

Desenvolvimento de um Aplicativo Computacional para Cálculo de Penetração Harmônica em Sistemas Elétricos e Projeto de Filtros Passivos Sintonizados

ANDRÉIA CRICO DOS SANTOS, CARLOS EDUARDO TAVARES

Resumo

Pautado no contexto da Qualidade da Energia Elétrica, este trabalho apresenta uma metodologia adequada para a análise do comportamento de sistemas elétricos sob o ponto de vista tanto da frequência fundamental, quanto de frequências harmônicas. Nesse sentido, é apresentado um aplicativo computacional desenvolvido com o intuito abordar o cálculo de fluxo de potência e o estudo de penetração harmônica, além de propor soluções para a problemática das distorções harmônicas por meio do projeto de filtros harmônicos passivos sintonizados. Para ilustrar a aplicabilidade do programa desenvolvido, alguns estudos de casos são mostrados.

Palavras Chave –distorções harmônicas, filtros sintonizados, programação, projeto, sistemas elétricos.

Computer Programfor Harmonic Distorsion Analisys and Tuned Passive Filter Design

Abstract

Based on the Power Quality context, this work presents an appropriate methodology for the electrical systems analysis in fundamental frequency, as well as in harmonic frequencies. In this sense, it is presented a software developed in order to calculate the power flow and make the study of harmonic penetration, in addition to propose solutions to the harmonic distortion problems through tuned passive harmonic filters design. To illustrate the applicability of the software, case studies are performed.

Keywords –filter design, harmonic distortion, programming, tuned filters.

1. Introdução

Energia e desenvolvimento são termos que se apresentam intimamente relacionados, uma vez que o ritmo de atividades dos setores industrial, comercial e de serviços, bem como a capacidade da população em adquirir bens e utilidades cada vez mais avançadas tecnologicamente refletem, de maneira direta, na magnitude do consumo energético em determinado país. No Brasil, esta realidade pode ser constatada a partir da análise do Balanço Energético Nacional, elaborado pelo MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, (2012), o qual mostra que a oferta interna de energia elétrica no país subiu de 45,7 TWh, em 1970, para 568,8 TWh em 2011.

As mudanças provocadas por essa evolução fizeram que, no decorrer dos anos, surgissem novos questionamentos acerca do fornecimento de energia elétrica. Nesse contexto, os consumidores se tornaram mais atentos e exigentes com relação à qualidade dos serviços prestados pelas concessionárias. Os equipamentos, desenvolvidos com maior precisão e eficiência, mostraram-se também mais sensíveis em termos operacionais e físicos, exigindo novos cuidados com relação à qualidade da energia com a qual são alimentados.

Dessa maneira, o termo “Qualidade da Energia Elétrica” passou a receber cada vez maior ênfase por abranger aspectos que são alvo de muito interesse e discussão no cenário energético nacional. Nesse contexto, merecem destaque as análises relacionadas às distorções harmônicas que são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental.

Principalmente a partir da segunda metade do século XX, pode-se dizer que o aumento do número de cargas de características não lineares ocasionou uma considerável intensificação da presença de sinais de frequências harmônicas nos sistemas elétricos de forma geral. Em síntese, as distorções harmônicas estão associadas com a crescente quantidade de acionamentos estáticos, fontes chaveadas, sistemas envolvendo retificações e inversões, além de equipamentos residenciais, comerciais e industriais que utilizam dispositivos de controle eletrônico (ISONI, 2001).

A presença das distorções harmônicas provoca efeitos indesejáveis, sendo que alguns deles podem ser notados visualmente, como disparos de dispositivos de proteção, outros podem ser ouvidos, como vibrações, outros são registrados por medidores de temperatura,

como aquecimentos excessivos, e há ainda outros casos em que é necessário utilizar aparelhos especiais para detectá-los, como no caso da ocorrência de ressonâncias, perdas elétricas, queda de tensão e redução do fator de potência, entre outros fenômenos (CORREIA, 2007).

Diante da constatação da variada gama de problemas que a presença de distorções harmônicas pode provocar, paulatinamente, medidas vêm sendo adotadas no Brasil com o intuito de estabelecer limites para os indicadores da qualidade do produto “energia elétrica”. Nesse sentido, o documento da AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, (2011) denominado Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, em seu módulo 8, apresenta a recomendação de valores limites típicos de distorções harmônicas de tensão (total e individual), caracterizados, basicamente, pelo nível de tensão do sistema que está sendo analisado. Ainda sobre este assunto, o documento do OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA – ONS, (2011) denominado Procedimentos de Rede, no submódulo 2.8, mostra os limites referentes aos indicadores associados às distorções harmônicas quando se avalia o impacto de novas condições de conexão à rede básica.

Uma solução clássica e eficiente para a mitigação dos problemas relacionados à presença de distorções harmônicas é a inserção de filtros em derivação na rede (NASCIMENTO, 2007).

Diante deste cenário, esse trabalho apresenta um aplicativo computacional que possui o objetivo de fornecer a análise de sistemas elétricos com distorções harmônicas. Buscou-se reunir e sistematizar as metodologias relacionadas ao cálculo de Fluxo de Potência, ao estudo de Penetração Harmônica e ao projeto de Filtros Passivos Sintonizados.

2. Material e Métodos

Para o desenvolvimento da pesquisa foi realizado o estudo de diferentes referências relacionadas à área de sistemas elétricos de potência e, mais especificamente, ao setor de qualidade da energia elétrica. Primeiramente foi investigada a importância do tema proposto diante do cenário do setor elétrico nacional. Em seguida, foram levantados aspectos técnicos relacionados à problemática das distorções harmônicas e às normas regulamentadoras ligadas ao tema. Em seguida, iniciou-se a análise propriamente dita dos meios que possibilitariam a criação do aplicativo computacional pretendido. Como ambiente de programação, foi utilizado o software MATLAB[®].

3. Cálculo do Fluxo de Potência

3.1 Sistemas de Transmissão de Energia

O cálculo do fluxo de potência apresenta-se como uma ferramenta que fornece o diagnóstico de funcionamento de determinado sistema elétrico, levando em consideração uma análise à frequência fundamental, em regime permanente. A partir dos resultados do cálculo, é possível conhecer o sentido de fluxos de potências ativas e reativas, a magnitude das perdas em cada parte do sistema e a sua capacidade em transferir energia. De posse dos valores de tensão, potência ativa e reativa geradas, consumidas e transportadas em cada local, pode-se realizar estudos sobre as condições de operação em diferentes possibilidades de carregamento. Dessa forma, a importância do cálculo de fluxo de potência não se restringe em apenas analisar a configuração de sistemas existentes, mas também permite elaborar o planejamento de ações de expansão.

As equações estáticas do fluxo de carga (EEFC), as quais relacionam potência e tensão, são algébricas e não lineares, sendo que a possibilidade de realização de uma solução analítica se restringe a casos muito simples. Devido à complexidade e à dimensão dos sistemas de equações envolvidos no processo de resolução, é viável recorrer à utilização de métodos matemáticos iterativos. Existem vários métodos possíveis de serem usados, como o Método de Gauss, o Método de Newton-Raphson e o Método Desacoplado Rápido.

Neste trabalho foi utilizado o Método Desacoplado Rápido, que é um derivado do Método de Newton-Raphson. Ao se valer das conhecidas propriedades de que o fluxo de potência ativa (P) é fortemente influenciado pelos ângulos de fase das tensões (θ) e o fluxo de potência reativa (Q) é fortemente dependente do módulo das tensões (V), são desacopladas as convergências P - θ e Q - V . Além disso, é importante citar que este método torna os cálculos menos extensos, uma vez que considera a Matriz Jacobiana constante. Esses aspectos resultam em iterações mais rápidas, menor esforço computacional e menos gastos de memória, fatos que podem compensar a convergência mais lenta do método quando comparado ao Newton-Raphson (GUIMARÃES, 2012).

3.2 Sistemas de Distribuição de Energia

Em sistemas de distribuição de energia, os cálculos iterativos comumente usados no Método Desacoplado Rápido podem apresentar problemas de convergência, devido a algumas características específicas do ambiente de distribuição, como a configuração predominantemente radial e a alta relação da resistência pela reatância (BARBOSA, 1995). Desta forma, para que o método pudesse ser aplicado tanto para sistemas de transmissão quanto de distribuição, foi necessária a implementação de uma técnica de rotação de eixos para as variáveis da rede de distribuição.

O método sugerido consiste em, basicamente, mudar o sistema de referência complexo através de uma rotação dos eixos real e imaginário, de modo que as impedâncias representadas no novo sistema de referência possuam relação x/r favorável à aplicação do Método Desacoplado Rápido. Com o intuito de esclarecer o procedimento comentado, a figura 1(a) mostra a representação gráfica de uma impedância típica de sistemas de transmissão, enquanto a figura 1(b) apresenta uma impedância típica de sistemas de distribuição. Já na figura 1(c) é representado o processo de rotação de eixos da impedância.

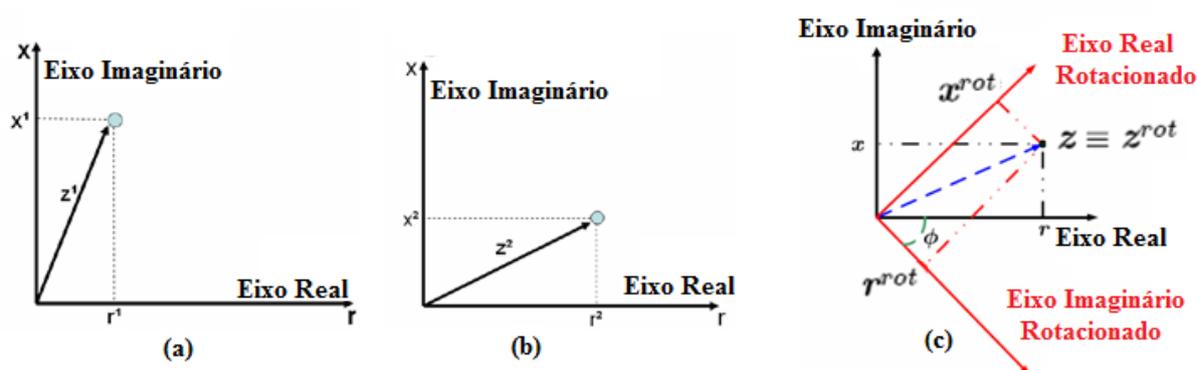


Figura 1: Impedâncias típicas de sistemas de transmissão (a) e distribuição (b), processo de rotação de eixos (c).

O procedimento para realizar o fluxo de potência, neste caso, inicia-se com cálculos para a definição do ângulo ideal para a rotação de eixos e, posteriormente, faz-se a rotação das impedâncias e potências do sistema para o novo eixo rotacionado. A partir deste ponto, são seguidos exatamente as mesmas etapas relatadas no Método Desacoplado Rápido convencional. Ao final dos cálculos, as grandezas que foram rotacionadas devem passar por uma nova rotação, agora de sentido inverso, para que seus valores finais correspondam ao sistema seguido como referência para todas as variáveis.

4. Estudo de Penetração Harmônica

O estudo de penetração harmônica de um sistema elétrico representa uma análise importante para se conhecer a respeito do fluxo, pelos componentes da rede, de ondas de frequências múltiplas inteiras da fundamental. A partir deste estudo é que se consegue quantificar o teor harmônico presente em determinado ponto de uma instalação, de modo que se faz possível avaliar se os níveis de distorções estão em conformidade com os valores de referência definidos por norma.

O método para cálculo de penetração harmônica utilizado é conhecido como Método da Injeção de Correntes Harmônicas. Este método não apresenta solução iterativa, não inclui a modelagem explícita dos dispositivos geradores de harmônicos e realiza os cálculos para apenas uma fase, considerando o sistema equilibrado. Em virtude desses fatores, esta é considerada uma das maneiras mais simples de se estudar o fluxo harmônico, sendo muito usada nos estudos de desenvolvimento de filtros e apresentando resultados satisfatórios para análise de sistemas elétricos, especialmente naqueles onde as fontes harmônicas apresentam injeção relativamente constante (NIQUINI, 2009).

O princípio básico do método utilizado para calcular as tensões de cada ordem harmônica em determinada barra é apresentado em (1) (NASCIMENTO, 2007).

$$[V_h] = [Z_h] \cdot [I_h] \quad (1)$$

Onde:

$[V_h]$ = vetor das tensões harmônicas resultantes;

$[Z_h]$ = matriz das impedâncias harmônicas;

$[I_h]$ = vetor das correntes harmônicas injetadas no sistema.

A matriz $[Z_h]$ é a matriz das impedâncias do sistema, sendo que a maneira mais acessível de encontrá-la é obtendo o inverso da matriz admitância para cada ordem harmônica. Como a impedância varia em função da frequência, para cada ordem harmônica (h) haverá um diagrama de impedâncias do sistema com valores distintos. Nesse sentido, o primeiro passo necessário antes da aplicação de (1) consiste em realizar a montagem desses diagramas, observando as adequadas correções a serem realizadas.

Para os cálculos, os valores de resistência foram considerados constantes, ou seja, desconsiderou-se o Efeito Skin. Já as reatâncias indutiva e capacitiva foram corrigidas em função da frequência como mostram (2) e (3), respectivamente:

$$X_{Lh} = X_{L1} \cdot h \quad (2)$$

$$X_{Ch} = X_{C1}/h \quad (3)$$

Onde:

X_{Lh} = reatância indutiva corrigida para a ordem harmônica h;
 X_{L1} = valor da reatância indutiva à frequência fundamental;
 X_{Ch} = reatância capacitiva corrigida para a ordem harmônica h;
 X_{C1} = valor da reatância capacitiva à frequência fundamental;
h = ordem harmônica.

Após a realização de todas as correções necessárias, podem ser montadas as matrizes admitância do sistema para cada ordem harmônica, que, ao serem invertidas, resultam nas correspondentes matrizes impedância de cada ordem.

De posse desses dados, montam-se os vetores de correntes harmônicas injetadas nas barras do sistema para cada ordem harmônica, valores esses geralmente obtidos a partir de medições. A partir daí, é possível obter os vetores de tensões harmônicas por meio da aplicação de (1).

No Brasil, os parâmetros mais comumente usados para indicação do teor de conteúdo harmônico de uma rede elétrica são as Distorções Harmônicas Individuais de Tensão (DIT) e Distorções Harmônicas Totais de Tensão (DTT). Seguindo as recomendações da ANEEL, as maneiras de obter estes parâmetros são apresentadas, respectivamente, em (4) e (5):

$$DIT = \frac{V_h}{V_1} \times 100\% \quad (4)$$

$$DTT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\text{máx}}} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (5)$$

Onde:

DIT = distorção harmônica individual de tensão para a ordem h, em [%];

DTT = distorção harmônica total de tensão em determinada barra, em [%];

V_h = tensão harmônica de ordem h;

V_1 = tensão à frequência fundamental.

5. Projeto de Filtros Harmônicos Passivos Sintonizados

5.1 Filtros Passivos Sintonizados

Filtros harmônicos possuem a capacidade de evitar que uma determinada frequência indesejável penetre em certos pontos da rede, ou seja, são circuitos capazes de separar sinais elétricos. Esta utilidade decorre das diferentes características que a impedância do filtro pode assumir para distintos valores de frequências.

Diz-se que um filtro é passivo quando possui apenas componentes passivos: elementos resistivos, indutivos e capacitivos. Por outro lado, os filtros ativos são constituídos por

elementos passivos combinados com componentes de eletrônica e de controle. Filtros passivos são de fácil instalação e utilização, porém apresentam pouca flexibilidade porque atenuam apenas as harmônicas para qual foram projetados e podem levar ao surgimento do problema de ressonância com o sistema.

Os filtros passivos sintonizados são circuitos ressonantes formados por resistores, indutores e capacitores em série ou combinações série-paralela destes elementos. O filtro, em si, pode também ser conectado em série no sistema, representando uma grande impedância para a frequência que se deseja evitar. Contudo, a ligação série apresenta a desvantagem de o filtro ter que ser dimensionado para suportar a corrente de plena carga do circuito, sendo geralmente mais caro. Por ser menos complexa e mais barata, a ligação shunt é a forma mais comum de instalação de filtros e, por esse motivo, as análises deste trabalho foram todas focadas neste tipo de conexão. Antes de tratar especificamente do projeto, é importante discorrer sobre algumas características de fundamental importância quando se estuda a operação de filtros passivos sintonizados.

5.1.1 Frequência de Sintonia

Considerando um filtro harmônico passivo sintonizado em uma determinada frequência, formado pelos elementos resistivo, indutivo e capacitivo em série e conectado a um sistema em derivação, tem-se a configuração mostrada na figura 2, para um pequeno sistema hipotético. Essa figura exhibe o equivalente monofásico do modelo, já que a conexão dos filtros trifásicos ocorre comumente em delta ou em estrela não aterrada.

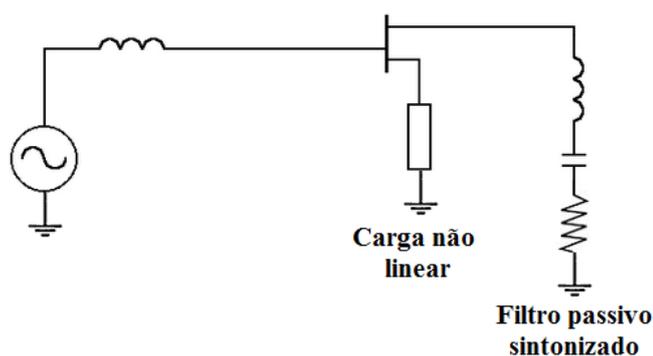


Figura 2: Equivalente monofásico mostrando sistema com filtro

A frequência de sintonia do filtro é obtida a partir do valor de frequência de ressonância série dos elementos indutivo (L) e capacitivo (C) do filtro. A ressonância série representa a condição em que as reatâncias indutiva e capacitiva são numericamente iguais, de forma que

seus efeitos se anulam. A maneira como se pode obter a frequência de ressonância é apresentada em (6) (RESENDE, 2006).

$$f_R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (6)$$

Onde:

f_R = frequência de ressonância, em hertz;

L = indutância do filtro, em henry;

C = capacitância do filtro, em farad.

Desta forma, é possível concluir que para a frequência de ressonância o filtro apresenta uma pequena impedância e possui natureza puramente resistiva. Para frequências inferiores ao valor de sintonia, o filtro em derivação apresenta características capacitivas, enquanto que para frequências maiores que a de sintonia é predominantemente indutivo.

Para ilustrar o comportamento da impedância do filtro em função da frequência, a figura 3 apresenta a variação do módulo da impedância de um determinado filtro RLC série ($R = 5 \Omega$, $L = 10 \text{ mH}$ e $C = 100 \mu\text{F}$), enquanto a figura 4 exibe a variação do ângulo das impedâncias em função da frequência.

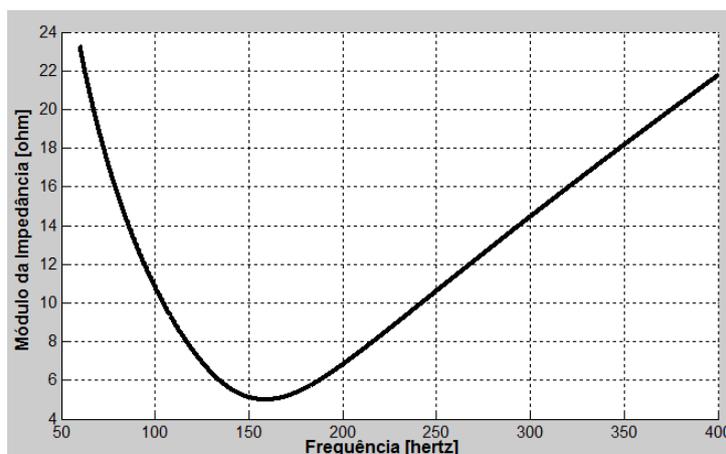


Figura 3: Gráfico da variação do módulo da impedância do filtro em função da frequência

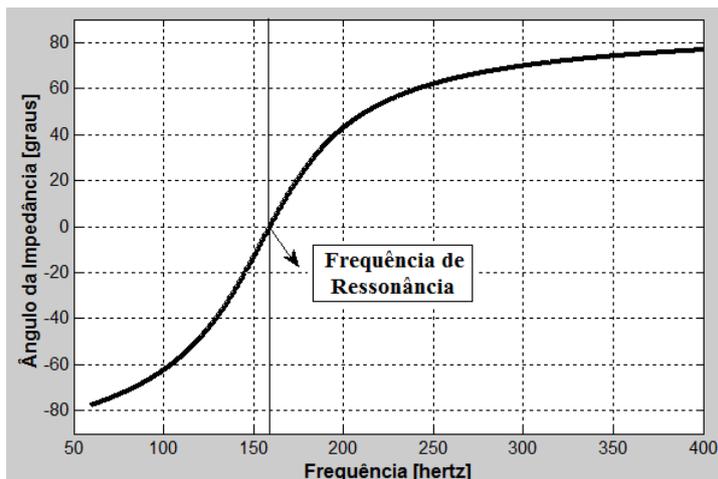


Figura 4: Gráfico da variação do ângulo da impedância do filtro em função da frequência

Como pode ser observado nas figuras, para a frequência de ressonância (159,15 Hz) o módulo da impedância assume seu valor mais baixo (5Ω) e seu ângulo é zero (caracterizando natureza puramente resistiva). Para frequências menores que a de ressonância a impedância do filtro é capacitiva (ângulos negativos) e em frequências maiores que a de ressonância a impedância do filtro é indutiva (ângulos positivos).

5.1.2 Dessintonia

Em termos práticos, um filtro não é sintonizado exatamente no valor da frequência harmônica que se deseja filtrar. Isso ocorre porque eles são sensíveis a variações de frequência, que ocorrem devido a dois fatores principais, quais sejam: as oscilações de frequência da rede e as variações de valores de capacitância e indutância dos componentes do filtro. Somam-se a esses fatores os desvios de sintonia inerentes à montagem, causados pelas faixas de tolerância de fabricação dos reatores e capacitores.

As alterações de frequência da rede ocorrem devido a efeitos da geração ou modificação expressiva e repentina nas cargas. As variações nos valores de capacitância acontecem, principalmente, devido a mudanças de temperatura e ao envelhecimento. Já as alterações de indutância advêm da não linearidade magnética do componente (TEIXEIRA, 2009).

Posto isto, é importante levar em consideração o efeito de variação de frequência para garantir que, sob esta condição, o filtro seja capaz de operar de maneira satisfatória.

Uma maneira de quantificar o desvio equivalente de frequência é mostrada em (7). Observa-se que esta equação abrange parcelas referentes às variações procedentes da rede, dos indutores e dos capacitores (NASCIMENTO, 2007).

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_1} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta C}{C} \right) \quad (7)$$

Onde:

δ = desvio equivalente de frequência;

$\Delta f/f_1$ = variação de frequência ocorrida no sistema CA, em relação ao valor de frequência nominal da rede;

$\Delta L/L$ = variação da indutância do filtro em relação ao valor nominal;

$\Delta C/C$ = variação da capacitância do filtro em relação ao valor nominal.

5.1.3 Fator de Qualidade

O fator de qualidade ou fator de mérito está associado à relação entre energia armazenada e energia dissipada em um circuito. Para o caso da configuração de um filtro RLC série, para sinais com frequência maior que a de ressonância, o fator de qualidade será dado pela relação entre a reatância indutiva e o valor de resistência. Por outro lado, para sinais com frequência menor que a de ressonância, o fator de qualidade será dado pela relação entre a reatância capacitiva e a resistência. Para a frequência de sintonia do filtro (f_R), quando a impedância do mesmo é resistiva, o fator de qualidade (Q) pode ser calculado conforme indicado em (8) (NASCIMENTO, 2007).

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_R \cdot L}{R} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_R \cdot C \cdot R} \quad (8)$$

Onde:

Q = fator de qualidade do filtro;

f_R = frequência de ressonância, em hertz;

R = resistência do filtro, em ohm;

L = indutância do filtro, em henry;

C = capacitância do filtro, em farad.

De maneira mais prática, pode-se dizer que este fator está relacionado à seletividade do filtro. Quanto maior o fator de mérito, mais seletivo é o circuito e menor será a faixa de frequências (em torno da frequência de sintonia) que o filtro será capaz de filtrar. Com base em (8), a figura 5 mostra como se altera o comportamento do módulo da impedância do filtro em função da frequência, quando são tomados diferentes valores para o fator de qualidade.

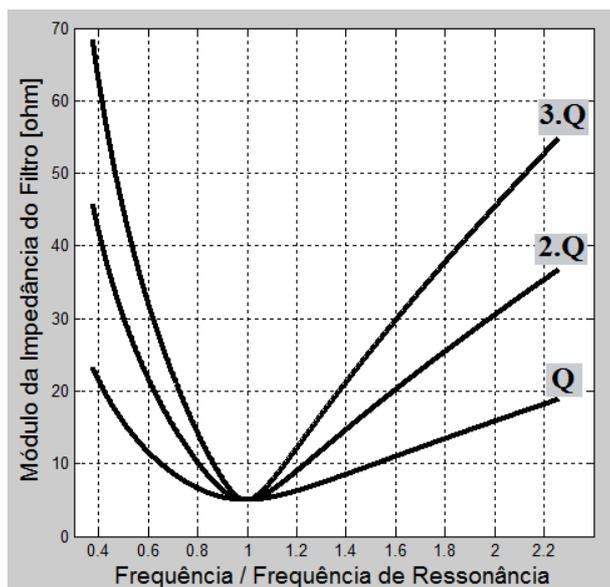


Figura 51: Módulo da impedância do filtro em função da frequência, para diferentes valores do fator de qualidade

5.1.4 Suportabilidade

Verificar se os componentes dos filtros suportam as condições às quais estarão sujeitos no sistema em que serão inseridos é um passo de primordial importância no processo de dimensionamento de filtros. Isso acontece porque caso os limites de suportabilidade dos componentes sejam ultrapassados, eles poderão sofrer sérios danos, anulando a eficiência do filtro. Exceder os limites de corrente, por exemplo, pode provocar aquecimento excessivo, o que leva à redução de vida útil, enquanto que sobretensões podem trazer efeitos como o rompimento de isolamentos.

A verificação da suportabilidade no projeto de filtros shunt pode ser feita levando em consideração apenas o capacitor do filtro, que é o componente exposto às condições mais hostis quando da presença de grandezas harmônicas no sistema. Dessa forma, ao assegurar que os testes de suportabilidade do capacitor são atendidos, garante-se também que os demais componentes do filtro operarão de forma segura. Neste trabalho foi usada como referência a norma do INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS – IEEE, 2002 Standard 18, sendo que as expressões a seguir mostram os limites estabelecidos pela referida norma, no que se refere à corrente eficaz (9), à corrente de pico (10), à tensão eficaz (11), à tensão de pico (12) e à potência reativa média (13).

$$\frac{I_{F(RMS)}}{I_{C(n)}} \leq 1,8 \quad (9)$$

$$\frac{I_{F(PICO)}}{\sqrt{2} \cdot I_{C(n)}} \leq 1,3 \quad (10)$$

$$\frac{V_{C(RMS)}}{V_{C(nom)}} \leq 1,1 \quad (11)$$

$$\frac{V_{C(pico)}}{\sqrt{2} \cdot V_{C(nom)}} \leq 1,2 \quad (12)$$

$$\frac{S_{C(M)}}{Q_{Cap(n)}} \leq 1,35 \quad (13)$$

Onde:

$I_{F(RMS)}$ = corrente eficaz verdadeira de fase no filtro;

$I_{C(n)}$ = corrente fundamental nominal de fase do capacitor;

$I_{F(PICO)}$ = corrente de pico verdadeira de fase no filtro;

$V_{C(RMS)}$ = tensão eficaz verdadeira de fase sobre o capacitor;

$V_{C(nom)}$ = tensão fundamental nominal de fase do capacitor.

$V_{C(pico)}$ = tensão de pico verdadeira de fase sobre o capacitor;

$S_{C(M)}$ = potência aparente média no capacitor;

$Q_{Cap(n)}$ = potência reativa fundamental nominal do capacitor.

5.2 Projeto de Filtros Passivos Sintonizados

Levando em conta as diferentes dimensões e características operacionais de sistemas elétricos, é presumível esperar que para realizar o dimensionamento de filtros alguns aspectos terão maior ou menor relevância, dependendo do tipo de sistema analisado.

Para redes de distribuição e sistemas industriais, os quais não apresentam expressivas variações de configuração e cargas, o projeto de filtros utilizando o Método Convencional atende de maneira satisfatória às necessidades desses casos, considerados menos complexos. Por outro lado, geralmente, os sistemas de transmissão de energia sofrem variações de configuração e condições de carregamento no decorrer de um período, ou seja, a impedância do sistema se altera constantemente. Para esse tipo de sistema é recomendável que se faça o projeto de filtros por meio do Método do Lugar Geométrico, o qual exige análise das diferentes condições de operação do sistema para levar em consideração o lugar geométrico do plano complexo que abrange todas as variações possíveis de ocorrer nos valores de impedância (NASCIMENTO, 2007).

Uma vez que os filtros passivos sintonizados apresentam impedância capacitiva na frequência fundamental, ao inseri-los em determinada rede, haverá suprimento do sistema de reativos favorecendo a correção do fator de potência, considerando que as cargas sejam de característica indutiva. Dessa forma, pode-se dizer que ao instalar um filtro observam-se dois

efeitos: minimização das distorções harmônicas e melhora do fator de potência. Como tais efeitos são intrínsecos, além de escolher o método de projeto, é preciso também definir se o objetivo prioritário do filtro é reduzir as distorções harmônicas aos níveis pré-definidos (sem conhecer de antemão o quanto o fator de potência irá melhorar) ou, pelo contrário, se o objetivo prioritário é aumentar o fator de potência a um valor pré-fixado (sem estabelecer previamente o quanto que os níveis de distorção harmônica deverão diminuir). Desta forma, foram implementadas quatro maneiras distintas de se realizar o projeto dos filtros harmônicos passivos sintonizados:

- **Método Convencional com o Objetivo Prioritário de Reduzir as Distorções Harmônicas:** para realizar o projeto do filtro por meio desta opção, são seguidos cinco passos principais, a saber: cálculo da potência reativa mínima do capacitor capaz de reduzir a distorção harmônica individual de tensão ao valor pré-estabelecido pelo usuário, cálculo do fator de qualidade ótimo do filtro, determinação do filtro mínimo (análise dos efeitos causados pela inserção do filtro para todas as demais ordens harmônicas presentes no sistema), aplicação dos testes de suportabilidade e análise do desempenho do arranjo final (obtenção os níveis de distorções harmônicas de todas as ordens, em cada barra do sistema, levando em conta todos os filtros projetados até o momento).
- **Método Convencional com o Objetivo Prioritário de Melhorar o Fator de Potência:** os passos que deverão ser seguidos, em síntese, para cada ordem harmônica, são: cálculo da potência reativa mínima para a correção do fator de potência até o valor desejado pelo usuário, distribuição da potência reativa no arranjo de filtros, determinação do fator de qualidade ótimo e dos componentes do filtro, aplicação dos testes de suportabilidade e determinação final do fator de potência da carga.
- **Método do Lugar Geométrico com o Objetivo Prioritário de Reduzir as Distorções Harmônicas:** as etapas que constituem o projeto podem ser resumidamente descritas como: cálculo dos componentes do filtro (levando em consideração os dados necessários para definir a região do plano complexo que abrange os valores de impedância que o sistema pode assumir considerando a análise de contingências), verificação da suportabilidade e cálculo do desempenho do arranjo final.
- **Método do Lugar Geométrico com o Objetivo Prioritário de Melhorar o Fator de Potência:** devem ser seguidos os seguintes passos: cálculo da potência reativa mínima para a correção do fator de potência, distribuição da potência reativa no arranjo de filtros, cálculo

dos componentes do filtro (levando em consideração a análise de contingências), verificação da suportabilidade e determinação final do fator de potência da carga.

Caso seja preciso instalar mais de um filtro no sistema, eles devem ser dimensionados separadamente, ordem por ordem, sendo que em cada barra inicia-se o projeto pela menor frequência harmônica e, quando este for finalizado, iniciam-se os cálculos da próxima ordem, até chegar à maior ordem escolhida. Durante os cálculos do projeto de cada filtro são levados em consideração os efeitos da existência dos demais que já foram inseridos anteriormente.

6. O Aplicativo Computacional Desenvolvido

O programa desenvolvido em Matlab apresenta como estrutura inicial três opções para o usuário escolher de acordo com suas necessidades de análise de determinado sistema elétrico, a saber:

- 1- Cálculo do Fluxo de Potência;
- 2- Estudo de Penetração Harmônica com possível Projeto de Filtro Passivo Sintonizado;
- 3- Cálculo do Fluxo de Potência e, em seguida, Estudo de Penetração Harmônica com possível Projeto de Filtro Passivo Sintonizado.

Desta maneira, é possível analisar o sistema apenas pela óptica da frequência fundamental (opção 1), apenas por meio da perspectiva de frequências harmônicas (opção 2) ou integrar ambos estudos (opção 3).

Como forma de inserir os dados do sistema elétrico, o usuário pode escolher entre duas opções, quais sejam: no próprio workspace do Matlab, sendo os parâmetros informados de acordo com as solicitações que surgem à medida que o programa é executado, ou por meio de um arquivo de extensão .m (arquivo feito no próprio ambiente Matlab), elaborado de forma a reunir todos os dados de entrada inicialmente necessários. Caso a segunda opção seja escolhida, será indagado ao usuário o nome do arquivo que contém as variáveis do sistema estudado e, então, elas serão todas carregadas de uma só vez. O arquivo .m usado para armazenar as variáveis deve ser elaborado de acordo com um modelo pré-estabelecido, onde há a descrição detalhada sobre a forma como cada dado deve ser declarado e sobre quais informações são necessárias para a realização de cada tipo de cálculo.

Uma vez inseridas as variáveis de entrada, caso seja escolhida a opção de análise completa, o software irá exibir, a princípio, a pergunta sobre qual método utilizar para o cálculo do fluxo de potência: o Método Desacoplado Rápido ou o Método Desacoplado

Rápido com Rotação de Eixos. Após a escolha, serão exibidos os resultados do fluxo de potência e, em seguida, já são calculados e mostrados os valores de distorções harmônicas de tensão individuais e totais em cada barra. Então, o programa exhibe a indagação sobre o desejo do usuário em visualizar o diagrama de impedância do sistema em função da frequência em determinada barra. O usuário pode visualizar os gráficos de quantas barras for de seu interesse.

Depois disso, a pergunta exibida refere-se à intenção de se inserir filtros harmônicos passivos sintonizados no sistema. Se a resposta do usuário for afirmativa, deve-se escolher o método a ser utilizado: Método Convencional ou Método do Lugar Geométrico. A próxima escolha a ser feita é sobre o objetivo prioritário da inserção do filtro: reduzir as distorções harmônicas ou melhorar o fator de potência. Após essas definições, o projeto do filtro é executado e são mostrados tanto as especificações do filtro, quanto os novos níveis de distorções harmônicas obtidas após a inserção do mesmo. O usuário pode inserir quantos filtros lhe parecer conveniente e ainda pode visualizar o diagrama de impedância em função da frequência com os traçados comparativos entre a rede original e após adição dos filtros.

Ao final da definição do filtro de cada ordem harmônica, existe a possibilidade de observar os resultados que seriam obtidos com a adoção do capacitor comercial mais próximo do valor calculado. Por vezes, os valores de capacitores obtidos por meio de cálculos são bastante específicos, não sendo disponíveis comercialmente. Assim, o usuário pode observar as respostas referentes aos níveis de distorções harmônicas do sistema obtidas a partir da inserção de um capacitor comercial, cujos dados de potência e tensão podem ser: inseridos pelo usuário ou buscados em um banco de dados de valores comerciais de capacitores presente no próprio programa. Nesta situação, todo o projeto do filtro será refeito, considerando o novo valor do capacitor.

Encerrados todos os processos relacionados às harmônicas, é feita uma última pergunta ao usuário sobre o seu desejo de realizar o cálculo do fluxo de potência do sistema após a adição dos filtros e, em caso afirmativo, são mostrados os novos resultados solicitados.

7. Estudo de Casos

Com o objetivo de exibir algumas aplicações do aplicativo computacional desenvolvido, serão mostrados a seguir dois estudos de casos de características distintas.

7.1 Sistema Elétrico de Quatro Barras

7.1.1 Considerações Iniciais

Todo o estudo apresentado na sequência é baseado em um sistema de quatro barras cujo diagrama unifilar é mostrado na figura 6. A configuração foi retirada do caso base presente na versão de demonstração do software elaborado pela empresa QUALITY ENGENHARIA E SISTEMAS, (2011), denominado *PQF*.

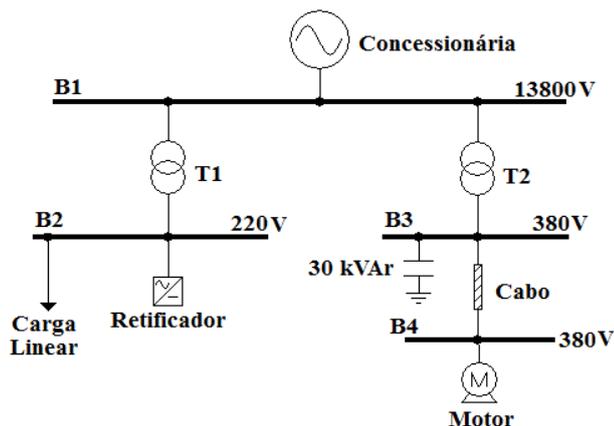


Figura 6: Diagrama unifilar do sistema de quatro barras analisado

As tabelas 1 e 2 mostram as principais informações que foram usadas para a realização da análise do caso. A primeira exibe os dados de barras, enquanto a segunda apresenta os dados de impedância dos equipamentos, em pu, à frequência fundamental de 60 Hz, na potência base de 100 kVA e tensão base de suas respectivas barras.

Tabela 1: Dados de Barra do Sistema de Quatro Barras

Barra	Tensão Base (V)	Tipo de Barra	Potência Gerada (kVA)	Potência Consumida (kVA)
1	13800	Referência	(incógnita)	0
2	220	PQ	0	162,9+161,3j
3	380	PQ	30j	0
4	380	PQ	0	71,1+55,18j

Tabela 2: Dados de Geradores, Cabos e Transformadores do Sistema de Quatro Barras

Equipamento	Resistência Série (pu)	Reatância Série (pu)
Equivalente Concessionária	0	0,001j
Transformador 1	0,004444	0,018222j
Transformador 2	0,006667	0,030333j
Cabo	0,003463	0,005194j

O retificador conectado à barra número 2 injeta correntes harmônicas no sistema. A tabela 3 mostra as ordens harmônicas, as magnitudes e os ângulos dessas correntes.

Tabela 3: Corrente Harmônicas Injetadas na Barra 2

Ordem harmônica	Magnitude da Corrente (A)	Ângulo da Corrente (°)
5	26,24	-5,74
7	18,75	-80,04
11	11,93	-48,63
13	10,09	-122,93
17	7,72	-91,52
19	6,91	-165,82
23	5,71	-134,41
25	5,25	151,29
29	4,52	-177,30
31	4,23	108,40
35	3,75	139,81
37	3,55	65,51
41	3,20	96,92
43	3,05	22,62
47	2,79	54,03
49	2,68	-20,27

A seguir, será mostrado o estudo do sistema, no que diz respeito à análise de fluxo de potência, penetração harmônica, fator de potência e filtros harmônicos.

7.1.2 Cálculo do Fluxo de Potência

Como a configuração é caracterizada como sendo um sistema de distribuição de energia, ainda que simples, foi utilizado o Método Desacoplado Rápido com Rotação de Eixos. Nesse sistema, o número de iterações necessárias à convergência foi ligeiramente menor do que quando não se utiliza a rotação de eixos. A semelhança entre o número de iterações nos dois métodos é devida à pequena complexidade do sistema, sendo que a diferença deve aumentar significativamente para redes de distribuição de maior porte (GRAVENA; CAVAGNOLI, 2011). A tabela 4 mostra os resultados encontrados pelo software desenvolvido em Matlab e pelo *PQF* para o valor do módulo de tensão fundamental nas barras do sistema.

Tabela 4: Resultados do Cálculo do Fluxo de Potência para o Sistema de Quatro Barras

Barra	Módulo da Tensão (V)	
	<i>Matlab</i>	<i>PQF</i>
1	13800	13800
2	211,56	211,56
3	375,10	375,01
4	373,04	372,94

De acordo com os limites estabelecidos pela ANEEL, presentes no módulo oito do PRODIST, todos os valores encontrados são classificados como adequados para os respectivos níveis de tensão de cada barra.

O valor da potência gerada na barra de referência (barra 1) fornecido pelo programa em MATLAB foi 237,21+199,06j kVA, enquanto que no PQF o valor resultante foi 237,21+199,88j kVA.

7.1.3 Estudo de Penetração Harmônica

Dada a considerável quantidade de ordens harmônicas presentes na rede, serão mostrados apenas os níveis de DTI₅, DTI₇ e DTT. A tabela 5 contém os valores fornecidos tanto pelo Matlab, quanto pelo PQF.

Tabela 1: Estudo de Penetração Harmônica da Situação Inicial do Sistema de Quatro Barras

Barra	DIT ₅ (%)		DIT ₇ (%)		DTT (%)	
	Matlab	PQF	Matlab	PQF	Matlab	PQF
1	0,0475	0,05	0,0482	0,05	0,1791	0,18
2	0,9073	0,96	0,9071	0,96	3,6103	3,81
3	0,0585	0,06	0,0813	0,09	0,4606	0,45
4	0,0580	0,06	0,0807	0,09	0,4571	0,46

Também de acordo com a ANEEL, os níveis de distorções harmônicas individuais e totais do sistema se mostraram adequados. Contudo, observa-se que o fator de potência no ponto de conexão com a concessionária (barra 1) apresenta valor 0,766, ou seja, está abaixo do limite permitido. O referido fator de potência pode ser encontrado a partir da potência fornecida pela barra número 1, como é indicado em (14).

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{237,21}{\sqrt{237,21^2 + 199,06^2}} = 0,766 \quad (14)$$

Onde:

FP = fator de potência;

P = potência ativa, em kW;

S = potência reativa, em kVA.

A fim de corrigir o fator de potência, a princípio, como o sistema não apresentava distorções harmônicas acima dos valores de referência, decidiu-se inserir simplesmente um capacitor conectado à barra de número 2.

O valor deste capacitor foi definido, com base na mesma equação mostrada em (14), como sendo aquele necessário para elevar o fator de potência ao valor 0,94. Após os cálculos, conclui-se que para isto seria necessário uma potência reativa capacitiva de 113kVAr. Ao

inserir este capacitor no sistema, o problema do fator de potência foi resolvido, no entanto, observou-se que aumentaram substancialmente os níveis de distorção harmônica, principalmente para a ordem harmônica de número 7, conforme mostra a tabela 6.

Tabela 6: Resultados do Estudo de Penetração Harmônica após Instalação do Capacitor

Barra	DIT ₅ (%)		DIT ₇ (%)		DTT (%)	
	Matlab	PQF	Matlab	PQF	Matlab	PQF
1	0,0977	0,10	1,1788	1,16	1,1832	1,16
2	1,8665	1,94	22,1934	22,20	22,285	22,30
3	0,1199	0,13	1,973	2,02	2,0059	2,05
4	0,1190	0,13	1,9583	2,02	1,9909	2,05

Nota-se que na barra 2 o limite de DIT₇ e DTT foram ultrapassados, de forma que isto poderia trazer uma série de prejuízos ao funcionamento do sistema e dos equipamentos. Nesse sentido, a solução mais viável para o caso seria instalar um filtro passivo sintonizado.

7.1.4 Projeto de Filtros Harmônicos Passivos Sintonizados

Por se tratar de um sistema industrial, o qual não apresenta grandes variações de configuração e cargas, será usado o Método Convencional para projetar o filtro com o intuito prioritário de melhorar o fator de potência.

Com relação aos dados de entrada necessários, foi informado que o filtro seria inserido na barra número 2 e optou-se por sintonizá-lo na ordem 7, por ser a frequência que apresentou problemas na hipótese anteriormente discutida. Os resultados são mostrados na tabela 7.

Tabela 7: Dados Fornecidos após Projeto do Filtro de Ordem 7

Variável do projeto	Valor fornecido
Resistência do Filtro (Ω)	$5,7775 \cdot 10^{-3}$
Indutância do Filtro (H)	$2,1893 \cdot 10^{-5}$
Capacitância do Filtro (F)	$65,589 \cdot 10^{-4}$
Potência Reativa Trifásica Capacitiva (kVAr)	122,17
Tensão Nominal de Fase do Capacitor (V)	128,33
Fator de Qualidade do Filtro	10
Fator de Potência Obtido com esse Filtro	0,94

Embora o fator de potência desejado tenha sido alcançado após a inserção do filtro, o mesmo provocou um aumento considerável das distorções harmônicas de ordem 5. A tabela 8 exibe os níveis de DIT₅, DIT₇ e DTT fornecidos pelo Matlab e pelo PQF, após o projeto.

Tabela 8: Estudo de Penetração Harmônica após Instalação do Filtro de Ordem 7

Barra	DIT ₅ (%)		DIT ₇ (%)		DTT (%)	
	Matlab	PQF	Matlab	PQF	Matlab	PQF
1	0,2062	0,20	0,0045	0,00	0,2200	0,22
2	3,9385	3,96	0,0846	0,09	4,2322	4,27
3	0,2538	0,26	0,0076	0,01	0,3027	0,30

4	0,2519	0,26	0,0075	0,01	0,3005	0,31
---	--------	------	--------	------	--------	------

Observando os resultados presentes na tabela 8, conclui-se que apesar de as distorções terem aumentado em certas circunstâncias, os valores de DIT e DTT não ultrapassaram os limites recomendados pela ANEEL. Apesar disso, constatou-se que sintonizar o filtro na ordem 5, ao invés da ordem 7, poderia trazer resultados mais interessantes no que se refere aos níveis de distorções harmônicas do sistema. A tabela 9 exibe os resultados obtidos para o projeto do filtro sintonizado em 300 Hz.

Tabela 9: Dados Fornecidos após Projeto do Filtro de Ordem 5

Variável do projeto	Valor fornecido
Resistência do Filtro (Ω)	$5,8954 \cdot 10^{-3}$
Indutância do Filtro (H)	$4,3787 \cdot 10^{-5}$
Capacitância do Filtro (F)	$64,277 \cdot 10^{-4}$
Potência Reativa Trifásica Capacitiva (kVAr)	122,17
Tensão Nominal de Fase do Capacitor (V)	129,64
Fator de Qualidade do Filtro	14
Fator de Potência Obtido com esse Filtro	0,94

Os resultados do estudo de penetração harmônica na presença do filtro harmônico sintonizado na ordem 5 são apresentados na tabela 10.

Tabela 10: Estudo de Penetração Harmônica após Instalação do Filtro de Ordem 5

Barra	DIT ₅ (%)		DIT ₇ (%)		DTT (%)	
	Matlab	PQF	Matlab	PQF	Matlab	PQF
1	0,0063	0,01	0,0232	0,02	0,1093	0,11
2	0,1198	0,17	0,4363	0,45	2,2113	2,27
3	0,0077	0,01	0,0391	0,04	0,2744	0,27
4	0,0077	0,01	0,0388	0,04	0,2724	0,27

7.1.5 Resultados Finais

Diante das possibilidades analisadas, conclui-se que a inserção do filtro passivo sintonizado na ordem 5 foi a proposta mais interessante, uma vez que por meio dele obteve-se o fator de potência desejado e, ao mesmo tempo, os níveis de distorção harmônica diminuíram em relação aos valores encontrados na configuração original do sistema. As figuras 7 e 8 apresentam o comportamento da impedância do sistema vista pela barra 2 antes e após a inserção do filtro projetado para sintonia na ordem 7 e 5, respectivamente. O traçado contínuo em vermelho representa a configuração original e o traçado tracejado em preto, por sua vez, mostra as modificações ocorridas após instalação do filtro.

A figura 7 revela que com o filtro sintonizado na ordem 7 ocorre uma elevação significativa da impedância na frequência de quinta ordem harmônica, ocasionando elevação dos níveis de DIT_5 e DTT. Já a figura 8 mostra que quando o filtro é sintonizado na ordem 5, o pico do valor de impedância é reduzido e deslocado para a ordem 4. Esta é, então, a solução mais eficiente devido à ausência de correntes de ordem 4 nesse sistema.

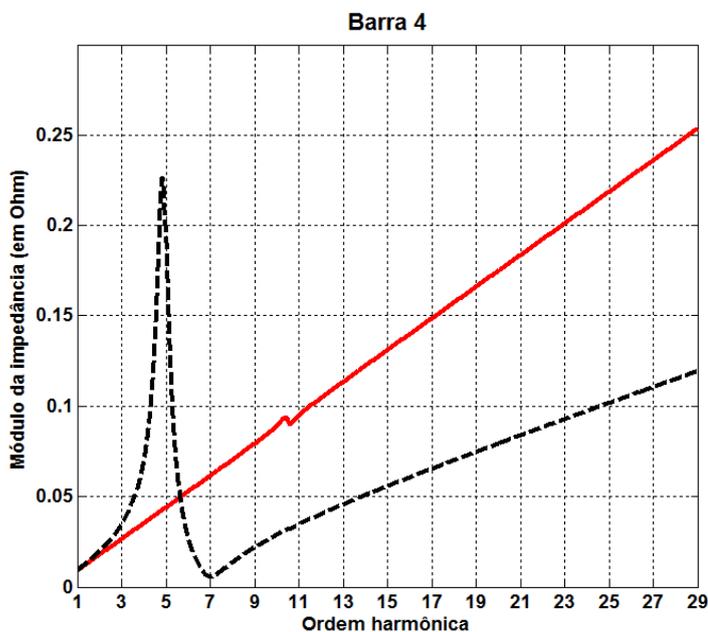


Figura 7: Módulo da Impedância do Sistema vista da Barra 2 em Função da Frequência Antes e Após a Adição do Filtro de Ordem 7

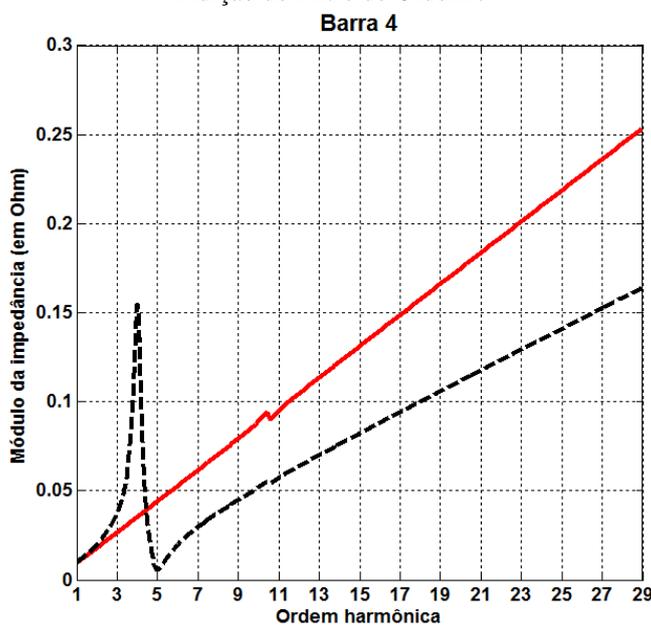


Figura 8: Módulo da Impedância do Sistema vista da Barra 2 em Função da Frequência Antes e Após a Adição dos Filtro de Ordem 5

7.2 Sistema Elétrico de 21 Barras

7.2.1 Considerações Iniciais

O sistema elétrico de 21 barras que será analisado na sequência possui o diagrama unifilar apresentado na figura 9.

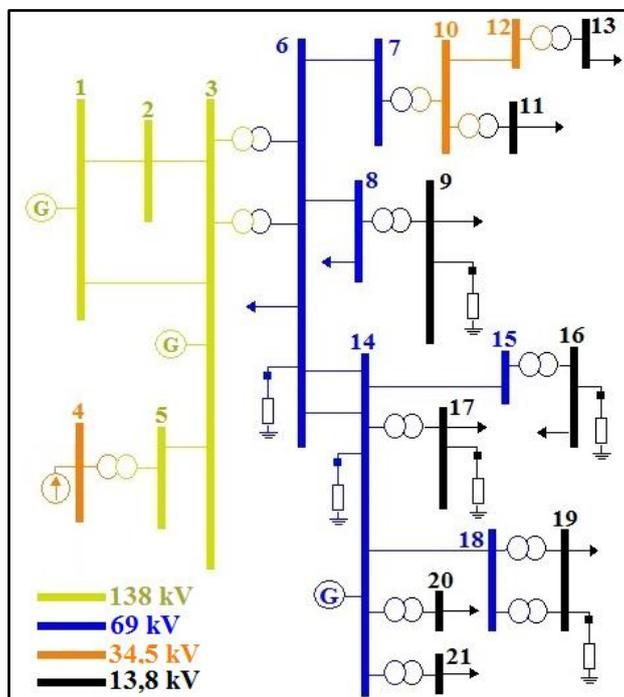


Figura 9:Diagrama Unifilar do Sistema de 21 Barras

Com relação ao sistema apresentado, a barra de referência é a de número 1 e todas as demais são do tipo PQ. A tabela 11 apresenta os dados de barra necessários à análise do sistema, enquanto a tabela 12 contém impedâncias de geradores, linhas e transformadores à frequência fundamental de 60 Hz, em pu, na potência base de 100 MVA e tensão base de suas respectivas barras. Observa-se que as barras 3 e 14 são consideradas como sendo de nível de curto circuito infinito.

Tabela 11: Dados de Barra do Sistema

Barra	Potência Gerada (MVA)	Potência Consumida (MVA)
1	(Incógnita)	-
3	$15 + 0j$	-
4	$0 + 11j$	-
6	$0 + 5,511j$	$18,8 + 10,7j$
8	-	$1,8 + 0,8j$
9	$0 + 1,02j$	$4,9 + 0,3j$
11	-	$0,8 + 0,3j$
13	-	$2,2 + 0,9j$
14	$10,9 + 5,075j$	-
16	$0 + 1,02j$	$1,8 + 1j$
17	$0 + 4,06j$	$6,7 + 3,8j$
19	$0 + 5,08j$	$15 + 7,7j$
20	-	$1,2 + 0,6j$

21	-	2,8 + 1,4j
----	---	------------

Tabela 12: Dados de Equipamentos e Linhas

Equipamento	Resistência Série (pu)	Reatância Série (pu)	Susceptância Shunt (pu)
Transformador 3-6 ⁽¹⁾	0	0,259j	0
Transformador 3-6 ⁽²⁾	0	0,26j	0
Transformador 4-5	0	0,072j	0
Transformador 7-10	0	0,514j	0
Transformador 8-9	0	0,3865j	0
Transformador 10-11	0	0,056j	0
Transformador 12-13	0	1,36j	0
Transformador 14-17	0	0,3865j	0
Transformador 14-20	0	0,715j	0
Transformador 14-21	0	0,696j	0
Transformador 15-16	0	1,202j	0
Transformador 18-19 ⁽¹⁾	0	0,5128j	0
Transformador 18-19 ⁽²⁾	0	0,5128j	0
Gerador – Barra 1	0,0165	0,146j	0
Linha 1-2	0,0895	0,302j	0,08212
Linha 1-3	0,0878	0,3415j	0,0954
Linha 2-3	0,0132	0,0444j	0,01199
Linha 3-5	0,0215	0,0898j	0,0215
Linha 6-7	0,2076	0,4778j	0,0087
Linha 6-8	0,001247	0,002868j	0,000052
Linha 6-14 ⁽¹⁾	0,0498	0,1147j	0,00208
Linha 6-14 ⁽²⁾	0,044	0,144j	0,0026
Linha 10-12	0,7052	0,8653j	0,0014
Linha 14-15	0,2742	0,4317j	0,006702
Linha 14-18	0,0147	0,048j	0,00086

7.2.2 Cálculo do Fluxo de Potência

Os resultados do cálculo do fluxo de potência fornecidos pelo programa desenvolvido são apresentados na tabela 13.

Tabela 13: Resultados do Cálculo do Fluxo de Potência

Barra	Módulo da Tensão (pu)	Ângulo da Tensão (°)
1	1	0
2	0,99224	-2,7292
3	0,98921	-3,0991
4	0,99016	-3,1123
5	0,99016	-3,1123
6	0,98001	-6,5725
7	0,9691	-7,3414
8	0,97992	-6,5839
9	0,98256	-7,7109
10	0,96244	-8,3031
11	0,96227	-8,3308
12	0,93723	-9,0963
13	0,92341	-11,0776
14	0,97613	-7,2175

15	0,97233	-7,7356
16	0,97232	-9,0469
17	0,97680	-8,7738
18	0,97225	-7,6237
19	0,96447	-9,9743
20	0,97168	-7,7358
21	0,96584	-8,4020

Observa-se que os níveis de tensão das barras 12 e 13 ficaram abaixo do limite mínimo estabelecido pela ANEEL. Considera-se, entretanto, que este problema possa ser resolvido com a alteração dos tapes dos transformadores no entorno desta área.

7.2.3 Estudo de Penetração Harmônica

Considerou-se a inserção de uma fonte perturbadora na barra 4, sendo que as correntes harmônicas injetadas por ela na referida barra são mostradas na tabela 14.

Tabela 14: Correntes Harmônicas Injetadas na Barra 4

Ordem Harmônica	Corrente RMS (A)
2	2,93
3	1,64
5	4,45
7	9,96
11	2,58
13	1,64
15	1,52
45	1,64
47	2,58

Os resultados das distorções harmônicas de tensão obtidos pelo programa desenvolvido foram comparados com as respostas fornecidas pelo software elaborado pela ELETROBRAS, (2011), denominado HarmZs. Dada a considerável quantidade de ordens harmônicas envolvidas no estudo, na tabela 15 são apresentados apenas os resultados de níveis de DTT em cada barra e DIT_7 , que é a ordem que mais contribuiu com o total de distorções.

Tabela 15: Resultados do Estudo de Penetração Harmônica

Barra	DIT_7		DTT	
	Matlab	HarmZs	Matlab	HarmZs
1	1,0732	1,0732	1,1415	1,1415
2	1,5453	1,5453	1,5996	1,5996
3	1,4565	1,4565	1,5061	1,5061
4	2,2138	2,2138	2,2903	2,2903
5	1,9175	1,9175	2,1251	2,1251
6	0,12831	0,1283	0,39924	0,3992
7	0,14232	0,1423	0,50193	0,5019
8	0,12843	0,1284	0,39992	0,3999
9	0,14892	0,1489	0,57949	0,5795
10	0,14195	0,1419	0,52584	0,5258

11	0,14178	0,1418	0,52526	0,5253
12	0,13951	0,1395	0,54061	0,5406
13	0,12961	0,1296	0,50432	0,5043
14	0,6131	0,6131	0,74802	0,7480
15	1,2453	1,2453	1,3242	1,3242
16	2,7847	2,7847	2,8355	2,8355
17	2,1274	2,1274	2,1881	2,1881
18	0,79341	0,7934	0,89959	0,8996
19	1,762	1,762	1,8278	1,8278
20	0,60117	0,6012	0,73421	0,7342
21	0,58663	0,5866	0,71734	0,7173

A tabela 15 mostra que existe uma boa correspondência entre os resultados fornecidos pelos dois programas. De acordo com a recomendação do ONS, que se aplica ao caso, os níveis de DTT superaram o limite nas barras 2, 3 e 5, e, com relação aos valores de DIT_7 , observa-se que houve inconformidade nas barras 1 a 5 e 14 a 19. Assim, torna-se evidente a necessidade da inserção de um filtro no sistema.

7.2.4 Projeto de Filtros Harmônicos Passivos Sintonizados

Em decorrência das características do sistema analisado, optou-se por realizar o projeto do filtro harmônico passivo sintonizado na ordem 7 pelo Método do Lugar Geométrico, com o intuito prioritário de reduzir as distorções harmônicas. O projeto foi feito para o filtro ser instalado na barra 4 (34,5 kV), com o objetivo de maximizar a eficiência de filtragem, uma vez que a injeção de correntes harmônicas ocorre nesta mesma barra.

Como comentado anteriormente, o método do Lugar Geométrico é indicado para sistemas de transmissão de energia, os quais sofrem frequentes variações de configuração e condições de carregamento. Para aplicá-lo, é necessário encontrar a região do plano complexo que abrange os valores de impedância que o sistema pode assumir considerando a análise de contingências. Nesse sentido, a figura 10 mostra o lugar geométrico das impedâncias vistas pela barra 4 em diferentes condições de operação e para valores de frequência variando até a ordem harmônica 50. A partir dos estudos de contingências, cujos resultados foram sintetizados na figura 10, concluiu-se que o ângulo máximo de variação das impedâncias harmônicas neste caso foi de $88,9561^{\circ}$.

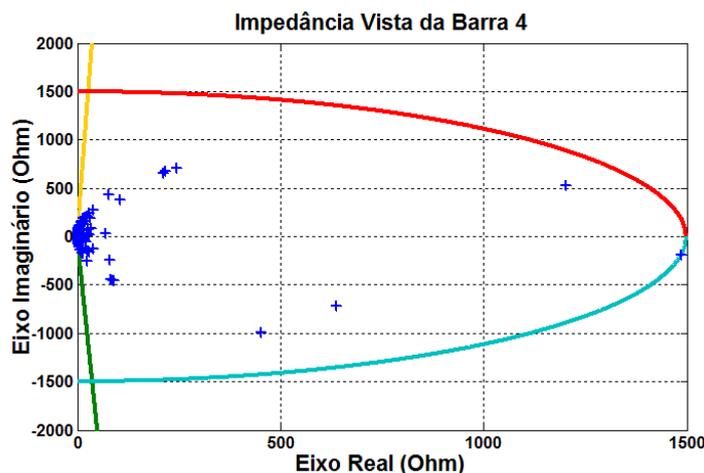


Figura 10: Lugar Geométrico das Impedâncias Vistas pela Barra 4

Ainda como dado de entrada para o projeto do filtro de ordem 7, foi considerado um desvio equivalente de frequência do sistema de 10% e definiu-se que o máximo valor permitido para a DIT_7 na barra 4 após a instalação do filtro seria 0,75%. Com base em tais premissas, o programa mostrou como resultado inicial os parâmetros de um filtro cujo valor de potência reativa capacitiva era de 4,5465 MVar. Então, foi solicitada a execução de novos cálculos que levassem em consideração a instalação de um banco de capacitores de potência 4,8 MVar (valor comercialmente disponível para o nível de tensão de 34,5 kV mais próximo de 4,5465 MVar). Assim, um novo projeto foi feito e seus resultados são mostrados na tabela 16.

Tabela 16: Dados Fornecidos Após o Projeto dos Filtros

Variável do Projeto	Valor fornecido
Resistência do Filtro (Ω)	6,9569
Indutância do Filtro (H)	$13,424 \cdot 10^{-3}$
Capacitância do Filtro (F)	$10,697 \cdot 10^{-6}$
Potência Reativa Trifásica Capacitiva (MVA)	4,8
Tensão Nominal do Capacitor (kV)	19,9186
Fator de Qualidade do Filtro	5,0919

7.2.5 Resultados Finais

A tabela 17 mostra novos valores de distorções nas barras após a inserção do filtro.

Tabela 17: Penetração Harmônica após a Adição do Filtro

Barra	DIT_7	DTT
1	0,16301	0,39616
2	0,23472	0,51034
3	0,22124	0,4742
4	0,33626	0,66867
5	0,29125	1,0077
6	0,019489	0,43776
7	0,021618	0,52915
8	0,019507	0,43833

9	0,022621	0,60876
10	0,021561	0,55097
11	0,021535	0,55039
12	0,021191	0,56399
13	0,019687	0,52713
14	0,093126	0,53265
15	0,18916	0,60433
16	0,42298	0,82353
17	0,32313	0,74531
18	0,12051	0,54547
19	0,26763	0,6864
20	0,091313	0,52373
21	0,089105	0,51278

Observa-se que os resultados foram satisfatórios, uma vez que os níveis de DIT_7 foram substancialmente diminuídos, permitindo que em todo o sistema os parâmetros relacionados às distorções harmônicas ficassem abaixo dos limites estabelecidos pelo ONS. A figura 11 apresenta o módulo da impedância vista pela barra 4 em função da frequência antes (linha contínua de cor vermelha) e após (linha tracejada de cor preta) a instalação do filtro.

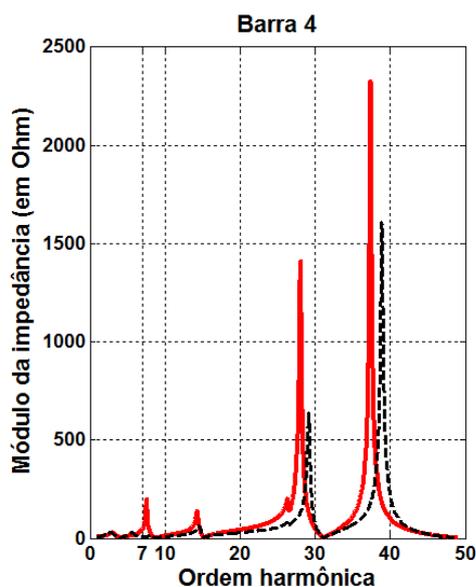


Figura 11: Impedância Vista pela Barra 4 em Função da Frequência

Como mostrado na figura 11, a inserção do filtro ocasionou uma mudança das frequências de ressonância paralela. Este fato não trouxe consequências negativas, pois as correntes das frequências em questão são muito pequenas ou inexistentes.

Se, por outro lado, em alguma barra, o aumento dos valores da impedância em determinadas ordens for expressivo e, ao mesmo tempo, as correntes harmônicas dessas ordens forem elevadas, os valores de distorções harmônicas de tensão irão aumentar e poderão ultrapassar os limites recomendados. Nestes casos, uma possibilidade seria a

instalação de novos filtros, cabendo esta análise ao projetista, com auxílio do aplicativo desenvolvido.

Como opção final de cálculo, o programa permite ainda que seja refeito o cálculo de fluxo de potência, considerando os efeitos da instalação do filtro. Neste caso, é possível perceber que o valor da tensão fundamental subiu nas barras PQ do sistema, uma vez que na frequência fundamental, os filtros apresentam reatância capacitiva e, assim, podem suprir reativos para o sistema.

8. Conclusões

Este trabalho procurou abordar os aspectos envolvidos na elaboração de um aplicativo computacional, programado no software Matlab. Primeiramente foi feita a fundamentação teórica sobre os assuntos utilizados durante o desenvolvimento do trabalho e, em seguida, foi explicada a estrutura de organização da programação. Por último, foram feitos dois estudos de casos de características diferentes, a fim de ilustrar a utilização do programa como uma ferramenta útil à análise de sistemas elétricos. As respostas fornecidas pelo programa desenvolvido para o cálculo de fluxo de potência, estudo de penetração harmônica e projeto de filtros puderam ser comparados com os softwares *PQF* e *HarmZs*, sendo que observou-se uma boa correspondência entre os resultados.

No que tange ao projeto de filtros, as possibilidades de utilização do Método Convencional ou do Método do Lugar Geométrico com o intuito prioritário de reduzir as distorções harmônicas ou melhorar o fator de potência permitem a realização do dimensionamento de filtros para uma variada gama de situações.

Diante do que foi exposto, considera-se que o trabalho realizado tenha contribuído para o tema no qual está inserido, pois o programa criado é capaz de unir diferentes análises importantes ao estudo de sistemas elétricos nas frequências fundamental e múltiplas inteiras da fundamental. O aplicativo desenvolvido apresenta-se como uma ferramenta útil, visto que os softwares comercialmente disponíveis geralmente não integram todas as funcionalidades descritas, principalmente no que se refere ao projeto de filtros. Como mostrado, o programa leva em consideração o método e o objetivo apropriados para cada sistema analisado.

Como trabalhos futuros, existe a possibilidade de buscar meios de deixar a interface do programa mais intuitiva e prática, facilitando a entrada de dados. Além disso, também há a

ideia de procurar implementar um algoritmo que vise encontrar a localização ótima de inserção de filtros, dadas as características de determinado sistema elétrico.

9. Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, 2011. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_4.pdf>. Acesso em: 10/09/13.

BARBOSA, A. S. “Fluxo de Potência em Sistemas de Distribuição: Aplicações Práticas”. Tese de Mestrado em Engenharia Elétrica apresentada à Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande – PB, 1995.

CORREIA, P. J. F. O impacto dos problemas de qualidade da energia em instalações elétricas – o caso particular das perturbações harmônicas, 2007. Disponível em: <http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/paulocorreia/index_ficheiros/investiga%C3%A7%C3%A3o_ficheiros/harmonicas.pdf>. Acesso em: 29/04/2013.

ELETOBRAS. HarmZs, <<http://www.harmzs.cepel.br>>. Versão 1.9.2-Set11. Rio de Janeiro, 2011.

GRAVENA, J. L. J. CAVAGNOLI, L. C. “Cálculo de Fluxo de Potência na Distribuição com Rotação de Eixos”. Trabalho de Graduação apresentado à Universidade Federal do Paraná. Curitiba – PR, 2011.

GUIMARÃES, G. C. Apostila sobre Estudo de Fluxo de Carga de Sistemas Elétricos de Potência. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica. Uberlândia - MG, 2012.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS – IEEE. Standard 18-2002. IEEE Standard for shunt power capacitors, 15 de Outubro de 2002.

ISONI, M. A moderna efficientização energética e seus possíveis efeitos sobre o desempenho operacional de equipamentos e instalações elétricas. Apostila de revisão de conceitos gerais – Distorções Harmônicas. Belo Horizonte, MG, 2001.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional – 2012. Resultados Preliminares, ano base 2011. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2012.pdf>. Acesso em: 10/06/13.

NASCIMENTO, R. P. Propostas de Procedimentos para Projetar Filtros Harmônicos a partir de um Programa de Penetração Harmônica, incluindo Cálculos de Desempenho e de Suportabilidade. Tese de Mestrado em Engenharia Elétrica apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia – MG, 2007.

NIQUINI, F. M. M. “Modelagem do elo de corrente contínua para análise harmônica utilizando o método de injeção de correntes trifásico harmônico com solução iterativa”. Tese de Mestrado em Engenharia Elétrica apresentada à Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora – MG, 2009.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA – ONS, Procedimentos de Rede - Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e de seus componentes, Nov. 2011.

QUALITY ENGENHARIA E SISTEMAS – PQF, 2011, <<http://www.qes.com.br>>. Versão Educacional – 7.0.1.84.

RESENDE, J. W. Harmônicos em sistemas elétricos. Apostila da disciplina Qualidade da energia I: Análises e soluções. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia - MG, 2006.

TEIXEIRA, D. A. “Análise de Distorções Harmônicas – Estudo de Caso de um Sistema Industrial”. Tese de Mestrado em Engenharia Elétrica apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte – MG, 2009.