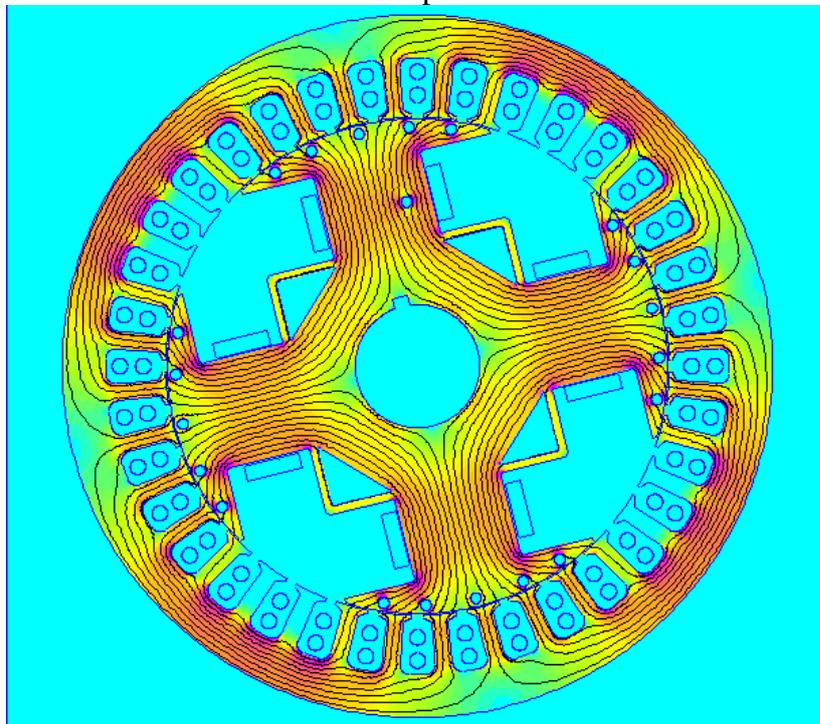


Figura. 2.11 – Solução dos Método dos elementos finitos para outra posição de Rotor com corrente harmônica no campo

Fonte: Próprio autor

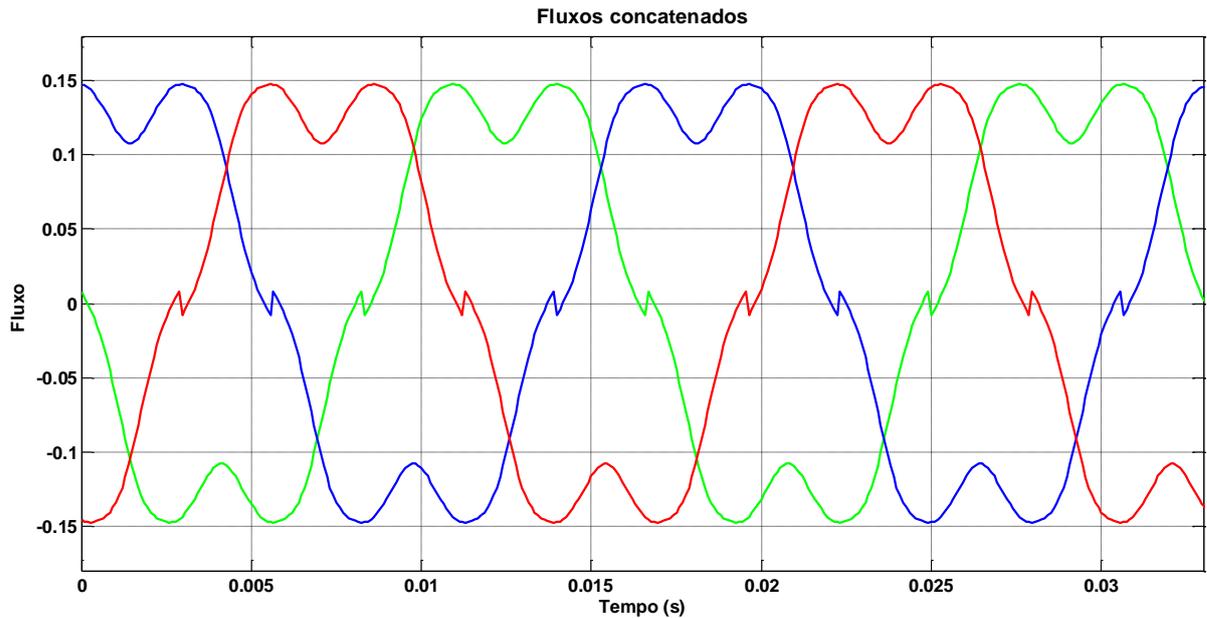


Figura 2.12. Fluxos concatenados nos enrolamentos das fases do gerador síncrono de polos salientes com corrente em corrente contínua e componente harmônica.

Fonte: Próprio autor

Os fluxos apresentaram distorções causadas pela variação do campo do rotor. Para uma verificação das componentes harmônicas correta necessita-se fazer um análise via transformada de Fourier, conforme figura 2.13.

Nota-se o aparecimento de diversas componentes harmônicas no fluxo concatenado. As componentes pares devem ser ignoradas pois se tratam de erros da resposta do algoritmo devido à baixa amostragem. As componentes 5^a e 7^a indicam que a modelagem está correta, pois a inserção de um componente par na corrente de campo, no caso a 6^a harmônica, ocasionou o aparecimento das duas harmônicas de bandas laterais próximas, 5^a e 7^a harmônicas. A terceira harmônica foi induzida devido a máquina ser trifásica, esta componente circula nos enrolamentos da máquina aumentando a corrente eficaz da máquina.

Estas componentes serão responsáveis por induzirem corrente harmônicas nos enrolamentos do estator.

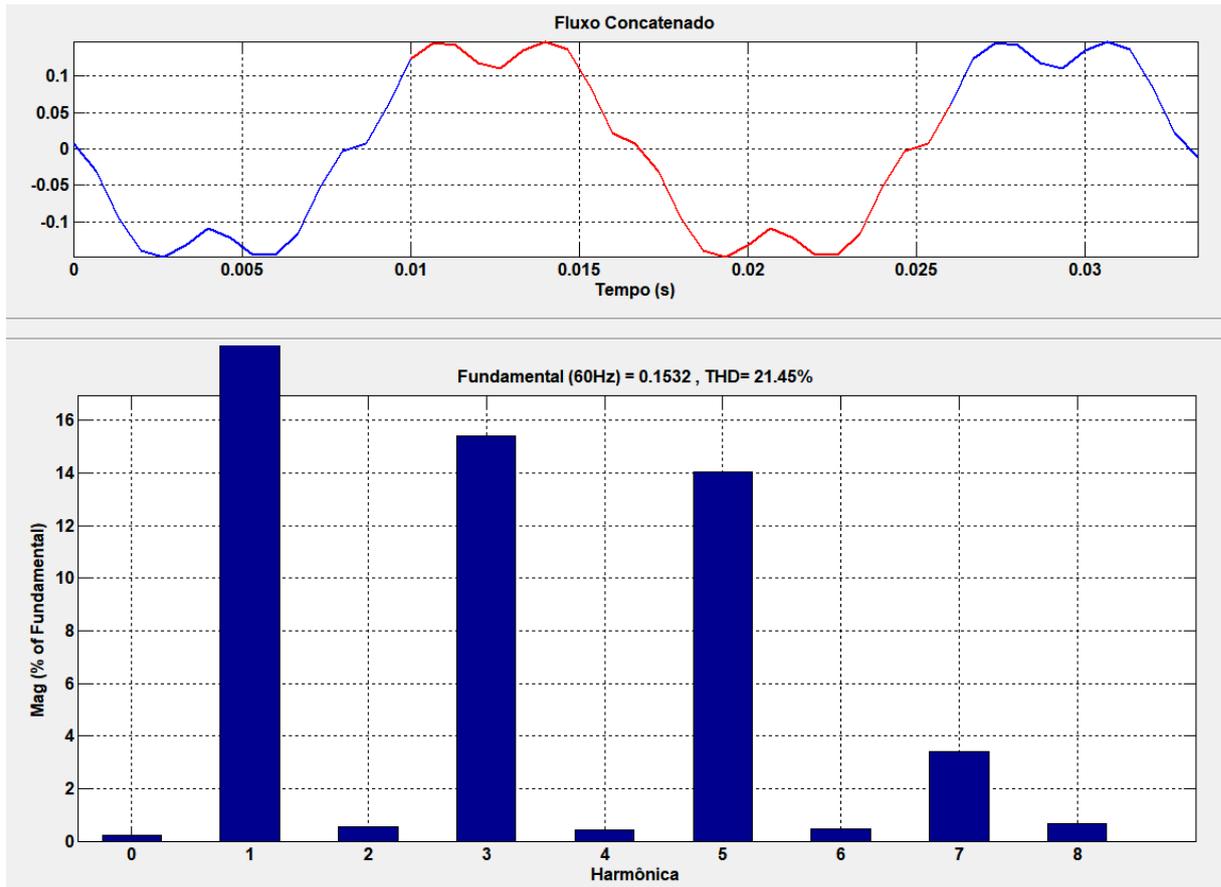


Figura 2.13. Fourier do Fluxos concatenados nos enrolamentos de uma fases do gerador síncrono de polos salientes com corrente em corrente contínua e componente harmônica.

Fonte: Próprio autor

Capítulo 3. Compensação de Harmônicos

3.1 *Origem de Harmônicas*

. Na atualidade é comum a presença e utilização de equipamentos de eletrônica de potência em aplicações industriais e residenciais. Estes equipamentos trazem facilidades operacionais para o cotidiano das pessoas melhorando vários aspectos da qualidade de vida e eficiência energética. Alguns exemplos são: eletrodomésticos com aplicações de motores com velocidade variável, fontes de alimentação Ininterruptas (UPS), fontes de alimentação de celulares e computadores. Nas indústrias estima-se que 65% da demanda elétrica é utilizada para acionamento de motores (RUDNICK, 2003), das quais aplicações de velocidade variável com conversores estáticos geram uma economia de estimada e 20% a 30%. A tecnologia de eletrônica de potência melhora a eficiência da utilização de energia, porém estas cargas eletrônicas aprestam uma relação não linear entre corrente e tensão o que resulta no aparecimento de conteúdo harmônico na rede elétrica, ocasionando perdas e problemas de operação em sistemas de distribuição de energia elétrica. Uma alimentação de carga não-linear é mostrada na figura 3.1.

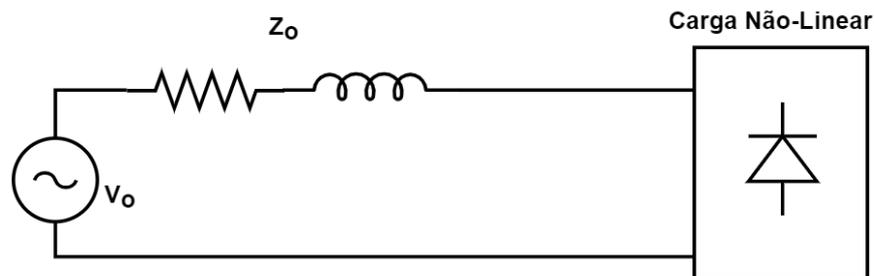


Figura 3.1. Sistema equivalente de energia alimentando carga não-linear
Fonte: Próprio autor

Os circuitos de eletrônica de potência utilizam-se de dispositivos semicondutores modernos de comutação que chaveiam correntes e tensões e acabam por criar corrente não-senoidais na rede elétrica. Estas correntes circulam pela rede elétrica sobrecarregando a rede,

causando perdas e problemas de qualidade de energia. Podendo causar riscos de instabilidade e problemas operacionais para cargas sensíveis, pois os harmônicos injetados no sistema de potência causam distorções de tensão no Ponto de Conexão Comum (PCC) onde cargas lineares e não-lineares de terceiros também estão conectadas. Tensões distorcidas no ponto PCC, causadas por correntes harmônicas circulantes podem ocasionar mal funcionamento de cargas sensíveis às variações de tensão. É possível modelar as cargas como fontes de correntes harmônicas no sistema (PENG, 1998), conforme figura 3.2.

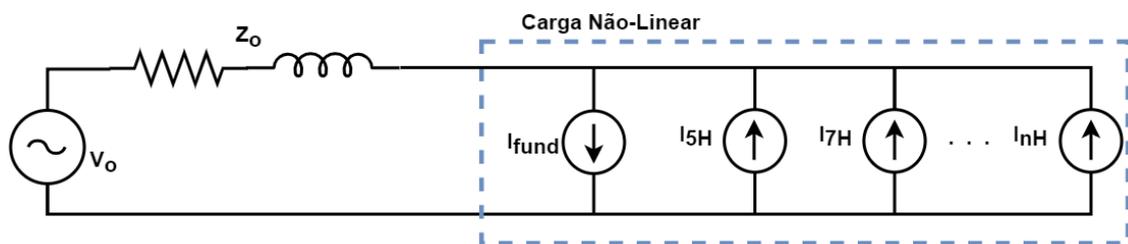


Figura 3.2. Modelagem Carga Não-linear como fonte de harmônicos
Fonte: Próprio autor

3.2 Filtragem de harmônicas

Muitas topologias de filtros foram desenvolvidas e utilizadas em sistemas elétricos para a compensação de harmônicos. Entre as que mais encontram aplicabilidade estão as técnicas corretivas que consistem na aplicação de filtros ao sistema (RIBEIRO, 2003).

Os filtros são classificados originalmente quanto a sua topologia (ativos ou passivos) e quanto ao seu posicionamento no circuito, série ou paralelo. Evoluções das topologias tradicionais que combinam filtros e técnicas de controle de mais de uma categoria foram denominados filtros híbridos (PHIPPS, 1994), podendo essa classificação ser aplicada tanto a característica topológica (GALHARDO, 2006) quanto de posicionamento do circuito (SINGH, 1999).

As primeiras técnicas de mitigação de conteúdo harmônico no sistema foi o desenvolvimento de filtros passivos. Esta técnica foi desenvolvida antes da popularização da

eletrônica de semicondutores de alta frequência de chaveamento. O princípio de funcionamento baseia-se em adicionar um circuito em paralelo com o sistema, que represente uma impedância baixíssima para uma determinada frequência, para isso projeta-se um circuito RLC (componentes passivos) cuja frequência de ressonância seja a frequência harmônica circulante no sistema. Assim a corrente harmônica circula entre carga e filtro ressonante.

Para o projeto e implementação de filtragem passiva é necessária atenção a fatores como precisão de cálculo e de fabricação dos componentes indutivos, baixa resistência dos enrolamentos destes elementos e qualidade do aterramento do sistema.

O dimensionamento de filtros passivos é baseado no equacionamento padrão de circuitos elétricos. Projeta-se os filtros para que apresentem alta impedância na frequência fundamental e baixa impedância na frequência harmônica que se deseja compensar.

A Figura 3.3 apresenta a aplicação de um filtro passivo em um sistema com cargas harmônicas.

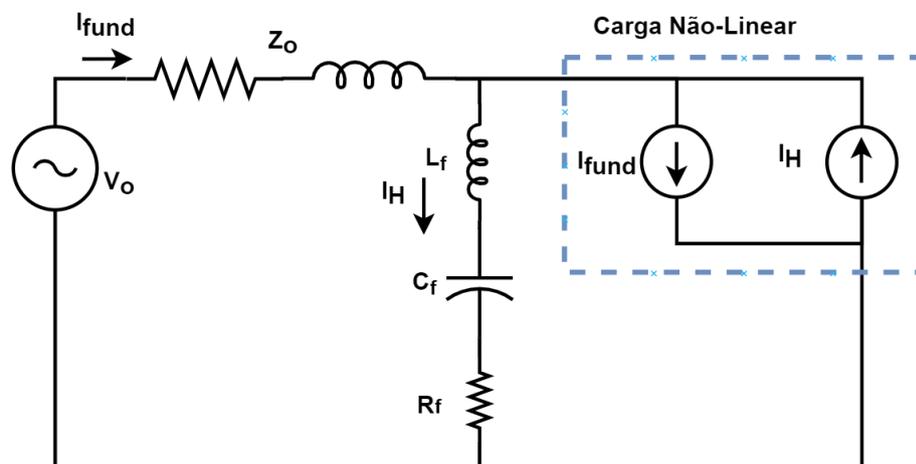


Figura 3.3. Filtro passivo compensando corrente harmônica
Fonte: Próprio autor, adaptado de (NASCIMENTO, 2007)

O desempenho dos filtros pode ainda ser afetado por condições externas como temperatura dos elementos, alteração do perfil de carga e alteração de componentes de rede que

afetem a impedância equivalente da mesma, considerando-se que devem ser projetados e sintonizados para condições especificadas de operação.

Alguns trabalhos propõem mudanças topológicas com aumento da ordem do circuito do filtro aumentando o número de componentes armazenadores de energia e com consequente aumento da complexidade do filtro a fim de se diminuir o peso e volume e melhorar a resposta do mesmo.

A degradação natural das matérias que compõem os elementos passivos do filtro, devido a uso contínuo e tempo de operação, também podem influenciar a sua performance visto que os parâmetros do filtro podem ser alterados.

Usualmente os filtros passivos são aplicados para a compensação em paralelo de correntes harmônicas visto que as compensações em série para distorções na tensão deveriam suportar a corrente de carga (PENG, 1999).

Esta técnica possui bom desempenho em sistemas com harmônicos específicos (CZARNECKI, 2005), bem como vantagens em sua simplicidade e custos de aplicação e manutenção. Do ponto de vista operacional, estes filtros não possuem grande abrangência pois, dado a sua natureza de operação, são aplicados em situações e harmônicas específicas. Suas principais desvantagens são desempenho satisfatório, porém não otimizado; o custo da implementação é baixo, porém as soluções normalmente se apresentam com peso e volume elevados e é uma solução fixa que não pode se adaptar a variações de carga e mudanças de impedância de rede.

Os primeiros conceitos de filtragem ativa de componentes harmônicas foram apresentados na década de 1970 (STEEPER, 1976), porém para que os filtros ativos fossem viáveis necessitava-se do desenvolvimento do dispositivos semicondutores de alta frequência de chaveamento como *IGBTs* e *MOSFETs* que veio a ocorrer mais de duas décadas mais tarde.

Também havia dificuldade de se implementar o sistema de controle, o que viria a ser possível com o desenvolvimento de DSPs de alto desempenho e custo acessível.

Os filtros ativos são mais adaptáveis a variações de carga e de infraestrutura de rede elétrica, além de diminuir o projeto físico de componentes passivos. O filtro ativo emula um componente ativo no circuito, usualmente uma fonte na frequência harmônica que se deseja compensar. A emulação é resultado da atuação de conversores estáticos de potência com componentes com semicondutores e acumuladores de energia (capacitores e resistores). Os filtros ativos podem atuar na compensação de correntes ou tensões harmônicas.

FAS – Filtro Ativo Série

Para a compensação de tensões harmônicas é necessário a emulação de uma tensão em série entre a fonte e a carga conforme mostrado na figura 3.4.

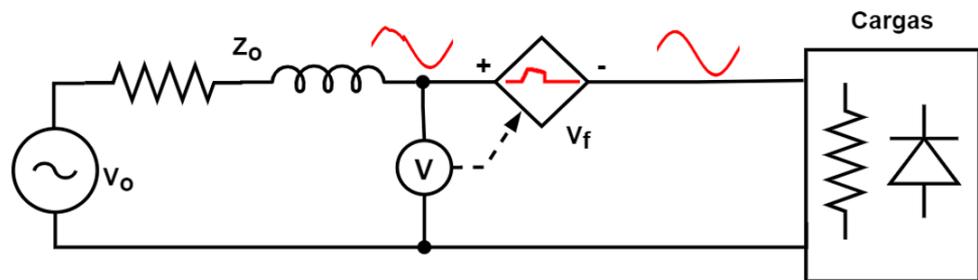


Figura 3.4. Sistema Equivalente para filtro ativo série compensando tensão harmônica
Fonte: Próprio autor

O filtro ativo série (FAS) atua de forma que a tensão vista pela carga seja somente a tensão da componente fundamental. Para tanto um elemento série (transformador de acoplamento) é inserido e a sua tensão é controlada de forma que emule uma queda de tensão necessária para eliminar a componente harmônica da tensão. Uma topologia deste tipo de sistema é mostrada na figura 3.5.

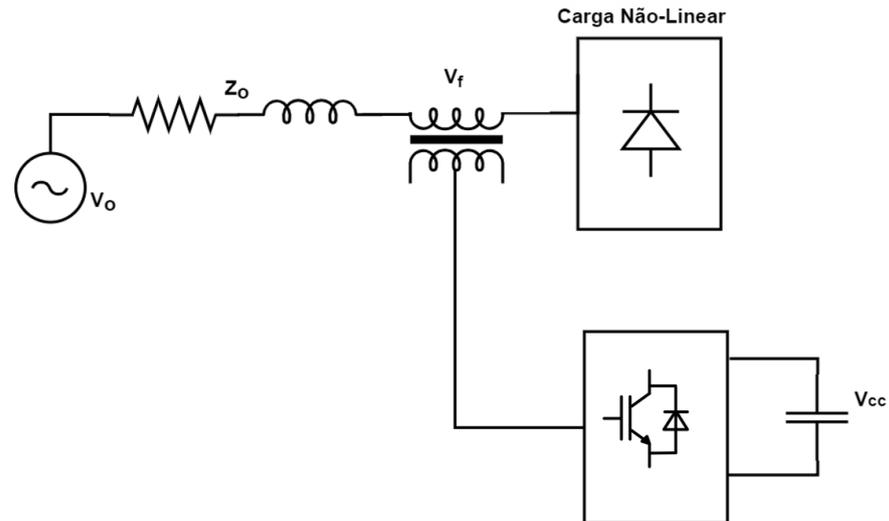


Figura 3.5. Topologia de filtro ativo série compensando tensão harmônica
Fonte: Próprio autor

A principal desvantagem de filtros em série é a necessidade do componente de acoplamento ter capacidade de conduzir toda a corrente de carga.

FAP – Filtro Ativo Paralelo

A topologia mais utilizada para filtragem de componentes harmônicas na corrente é o filtro ativo paralelo (FAP). O filtro é ligado em paralelo com a carga (geradora de conteúdo harmônico) com a finalidade de fornecer um caminho alternativo para as correntes harmônicas. Com a atuação correta do FAP as correntes harmônicas ficam restritas à circulação entre carga e filtro, eliminando a circulação de harmônicas pelo sistema elétrico da rede.

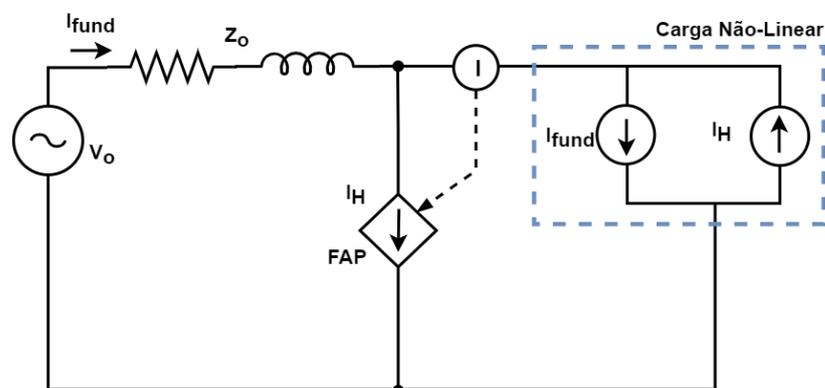


Figura 3.4. Sistema Equivalente para filtro ativo série compensando tensão harmônica
Fonte: Próprio autor

O FAP é mais implementado é o inversor VSI controlado por corrente. Emula-se várias correntes harmônicas que o PAF compensa as correntes harmônicas de cargas não lineares.

O controle do sistema mede a corrente instantânea de carga, e determina a corrente que deve ser inserida no sistema para que a corrente de rede seja senoidal na frequência fundamental. Como o FAP é controlado por corrente, pode-se também compensar a corrente reativa da fundamental, porém eleva-se o nível de potência a ser processada pelo conversor de potência.

Diversos problemas de qualidade de energia podem ser mitigados com a aplicação de filtros ativos. Topologias diversas são utilizadas para compensação de potência reativa e correção do fator de potência, regulação de tensão, balanceamento de carga, redução de *flickers* de tensão, atenuação de correntes harmônicas.

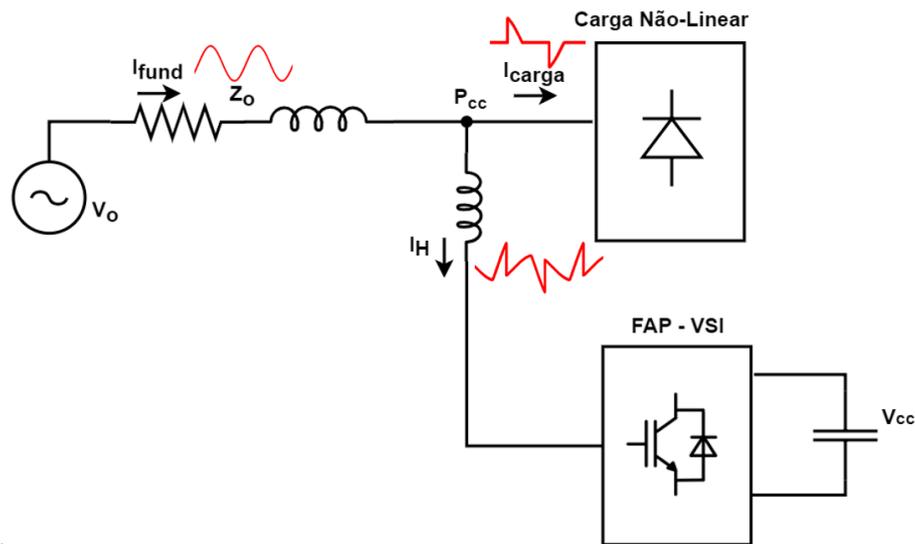


Figura 3.6. Topologia de filtro ativo paralelo compensando corrente harmônica
Fonte: Próprio autor

Os filtros ativos conseguem melhor performance e tem uma maior gama de operação, porém sua aplicação fica limitada para sistemas de potência e tensão elevada principalmente pela dificuldade de aplicação de componentes semicondutores a estes níveis.

A topologia do filtro ativa é escolhida avaliando-se os requisitos de compensação necessários. O FAP é usualmente aplicado para cargas altamente não-lineares (como grandes retificadores) de baixa tensão (até 1kV), aplicações com risco de ressonância, em sistemas com constante variação de carga e aplicações com cargas sensíveis.

Capítulo 4. Filtro Ativo Paralelo

4.1 Introdução ao FAP

O Filtro Ativo Paralelo foi utilizado para a comparação do desempenho da máquina síncrona na mitigação de componentes harmônicas em sistemas de potência. Neste capítulo são mostrados a topologia, dimensionamento do filtro ativo e a sua estratégia de controle, bem como o seu desempenho em correção de uma carga não-linear.

4.2 Topologia

Um filtro ativo paralelo (FAP) pode ser implementado utilizando diferentes topologias. Devido a semelhanças de ação de compensação, para fins de comparação, optou-se pela utilização de um inversor de tensão em ponte completa. A utilização deste conversor ainda resulta menores perdas quando comparado como o inversor de corrente (PENG, 1998). A Figura 4.1 mostra o sistema completo.

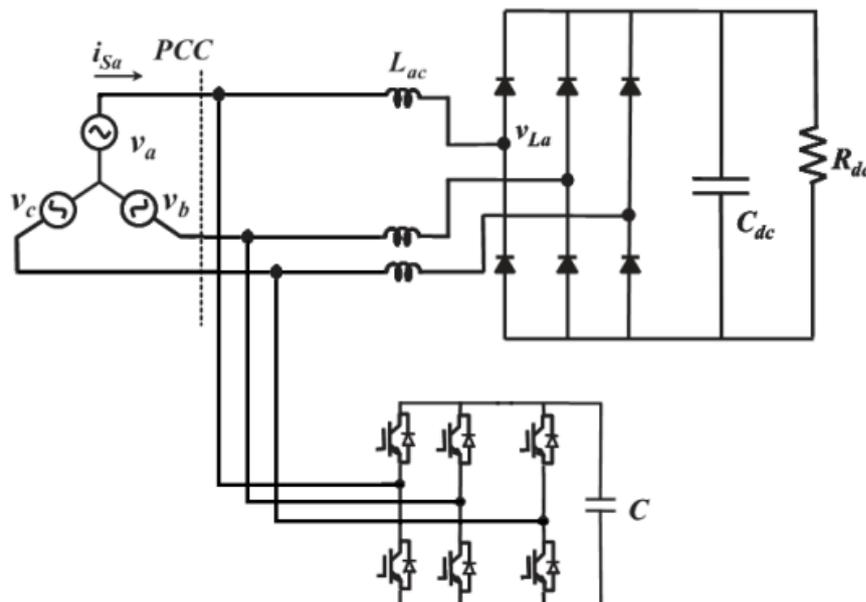


Figura 4.1 - Topologia do Filtro

No FAP, a qual corrente monitorada e controlada pode ser a corrente da carga e do filtro ativo, ou a corrente da rede. Na primeira opção (monitoramento da corrente de carga) faz-se com que o FAP gere a corrente oriunda da diferença da corrente com uma referência de corrente senoidal. Para tanto faz-se necessário o monitoramento de duas correntes (a de carga e a do FAP), logo, dois sensores de corrente são necessários. Ademais, para a geração da corrente de referência, é necessário o sensoriamento da tensão da rede, além de cálculo matemático, o que pode prejudicar o desempenho dinâmico do sistema.

Considerando-se a topologia baseada no monitoramento da corrente do inversor, apresentada na Figura 2, elimina-se um sensor de corrente o que representa mais simplicidade e menor custo e a referência de corrente é gerada à custa de menos cálculos matemáticos. Por estas características esta foi a topologia escolhida para o projeto do FAP.

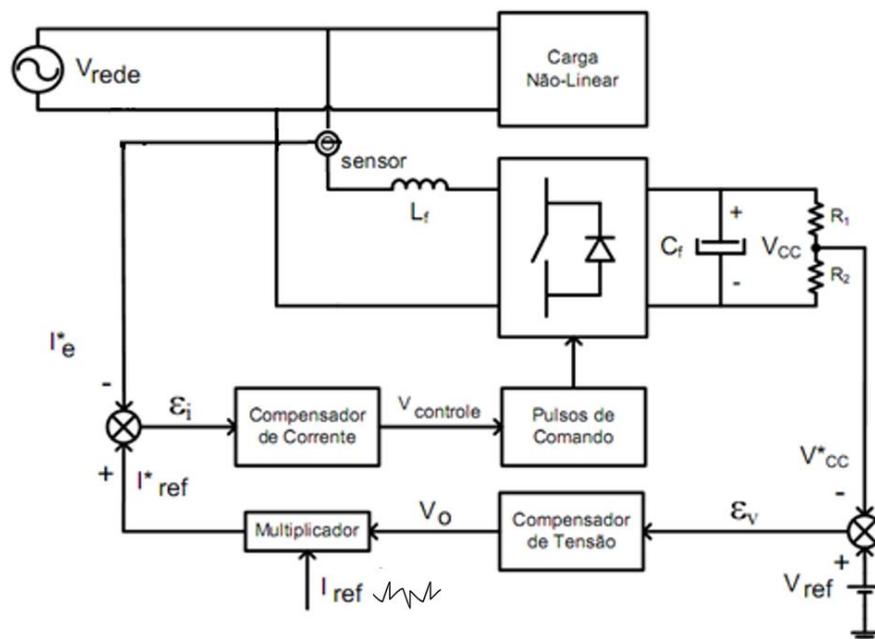


Figura 4.2. Sistema equivalente com malhas de controle
Fonte: Próprio autor

4.3 *Estratégia de controle*

No inversor de tensão a tensão no barramento CC (V_{cc}) deve ser mantida constante e seu valor médio deve ser superior ao valor de pico da tensão da rede. Esta tensão contínua provê para a rede a corrente necessária através do indutor de acoplamento L_c . Logo deve existir uma malha de tensão que garanta o valor adequado do barramento CC.

Como o intuito do FAP é a compensação de uma larga faixa de frequências harmônicas de corrente é necessário que haja uma malha de corrente capaz de responder de forma rápida o suficiente para que o FAP possa gerar as harmônicas de corrente desejadas.

Assim pela dinâmica do sistema deve-se projetar uma malha interna de corrente rápida o suficiente para atendimento das harmônicas desejadas; e uma malha de tensão mais lenta para garantir uma tensão adequada no barramento CC.

Na malha de corrente tem-se uma comparação entre a corrente da rede e a corrente de referência gerada. O sinal de erro passa por um controlador que aciona a geração dos pulsos dos semicondutores.

Para a determinação das correntes de referência é utilizada a teoria da potência instantânea (AKAGI, 1984).

4.4 *Dimensionamento dos Componentes físicos*

Para o projeto do FAP são necessárias as especificações de operação do sistema como mostrado no quadro abaixo.

Tabela 1 – Especificações do Filtro

Especificações	Valores
Tensão eficaz da rede (V_{redeef})	187V a 253V
Tensão do barramento (V_{CC})	400V
Potência ativa da carga (P_{carga})	1,6kW
Ondulação de corrente no indutor do FAP (Δi_{Lf})	20%
Ondulação de tensão no barramento (Δv_{CC})	10%
Frequência de operação da rede (f_{rede})	60Hz
Frequência de comutação dos interruptores (f_s)	30kHz

Para o projeto do indutor de acoplamento considera-se a máxima ondulação de corrente permitida na máxima corrente possível com esse resultado normaliza-se a corrente baseada no índice de modulação e calcula-se a variação normalizada. É possível demonstrar que o indutor que atende essa especificação tem o valor de acordo com a equação (4.1)

$$L_f = \frac{\overline{\Delta I_{fmax}} \cdot V_{CC}}{2 \cdot f_s \cdot \Delta I_{fmax}} \quad (4.1)$$

Para o projeto do capacitor do link CC é possível determinar um valor mínimo baseando-se na potência que o filtro vai processar, na frequência da rede e na variação de tensão aceitável.

$$C_f = \frac{Q_{filtro}}{f_{rede} \cdot (V_{CCmax}^2 - V_{CCmin}^2)} \quad (4.2)$$

Os semicondutores estarão sujeitos a tensão do barramento CC e deverão ser capazes de processar a corrente de pico da carga. Assim:

Tabela 2 - Dimensionamento dos Componentes Físicos

Componentes	Valor
Semicondutores	20Apico / 10Arms 400V
Lf	810 μ H
Cf	1.8 mF

Ganho Sensor corrente	0,03
Ganho Sensor Tensão	0.015

4.5 *Projeto das Malhas de Controle*

Para que o filtro opere de forma satisfatória a compensar o conteúdo harmônico da corrente da rede é necessário as malhas de controle sejam projetadas de forma que:

- Ganhos elevados para baixas frequências, para reduzir o erro estático a valores próximos de zero;
- Inclinação de -20 dB/década na frequência de cruzamento da curva de ganho da FTLA (função de transferência de laço aberto), proporcionando ao sistema uma margem de fase adequada e, conseqüentemente, estabilidade de operação;
- Atenuação elevada em altas frequências para filtragem de componentes de alta frequência a fim de evitar oscilações e perturbações na resposta do sistema. Tendo-se em vista a necessidade de a malha de corrente ser muito mais rápida que a malha de tensão, projetou-se a frequência de corte da malha de corrente em 3 kHz e da malha de tensão em 20 Hz.

O projeto das malhas de controle foi feito através da resposta em frequência do diagrama de bode seguindo de modo a se permitir alta largura de banda do compensador de corrente de modo que este possa sintetizar as componentes harmônicas de alta frequência, porém restringindo as frequências de chaveamento. A malha de corrente deve ter alto ganho em baixa frequência para controle adequado da tensão no capacitor. As figuras 4.3 e 4.4 mostram o resultado respectivamente da malha de tensão e malha de corrente com atendimento dos requisitos para operação do sistema.

A simulação do sistema FAP é mostrado no Capítulo 6.

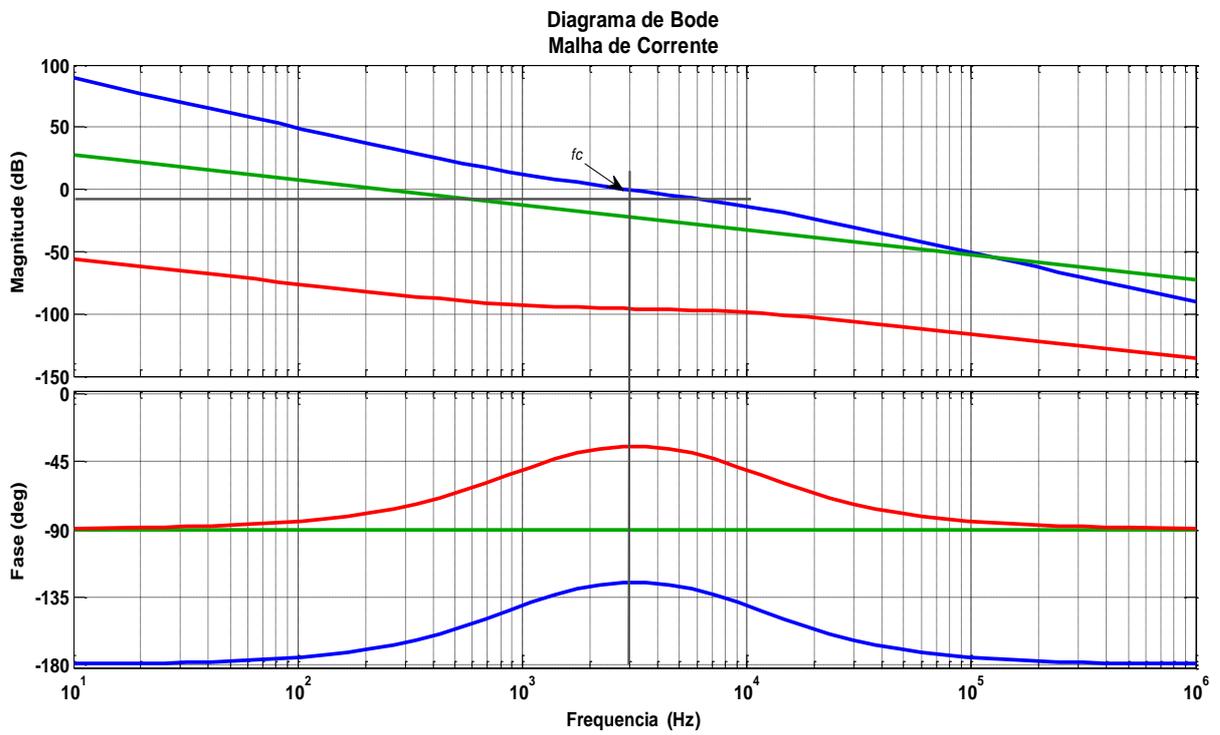


Figura 4.3. Diagrama de Bode da Malha de Corrente
Fonte: Próprio autor

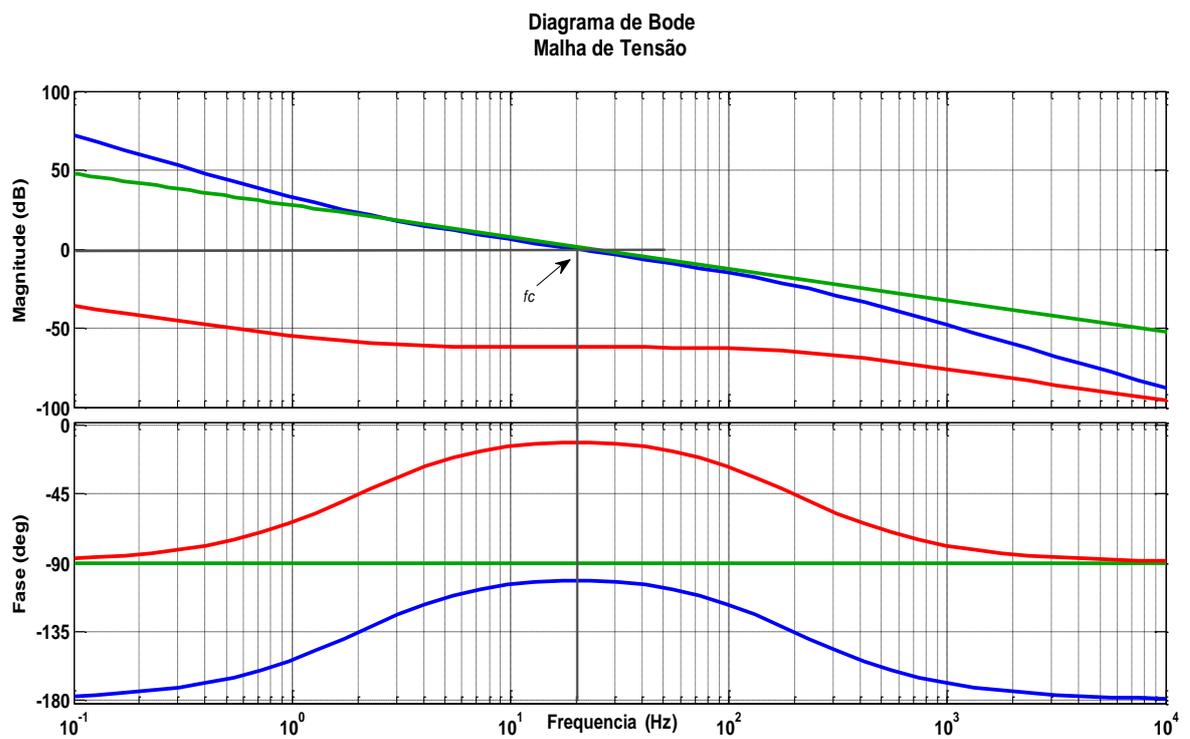


Figura 4.4. Diagrama de Bode da Malha de Tensão
Fonte: Próprio autor.

Capítulo 5. Filtro Ativo Supersíncrono (FAZ)

5.1 *Compensador síncrono*

No sistema elétrico de potência os fatores preponderantes buscados na operação são confiabilidade e eficiência. Na medida que o perfil de carga do sistema elétrico é alterado com a inserção de equipamentos de novas tecnologias (como equipamentos de fontes chaveadas), o gerenciamento técnico das redes de distribuição e transmissão se tornam cada vez mais custosas.

Novas regulamentações para autoprodutores de energia também diversificaram a gama de tecnologias de geração de energia e vem em tom acentuado modificando a característica da tradicional de geração de energia distante da carga. A maioria dos novos empreendimentos tem foco na em energias renováveis como sistemas fotovoltaico e eólico. Esses dois tipos de sistemas ainda trazem mais um problema agregado do ponto de vista de gerenciamento de rede: a intermitência e volatilidade de fluxo de potência natural de suas fontes primárias.

Esses problemas relatados podem ser contornados com o suprimento de energia reativa ao sistema. Os compensadores síncronos são usualmente utilizados para estes fins, pois apresentam robustez e simplicidade de operação.

A máquina síncrona quando opera como motor a vazio e desconsiderando-se as perdas temos o seguinte circuito equivalente por fase mostrado na figura 5.1.

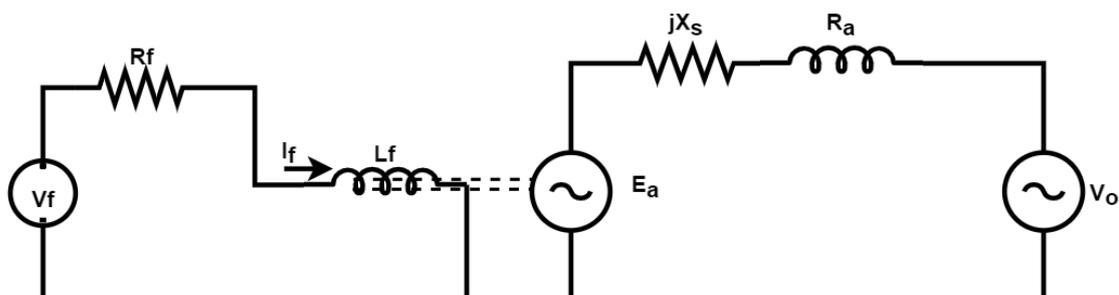


Figura 5.1 - Circuito Equivalente por fase do motor síncrono
Fonte: Próprio autor.

Analisando a malha do circuito, desprezando-se a resistência de armadura, pode-se equacionar o sistema da forma:

$$V_o = E_a + jX_S I_a$$

Onde V é a tensão da rede, E_a é a força eletromotriz induzida e I_a a corrente que flui no estator. A medida que não há potência no eixo da máquina, considera-se o ângulo de potência zero, e o diagrama fasorial se apresenta conforme a Figura 5.2.



Figura 5.2 -- Diagrama Fasorial para corrente de campo nominal
Fonte: Próprio autor.

Dado que não há carga mecânica a tensão induzida E_a depende somente do fluxo concatenado, logo é proporcional a corrente de campo. Para uma situação de alimentação do campo com valores nominais de excitação, o fasor E_a terá o mesmo módulo de V_o , e não há defasagem entre as tensões pois o ângulo de potência é nulo (não há carga mecânica). Logo não há diferença de potencial na indutância da máquina e, portanto, não há corrente no sistema.

A medida que a corrente de campo aumenta acima do seu valor nominal, o módulo do fasor E_a cresce e a diferença entre E_a e V_o , aumenta. Nota-se pelo diagrama fasorial mostrado na Figura 5.3 que a queda de tensão $E_a - V_o$, está deslocada em 180° em relação aos fasores E_a e V_o . Esta diferença de potencial representa a queda de tensão na indutância da máquina, a qual é mostrada na Equação (5.1):

$$E_a - V_o = jX_S I_a \quad (5.1)$$

Onde j é o operador imaginário, X_S é a reatância da máquina na frequência fundamental e I_a é a corrente da malha. Assim o ângulo da corrente tem que ser 90° em relação as tensões

E_a e V_o . No diagrama fasorial mostrado na Figura 5.3 observa-se que a corrente está adianta em 90° da tensão V_o , portanto ao se analisar esse comportamento observa-se que essa relação emula a relação de tensão-corrente em um capacitor, portanto um motor síncrono sem carga no seu eixo operando sobexcitado emula um capacitor no sistema de potência, podendo, portanto, suprir potência reativa conforme convenção.

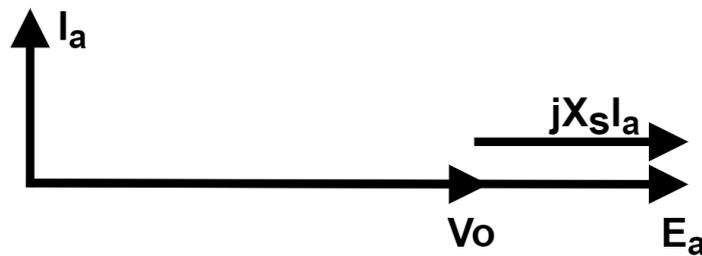


Figura 5.3 – Diagrama Fasorial para corrente de campo acima da nominal
Fonte: Próprio autor.

É importante frisar que ao se aumentar I_f (corrente de campo), E_a cresce proporcionalmente (dentro dos limites de saturação), aumentando assim a queda de tensão $jX_S I_a$, logo aumentando também I_a , porém mantendo-se a defasagem. Nesse sentido o sistema se comporta como um capacitor variável, suprindo energia reativa variável. Logo a máquina sobexcitada operando como motor a vazio ou gerador (dependendo da convenção de sinais) permite a emulação de um capacitor ajustável ao sistema de potência.

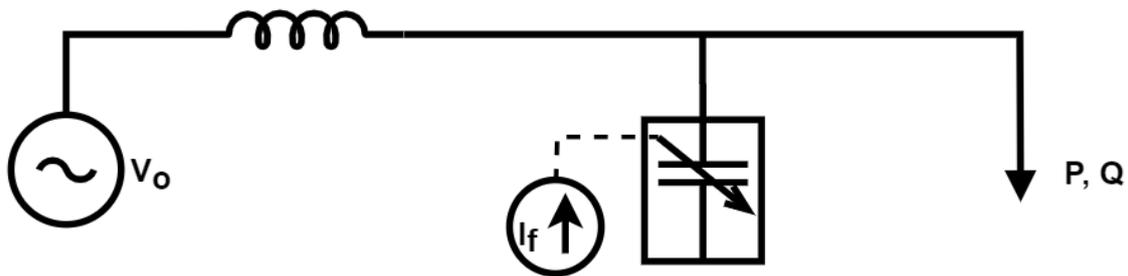


Figura 5.4 - Sistema de potência com capacitor ajustável equivalente
Fonte: Próprio autor.

Se a corrente I_f , for diminuída, o módulo do fasor E_a também diminui, tornando a tensão induzida E_a menor que a tensão V_o . Assim a diferença $jX_S I_a$, inverte o seu sentido deixando a corrente 90° atrasada em relação a tensão V_o .

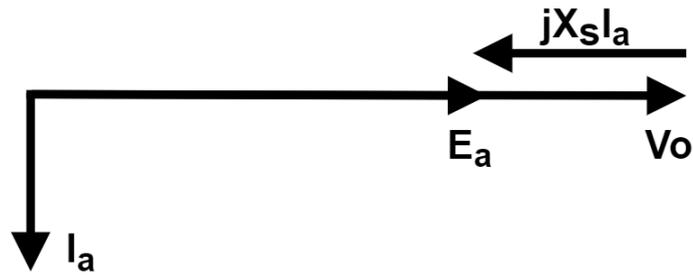


Figura 5.5 – Diagrama Fasorial para corrente de campo acima da nominal
Fonte: Próprio autor.

Realizando-se a mesma análise da relação tensão-corrente entre V_o e I_a , temos a emulação de um indutor no sistema. Logo o motor síncrono subexcitado se comporta como uma carga indutiva ajustável, conforme mostrado na Figura 5.6.

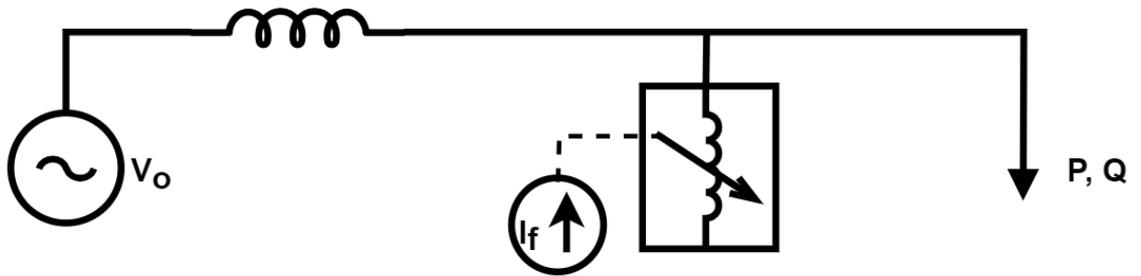


Figura 5.6 - Sistema de potência com capacitor ajustável equivalente
Fonte: Próprio autor.

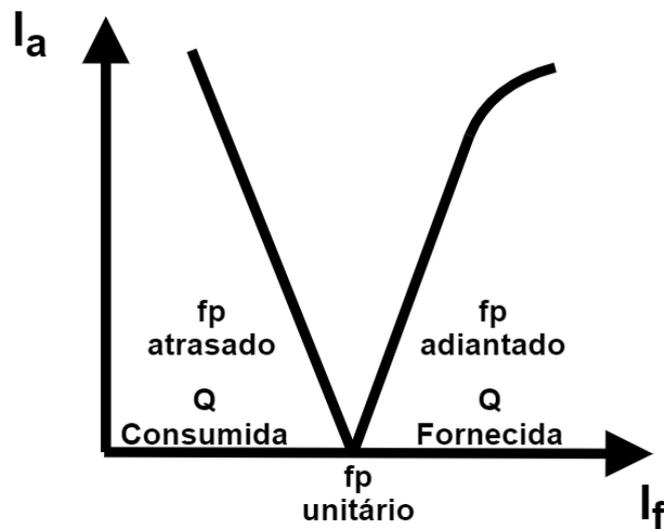


Figura 5.7 – Curva V da relação $I_a \times I_f$
Fonte: Próprio autor.

A curva mostrada na figura 5.7 é chamada de curva V . Ela denota o comportamento de I_a em relação a variação de I_f . Como não há potência ativa sendo injetada na máquina (desprezando-se as perdas) para um fator de potência unitário a corrente I_a é nula. A partir desse ponto o aumento linear da corrente de campo implica em um aumento linear da corrente de linha e conseqüente suprimento de potência reativa pelo motor para a rede. Essa relação é linear até a saturação da máquina ser atingida.

5.2 *Compensador supersíncrono*

O funcionamento da máquina mostrado no item 4.1 propicia diversas vantagens operacionais para sistemas elétricos de potência, porém considera somente a compensação de reativos na frequência fundamental. No entanto, sabe-se que atualmente as cargas não-lineares representam uma parcela considerável da demanda do sistema.

As cargas não-lineares são assim nomeadas por comumente apresentarem uma relação de não-linearidade entre tensão e corrente. Esse aspecto causa uma deformação nas correntes do sistema conhecida como distorção harmônica, pois apresenta-se de forma similar em cada ciclo da fundamental, evidenciando que seu espectro é múltiplo inteiro da frequência nominal do sistema (RUDNICK, 2003).

Uma carga não-linear típica muito utilizada em sistemas de energia é o retificador. Para sistemas de elevada potência, busca-se a utilização de retificadores trifásicos com a finalidade de se distribuir a corrente entre as fases e assim evitar desbalanceamentos no sistema. Os retificadores trifásicos são muito comuns em aplicações industriais (ALMONTE, 1995) de alta potência como: integração de sistemas de geradores assíncronos a rede elétrica convencional e em sistemas de transmissão normalmente de alta tensão (HVDC).

As distorções harmônicas podem ser danosas aos componentes do sistema de energia dependendo de sua susceptibilidade. Naturalmente os equipamentos menos afetados são as

cargas resistivas como sistemas de aquecimento. Nestes sistemas a forma de onda não é relevante para seu funcionamento. Sistemas considerados mais susceptíveis são os projetados para operar em condições específicas de alimentação (onda senoidal), como equipamentos de comunicação, processamento de dados e máquinas elétricas operando na frequência da rede.

Tamãha é a importância do tema que diversas normas internacionais abordam as práticas e requisitos para o controle de harmônicas no sistema elétrico de potência como IEEE-519 (IEEE, 1992).

Um sistema com uma carga não linear é apresentado na figura 5.8, mostrado com equivalente monofásico.

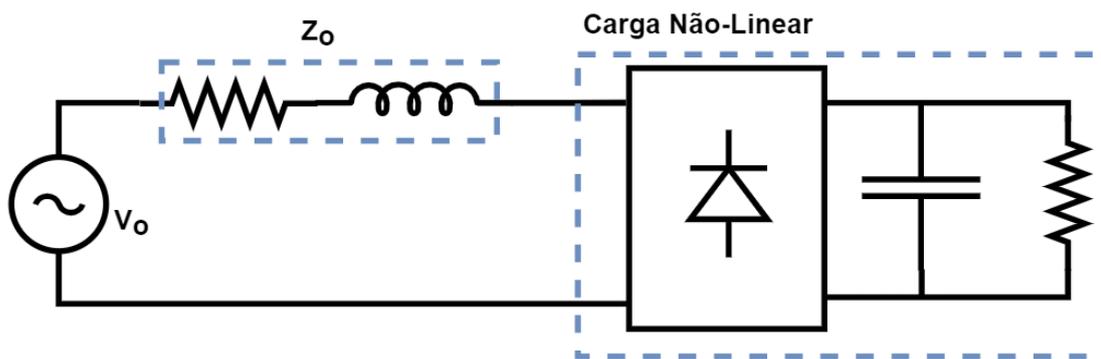


Figura 5.8 – Sistema com carga não-linear
Fonte: Próprio autor.

A corrente de linha da fonte apresenta conteúdo harmônico que flui por todo o circuito. Assim uma modelagem comum de se realizar para análise é modelar a carga como um (ou vários) gerador de corrente harmônica. A figura 5.9 mostra o equivalente monofásico nesta modelagem.

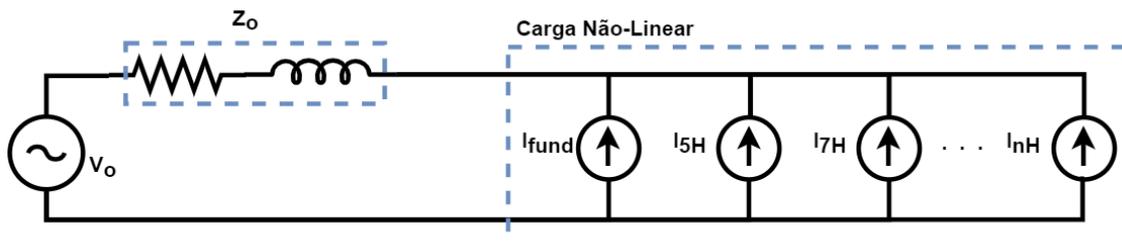


Figura 5.9 – Equivalente monofásico - Várias harmônicas
Fonte: Próprio autor.

Também é possível a análise independente do circuito em cada componente harmônico. Assumindo que a fonte (representando a rede do sistema) só gera tensão na frequência fundamental, a sua modelagem é apenas dos elementos passivos, resistências e indutâncias, equivalentes do sistema.

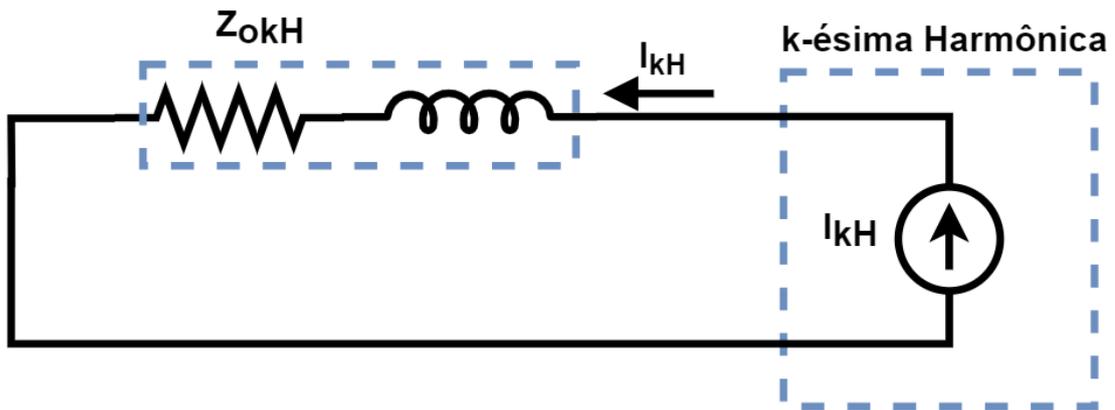


Figura 5.10 – Equivalente monofásico do circuito na frequência harmônica kH
Fonte: Próprio autor.

Na Figura 5.10, I_{kH} representa a k -ésima harmônica gerada pela carga não linear e Z_{okH} a impedância equivalente do sistema, nesta mesma frequência harmônica. É possível observar um dos problemas comuns das distorções harmônicas, elas circulam por todo o circuito e causam perdas e quedas de tensão em componentes passivos equivalentes. Uma forma de mitigar os efeitos das harmônicas é restringir seu percurso ao longo do sistema, para tanto, é comum posicionar um equipamento em paralelo com a rede para compensar, ou em outras palavras, oferecer um caminho alternativo de circulação para estas harmônicas, similar a compensação de reativo na frequência fundamental.

Considerando-se a operação como compensador síncrono, seria uma grande vantagem operacional se esta máquina pudesse também atuar na compensação de correntes harmônicas. Para que seja feita essa análise é necessário que o modelo do compensador seja utilizado

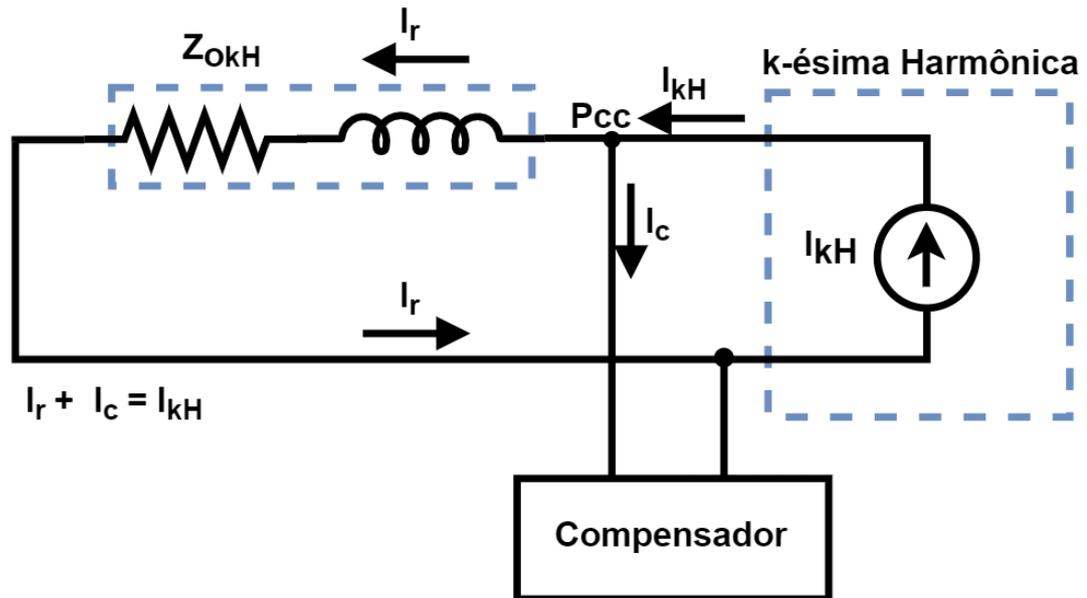


Figura 5.11 – Equivalente monofásico do circuito na frequência harmônica kH com compensador
Fonte: Próprio autor.

Se a máquina estiver atuando somente como compensador síncrono (operação na frequência síncrona, a sua modelagem seria semelhante ao gerador da rede, ou seja, somente uma reatância, conforme figura 5.12.

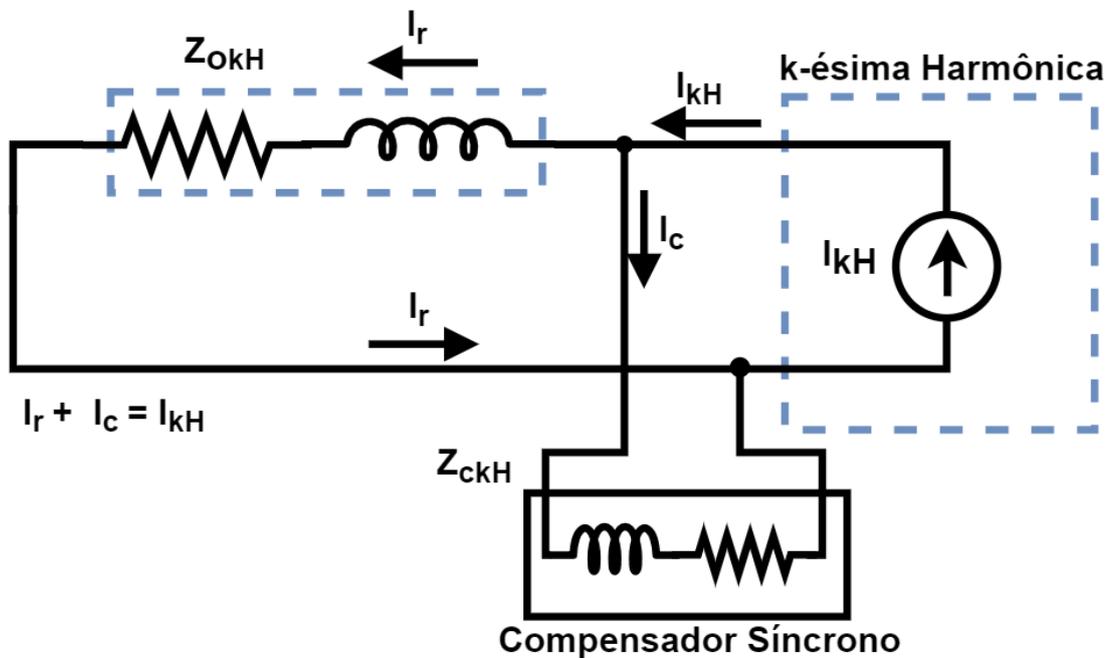


Figura 5.12 – Equivalente monofásico do circuito na frequência harmônica kH , considerando-se o modelo equivalente do compensador nesta frequência.
Fonte: Próprio autor.

No ponto PCC temos um divisor de corrente, onde $I_{kH} = I_r + I_c$. A rede elétrica é um barramento muito mais forte que a máquina (menor impedância e maior capacidade de curto-circuito), assim pode-se supor que $Z_{okH} \ll Z_{ckH}$, o que faz de Z_{okH} um caminho de menor impedância para a corrente harmônica, então tem-se que se $I_r \gg I_c$. O compensador não conseguiria atuar de forma satisfatória, pois a maior porção da corrente harmônica se encontra ainda transitando pela rede elétrica.

Como mostrado no Capítulo 1, é possível induzir tensões harmônicas nos enrolamentos do estator da máquina desde que uma corrente de campo apropriada seja usada. Como essas tensões estão na frequência harmônica elas podem ser introduzidas ao modelo na frequência harmônica como fonte de tensão.

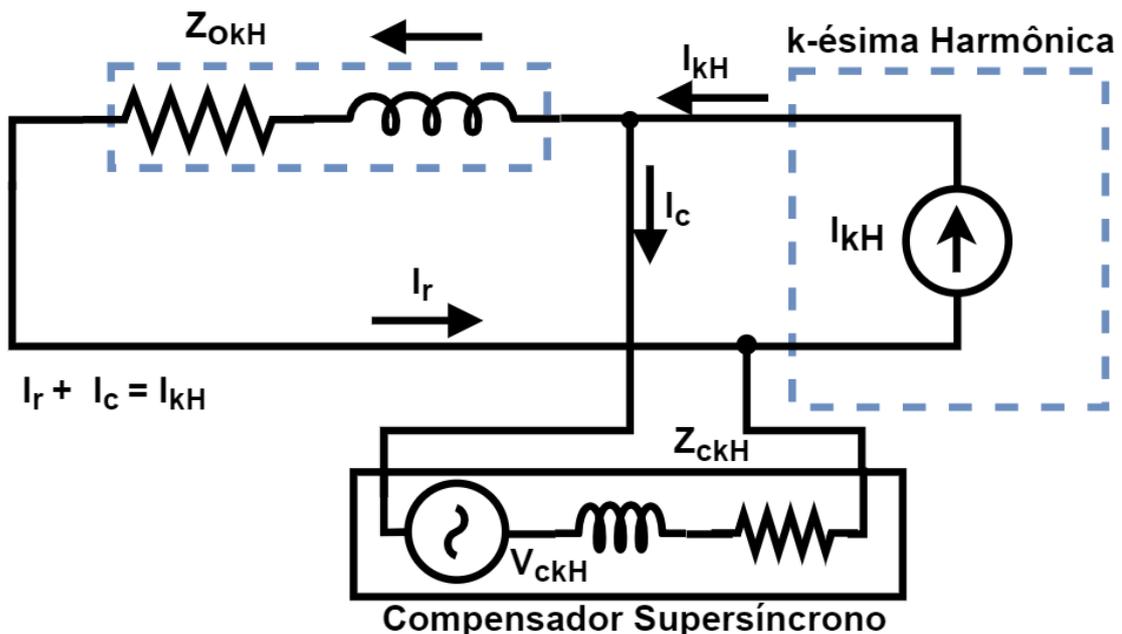


Figura 5.13 – Equivalente monofásico do circuito na frequência harmônica kH , considerando-se o modelo equivalente do compensador nesta frequência.

Fonte: Próprio autor.

Entretanto para a compensação de harmônicas nota-se que a emulação de componentes passivos unitários como capacitores ou indutores, não seria efetiva para a atenuação considerável da harmônica, visto que o nó no ponto PCC sempre irá dividir a corrente entre os ramos e como mostrado $Z_{okH} \ll Z_{ckH}$. Uma abordagem mais efetiva e simplificada seria a

emulação de uma fonte de corrente na mesma frequência, fase e módulo da frequência harmônica como mostra a figura 5.14.

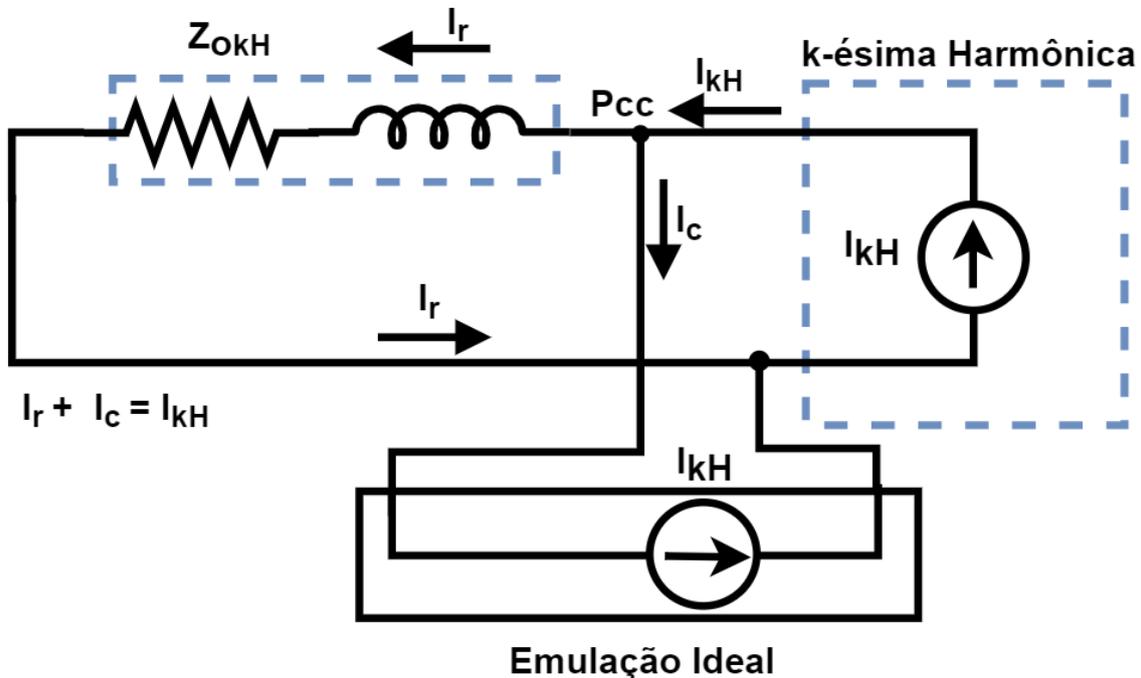


Figura 5.14 – Equivalente monofásico com o compensador atuando com emulação ideal.

Aplicando-se a lei de *Kirchhoff* das correntes no ponto PCC, tem-se

$$I_r + I_c = I_{kH} \quad (5.2)$$

$$I_r = I_{kH} - I_c \quad (5.3)$$

Ao se emular uma fonte de corrente no compensador, tem-se

$$I_c = I_{kH} \quad (5.4)$$

$$I_r = 0 \quad (5.5)$$

Para que a fonte de tensão em série com o a reatância da máquina na frequência harmônica atue como compensador de correntes harmônicas, esta precisa emular um componente ativo no circuito, para que sejam criadas as condições da corrente de harmônica circular pelo compensador, uma vez que o elemento passivo do compensador (indutância equivalente da máquina) representa uma impedância maior do que o componente passivo da

rede. A figura 5.15 mostra o compensador supersíncrono equivalente considerando-se a transformação de fontes.

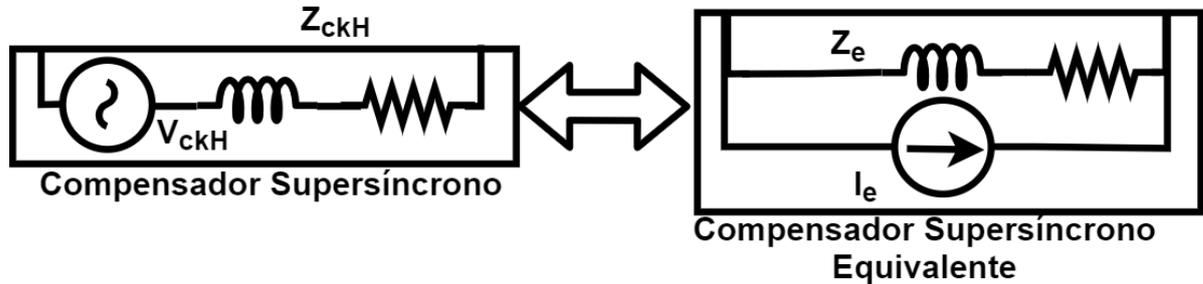


Figura 5.15 –Circuito equivalente e emulação possível.

Fonte: Próprio autor.

Observando-se o circuito equivalente do compensador via teorema de circuito de transformação de fontes ente os pontos de conexão do compensador, facilita-se a análise e o aproxima do que seria o compensador ideal da figura 5.14.

Para tanto teríamos uma conversão tal que:

$$I_e = V_{ckH}/Z_{ckH} \quad (5.6)$$

$$Z_e = Z_{ckH}, \quad (5.7)$$

Para que I_r seja diminuído, próximo de zero, precisa-se que a corrente que I_c seja muito próxima de I_e (corrente emulada), para tanto, faz-se intuitivamente que $I_e = I_{kH}$:

$$I_e = I_{kH} \quad (5.8)$$

$$\frac{V_{ckH}}{Z_{ckH}} = I_{kH} \quad (5.9)$$

$$V_{ckH} = I_{kH} Z_{ckH} \quad (5.10)$$

Esta é a tensão que deve ser gerada no estator da máquina síncrona para que a emulação do compensador seja de um elemento ativo no circuito uma fonte de corrente em paralelo com uma impedância. Conhecendo-se a componente harmônica que se deseja compensar

(frequência, módulo e fase), é possível modificar a tensão V_{ckH} através do ajuste da corrente de campo da máquina, de forma que I_r seja compensada.

Com o circuito equivalente mostrado na figura 5.13 (com a máquina síncrona modelada como fonte de tensão e impedância), é possível simular a resposta normalizada deste circuito equivalente. Para fins de análise, simulou-se a entrada em atuação do compensador no circuito equivalente no tempo de 0.005 segundos.

Antes do tempo de $t = 0.005s$ temos que a corrente I_{kH} flui pela rede elétrica pois não há compensação ativa, assim $I_r = I_{kH}$, (na Figura 5.16, I_r está em bege e I_{kH} em vermelho) e $I_c = 0$ (azul). Em $t = 0.005s$ o compensador supersíncrono é ativado e a maior porção da corrente I_{kH} passa a circular pelo compensador, fazendo com I_r aproximadamente zero na frequência da harmônica.

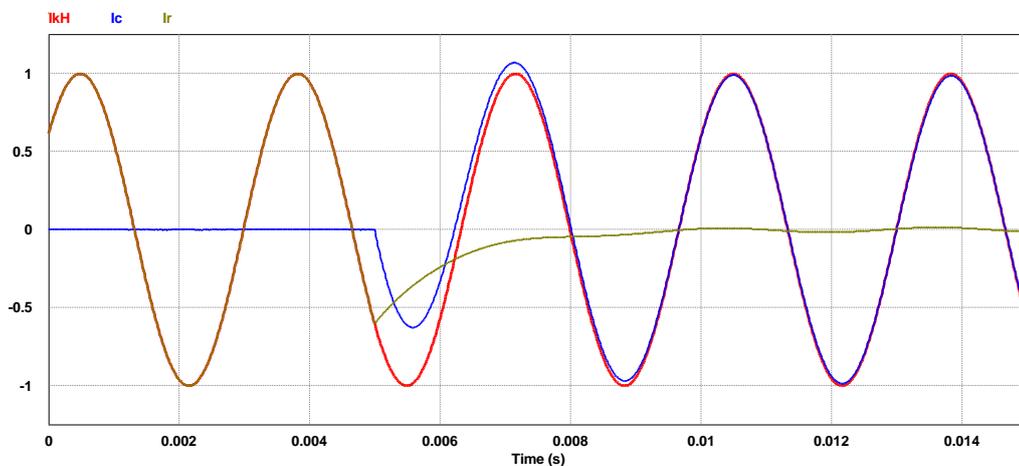


Figura 5.16 – Simulação do circuito equivalente da Figura 5.13 em operação.
Fonte: Próprio autor.

O circuito se comporta de forma esperada, diminuindo consideravelmente a corrente I_r , fazendo com que a corrente I_{kH} circule pelo caminho criado pelo compensador.

5.3 Análise da operação

As expressões 5.8 e 5.10 mostram que a corrente que irá circular no compensador, depende do módulo e ângulo da corrente harmônica logo a tensão a ser induzida na máquina deve ser função também de I_{kH} , como mostrado na expressão 5.10 que representa a operação possível desse sistema mais próxima da ideal. Nesta expressão, nota-se que para emulação desta corrente a tensão a ser induzida também depende da impedância da máquina na frequência harmônica.

A medida que se varia o módulo da tensão induzida no compensador, há variação da corrente I_c e conseqüente variação de I_r conforme expressão (5.2). A corrente em I_r aumenta devido a circulação de I_{kH} pela rede. Também há deslocamento de fase de I_r em relação a I_{kH} . Para fins de análise, reduziu-se o módulo em 25%, o resultado é mostrado na figura 5.17.

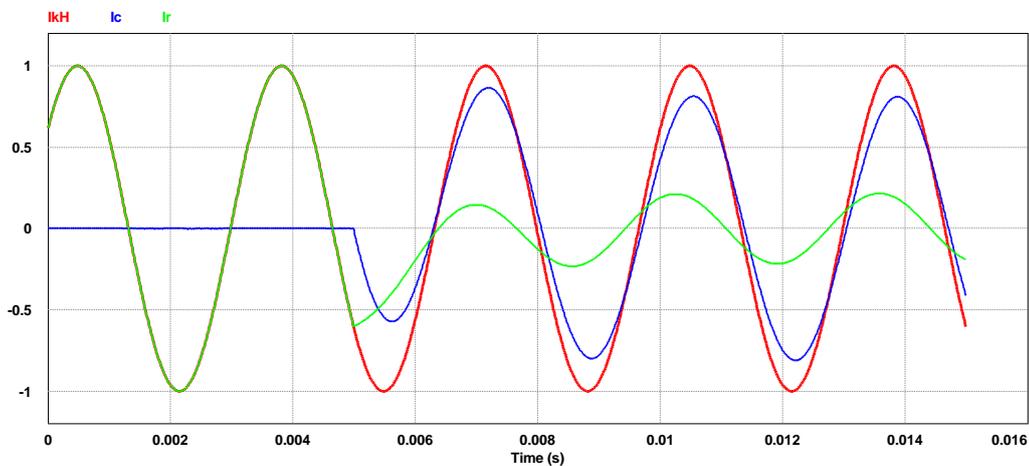


Figura 5.17 – Simulação do circuito equivalente da Figura 5.13 com aumento de V_{ckH} em 25%
Fonte: Próprio autor.

Elevando-se o módulo da tensão induzida em 25% o sistema entraria em uma operação indesejada, pois a corrente I_c se tornaria maior que a corrente I_{kH} e estaria inserindo conteúdo harmônico no sistema, conforme mostrado na Figura 5.18.

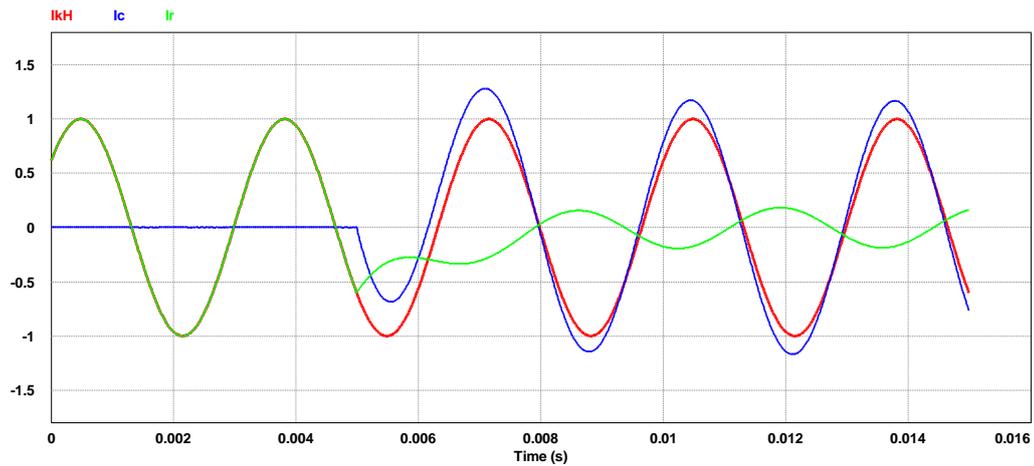


Figura 5.18 – Simulação do circuito da Figura 5.13 com aumento de V_{ckH} em 25%
Fonte: Próprio autor.

Para variações na fase da tensão induzida, observa-se que também variam o comportamento da compensação. Para um adiantamento na fase da tensão induzida, a compensação ainda atua, porém de forma menos efetiva, ocasionando a redução da corrente I_r e deslocamento de sua fase, mostrado em figura 5.19.

Porém, se a fase da tensão for atrasada, tem-se também um aumento do conteúdo harmônico, pois a corrente I_c na componente harmônica se torna maior que a corrente I_{kH} , conforme visto na Figura 5.19

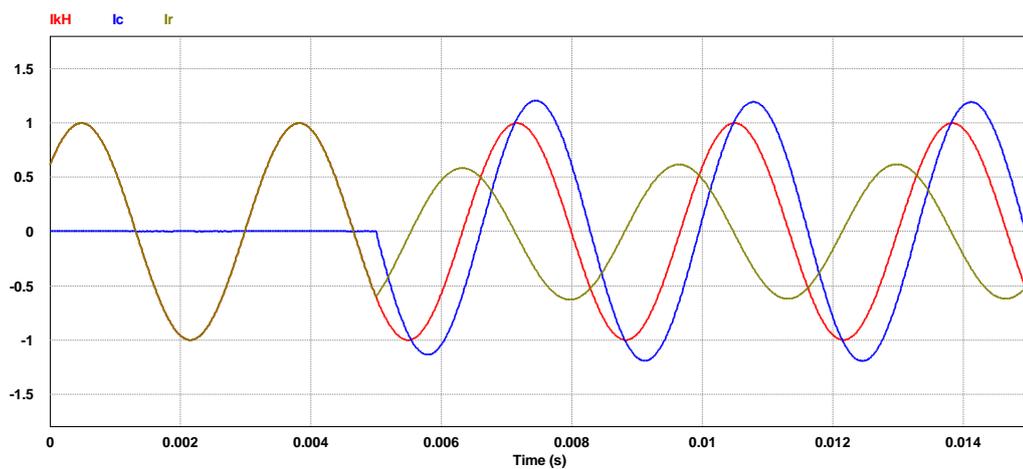


Figura 5.19 – Simulação do circuito da Figura 5.13 com adiantamento de fase de V_{ckH} em 45°
Fonte: Próprio autor.

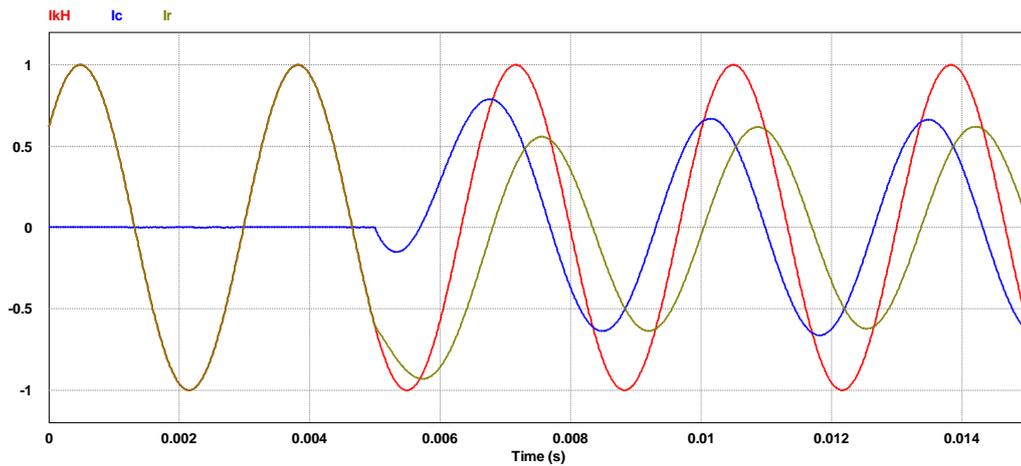


Figura 5.20 – Simulação do circuito da Figura 5.13 com atraso de fase de V_{ckH} em 45°
 Fonte: Próprio autor.

Observa-se no modelo apresentado que a máquina síncrona pode se comportar como compensador de harmônicos desde que se induza uma tensão de mesma frequência no seu estator. Da mesma forma que o compensador síncrono em relação a reativos na frequência fundamental, as variações da operação modificam o conteúdo inserido no sistema, podendo o compensador de harmônico passar a fonte de harmônicos.

Pode-se também comparar a atuação da máquina como compensador de harmônicos com a de um filtro ativo paralelo. A topologia padrão deste filtro é um conversor *voltage source inverter (VSI)*, que também tem característica primária de fonte de tensão, sendo controlado por corrente. Nesse tipo de aplicação um caminho para as correntes harmônicas através do conversor até um capacitor. Na máquina síncrona com a operação descrita as correntes harmônicas circulariam pela mesma com a emulação de uma fonte de corrente e o capacitor equivalente (para a frequência harmônica) ainda poderia ser variável conforme a variação dos parâmetros da tensão induzida.

- i. Transformada de Clarke que muda a referência para o eixo *alfa-beta*;
- ii. Cálculo das potências de acordo com a teoria da potência instantânea;
- iii. Cálculo das potências que se deseja compensar.
- iv. Cálculo da corrente de referência no eixo *alfa-beta*;
- v. Transformada inversa de Clarke para inversa para o eixo *abc*.

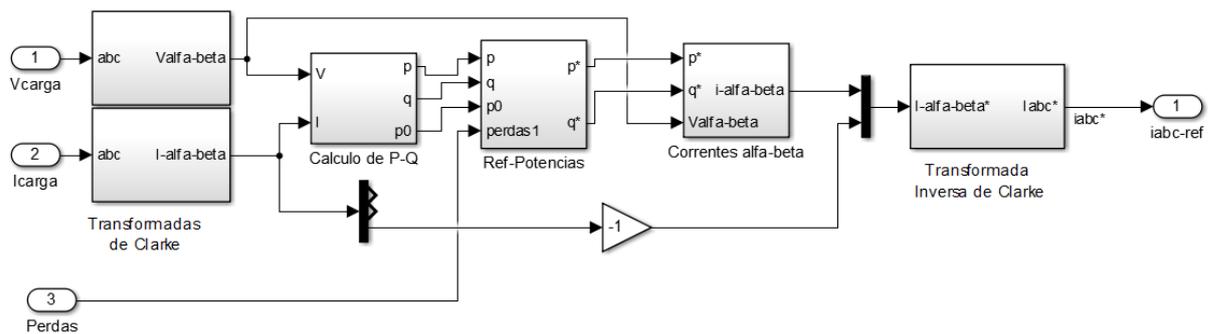


Figura 6.3. Subsistema Controle DQ - Cálculo de potência referência instantânea

Fonte: Próprio autor

Calculado as referências de corrente no eixo *abc*. As mesmas são enviadas para a malha de corrente, figura 6.4.

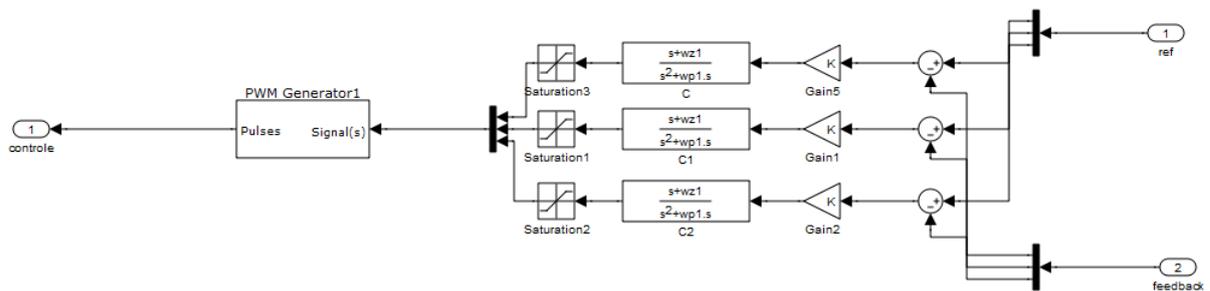


Figura 6.4. Subsistema Ci (Controlador de Corrente)

Fonte: Próprio autor

A figura 6.6 apresenta o resultado do filtro mostrando as correntes do sistema. Em vermelho é mostrada a corrente da rede, em verde a corrente de carga e em azul a corrente do

filtro. Observa-se que a corrente de filtro complementa a corrente da rede a fim de mantê-la senoidal.

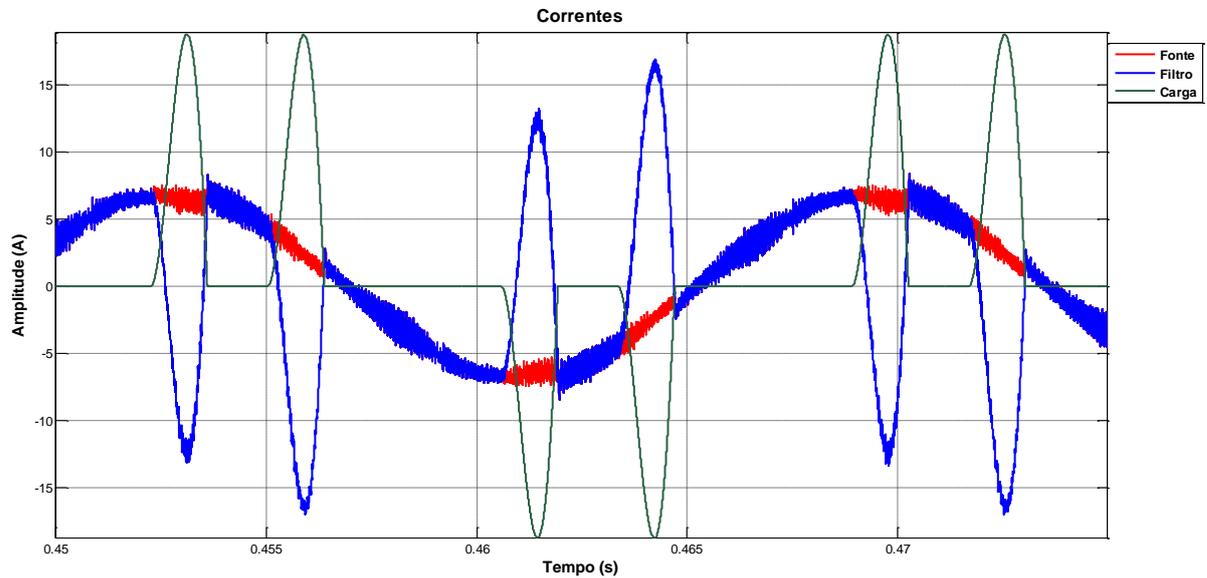


Figura 6.5. Correntes do Sistema
Fonte: Próprio autor

A Figura 6.6 apresenta a tensão e correntes do sistema elétrico depois da compensação. A Figura 6.4 contém as correntes da carga, da fonte e da entrada do FAP durante a compensação realizada. Mostra-se que foi possível compensar as correntes harmônicas e energia reativa convencional do sistema.

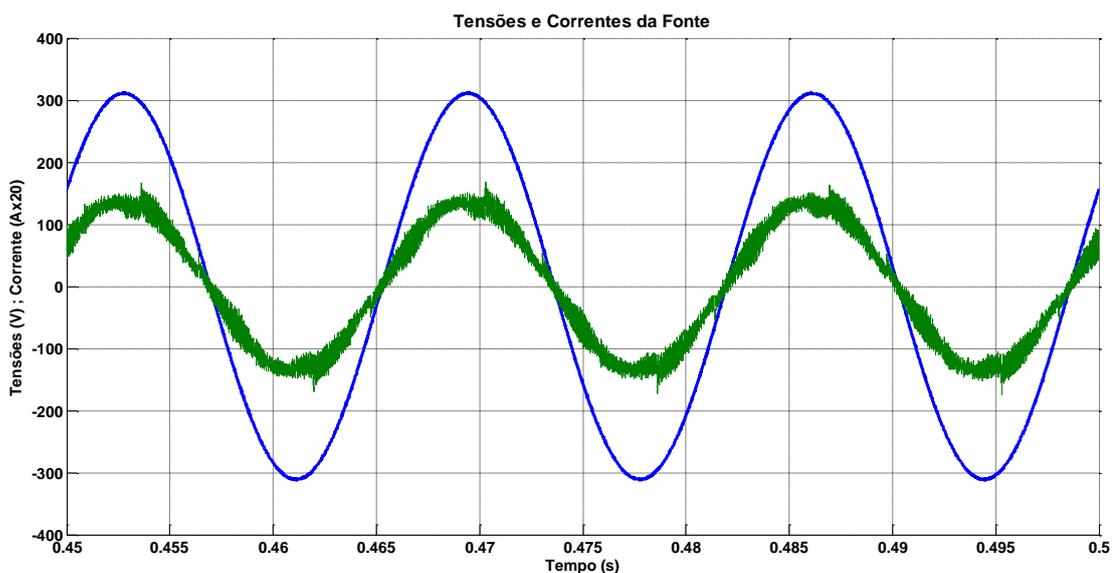


Figura 6.6. Corrente e Tensão de uma fase da fonte
Fonte: Próprio autor

A Figura 6.7 mostra as corrente e tensões do sistema, mostra-se a operação adequada do FAP, compensando as não-linearidades da carga e a corrente tornando as correntes da rede senoidais.

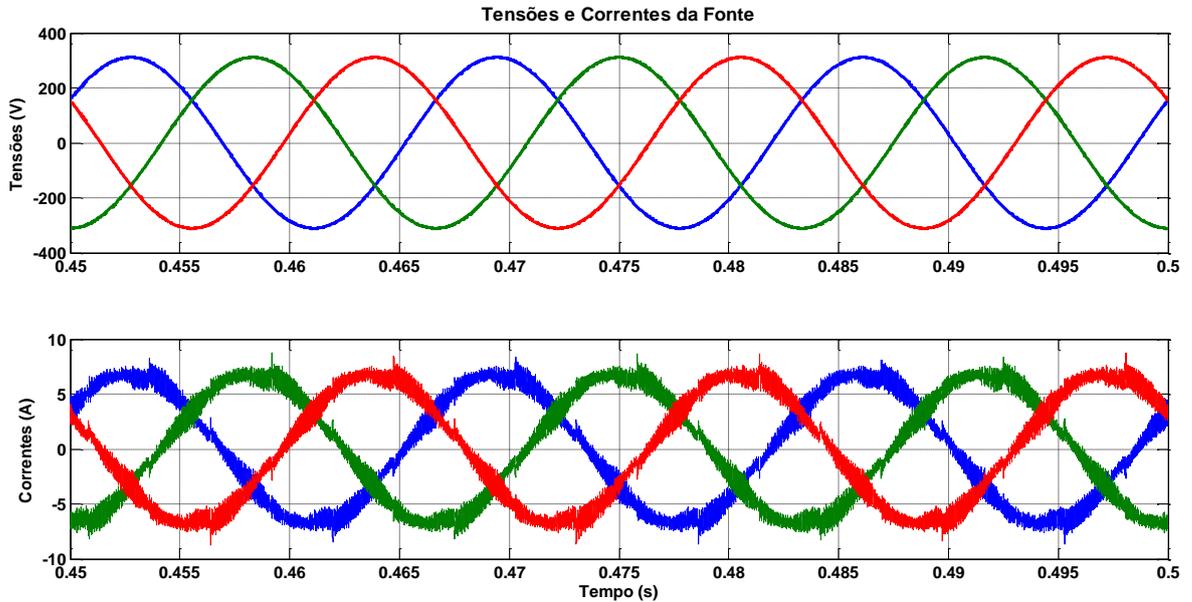


Figura 6.7. Corrente da fonte trifásica
Fonte: Próprio autor

As correntes do FAP são mostradas na Figura 6.8. mostra as corrente e tensões do sistema, mostra-se a operação adequada do FAP, compensando as não-linearidades da carga e a corrente tornando as correntes da rede senoidais.

Como se pode observar o filtro funcionou de forma satisfatória para a corrente de carga mostrada na Figura 6.9. Observa-se ainda na Figura 6.8 que a corrente do filtro teve boa resposta dinâmica realizando a correção necessária para tornar a corrente da fonte senoidal e em fase com a tensão.

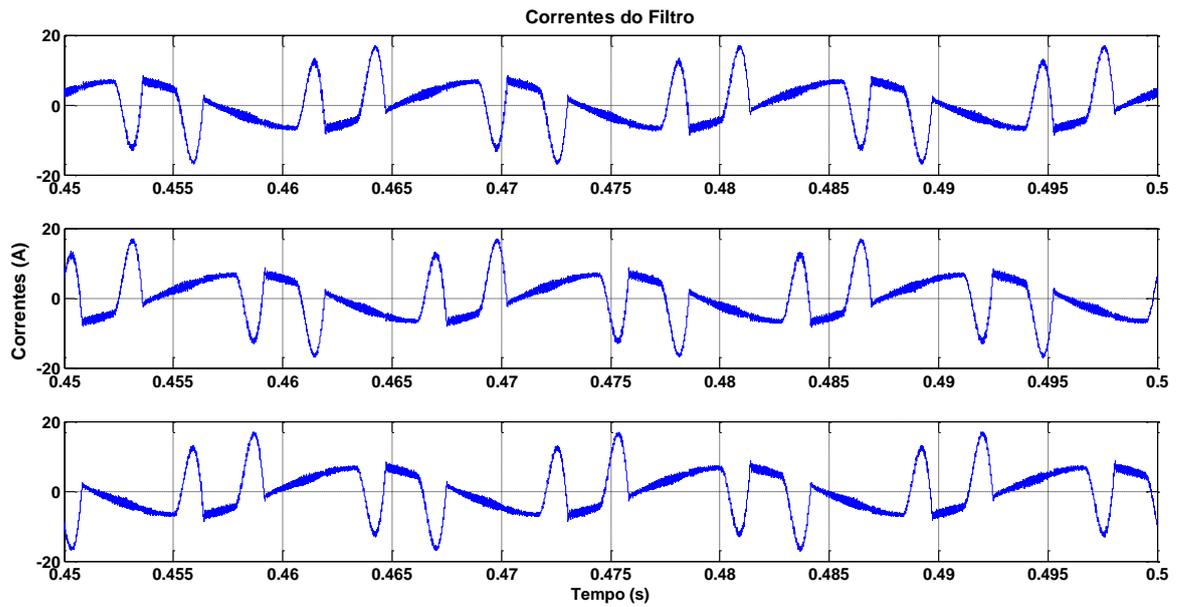


Figura 6.8. Correntes do Filtro
Fonte: Próprio autor

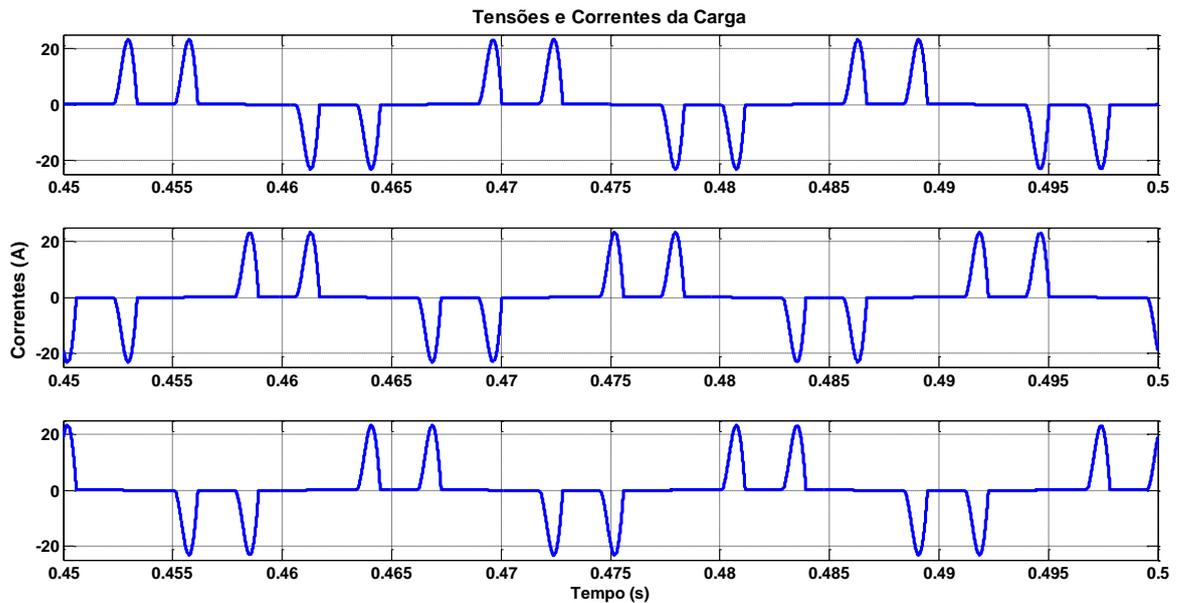


Figura 6.9. Correntes da Carga
Fonte: Próprio autor

Na figura 6.10 nota-se a boa resposta da malha de tensão, mantendo a oscilação de tensão dentro de patamares aceitáveis. As figuras 6.11 e 6.12 mostram a análise da taxa de distorção harmônica do sistema com e sem a compensação. Observa-se uma grande redução da taxa de distorção harmônica (THD) e elevando o fator de potência,.

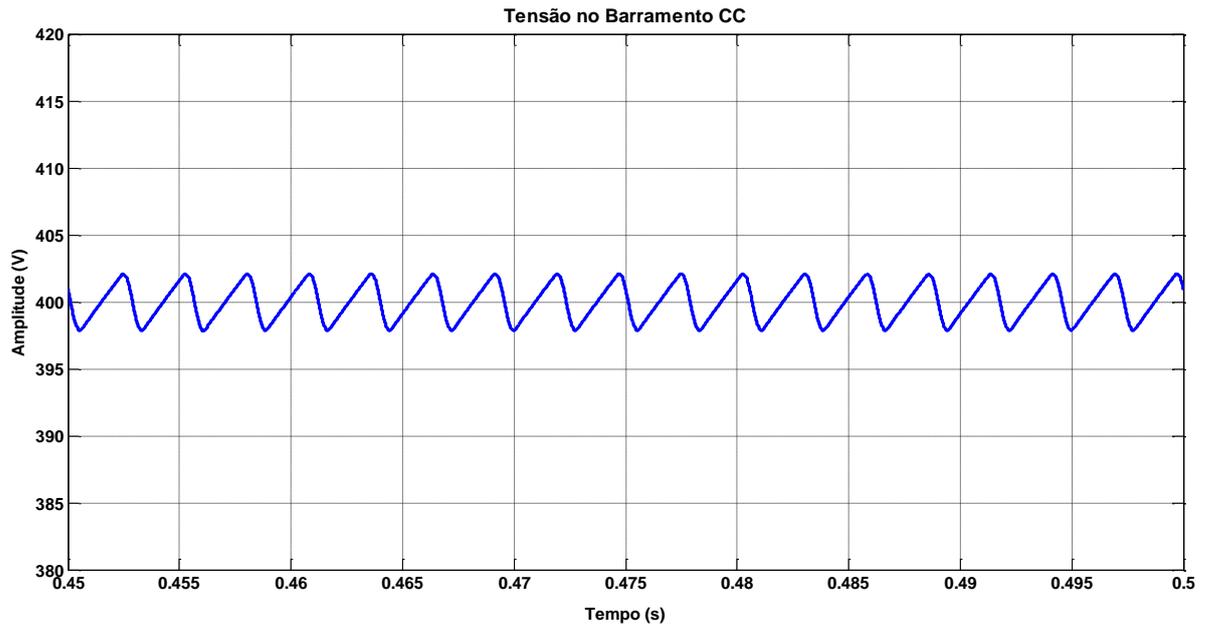


Figura 6.10. Correntes do Filtro
Fonte: Próprio autor

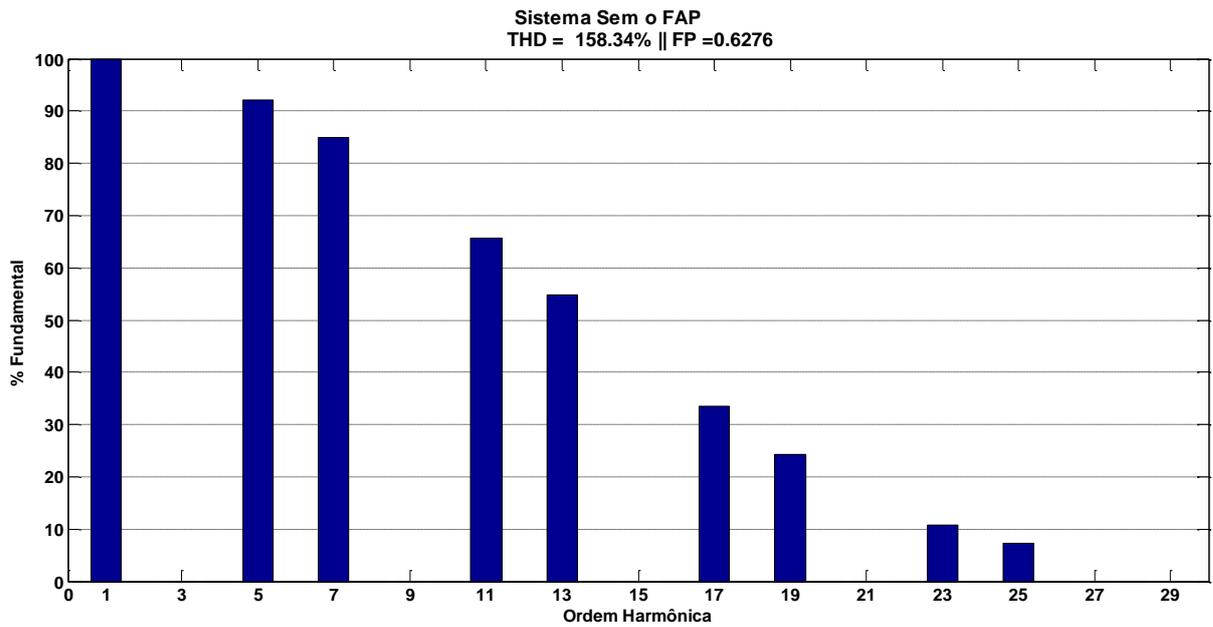


Figura 6.11 - THD da Corrente Sem compensação
Fonte: Próprio autor

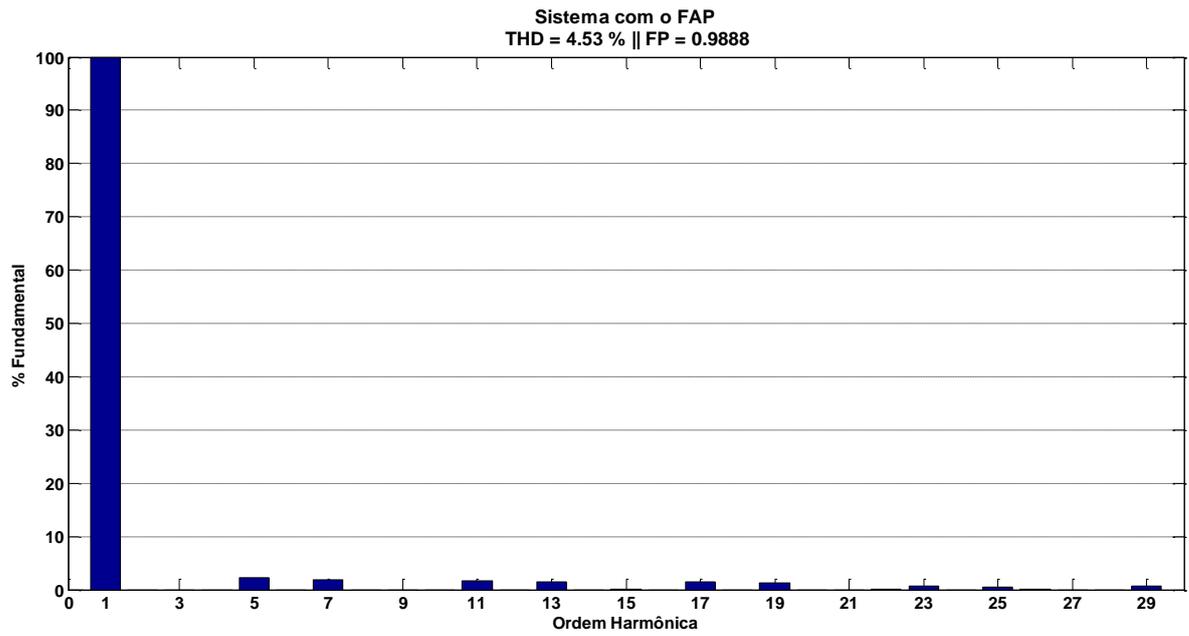


Figura 6.12 - THD da Corrente Com Compensação
Fonte: Próprio autor

6.2 Resultados de Compensação de Harmônica com FAZ

Os resultados foram obtidos a partir da simulação em *Simulink*®. O sistema simulado apresentado na Figura 6.13 onde é mostrado a carga não-linear alimentada pela rede e a máquina síncrona conectada em paralelo. As tensões harmônicas para a geração e alimentação do campo, são feitas por um gerador de harmônicos emulando um inversor igual ao simulado para FAP para efeito de comprovação do conceito.

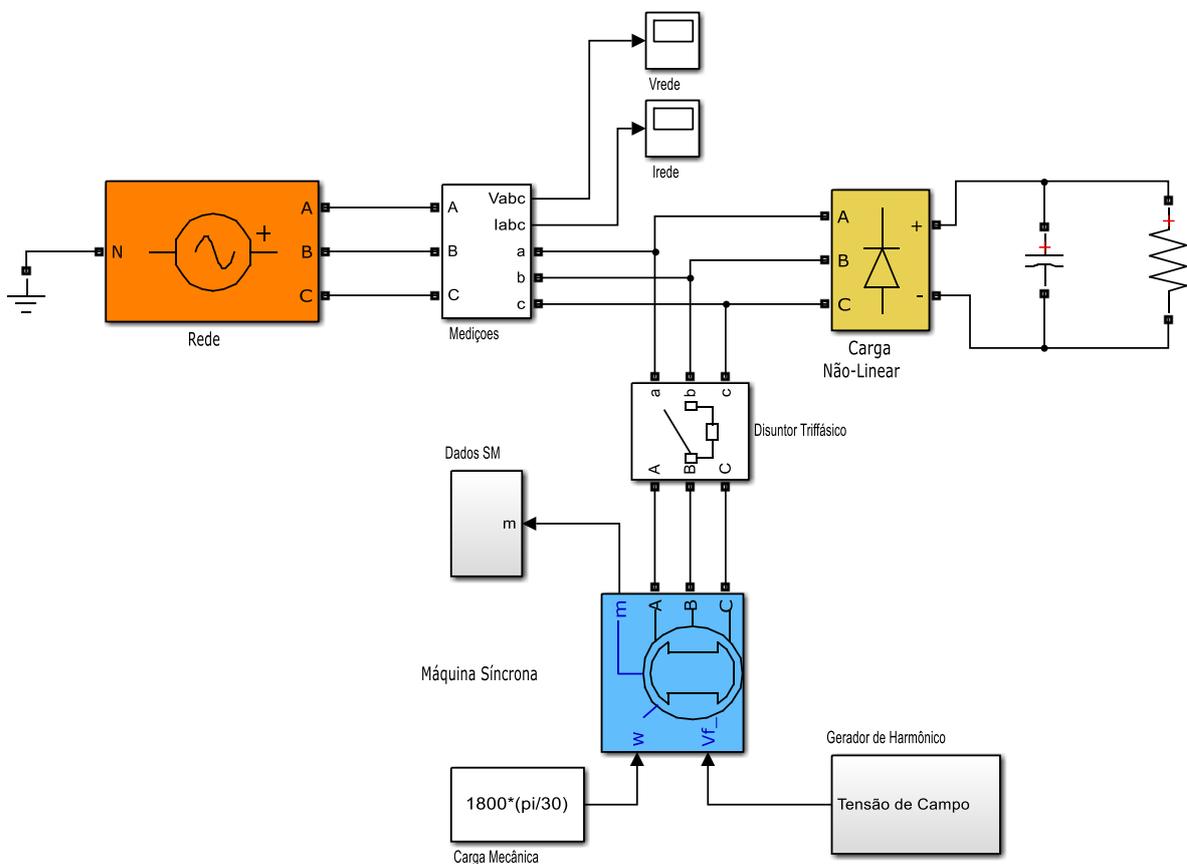


Figura 6.13 - Sistema a ser Simulado

Fonte: Próprio autor

A Tabela 3 mostra os parâmetros da simulação realizada. A corrente da carga é mostrada na Figura 6.14. Sem a conexão da máquina em paralelo a corrente é fornecida pela rede.

Tabela 3 – Parâmetros da Simulação

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
Potência da Carga	1,6 kW
Tensão Nominal (Rede e MS)	220 V _{rms}
Potência Máquina Síncrona (MS)	2,0 kVA
Corrente de Campo Nominal	3,0 A
Número de Par de Polos	2
Tipo da MS	Polos Salientes

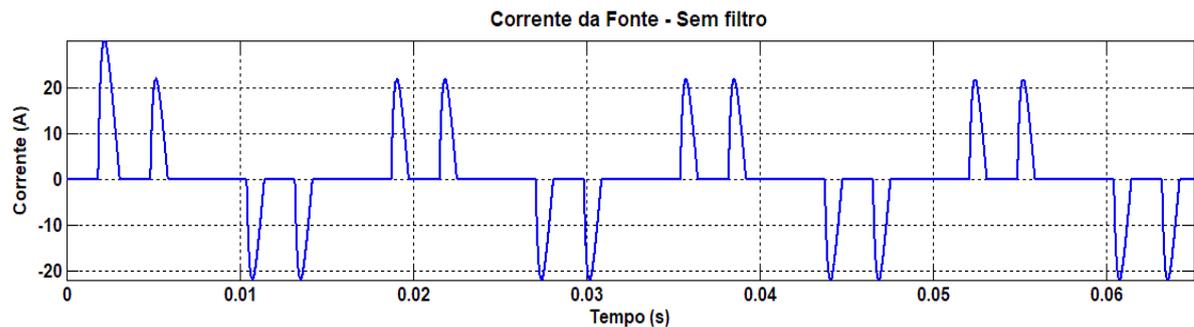


Figura 6.14 - Corrente de Carga

Fonte: Próprio autor

A análise da transformada de Fourier indica as principais componentes harmônicas presentes.

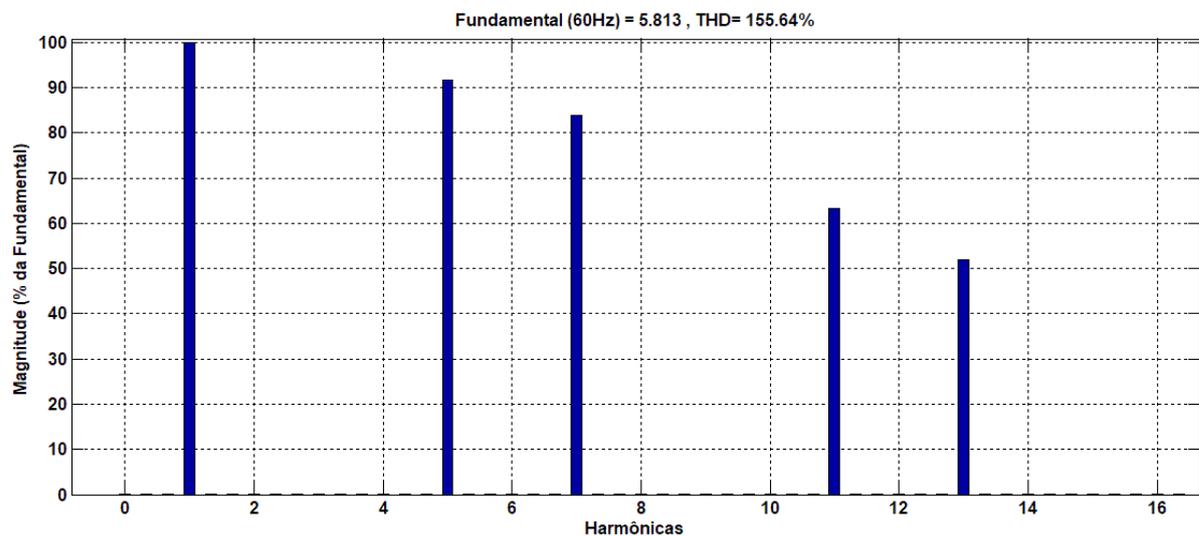


Figura 6.15 - Análise Harmônica da Corrente de Carga

Fonte: Próprio autor

Considerando que as harmônicas mais relevantes são os pares de 5^a, 7^a e 11^a e 13^a mostra-se viável utilizar a máquina síncrona alimentada com conteúdo harmônico contendo a 6^a e a 12^a harmônica, conforme os equacionamento e resultados mostrados nos Capítulos 2.

Acionando o disjuntor e colocando a máquina no sistema, com uma alimentação de campo somente em CC, nota-se que o THD diminui devido ao aumento da corrente na frequência fundamental, porém as distorções ainda estão presentes.

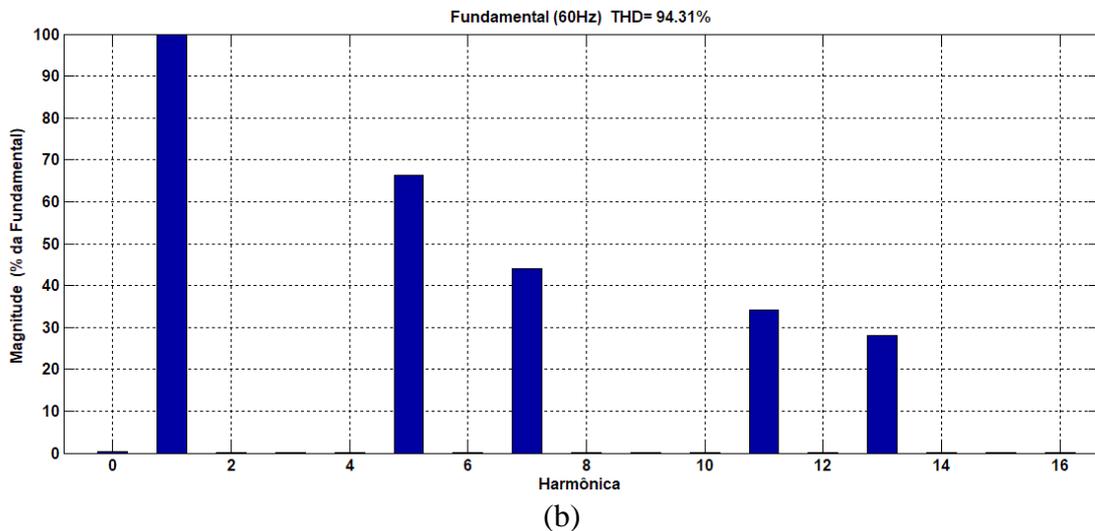
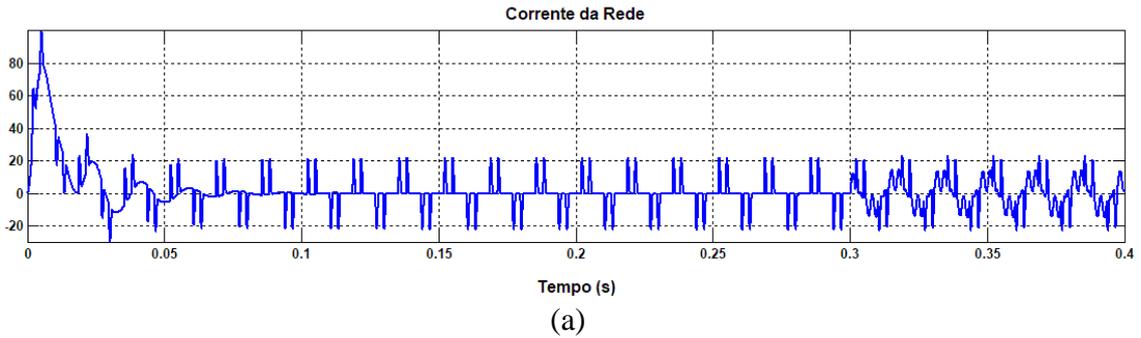


Figura 6.16 – (a) Corrente da Rede (b) Análise Harmônica da Corrente de Carga – Alimentação de Campo CC + 6ª Harmônica

Fonte: Próprio autor

Modificando a corrente de campo, com a inserção da 6ª harmônica no tempo $t = 0,3s$, visando a compensação da 5ª e da 7ª harmônicas.

A figura 6.16 (b) mostra a análise harmônica da corrente da rede para a inserção da sexta harmônica na corrente de campo. Observa-se uma redução na magnitude da 5ª e da 7ª harmônica.

A tensão de campo foi gerada por um simples bloco de senóide de forma a inicialmente testar-se a prova do conceito. Na figura 6.17 observa-se que a média da tensão de campo é positiva.

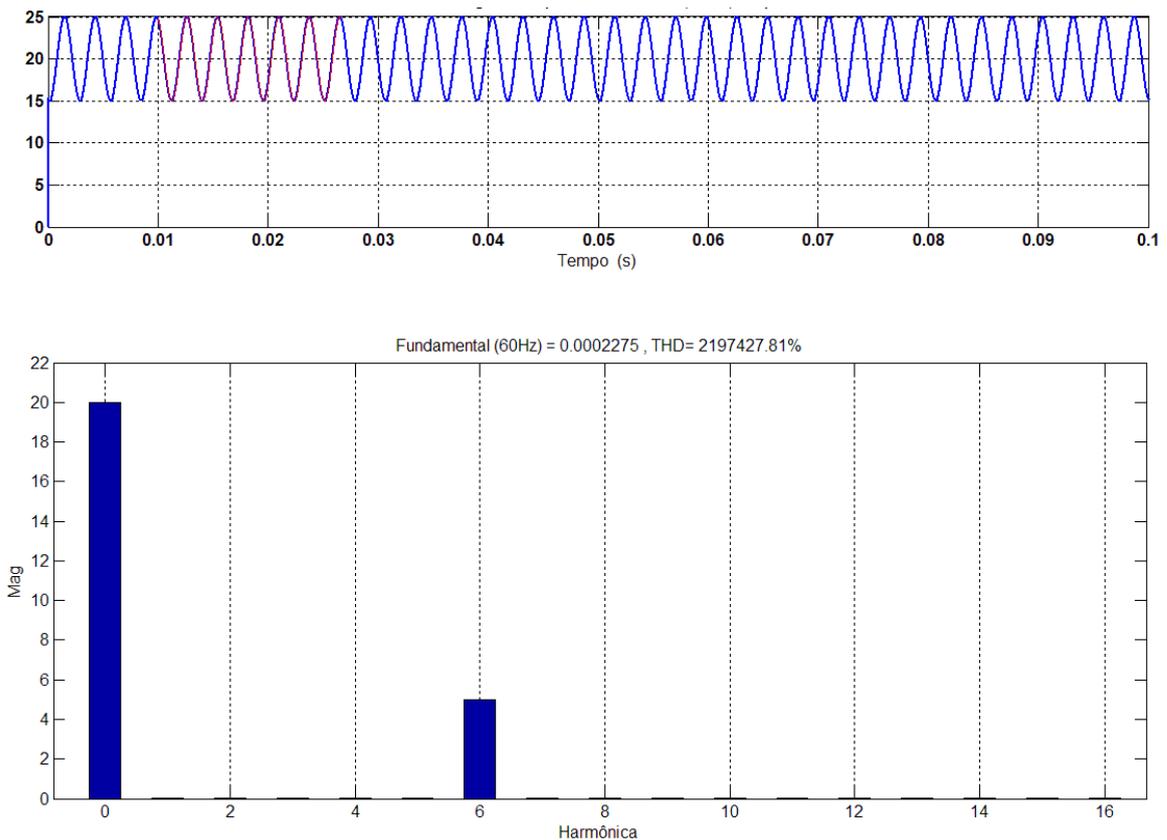


Figura 6.17 - Tensão de Campo aplicada ao rotor e Análise do espectro harmônico da tensão de campo

Fonte: Próprio autor

Na figura 6.16 (b) é possível observar que a compensação foi realizada parcialmente, com redução das componentes 5^a e 7^a. Nota-se também que a corrente apresenta um aspecto mais senoidal, claramente reflexo da queda do THD.

A corrente da máquina síncrona operando como FAZ é mostrada na Figura 6.18. Pode-se observar que a máquina compensa as componentes harmônicas de 5^a e 7^a frequência. Na figura 6.19 mostra-se uma vista ampliada da corrente da máquina antes e após ser acionada.

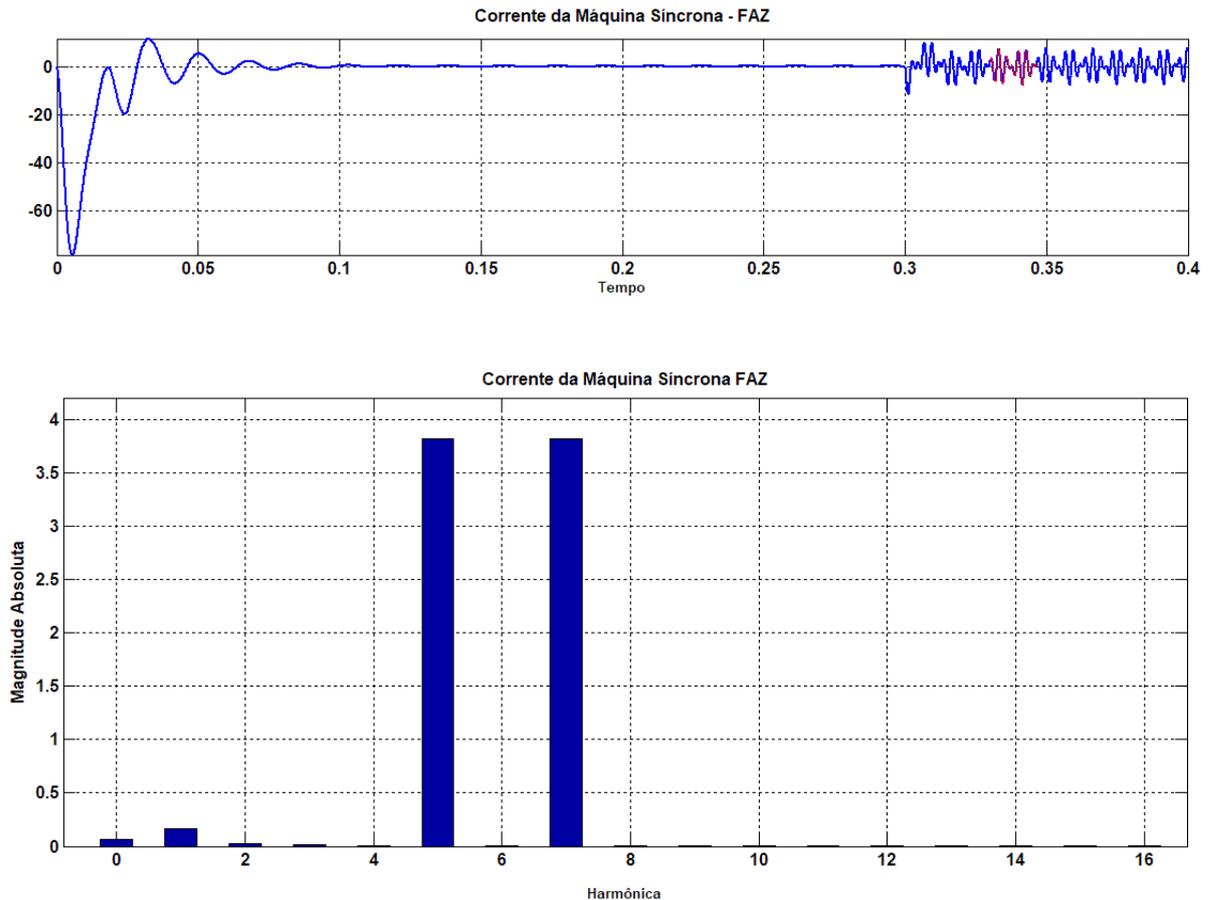


Figura 6.18 – Corrente da Máquina Síncrona e Análise do espectro harmônico da corrente da Máquina Síncrona operando como FAZ

Fonte: Próprio autor

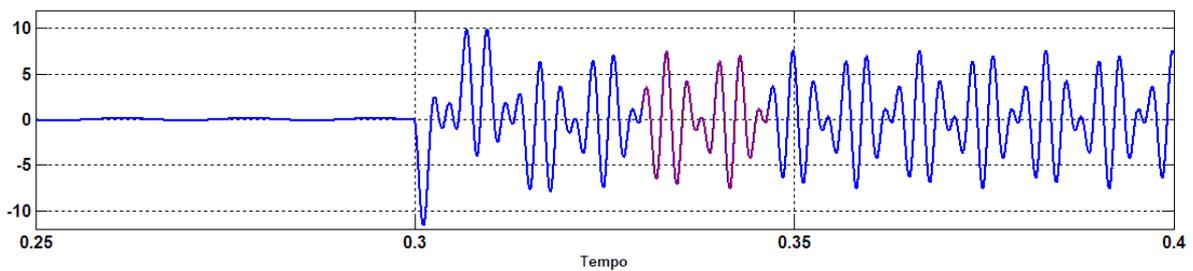


Figura 6.19 – Vista Ampliada Corrente da Máquina Síncrona, antes e depois de ser acionada.

Fonte: Próprio autor

É possível a máquina compensar harmônicas e potência reativa da da frequência fundamental, basta-se se elevar o valor médio da corrente de campo. A figura 6.20 mostra a compensação realizada pela máquina síncrona operando em modo compensador síncrono (para

o tempo menor que $t = 0,3s$ e modo supersíncrono para o tempo após $t = 0,3s$. A sua corrente pode ser visualizada na figura 6.20. No detalhe da b) desta figura mostra a mudança de modo e o detalhe onde é possível visualizar as harmônicas na corrente da máquina, mostrando a capacidade da máquina de operar em ambos os modos.

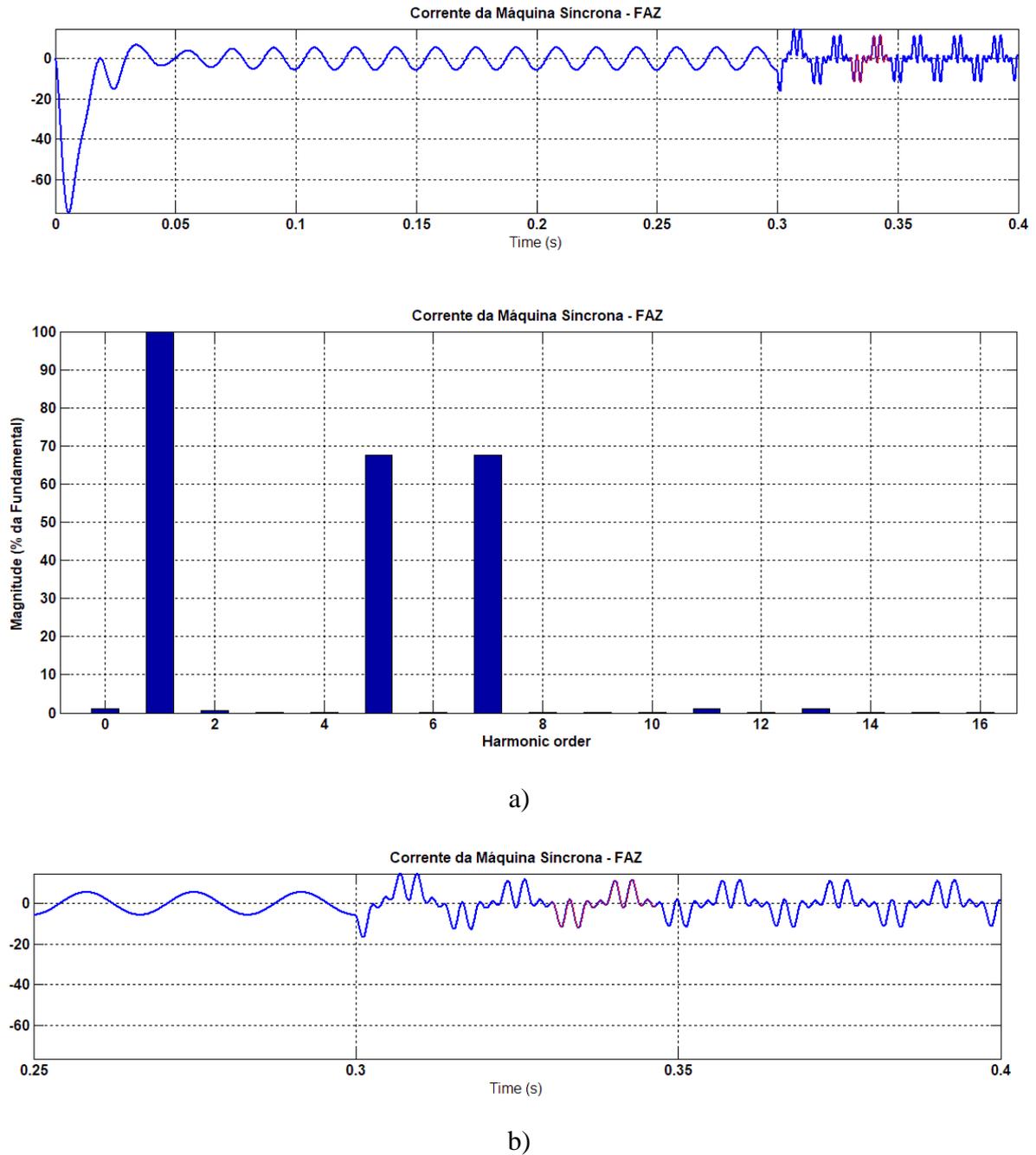


Figura 6.20 – a) Análise do espectro harmônico da corrente da Máquina Síncrona com aplicação de 6ª harmônica. b) Ampliação no acionamento do modo supersíncrono em $t = 0,3s$

Fonte: Próprio autor

6.3 *Discussões e Análise*

Os resultados de simulação mostraram que a máquina síncrona pode ser utilizada para redução do conteúdo harmônico na alimentação de uma carga não-linear. A análise deve ser feita com cautela para que se verifique a atenuação de cada componente, pois um índice geral como o THD pode apresentar distorções devido a variação da magnitude da corrente fundamental. Na situação analisada a carga não-linear apresentava alto conteúdo harmônico de 90% e 83% de magnitude na 5ª e 7ª harmônica que foram reduzidas para 65% e 45% respectivamente. Dados para sistema sem a máquina e depois com a máquina operando como compensador supersíncrono.

As simulações reforçaram as análises teóricas das modelagens indicando que o estudo de máquinas síncrona atuando com compensação de conteúdo harmônico é possível e viável. Mostrou-se ainda que a máquina síncrona pode transitar entre os modos de compensador síncrono e supersíncrono.

Em comparação com o filtro ativo paralelo o compensador síncrono mostrou-se mais limitado, uma vez que o seu desempenho é inferior ao FAP, porém se mostra como uma alternativa principalmente para sistemas que se utilizaram de *retrofitting* pois pode ser uma opção que apresenta uma redução percentual e absoluta satisfatória e com o diferencial de ter mais aplicabilidade em sistemas de alta tensão e/ou alta potência. Apresenta ainda a vantagem de atuar na compensação de reativos que demandaria um esforço desproporcional do FAP devido aos níveis de corrente e ou tensão que os semicondutores do FAP estariam sujeitos.

Em termos de custo e densidade de potência o compensador síncrono também teria vantagem se as aplicações demandassem altos níveis de potência.

Capítulo 7. Considerações Finais

O trabalho teve foco na prova do conceito de utilização da máquina síncrona para compensação de conteúdo harmônico em sistemas interligados a rede elétrica. Essa máquina já é utilizada como compensador síncrono para suporte de potência reativa na frequência fundamental. Logo o proposto é extensão dessa utilização para frequências oriundas da operação de equipamentos e sistemas de eletrônica de potência.

A modelagem apresentou a possibilidade teórica da utilização, tanto no modelo teórico via equações da máquina quanto o modelo usando reconstrução de campo mostraram que a inserção de correntes harmônicas no campo pode efetivamente atuar na compensação de corrente com conteúdo harmônico de carga não-lineares.

A simulação mostrou a aplicação da metodologia e a compensação de harmônicas do sistema. Algumas dificuldades terão que ser trabalhadas para a implementação física desta metodologia, entre elas:

- Estudo de estresse e aquecimento no enrolamento de campo da máquina,
- Identificação de harmônica em caso de mudança de cargas,
- Aumento de corrente de 3ª harmônica internamente na máquina,
- Sincronismo da máquina para entrada e saída de operação em sistemas com rede elétrica de alta impedância,
- Efeito pulsante no torque,
- Aquecimento adicional do núcleo da máquina síncrona.

A inovação deste tipo de aplicação da máquina síncrona, abre um leque de oportunidade de trabalho futuros para este tipo de tecnologia.

- Aplicação em *microgrids* para auxílio na regulação de tensão;

- Extensão da modelagem e utilização em geradores de turbinas eólicas;
- Desenvolvimento e dimensionamento de um sistema de controlador automático para identificação e determinação da tensão otimizada de campo e assim deixar que o controlador determine a magnitude e fase da corrente de compensação.
- A utilização de correntes não senoidais na corrente de campo para que a compensação seja desenvolvida para uma única componente harmônica.
- Analisar o problema do ponto de vista de modulação de duas frequências para assim buscar-se uma solução para a modulação diferenciada para corrente de campo como uma modulação residual por exemplo.
- Implementar um controlador com transformada Park visto que a máquina pode ser modelada por esta transformada.
- Projeto específico e diferenciado dos enrolamentos da máquina síncrona para a aplicação como filtro ativo de conteúdo harmônico na rede elétrica.

Referências Bibliográficas

AKAGI, H., KANAZAWA, Y. E NABAE, A. (1984) Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components. IEEE Transaction on Industry Application.

ALMONTE, R.L. E ASHLEY, A.W. (1995) “Harmonics at the utility industrial interface: a real world example”, IEEE Trans. on IA, Vol. 31, No. 6, Nov. Dec., pp. 1419-1426.

BASTOS, J. P. A. (1992) Eletromagnetismo e Cálculo de Campos. 2. Ed, Editora da UFSC, 1992.

BROWN, D.R. E KRAUSE, P.C. (1979) Modeling of Transient Electrical Torques in Solid Iron Rotor Turbogenerators. IEEE Transaction on Power Apparatus Systems., Vol. 98 , Setembro / Outubro 1979, pp. 1502 – 1508

CHAPMAN. S. J. (2005) Electric machinery fundamentals. Livro. 4ª Edição. ISBN 0-07-246523--9 Editora: McGraw-Hill, Nova York, NY. Estados Unidos da América.

CZARNECKI, L. S. E GINN III, H. L. (2005) “The Effect of The Design Method on Efficiency of Resonant Harmonic Filters”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 20, no. 1, pp. 286-271, Jan. 2005.

FITZGERALD., A.E.; KINGSLEY, C., UMANS, S. D. (2003) Electric Machinery, 6th edition. McGraw-Hill, 2003

FUJITA, H. e AKAGI H. (1998) The unified power quality conditioner: The integration of series- and shunt-active filters. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 13, No. 2, pp. 315-322, Março, 1998.

GALHARDO, M. A. B. (2006) Contribuições ao Estudo da Compensação de Harmônicos em Sistemas de Energia Elétrica. Instituto de tecnologia. Universidade Federal do Pará. Pará, Brasil, 2006.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - IEEE (2014). IEEE Std 519-2014 - IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. Estados Unidos.

KIMPARA, M. L. M. (2012) Modelagem e análise de geradores síncronos utilizando o método de reconstrução do campo. 2012. 83p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Mato Grosso do Sul, 2012.

KIMPARA, M. L. M.; PINTO, J. O. P.; FAHIMI, B.; RIBEIRO, P. E. M. J. ; GODOY, R. B. e SILVA, L. E. B. (2013) Field reconstruction method applied for harmonic voltage mitigation in salient pole synchronous generators, Anais do 2013 Brazilian Power Electronics Conference, Gramado, 2013.

KIMPARA, MARCIO L. MAGRI ; GODOY, RUBEN BARROS ; RIBEIRO, PEDRO E. M. JUSTINO ; DA SILVA, LUIZ E. BORGES ; FAHIMI, BABAK ; PINTO, JOÃO ONOFRE PEREIRA. (2014) A New Synchronous Machine Modeling Using the Field Reconstruction Method. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, v. 25, p. 481-492, 2014.

KHOOBROO, A.; FAHIMI, B.; PEKAREK, S. D. (2008) A New Field Reconstruction Method for Permanent Magnet Synchronous Machines. IEEE Industrial Electronics – IECON, 2008.

KRAUSE, P. C.; WASYNCZUK, O.; SUDHOLF, S. D. (2002) Analysis of electric machinery e drive systems, 2. Ed., John Wiley & Sons, 2002

LIN, C.; FAHIMI, B. (2011) Reduction of torque ripple in switched reluctance motor drives using field reconstruction method. IEEE Vehicle Power e Propulsion Conference (VPPC2011), Chicago, USA, 2011.

NAGANO, S; et al., (2002) Problems and corresponding technics harmonics of synchronous machine, Technical Report of IEEJ, No.903, December 2002

NASCIMENTO, C. F. (2007) Determinação do Conteúdo Harmônico de Corrente Baseada em Redes Neurais Artificiais para Cargas Não-Lineares Monofásicas. Tese de Doutorado Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2007

ÖZKAYA, H. (2007) Parallel Active Filter Design, Control, And Implementation 2007. Dissertação de Mestrado Graduate School of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University, Turquia, 2007.

PENG, F. Z. (1998) Application issues of active power filters. IEEE Industrial Application Magazine, pp. 21-30, Setembro / Outubro 1998.

PENG, F. Z. (1999) Harmonic sources and filtering approaches. IEEE Industrial Application Magazine, pp. 18-25, Julho / Agosto. 1999.

PHIPPS, J. K., NELSON, J. P., SEN, P. K. (1994): "Power Quality and Harmonic Distortion on Distribution Systems", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 30, no. 2, March/April 1994, pp. 476-485

RIBEIRO E R. (2003) Filtros Ativos Série para a Compensação de Harmônicas de Tensão. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2003.

RUDNICK, H.; DIXON J.; MORAN, L. (2003) Delivering clean power and pure power. IEEE Power and Energy Magazine, pp. 32-40, Setembro / Outubro. 2003.

SINGH, B.; AL-HADDAD, K.; CHANDRA, A. (1999) A review of active filters for power quality improvement. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 46, No. 5, pp. 960-971, Outubro, 1999.

STEEPER, D. E. AND STRATFORD, R. P. (1976): "Reactive compensation and harmonic suppression for industrial power systems using thyristor converters", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 12, no. 3, 1976, pp.232-255

TAN, C. M.; LI, W.; GAN, Z.; HOU, Y. (2011) Applications of Finite Element Methods for Reability Studies on ULSI Interconnections. Springer-Verlag London, 2011.

TAKASE, F. *et al.* (1997) Harmonic compensation using a synchronous machine with resonant field circuits," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 12, no. 2, pp. 143-150, June 1997.

ZANETA, E.; ANTON B. e MUCHA M. (2006) Harmonic Distortion Produced by Synchronous Generator in Thermal Power Plant, Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Power Systems, Lisbon, Portugal, September, 2006.

ZHU, W; FAHIMI, B. e PEKAREK, S. D. (2006) A Field Reconstruction Method for Optimal Excitation of Permanent Magnet Synchronous Machines. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.21, No. 2; pp. 305–313. 2006.

WU, D.; PEKAREK, S. D.; FAHIMI, B. (2009) A field reconstruction technique for efficient modeling of the fields e forces within induction machines. IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 24, no. 2, pp. 366-374, Jun. 2009.

Anexo - A

Código MATLAB® e FEMM®

```

%Código desenvolvido por Pedro Eugênio Marcondes Justino Ribeiro
%Em caso de utilização, favor informar o autor
%pedroe87@gmail.com

%% Estator.
clear
clc
format long

addpath('C:\Program Files\femm42\mfiles');
savepath;
global HandleToFEMM;
openfemm;
handl=HandleToFEMM;
main_maximize;
showconsole;
hideconsole;
filename =
'C:\Users\Pedro\Desktop\ProjetoMaquinaSincrona\Sinc_SAL_15_4_RevA6_S.FEM';
opendocument(filename);
clc

data1='Simulação A1+ = 1A';

%Dados da Máquina
k=1;
Rag = 161/2; % Raio do entreferro
Rds1 = 162.5/2; % Raio do dente do estator
Rds2 = 180.75/2; %Raio do dente do estator dens. fluxo constante

%%
%Define o angulo inicial do Rotor ==-1
mi_clearselected();
mi_selectgroup(3); %seleciona grupo 3 (rotor)
mi_moverotate(0,0,-1) %rotaciona 1° em relação a origem.
mi_clearselected();
disp('Iniciando simulação FEM...')

for k=1:1:1

%Rotaciona o Rotor para posição de theta atual
mi_clearselected();
mi_selectgroup(3); %seleciona grupo 3 (rotor)
mi_moverotate(0,0,1) %rotaciona 1° em relação a origem.

```

```
%Roda Modelo FEM para cada valor de theta
```

```
mi_analyze();
mi_loadsolution();
disp('Finalizada simulação FEM...')
```

```
mi_loadsolution();
mo_clearcontour
mo_seteditmode('contour');
```

```
%%
```

```
mo_addcontour(Rds2*cosd(5),Rds2*sind(5));
mo_addcontour(-Rds2*cosd(5),-Rds2*sind(5));
mo_bendcontour(180,1);
mo_addcontour(-Rds2*cosd(5),-Rds2*sind(5));
mo_addcontour(Rds2*cosd(5),Rds2*sind(5));
mo_bendcontour(180,1);
mo_addcontour(Rds2*cosd(5),Rds2*sind(5));
mo_addcontour(-Rds2*cosd(5),-Rds2*sind(5));
mo_bendcontour(180,2);
mo_addcontour(-Rds2*cosd(5),-Rds2*sind(5));
mo_addcontour(Rds2*cosd(5),Rds2*sind(5));
mo_bendcontour(180,2);
```

```
clear temp
```

```
mo_makeplot(2,360,'C:\Users\Pedro\Desktop\ProjetoMaquinaSincrona\myfile_teste2.txt',0);
```

```
temp=load('C:\Users\Pedro\Desktop\ProjetoMaquinaSincrona\myfile_teste2.txt', '-ASCII');
KnA_ST(k,:)=temp(:,2);
```

```
clear temp
```

```
mo_makeplot(3,360,'C:\Users\Pedro\Desktop\ProjetoMaquinaSincrona\myfile_teste2.txt',0);
```

```
temp2=load('C:\Users\Pedro\Desktop\ProjetoMaquinaSincrona\myfile_teste2.txt', '-ASCII');
KtA_ST(k,:)=temp2(:,2);
```

```
%Modelo desenvolvido por Pedro Eugênio Marcondes Justino Ribeiro em caso de
%utilização, favor informar o autor em pedroe87@gmail.com
```

```
%%
```

```
mo_clearcontour
mo_seteditmode('contour');
mo_addcontour(Rag,0);
mo_addcontour(-Rag,0);
```

```

mo_bendcontour(180,1);
mo_addcontour(-Rag,0);
mo_addcontour(Rag,0);
mo_bendcontour(180,1);
mo_clearcontour

mo_seteditmode('contour');
mo_addcontour(Rag,0);
mo_addcontour(-Rag,0);
mo_bendcontour(180,2);
mo_addcontour(-Rag,0);
mo_addcontour(Rag,0);
mo_bendcontour(180,2);

clear temp

mo_makeplot(2,360,'C:\Users\Pedro\Desktop\ProjetoMaquinaSincrona\myfile_teste2.txt',0);

temp=load('C:\Users\Pedro\Desktop\ProjetoMaquinaSincrona\myfile_teste2.txt',
'-ASCII');
    KnA_AG(k,:)=temp(:,2);

clear temp

mo_makeplot(3,360,'C:\Users\Pedro\Desktop\ProjetoMaquinaSincrona\myfile_teste2.txt',0);

temp2=load('C:\Users\Pedro\Desktop\ProjetoMaquinaSincrona\myfile_teste2.txt',
'-ASCII');
    KtA_AG(k,:)=temp2(:,2);

%% Fluxos Concatenados

fA11(k,:)=mo_getcircuitproperties('A1+');
fA12(k,:)=mo_getcircuitproperties('A1-');

fA21(k,:)=mo_getcircuitproperties('A2+');
fA22(k,:)=mo_getcircuitproperties('A2-');

fA31(k,:)=mo_getcircuitproperties('A3+');
fA32(k,:)=mo_getcircuitproperties('A3-');

%
fB11(k,:)=mo_getcircuitproperties('B1+');
fB12(k,:)=mo_getcircuitproperties('B1-');

fB21(k,:)=mo_getcircuitproperties('B2+');
fB22(k,:)=mo_getcircuitproperties('B2-');

```

```

fB31(k,:)=mo_getcircuitproperties('B3+');
fB32(k,:)=mo_getcircuitproperties('B3-');

%
fC11(k,:)=mo_getcircuitproperties('C1+');
fC12(k,:)=mo_getcircuitproperties('C1-');

fC21(k,:)=mo_getcircuitproperties('C2+');
fC22(k,:)=mo_getcircuitproperties('C2-');

fC31(k,:)=mo_getcircuitproperties('C3+');
fC32(k,:)=mo_getcircuitproperties('C3-');

fP11(k,:)=mo_getcircuitproperties('P1+');
fP12(k,:)=mo_getcircuitproperties('P1-');
k
end

%Retorna o rotor para o angulo inicial
mi_clearselected();
mi_selectgroup(3); %seleciona grupo 3 (rotor)
mi_moverotate(0,0,-k+1) %rotaciona 1° em relação a origem.
mi_clearselected();



---



%% Rotor.

addpath('C:\Program Files\femm42\mfiles');
savepath;
global HandleToFEMM;
openfemm;
handl=HandleToFEMM;
main_maximize;
showconsole;
hideconsole;
filename =
'C:\Users\Pedro\Desktop\doutorado\ProjetoMaquinaSincrona2\Sinc_SAL_15_4_Rev
A6_R.FEM';
opendocument(filename);
clc

data1='Simulação P1+ = 1A_H';

%%
%Dados da Máquina
k=1;
Rag = 161/2; % Raio do entreferro
Rds1 = 162.5/2; % Raio do dente do estator
Rds2 = 180.75/2; %Raio do dente do estator dens. fluxo constante

```

```

%%
%Define o angulo inicial do Rotor ==-1
mi_clearselected();
mi_selectgroup(3); %seleciona grupo 3 (rotor)
mi_moverotate(0,0,-1) %rotaciona 1° em relação a origem.
mi_hidenames();
mi_clearselected();
disp('Iniciando simulação FEM...')
wh= 2*pi*6*60;
Ah=1/2;
mi_modifycircprop('P1+',1,1); %seta a corrente do rotor para 1A
mi_modifycircprop('P1-',1,-1);
%%
thetan = 46;
for k=1:2:thetan %

%Rotaciona o Rotor para posição de theta atual
mi_clearselected();
mi_selectgroup(3); %seleciona grupo 3 (rotor)
mi_moverotate(0,0,1) %rotaciona 1° em relação a origem.

%Roda Modelo FEM para cada valor de theta
mi_analyze();
mi_loadsolution();
disp('Finalizada simulação FEM...')
mi_loadsolution();
mo_hidepoints(); %%funcoes mo so podem ser usadas apos o load da
solução

mo_clearcontour
mo_seteditmode('contour');

%%
mo_addcontour(Rds2*cosd(5),Rds2*sind(5));
mo_addcontour(-Rds2*cosd(5),-Rds2*sind(5));
mo_bendcontour(180,1);
mo_addcontour(-Rds2*cosd(5),-Rds2*sind(5));
mo_addcontour(Rds2*cosd(5),Rds2*sind(5));
mo_bendcontour(180,1);

clear temp

mo_makeplot(2,1440,'C:\Users\Pedro\Desktop\doutorado\ProjetoMaquinaSincrona
2\myfile_teste2.txt',0);

temp=load('C:\Users\Pedro\Desktop\doutorado\ProjetoMaquinaSincrona2\myfile_
teste2.txt','-ASCII');
KnA_ST(k,:)=temp(:,2);

clear temp

```

```

mo_makeplot(3,1440,'C:\Users\Pedro\Desktop\doutorado\ProjetoMaquinaSincrona
2\myfile_teste2.txt',0);

temp2=load('C:\Users\Pedro\Desktop\doutorado\ProjetoMaquinaSincrona2\myfile
_teste2.txt','-ASCII');
    KtA_ST(k,:)=temp2(:,2);

%%
    mo_clearcontour
    mo_seteditmode('contour');
    mo_addcontour(Rag,0);
    mo_addcontour(-Rag,0);
    mo_bendcontour(180,1);
    mo_addcontour(-Rag,0);
    mo_addcontour(Rag,0);
    mo_bendcontour(180,1);

    clear temp

mo_makeplot(2,1440,'C:\Users\Pedro\Desktop\doutorado\ProjetoMaquinaSincrona
2\myfile_teste2.txt',0);

temp=load('C:\Users\Pedro\Desktop\doutorado\ProjetoMaquinaSincrona2\myfile_
teste2.txt','-ASCII');
    KnA_AG(k,:)=temp(:,2);

    clear temp

mo_makeplot(3,1440,'C:\Users\Pedro\Desktop\doutorado\ProjetoMaquinaSincrona
2\myfile_teste2.txt',0);

temp2=load('C:\Users\Pedro\Desktop\doutorado\ProjetoMaquinaSincrona2\myfile
_teste2.txt','-ASCII');
    KtA_AG(k,:)=temp2(:,2);

%Modelo desenvolvido por Pedro Eugênio Marcondes Justino Ribeiro em caso de
%utilização, favor informar o autor em pedroe87@gmail.com

%% Fluxos Concatenados

fA11(k,:)=mo_getcircuitproperties('A1+');
fA12(k,:)=mo_getcircuitproperties('A1-');

fA21(k,:)=mo_getcircuitproperties('A2+');
fA22(k,:)=mo_getcircuitproperties('A2-');

fA31(k,:)=mo_getcircuitproperties('A3+');
fA32(k,:)=mo_getcircuitproperties('A3-');

%
fB11(k,:)=mo_getcircuitproperties('B1+');

```

```

fB12(k,:)=mo_getcircuitproperties('B1-');

fB21(k,:)=mo_getcircuitproperties('B2+');
fB22(k,:)=mo_getcircuitproperties('B2-');

fB31(k,:)=mo_getcircuitproperties('B3+');
fB32(k,:)=mo_getcircuitproperties('B3-');

%
fC11(k,:)=mo_getcircuitproperties('C1+');
fC12(k,:)=mo_getcircuitproperties('C1-');

fC21(k,:)=mo_getcircuitproperties('C2+');
fC22(k,:)=mo_getcircuitproperties('C2-');

fC31(k,:)=mo_getcircuitproperties('C3+');
fC32(k,:)=mo_getcircuitproperties('C3-');

fP11(k,:)=mo_getcircuitproperties('P1+');
fP12(k,:)=mo_getcircuitproperties('P1-');

fP21(k,:)=mo_getcircuitproperties('P2+');
fP22(k,:)=mo_getcircuitproperties('P2-');

fP31(k,:)=mo_getcircuitproperties('P3+');
fP32(k,:)=mo_getcircuitproperties('P3-');

fP41(k,:)=mo_getcircuitproperties('P4+');
fP42(k,:)=mo_getcircuitproperties('P4-');

disp(k)

%% atualização de corrente harmônica no prox passo do rotor
tk=(k)/(360*60);

Ch= Ah*sin(wh*tk); % atialização da componente harmonica
Ir=1+Ch;% atualização corrente campo
mi_modifycircprop('P1+',1,Ir);
mi_modifycircprop('P1-',1,-Ir);

%%
mo_showdensityplot(0,0,1,0,'mag');
namefile1= sprintf('FLUXr_%d.emf',k);
namefile2= sprintf('FLUXr_%d.txt',k);
mo_savemetafile(namefile1);
copyfile('Sinc_SAL_15_4_RevA6_R.ans',namefile2)

end

disp('Finalizada.')
```

```

%Retorna o rotor para o angulo inicial
mi_clearselected();
mi_selectgroup(3); %seleciona grupo 3 (rotor)
mi_moverotate(0,0,-k+1) %rotaciona 1° em relação a origem.
mi_clearselected();
mi_modifycircprop('P1+',1,1);
mi_modifycircprop('P1-',1,-1);
save('C:\Users\Pedro\Documents\MATLAB\results_doc2\rotor_P1_1A_H');

%%

addpath('C:\Program Files\femm42\mfiles');
savepath;
global HandleToFEMM;
openfemm;
handl=HandleToFEMM;
main_maximize;
showconsole;
hideconsole;
filename =
'C:\Users\Pedro\Desktop\doutorado\ProjetoMaquinaSincrona2\Sinc_SAL_15_4_Rev
A6_R.FEM';
opendocument(filename);
clc

data1='Simulação P1+ = 1A_H';
%%

%Dados da Máquina
k=1;
Rag = 161/2; % Raio do entreferro
Rds1 = 162.5/2; % Raio do dente do estator
Rds2 = 180.75/2; %Raio do dente do estator dens. fluxo constante

%%
%Define o angulo inicial do Rotor ==-1
mi_clearselected();
mi_selectgroup(3); %seleciona grupo 3 (rotor)
mi_moverotate(0,0,-1) %rotaciona 1° em relação a origem.
mi_hidenames();
mi_clearselected();
disp('Iniciando simulação FEM...')
wh= 2*pi*6*60;
Ah=1/2;
mi_modifycircprop('P1+',1,1); %seta a corrente do rotor para 1A
mi_modifycircprop('P1-',1,-1);
mi_modifycircprop('P2-',1,-1);
mi_modifycircprop('P2-',1,-1);
mi_modifycircprop('P3-',1,-1);
mi_modifycircprop('P3-',1,-1);

```

```

mi_modifycircprop('P4-',1,-1);
mi_modifycircprop('P4-',1,-1);

%%
thetan = 46;
for k=1:2:thetan %

%Rotaciona o Rotor para posição de theta atual
mi_clearselected();
mi_selectgroup(3); %seleciona grupo 3 (rotor)
mi_moverotate(0,0,1) %rotaciona 1° em relação a origem.

%Roda Modelo FEM para cada valor de theta
mi_analyze();
mi_loadsolution();
disp('Finalizada simulação FEM...')
mi_loadsolution();
mo_hidepoints(); %%funcoes mo so podem ser usadas apos o load da
solucao
mo_clearcontour
mo_seteditmode('contour');
%%
mo_addcontour(Rds2*cosd(5),Rds2*sind(5));
mo_addcontour(-Rds2*cosd(5),-Rds2*sind(5));
mo_bendcontour(180,1);
mo_addcontour(-Rds2*cosd(5),-Rds2*sind(5));
mo_addcontour(Rds2*cosd(5),Rds2*sind(5));
mo_bendcontour(180,1);

clear temp

mo_makeplot(2,1440,'C:\Users\Pedro\Desktop\doutorado\ProjetoMaquinaSincrona
2\myfile_teste2.txt',0);

temp=load('C:\Users\Pedro\Desktop\doutorado\ProjetoMaquinaSincrona2\myfile_
teste2.txt','-ASCII');
KnA_ST(k,:)=temp(:,2);

clear temp

mo_makeplot(3,1440,'C:\Users\Pedro\Desktop\doutorado\ProjetoMaquinaSincrona
2\myfile_teste2.txt',0);

temp2=load('C:\Users\Pedro\Desktop\doutorado\ProjetoMaquinaSincrona2\myfile_
teste2.txt','-ASCII');
KtA_ST(k,:)=temp2(:,2);

%Modelo desenvolvido por Pedro Eugênio Marcondes Justino Ribeiro em caso de
%utilização, favor informar o autor em pedroe87@gmail.com

```

```

%%
mo_clearcontour
mo_seteditmode('contour');
mo_addcontour(Rag,0);
mo_addcontour(-Rag,0);
mo_bendcontour(180,1);
mo_addcontour(-Rag,0);
mo_addcontour(Rag,0);
mo_bendcontour(180,1);

clear temp

mo_makeplot(2,1440,'C:\Users\Pedro\Desktop\doutorado\ProjetoMaquinaSincrona
2\myfile_teste2.txt',0);

temp=load('C:\Users\Pedro\Desktop\doutorado\ProjetoMaquinaSincrona2\myfile_
teste2.txt','-ASCII');
    KnA_AG(k,:)=temp(:,2);

clear temp

mo_makeplot(3,1440,'C:\Users\Pedro\Desktop\doutorado\ProjetoMaquinaSincrona
2\myfile_teste2.txt',0);

temp2=load('C:\Users\Pedro\Desktop\doutorado\ProjetoMaquinaSincrona2\myfile_
_teste2.txt','-ASCII');
    KtA_AG(k,:)=temp2(:,2);
%% Fluxos Concatenados

fA11(k,:)=mo_getcircuitproperties('A1+');
fA12(k,:)=mo_getcircuitproperties('A1-');

fA21(k,:)=mo_getcircuitproperties('A2+');
fA22(k,:)=mo_getcircuitproperties('A2-');

fA31(k,:)=mo_getcircuitproperties('A3+');
fA32(k,:)=mo_getcircuitproperties('A3-');

%
fB11(k,:)=mo_getcircuitproperties('B1+');
fB12(k,:)=mo_getcircuitproperties('B1-');

fB21(k,:)=mo_getcircuitproperties('B2+');
fB22(k,:)=mo_getcircuitproperties('B2-');

fB31(k,:)=mo_getcircuitproperties('B3+');
fB32(k,:)=mo_getcircuitproperties('B3-');

%
fC11(k,:)=mo_getcircuitproperties('C1+');
fC12(k,:)=mo_getcircuitproperties('C1-');

```

```

fC21(k,:)=mo_getcircuitproperties('C2+');
fC22(k,:)=mo_getcircuitproperties('C2-');

fC31(k,:)=mo_getcircuitproperties('C3+');
fC32(k,:)=mo_getcircuitproperties('C3-');

fP11(k,:)=mo_getcircuitproperties('P1+');
fP12(k,:)=mo_getcircuitproperties('P1-');

fP21(k,:)=mo_getcircuitproperties('P2+');
fP22(k,:)=mo_getcircuitproperties('P2-');

fP31(k,:)=mo_getcircuitproperties('P3+');
fP32(k,:)=mo_getcircuitproperties('P3-');

fP41(k,:)=mo_getcircuitproperties('P4+');
fP42(k,:)=mo_getcircuitproperties('P4-');

disp(k)

%% atualização de corrente harmônica no prox passo do rotor
tk=(k)/(360*60);

Ch= Ah*sin(wh*tk); % atialização da componente harmonica
Ir=1+Ch;% atualização corrente campo
mi_modifycircprop('P1+',1,Ir);
mi_modifycircprop('P1-',1,-Ir);
mi_modifycircprop('P2+',1,Ir);
mi_modifycircprop('P2-',1,-Ir);
mi_modifycircprop('P3+',1,Ir);
mi_modifycircprop('P3-',1,-Ir);
mi_modifycircprop('P4+',1,Ir);
mi_modifycircprop('P4-',1,-Ir);

%%
mo_showdensityplot(0,0,1,0,'mag');
namefile1= sprintf('FLUXr_%d.emf',k);
namefile2= sprintf('FLUXr_%d.txt',k);
mo_savemetafile(namefile1);
copyfile('Sinc_SAL_15_4_RevA6_R.ans',namefile2)

%save('C:\Users\Pedro\Documents\MATLAB\results_doc2\rotor_P1_1A_H');
end

disp('Finalizada.')
```

```
%Retorna o rotor para o angulo inicial
mi_clearselected();
mi_selectgroup(3); %seleciona grupo 3 (rotor)
mi_moverotate(0,0,-k+1) %rotaciona 1° em relação a origem.
mi_clearselected();
mi_modifycircprop('P1+',1,1);
mi_modifycircprop('P1-',1,-1);
mi_modifycircprop('P2+',1,1);
mi_modifycircprop('P2-',1,-1);
mi_modifycircprop('P3+',1,1);
mi_modifycircprop('P3-',1,-1);
mi_modifycircprop('P4+',1,1);
mi_modifycircprop('P4-',1,-1);

save('C:\Users\Pedro\Documents\MATLAB\results_doc2\rotor_P1_1A_H');

%Modelo desenvolvido por Pedro Eugênio Marcondes Justino Ribeiro em caso de
%utilização, favor informar o autor em pedroe87@gmail.com
```

Anexo – B

Arquivos com projeto da máquina para ser analisado pelo método dos elementos finitos.

Modelo desenvolvido por Pedro Eugênio Marcondes Justino Ribeiro em caso de utilização, favor informar o autor em pedroe87@gmail.com

Deve ser utilizada com software FEMM®.

Dados	<Phi_h> = 0
[Format] = 4.0	<Phi_hx> = 0
[Frequency] = 0	<Phi_hy> = 0
[Precision] = 1e-008	<LamType> = 0
[MinAngle] = 30	<LamFill> = 1
[Depth] = 112	<NStrands> = 1
[LengthUnits] = millimeters	<WireD> = 0
[ProblemType] = planar	<BHPoints> = 0
[Coordinates] = cartesian	<EndBlock>
[ACSolver] = 0	<BeginBlock>
[PrevSoln] = ""	<BlockName> = "1006 Steel"
[Comment] = "Autor: PEMJR."	<Mu_x> = 1404
[PointProps] = 0	<Mu_y> = 1404
[BdryProps] = 0	<H_c> = 0
[BlockProps] = 5	<H_cAngle> = 0
<BeginBlock>	<J_re> = 0
<BlockName> = "Air"	<J_im> = 0
<Mu_x> = 1	<Sigma> = 5.7999999999999998
<Mu_y> = 1	<d_lam> = 0
<H_c> = 0	<Phi_h> = 20
<H_cAngle> = 0	<Phi_hx> = 0
<J_re> = 0	<Phi_hy> = 0
<J_im> = 0	<LamType> = 0
<Sigma> = 0	<LamFill> = 1
<d_lam> = 0	<NStrands> = 0

<WireD> = 0		2.0719500000000002
		31680.362036999999
<BHPoints> = 38		
0 0		2.1135380000000001
		39883.212823000002
0.38833000000000001	79.577472	2.1470829999999999
		50209.990126999997
0.48252400000000001	100.182101	2.1744270000100001
		63210.632496999999
0.59529299999999996	126.121793	2.1996039999999999
		79577.471546000001
0.726634 158.77793		2.2269369999999999
		100182.101136
0.87345300000000003		2.2598500001000001
199.889570999999999		126121.79292599999
1.02810099999999999	251.646061	2.3009309999999998
		158777.930096
1.178099 316.80362000000002		2.3525969999999998
		199889.57102999999
1.308718 398.83212800000001		2.4176359999999999
		251646.06052200001
1.408663 502.09990099999999		2.4995159919999998
		316803.62037000002
1.47564500000000001		<EndBlock>
632.10632499999997		<BeginBlock>
1.51695700000000001		<BlockName> = "14 AWG"
795.774715000000001		<Mu_x> = 1
1.544297 1001.821011		<Mu_y> = 1
		<H_c> = 0
1.567545 1261.2179289999999		<H_cAngle> = 0
		<J_re> = 0
1.592042 1587.779301		<J_im> = 0
		<Sigma> = 58
1.619381 1998.81571		<d_lam> = 0
		<Phi_h> = 0
1.649135 2516.4606050000002		<Phi_hx> = 0
		<Phi_hy> = 0
1.6799839999999999 3168.036204		<LamType> = 3
		<LamFill> = 1
1.7105109999999999		<NStrands> = 1
3988.3212819999999		
1.74007700000000001		
5020.9990129999996		
1.769441 6321.0632500000002		
1.8005549999999999 7957.747155		
1.83562500000000001 10018.210114		
1.8761209899999999		
12612.179292999999		
1.92218700000000001		
15877.793009999999		
1.972386 19988.957103000001		
2.02367400000000002		
25164.606051999999		

<WireD> = 1.62813422596841	<LamType> = 0
<BHPoints> = 0	<LamFill> = 0.9799999999999998
<EndBlock>	<NStrands> = 0
<BeginBlock>	<WireD> = 0
<BlockName> = "16 AWG"	<BHPoints> = 47
<Mu_x> = 1	0 0
<Mu_y> = 1	0.050000000000000003 15.120714
<H_c> = 0	0.10000000000000001
<H_cAngle> = 0	22.718292000000002
<J_re> = 0	0.14999999999999999
<J_im> = 0	27.842732999999999
<Sigma> = 58	0.20000000000000001
<d_lam> = 0	31.871434000000001
<Phi_h> = 0	0.25 35.365043999999997
<Phi_hx> = 0	0.29999999999999999
<Phi_hy> = 0	38.600588000000002
<LamType> = 3	0.34999999999999998
<LamFill> = 1	41.736201999999999
<NStrands> = 1	0.40000000000000002
<WireD> = 1.2911827701741401	44.873978999999999
<BHPoints> = 0	0.45000000000000001
<EndBlock>	48.087806999999998
<BeginBlock>	0.5 51.437235999999999
<BlockName> = "M-19 Steel"	0.55000000000000004
<Mu_x> = 4416	54.975220999999998
<Mu_y> = 4416	0.59999999999999998
<H_c> = 0	58.752992999999996
<H_cAngle> = 0	0.65000000000000002
<J_re> = 0	62.823644000000002
<J_im> = 0	0.69999999999999996
<Sigma> = 1.8999999999999199	67.245284999999996
<d_lam> = 0.63500001000000001	0.75 72.084406000000001
<Phi_h> = 0	0.80000000000000004
<Phi_hx> = 0	77.420100000000005
<Phi_hy> = 0	0.84999999999999998
	83.350020999999998
	0.90000000000000002
	89.999611999999999
	0.94999999999999996
	97.537352999999996
	1 106.201406000000001

1.05	116.34846400000001	<TotalAmps_re> = 0
1.1000000000000001	128.54732899999999	<TotalAmps_im> = 0
1.149999999999999	143.76543100000001	<CircuitType> = 1
1.2	163.75416899999999	<EndCircuit>
1.25	191.86815799999999	<BeginCircuit>
1.3	234.833507	<CircuitName> = "A2+"
1.3500000000000001	306.50976900000001	<TotalAmps_re> = 0
1.399999999999999	435.255202	<TotalAmps_im> = 0
1.45	674.911968	<CircuitType> = 1
1.5	1108.3255690000001	<EndCircuit>
1.55	1813.085468	<BeginCircuit>
1.6000000000000001	2801.21742099999998	<CircuitName> = "A3+"
1.649999999999999	4053.65311699999998	<TotalAmps_re> = 0
1.7	5591.10689	<TotalAmps_im> = 0
1.75	7448.318413	<CircuitType> = 1
1.8	9708.81567	<EndCircuit>
1.8500000000000001	12486.931615	<BeginCircuit>
1.899999999999999	16041.483644	<CircuitName> = "B1+"
1.95	21249.420623999998	<TotalAmps_re> = 0
2	31313.495878000002	<TotalAmps_im> = 0
2.049999999999999	53589.446877000002	<CircuitType> = 1
2.1000000000000001	88477.484601000004	<EndCircuit>
2.149999999999999	124329.41054	<BeginCircuit>
2.2000000000000002	159968.5693	<CircuitName> = "B2+"
2.25	197751.604272	<TotalAmps_re> = 0
2.299999999999999	234024.75134700001	<TotalAmps_im> = 0
<EndBlock>		<CircuitType> = 1
[CircuitProps] = 20		<EndCircuit>
<BeginCircuit>		<EndCircuit>
<CircuitName> = "A1+"		<BeginCircuit>

```

<CircuitName> = "C1+"
<TotalAmps_re> = 0
<TotalAmps_im> = 0
<CircuitType> = 1
<EndCircuit>
<BeginCircuit>
  <CircuitName> = "C2+"
  <TotalAmps_re> = 0
  <TotalAmps_im> = 0
  <CircuitType> = 1
<EndCircuit>
<BeginCircuit>
  <CircuitName> = "C3+"
  <TotalAmps_re> = 0
  <TotalAmps_im> = 0
  <CircuitType> = 1
<EndCircuit>
<BeginCircuit>
  <CircuitName> = "A1-"
  <TotalAmps_re> = 0
  <TotalAmps_im> = 0
  <CircuitType> = 1
<EndCircuit>
<BeginCircuit>
  <CircuitName> = "A2-"
  <TotalAmps_re> = 0
  <TotalAmps_im> = 0
  <CircuitType> = 1
<EndCircuit>
<BeginCircuit>
  <CircuitName> = "A3-"
  <TotalAmps_re> = 0
  <TotalAmps_im> = 0
  <CircuitType> = 1
<EndCircuit>
<BeginCircuit>
  <CircuitName> = "B1-"
  <TotalAmps_re> = 0
  <TotalAmps_im> = 0
  <CircuitType> = 1
<EndCircuit>
<BeginCircuit>
  <CircuitName> = "B2-"
  <TotalAmps_re> = 0
  <TotalAmps_im> = 0
  <CircuitType> = 1
<EndCircuit>
<BeginCircuit>
  <CircuitName> = "B3-"
  <TotalAmps_re> = 0
  <TotalAmps_im> = 0
  <CircuitType> = 1
<EndCircuit>
<BeginCircuit>
  <CircuitName> = "C1-"
  <TotalAmps_re> = 0
  <TotalAmps_im> = 0
  <CircuitType> = 1
<EndCircuit>
<BeginCircuit>
  <CircuitName> = "C2-"
  <TotalAmps_re> = 0
  <TotalAmps_im> = 0
  <CircuitType> = 1
<EndCircuit>
<BeginCircuit>
  <CircuitName> = "C3-"
  <TotalAmps_re> = 0
  <TotalAmps_im> = 0

```

```

    <CircuitType> = 1
<EndCircuit>
<BeginCircuit>
  <CircuitName> = "P1+"
  <TotalAmps_re> = 0.5
  <TotalAmps_im> = 0
  <CircuitType> = 1
<EndCircuit>
<BeginCircuit>
  <CircuitName> = "P1-"
  <TotalAmps_re> = -0.5
  <TotalAmps_im> = -0
  <CircuitType> = 1
<EndCircuit>
<BeginCircuit>
  <CircuitName> = "P2+"
  <TotalAmps_re> = 0.5
  <TotalAmps_im> = 0
  <CircuitType> = 1
<EndCircuit>
<BeginCircuit>
  <CircuitName> = "P2-"
  <TotalAmps_re> = -0.5
  <TotalAmps_im> = -0
  <CircuitType> = 1
<EndCircuit>
<BeginCircuit>
  <CircuitName> = "P3+"
  <TotalAmps_re> = 0.5
  <TotalAmps_im> = 0
  <CircuitType> = 1
<EndCircuit>
<BeginCircuit>
  <CircuitName> = "P3-"
  <TotalAmps_re> = -0.5
  <TotalAmps_im> = -0
  <CircuitType> = 1
<EndCircuit>
<BeginCircuit>
  <CircuitName> = "P4+"
  <TotalAmps_re> = 0.5
  <TotalAmps_im> = 0
  <CircuitType> = 1
<EndCircuit>
<BeginCircuit>
  <CircuitName> = "P4-"
  <TotalAmps_re> = -0.5
  <TotalAmps_im> = -0
  <CircuitType> = 1
<EndCircuit>
[NumPoints] = 1227

```