

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JOÃO VÍTOR DE LARA SILVA

**ESTUDO DE FLUXO DE POTÊNCIA HARMÔNICO EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2017

JOÃO VÍTOR DE LARA SILVA

**ESTUDO DE FLUXO DE POTÊNCIA HARMÔNICO EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Engenharia Elétrica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Murilo da Silva

CORNÉLIO PROCÓPIO
2017



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

João Vítor de Lara Silva

Estudo de fluxo de potência harmônico em sistema de distribuição de energia elétrica

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 10:20hs do dia 24/11/2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Murilo da Silva - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Silvio Aparecido de Souza - (Membro)

Prof(a). Me(a). João Cesar de Paula Salve - (Membro)

A Deus

Aos meus pais

À memória de Inayê Aparecida da Silva Vieira, minha sobrinha.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida.

Em especial aos meus pais, Maria de Fátima Cândida de Lara e Antônio Júlio da Silva que, mesmo diante das dificuldades zelaram pela minha educação e orientação, pelo amor incondicional a mim dedicado e o apoio nos momentos difíceis da minha formação.

À minha esposa Joselma Aparecida Sebastião por estar sempre presente e me apoiando em todos os momentos dessa caminhada.

À minha irmã Amanda Aparecida da Silva e aos meus sobrinhos Iago da Silva Vieira, João Gabriel da Silva Oliva e Maria Clara da Silva Oliva.

Ao professor Murilo da Silva pela amizade, paciência e oportunidade oferecida, por ter confiado a mim o desenvolvimento deste trabalho, pela orientação competente e segura.

Aos professores João Cesar de Paula Salve e Silvio Aparecido de Souza pela participação nas bancas e pelos comentários e observações pertinentes, fundamentais para o aperfeiçoamento do trabalho.

Ao corpo docente do Curso de Graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

À CERAL – Cooperativa de Eletrificação Rural de Arapoti - PR., na pessoa do Engenheiro Evandro Terra Júnior, pela oportunidade e incentivo durante o meu estágio.

Agradeço aos meus amigos, pelo auxílio nos momentos difíceis e também por compartilhar de uma fase tão importante na minha vida.

Enfim, a minha gratidão a todos por possibilitarem esta experiência desafiadora, enriquecedora, gratificante e de extrema importância para o meu crescimento profissional e realização pessoal.

“Bom mesmo é ir à luta com determinação, abraçar a vida e viver com paixão, perder com classe e viver com ousadia, pois o triunfo pertence a quem se atreve, e a vida é muito bela para ser insignificante”.

(Charles Chaplin)

RESUMO

SILVA, João Vítor de L. **ESTUDO DE FLUXO DE POTÊNCIA HARMÔNICO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.** 2017. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

A presença de dispositivos que utilizam eletrônica de potência dentro do seu esquema de funcionamento teve um aumento significativo nos últimos anos. Porém, o uso de tais dispositivos, afeta diretamente a qualidade da energia elétrica no que diz respeito da injeção de correntes harmônicas em sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Este trabalho de conclusão de curso, tem como objetivo principal avaliar as grandezas elétricas de um sistema elétrico na presença de frequências diferentes da frequência fundamental, bem como, levantar indicadores de distorção harmônica. Para isto utilizou-se do estudo e programação *de um* fluxo de potência harmônico utilizando-se do software MatLab e também o software *ATPDraw* para validar os resultados.

Palavras-chave: Distribuição de Energia Elétrica, Sistema Radial, Fluxo de Potência Harmônico, Qualidade de Energia Elétrica, Distorção Harmônica.

ABSTRACT

SILVA, João Vítor de L. **ESTUDO DE FLUXO DE POTÊNCIA HARMÔNICO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.** 2017. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

The presence of devices that use power electronics within their operating scheme has increased significantly in recent years. However, the use of such devices directly affects the quality of electric power with respect to the injection of harmonic currents in Electric Power Distribution systems. The main objective of this work is to evaluate the electrical magnitudes of an electric system in the presence of frequencies different from the fundamental frequency, as well as to raise indicators of harmonic distortion. For this purpose, we used the study and programming of a harmonic power flow using MatLab software and also the ATPDraw software to validate the results.

Keywords: Distribution of Electric Energy, Radial System, Harmonic Power Flow, Electric Power Quality, Harmonic Distortion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aumento de cargas eletrônicas instaladas nos EUA.....	14
Figura 2 - Representação de um sistema de distribuição radial.....	22
Figura 3 - Série de Fourier de uma forma de onda distorcida.	23
Figura 4 - Sistema radial de exemplo.....	29
Figura 5 - Sistema radial com injeção de corrente harmônica.....	35
Figura 6 - Sistema de 11 Barras.....	40
Figura 7 - Sistema de 11 Barras - ATPDraw	41
Figura 8 - Sistema de 11 Barras – Primeiro Caso.....	43
Figura 9 - Sistema de 11 Barras – Segundo Caso	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Potência das cargas.....	30
Tabela 2 - Impedância dos trechos	30
Tabela 3 - Corrente e tensão das cargas na primeira iteração.....	30
Tabela 4 - Somatório de corrente nos trechos	31
Tabela 5 - Tensão nas barras para primeira iteração.....	31
Tabela 6 - Comparação das tensões	31
Tabela 7 - Tensão nas barras para última iteração	32
Tabela 8 - Corrente Harmônica de 3ª ordem injetada nas Barras 3.....	35
Tabela 9 - Correntes harmônicas presente em cada trecho	36
Tabela 10 - Impedâncias dos trechos	36
Tabela 11 - Tensão harmônica de inicialização	36
Tabela 12 - Correntes harmônicas absorvidas pelas cargas	37
Tabela 13 - Somatório de corrente nos trechos	37
Tabela 14 - Tensão nas barras para primeira iteração.....	37
Tabela 15 - Comparação das tensões	38
Tabela 16 - Tensão nas barras para última iteração	38
Tabela 17 - Tensão fundamental e tensão harmônica - Exemplo	38
Tabela 18 - Dados do sistema de 11 barras	41
Tabela 19 - Resultado comparativo para as tensões - Sistema de 11 barras	42
Tabela 20 - Resultado comparativo para as correntes - Sistema de 11 barras.....	42
Tabela 21 - Correntes harmônicas injetadas na Barra 7	43
Tabela 22 - Tensões para a 3ª harmônica	44
Tabela 23 - Correntes para a 3ª harmônica	44
Tabela 24 - Tensões para a 5ª harmônica	45
Tabela 25 - Correntes para a 5ª harmônica	45
Tabela 26 - Tensões para a 7ª harmônica	46
Tabela 27 - Correntes para a 7ª harmônica	46
Tabela 28 - Tensão Fundamental e Eficaz - Primeiro caso.....	47
Tabela 29 - Corrente Fundamental e Eficaz - Primeiro caso.....	48
Tabela 30 - Distorções Harmônicas de Tensão - Primeiro caso	49
Tabela 31 - Distorções Harmônicas de Correntes - Primeiro caso.....	50
Tabela 32 - Correntes harmônicas injetadas.....	52

Tabela 33 - Tensões para a 3ª harmônica	54
Tabela 34 - Correntes para a 3ª harmônica	54
Tabela 35 - Tensões para a 5ª harmônica	55
Tabela 36 - Correntes para a 5ª harmônica	55
Tabela 37 - Tensões para a 7ª harmônica	56
Tabela 38 - Correntes para a 7ª harmônica	56
Tabela 39 - Tensão Fundamental e Eficaz - Segundo caso.....	57
Tabela 40 - Corrente Fundamental e Eficaz - Segundo caso.....	58
Tabela 41 - Distorções Harmônicas de Tensão - Segundo caso	59
Tabela 42 - Distorções Harmônicas de Corrente - Segundo caso	60

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Aspectos Gerais	13
1.2 Identificação do Problema	15
1.3 Justificativa	15
1.4 Objetivos	16
1.4.1 Objetivo Geral	16
1.4.2 Objetivos Específicos	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 Modelagem de Carga	18
2.1.1 Cargas de Impedância Constante com a Tensão	19
2.2 Fluxo de Potência em Rede de Distribuição	20
2.2.1 Método de Varredura Direta/Inversa (<i>Backward/Forward</i>)	21
2.2.2.1 Método de Soma das Correntes	21
2.3 Indicadores de Distorção Harmônica	23
2.3.1 Valor Eficaz Verdadeiro	25
2.3.2 Distorção Harmônica Total de Tensão (<i>DHTV</i>) – IEEE Std. 1459-2010	26
2.3.3 Distorção Harmônica Total de Corrente (<i>DHTI</i>) – IEEE Std. 1459-2010	26
2.3.4 Distorção Harmônica Total Efetiva (<i>DHTE</i>)	27
2.3.5 Fator de Distorção Harmônica Individual (<i>DHI</i>)	27
2.3.6 Fator K – IEEE Std. 1100-2005	28
3 MÉTODO DE PESQUISA	29
3.1 Implementação do Fluxo De Potência	29
3.1.1 Fluxo de Potência Fundamental	29
3.1.2 Fluxo de Potência Harmônico em Rede De Distribuição	32
3.2 Modelagem do Problema	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1 Sistema de Potência Analisado	40
4.2 Primeiro Caso – Injeção de Correntes Harmônicas em uma Barra de Carga do Sistema	43
4.2.1 Injeção de corrente harmônica na barra 7	43
4.2.2 Valores de tensão e correntes para a harmônica de 3ª ordem	44
4.2.3 Valores de tensão e correntes para a harmônica de 5ª ordem	45
4.2.4 Valores de tensão e correntes para a harmônica de 7ª ordem	46
4.2.5 Valores eficazes de tensão e corrente para injeção na barra 7	47
4.2.6 Distorção harmônica total (<i>DHTv</i>), efetiva (<i>DHTEv</i>) e individual (<i>DHIV</i>) de tensão	49
4.2.7 Distorção harmônica total (<i>DHTi</i>), efetiva (<i>DHTEi</i>) e individual (<i>DHII</i>) de corrente	50
4.2.8 Fator K	51
4.3 Segundo Caso – Injeção de Correntes Harmônicas em Todas as Barras de Carga do Sistema	52
4.3.1 Valores de tensão e correntes para a harmônica de 3ª ordem	54
4.3.2 Valores de tensão e correntes para a harmônica de 5ª ordem	55
4.3.3 Valores de tensão e correntes para a harmônica de 7ª ordem	56
4.3.4 Valores eficazes de tensão e corrente para injeção em todas as barras de carga	57

4.3.5 Distorção harmônica total ($DHTv$), efetiva ($DHTEv$) e individual ($DHIv$) de tensão.....	59
4.3.6 Distorção harmônica total ($DHTi$) e efetiva ($DHTEi$) de corrente.....	60
4.3.7 Fator K.....	61
5 CONCLUSÃO	62
PROPOSTA DE CONTINUIDADE DE PESQUISA	63
REFERÊNCIAS.....	64

1 INTRODUÇÃO

1.1 Aspectos Gerais

Nos últimos anos, com o advento da eletrônica de potência, houve um aumento significativo da utilização de cargas não lineares, sendo estas as principais responsáveis por ocasionar distorções nas formas de onda de correntes que geram distorções nas formas de onda das tensões, corroborando para reduzir a eficiência do sistema elétrico, além de produzir alguns efeitos indesejados, tais como: mau funcionamento em circuitos eletrônicos; vibrações, ruídos e fadigas em motores, transformadores e reatores, diminuindo assim a vida útil desses equipamentos (VARIZ et al, 2008).

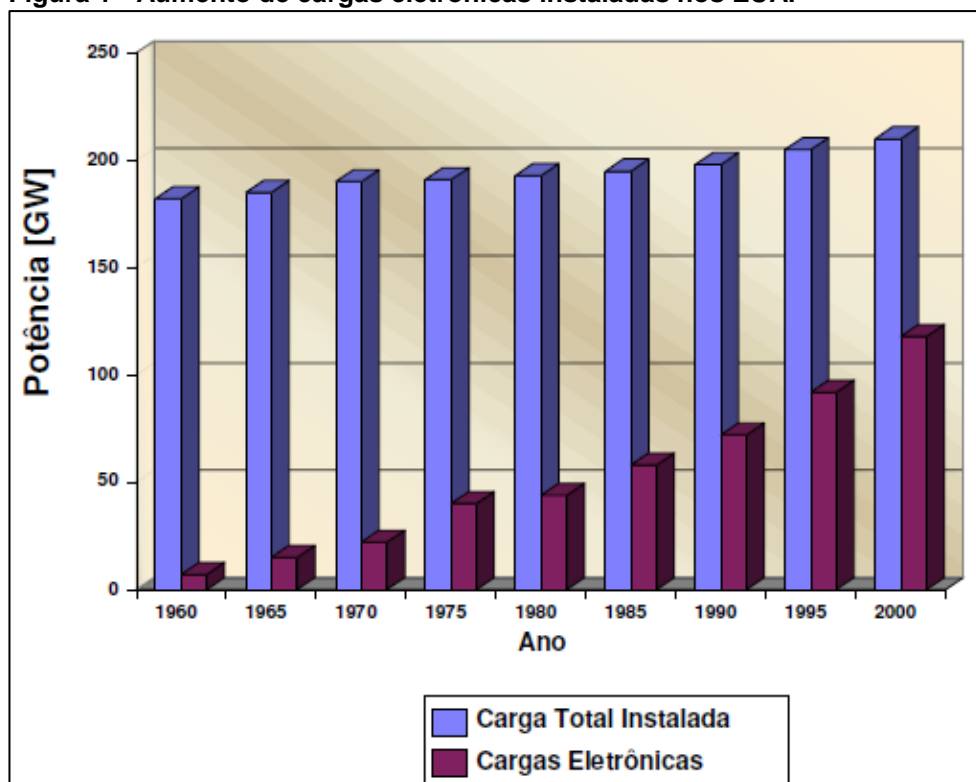
Cargas eletrônicas estão ocupando cada vez mais a fração de cargas instaladas no sistema de distribuição de energia elétrica. Coincidentemente, há uma maior utilização de capacitores para a correção do nível de tensão no sistema de distribuição. Estes dois fatores podem apresentar condições de funcionamento deficientes devido a elevados níveis de propagação de harmônicas no sistema de distribuição de energia elétrica (WILLIAMS; BROWNFIELD; DUFFUS, 1993).

A Figura 1, ilustra um levantamento realizado nos EUA, com relação as cargas instaladas num período de 1980 até 2000, como podemos perceber as cargas eletrônicas representam cerca de 50% do total de cargas instaladas.

No passado os problemas de qualidade de energia não eram tão relevantes, pois os equipamentos não possuíam alta sensibilidade a variações de tensão ou frequência. Mas atualmente a qualidade de energia vem apresentando uma crescente preocupação devido, principalmente, as questões financeiras.

De modo geral, define-se qualidade de energia elétrica, como uma condição do sinal de tensão e corrente que permite que equipamentos, processos, instalações elétricas e sistemas elétricos operarem de forma satisfatória, sem prejuízo de desempenho e redução da vida útil.

Figura 1 - Aumento de cargas eletrônicas instaladas nos EUA.



Fonte: Garcia (2008)

Segundo o PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), módulo 8, revisão 8, em vigência desde 01 de janeiro de 2017, os principais distúrbios relacionados a qualidade de energia elétrica são:

- Efeitos transitórios;
- Variação de tensão de longa duração;
- Variação de tensão de curta duração;
- Desequilíbrio de tensão;
- Flutuação de tensão;
- Variação na frequência;
- Distorção da forma de onda.

Com isto, existem ainda, os prejuízos econômicos resultantes da ocorrência destes distúrbios, contribuindo, desta forma, para um aumento da

importância de estudos ligados a qualidade da energia elétrica, tanto para os órgãos do sistema elétrico quanto para os próprios consumidores.

1.2 Identificação do Problema

Estudos sobre harmônicos em sistema de distribuição de energia elétrica contribuem para a investigação do impacto de correntes não-lineares no sistema elétrico, possibilitando estimar indicadores de qualidade de energia elétrica, tais como: nível de distorção harmônica total de tensão (DHT_V) e distorção harmônica total de corrente (DHT_I), bem como, para determinar condições de ressonância e requisitos de filtragem.

Dado o exposto, este trabalho dedica-se ao estudo, implementação e simulação do fluxo de potência considerando as componentes harmônicas em sistemas de distribuição de energia elétrica. A implementação e simulação será realizada através do software *MatLab*®. O cálculo do fluxo de potência harmônico nos fornecerá uma ferramenta para uma análise mais precisa no tocante a operação ou planejamento da expansão do sistema de distribuição, bem como, fornecerá subsídio para análise de situações de ressonância no sistema e necessidade de correção dos níveis de harmônicos.

1.3 Justificativa

A crescente inserção de cargas não lineares faz com que o sistema de distribuição de energia elétrica opere cada vez mais carregado. A fim de ter plenamente ideia deste novo cenário, faz-se necessário um estudo de fluxo de potência que possa fornecer resultados cada vez mais precisos.

Os métodos de resolução de fluxo de potência são resolvidos considerando geralmente a frequência fundamental (60 Hz - Brasil), desconsiderando em grande parte dos estudos a influência de cargas não lineares. Desse modo, a análise do fluxo de potência convencional e harmônico, possibilitará um estudo mais preciso da real condição do sistema elétrico de distribuição. As informações adicionais propiciarão tomadas de ações mais assertivas quanto ao planejamento para expansão e operação do sistema

elétrico, assim como, subsidiará informações para controle e correção dos níveis harmônicos, sejam por parte da concessionária ou consumidor.

1.4 Objetivos

Nesta seção são apresentados o objetivo geral desta obra, bem como, a descrição das especificidades da proposta, elencando os objetivos específicos deste Trabalho de Conclusão de Curso.

1.4.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral o estudo de fluxo de potência harmônico em sistemas de distribuição de energia elétrica.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Realizar um estudo bibliográfico sobre o sistema de distribuição de energia, harmônicos, normatização, e fluxo de potência em sistemas de distribuição;
- Estudar os algoritmos de fluxo de potência convencional para sistemas distribuição; Modelagem de cargas; Implementação de um algoritmo de fluxo de potência convencional;
- Estudar a modelagem das cargas harmônicas e técnicas de fluxo de carga considerando as harmônicas;
- Realizar a programação do método do fluxo de potência harmônico por meio do software *MatLab®*;
- Apresentar grandezas elétricas conforme normas internacionais;
- Por fim, avaliar e discutir os resultados e redigir o trabalho final.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Até o final da década de 40, a análise de fluxo de potência era muito trabalhosa, pois se utilizavam de modelos reduzidos dos sistemas de potência, sendo este método conhecido como analisadores de rede. (Canossa, 2007).

Kagan et al (2005) e Mansour (2009), descrevem que o estudo do fluxo de potência da rede elétrica é a resolução de um circuito elétrico que representa a mesma para o qual se dispõe da topologia, com suas constantes elétricas e seus elementos, demandas de carga e das tensões nos geradores.

O cálculo do fluxo de potência tem por objetivo encontrar o estado e as condições operacionais de uma rede em regime permanente, possibilitando, desse modo, uma avaliação de desempenho da rede, fornecendo parâmetros para o planejamento e uma tomada de decisão segura (ROSA, 2014). Para Puger (2013), os parâmetros são determinados através de equações e inequações não lineares correspondentes às leis de Kirchhoff.

No início dos anos 60, foram desenvolvidos os primeiros estudos conhecidos como fluxo de potência com a utilização do método de Gauss-Seidel, sendo que o mesmo não é muito utilizado, pois demanda de grande esforço computacional devido ao elevado número de iterações (ROSA, 2014).

Posteriormente, surgiram outros métodos. Como o de Newton-Raphson, sendo este considerado mais rápido e que demanda uma quantidade menor de memória (CANOSSA, 2007). Para Rosa (2014), o método de Newton-Raphson é uns dos métodos mais utilizados até os dias atuais, pois apresenta eficiência e uma rápida convergência.

Shirmohammadi et al (1988) desenvolveram o método conhecido como (*Backward/Forward*), varredura reversa/direta, de soma das correntes para o cálculo do fluxo de potência em sistemas puramente radiais, embora o mesmo possa ser adaptado e aplicado em sistemas fracamente malhados.

Cespedes (1990), propôs o método de somas de potências para solução do fluxo de carga nas redes de distribuição de energia elétrica. Este método baseia-se na utilização apenas do módulo da tensão, eliminando-se o ângulo de fase da mesma. Cespedes (1990), salienta ainda que, o ângulo de fase da tensão não é importante na maioria dos estudos relacionados à

distribuição, pois considera que a diferenças de tensão entre ângulos de fase em um alimentador não excedam alguns graus.

Hiyama, Hammam e Ortmeyer (1989), propuseram um método para análise de níveis de harmônicas causada por fontes harmônicas distribuídas ao longo de alimentadores do sistema de distribuição de energia elétrica. O método pode ser usado para completar as medições harmônicas e para fornecer informações sobre a propagação harmônica.

Variz et al (2008), utilizou-se do método de Newton-Raphson, baseando-se em equações de injeções de corrente, para o cálculo do fluxo de potência harmônico em sistemas elétricos equilibrados e desequilibrados. Deste modo, tornou-se possível a representação de interações entre componentes harmônicas de diferentes frequências.

Archundia-Aranda e Mota-Palomino (2010), apresentaram um método baseado no algoritmo (*Backward/Forward*) para a resolução do fluxo de potência harmônico em sistemas de distribuição radiais, com o objetivo de obter resultados semelhantes ao método de equações de injeção de correntes utilizados para estudos relacionados a harmônicos.

2.1 Modelagem de Carga

As cargas em sistema elétrico podem ser classificadas de acordo com as características específicas que cada tipo de carga possui. Tais características dependem da localização geográfica, o uso final da energia, do nível de tensão de suprimento, entre outras. Outro aspecto importante para a classificação das cargas leva em consideração a sensibilidade das mesmas com relação a qualidade de energia elétrica. Desta forma, as cargas podem ser mais ou menos susceptíveis a fenômenos permanentes ou transitórios, relativos a forma de onda da tensão. Por outro lado, sabe-se que a potência absorvida por uma carga pode variar dependendo da magnitude e da frequência da tensão (KAGAN et al, 2005).

Dentre os modelos existentes na literatura para modelagem de cargas, neste trabalho iremos utilizar o modelo de carga com a impedância constante com a tensão.

2.1.1 Cargas de Impedância Constante com a Tensão

No modelo de carga com impedância constante, as impedâncias se mantêm constante, sendo obtida através de potências ativa e reativa absorvida pela carga quando alimentada por uma tensão nominal ou de referência. Kagan (2005).

tal que:

$$\bar{S}_{NF} = S_{NF} \angle \varphi = P_{NF} + jQ_{NF} \quad (1)$$

Desta forma, a potência absorvida pela carga quando suprida por uma tensão nominal $\dot{V}_{NF} = V_{NF} \angle \theta$, resulta para a impedância:

$$\bar{Z}_{const} = \frac{V_{NF}^2}{\bar{S}_{NF}^*} = \frac{V_{NF}^2}{S_{NF}} \angle \varphi = P + jQ \quad (2)$$

Em que:

$$P = \frac{V_{NF}^2}{S_{NF}} \cos \varphi \text{ e } jQ = \frac{V_{NF}^2}{S_{NF}} \text{sen } \varphi$$

Para qualquer valor de tensão $\dot{V}_F = V_F \angle \theta_1$ aplicada à carga, a potência absorvida pela carga será dada por:

$$\bar{S}_F = \dot{V}_F I^* = \dot{V}_F \frac{V_F^*}{\bar{Z}_{const}} = \frac{V_F^2}{\frac{V_{NF}^2}{\bar{S}_{NF}}} = \left(\frac{V_F}{V_{NF}} \right)^2 \bar{S}_{NF} \quad (3)$$

Ou seja, a potência absorvida pela carga varia quadraticamente com a tensão a ela aplicada.

Desta forma, para qualquer valor de tensão $\dot{V}_F = V_F \angle \theta_1$ aplicada à carga, a corrente absorvida pela carga I_{carga} é dada por:

$$I_{carga} = \frac{V_F \angle \theta_1}{\bar{Z}_{const}} \quad (4)$$

2.2 Fluxo de Potência em Rede de Distribuição

Para o estudo de fluxo de potência em sistemas de transmissão existem diversos métodos convencionais disponíveis, tais como: os métodos de Gauss-Seidel, Newton Raphson e Desacoplado Rápido. Porém, quando estes métodos são aplicados a sistemas de distribuição os mesmos não apresentam uma convergência satisfatória.

Um sistema de distribuição de energia elétrica apresenta certas características distintas que os tornam diferente e um tanto difícil de analisar, em comparação com um sistema de transmissão. Tais características são: Cargas desequilibradas, linhas não transpostas, monofásicos e bifásicos laterais são alguns deles (BHUTAD; KULKARNI; KHAPARDE, 2003).

Para Mansour (2009) e Carvalho (2006), o fato dos métodos convencionais não apresentarem resultados satisfatório em sistemas de distribuição de energia elétrica, sendo este tipicamente radial, é devido as características peculiares do mesmo, tais como: baixa relação X/R (reatância/resistência), trechos com impedâncias relativamente baixas associados com trechos com valor de impedâncias relativamente altas.

De acordo com Mansour (2009) o método desenvolvido por Shirmohammadi et al (1998), é uns dos métodos mais apropriados para o cálculo do fluxo de potência em rede de distribuição, pois o método apresenta um entendimento conceitual simples, apresentando resultados eficientes quando aplicado em sistemas radiais.

Souza et al (2014), salientam que a aplicação do método desenvolvido por Shirmohammadi et al (1988) por não trabalhar com inversão de matrizes, faz com que a convergência seja alcançada com um número menor de iterações, desse modo reduzindo-se o esforço computacional.

No subcapítulo a seguir será apresentado o método desenvolvido por Shirmohammadi et al (1998) para a resolução do fluxo de potência em sistemas de distribuição.

2.2.1 Método de Varredura Direta/Inversa (*Backward/Forward*)

Este método consiste na resolução do fluxo de potência em duas etapas, na primeira etapa realiza-se uma varredura inversa ou *Backward*, calculando-se as correntes ou potências de todos os trechos nas linhas, iniciando-se esta varredura das barras finais em direção à barra de referência. Nesta etapa, assume-se um valor inicial para as tensões nodais nas barras. Na segunda etapa, realiza-se uma varredura direta (*Forward*), onde são realizados os cálculos para os novos valores de tensões nas barras, essa varredura começa da barra da subestação e vai em direção às barras finais do sistema em estudo. As duas etapas são realizadas até que um critério de convergência seja satisfeito.

2.2.2.1 Método de Soma das Correntes

Primeiramente deve-se especificar um valor de tensão para a barra inicial (nó raiz) e assumir como referência para as demais barras do sistema. Realiza-se o cálculo para as correntes de todas as barras de carga, através da equação a seguir:

$$\dot{I}_i^{(k)} = \left(\frac{S_i}{\dot{V}_i^{(k-1)}} \right)^* - \dot{Y}_i^{sh} \dot{V}_i^{(k-1)}, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

tal que:

O símbolo $(.)^*$ indica o conjugado do valor complexo entre parênteses;

$\dot{I}_i^{(k)}$ – Corrente demandada pela barra i , na iteração k ;

S_i – Potência complexa especificada na barra i ;

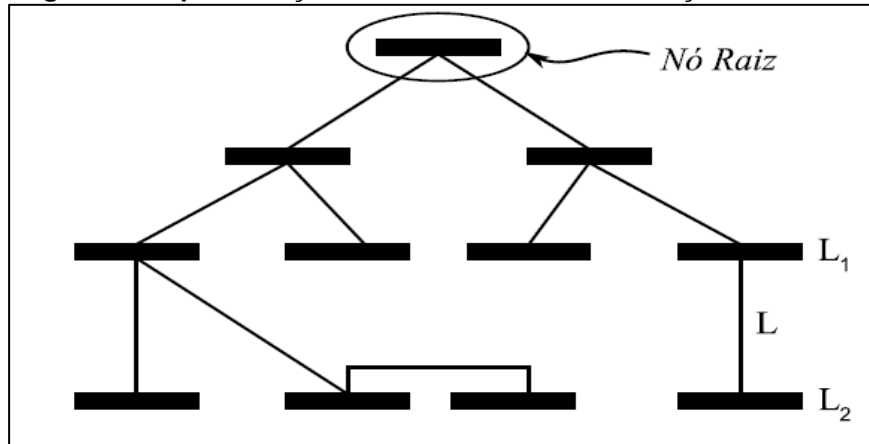
$\dot{V}_i^{(k-1)}$ – Tensão na barra i , calculada durante $(k - 1)$ -ésima iteração;

\dot{Y}_i^{sh} – Soma de todos os elementos *shunt* da barra i .

Backward: Partindo-se das barras extremas com direção a barra da subestação (representado pelo nó raiz), calcula-se a corrente $\dot{I}_L^{(k)}$ que circula em

cada trecho L que conecta a uma barra L_2 e a sua antecessora L_1 , como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Representação de um sistema de distribuição radial



Fonte: Mansour (2009, p. 84)

$$j_L^{(k)} = \sum(\text{correntes que saem do nó } L_2) \quad (6)$$

tal que:

$L = l, l - 1, \dots, 1$ e $l = \text{número de trechos que o sistema possui}$

Forward: Partindo-se da barra da subestação (representado pelo nó raiz) e seguindo até as barras extremas, calcula-se as tensões em cada barra. Seja L a linha que liga uma barra L_2 à sua antecessora L_1 , a tensão em L_2 é calculada usando a atualização da tensão na iteração k de L_1 e o fluxo de corrente na linha L calculada no passo 3:

$$\dot{V}_{L_2}^{(k)} = \dot{V}_{L_1}^{(k)} - \dot{Z}_L j_L^{(k)}, L = 1, 2, 3, \dots, p \quad (7)$$

tal que:

$\dot{V}_L^{(k)}$ – Tensão calculada na barra L , na iteração (k) ;

$\dot{V}_L^{(k-1)}$ – Tensão calculada na barra L , na iteração $(k - 1)$;

\dot{Z}_L – Impedância série da linha L .

Repete-se os passos 2, 3 e 4 até que um critério de parada seja alcançado, utilizando-se da Eq. 4. Por exemplo, adota-se como critério de parada um coeficiente de tolerância ε e determina-se a maior diferença entre as tensões calculadas nas barras, caso a diferença entre a tensão calculada na iteração atual e a iteração anterior seja maior que o coeficiente de tolerância, repete-se os passos 2, 3 e 4, caso contrário encerra-se o processo iterativo.

$$\left| \dot{V}_L^{(k)} - \dot{V}_L^{(k-1)} \right| \leq \varepsilon \quad (8)$$

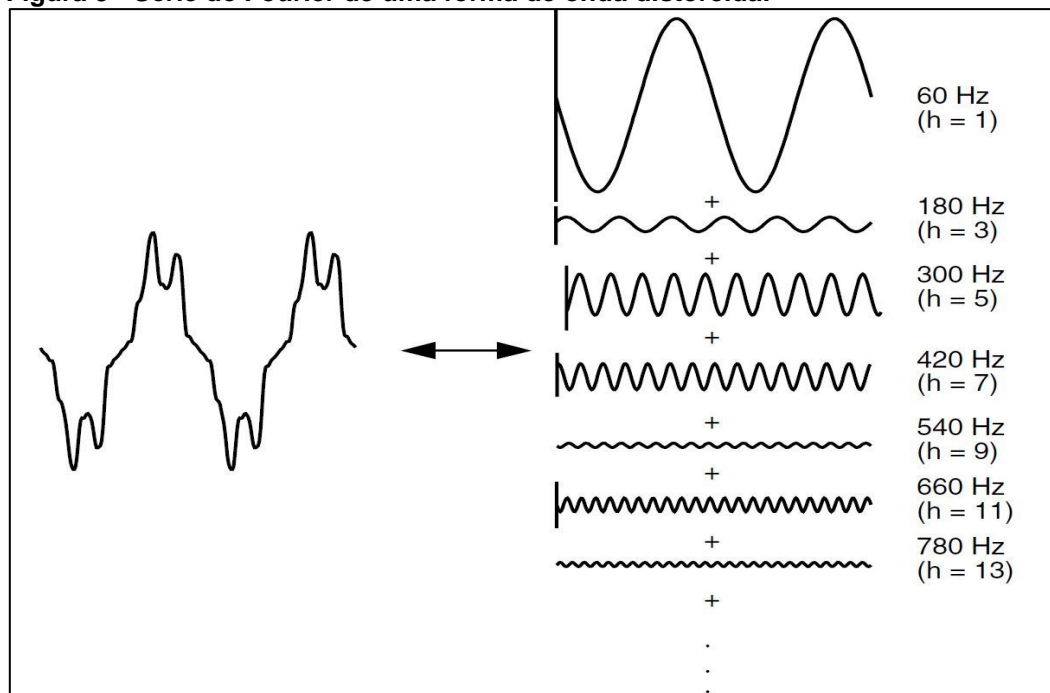
tal que:

ε – Valor da tolerância desejado.

2.3 Indicadores de Distorção Harmônica

Distorção harmônica é um termo utilizado para definir um sinal não puramente senoidal composto por componentes múltiplos inteiros da frequência fundamental Figura 3, causada por cargas não-lineares onde a corrente não é proporcional a tensão aplicada (DUGAN et al, 2012).

Figura 3 - Série de Fourier de uma forma de onda distorcida.



Fonte: DUGAN et al, 2012.

A crescente quantidade de acionamentos estáticos, fontes chaveadas e outros dispositivos eletrônicos nas plantas industriais contribuem para o aumento da distorção harmônica, deformando sinais de tensões e correntes.

Dentre as principais cargas responsáveis por gerar componentes harmônicas, (VIANNA, 2009) cita-se:

- Fornos a arco;
- Fornos de Indução;
- Máquinas de Solda e Pontideiras;
- Saturação de Transformadores;
- Conversores de Potência, etc.

Altos níveis de distorção harmônica em instalações podem causar problemas na rede elétrica como nos equipamentos instalados, fadiga acelerada de fios e cabos causada pelo aumento de tensão na rede, diminuição de vida útil de diversos equipamentos, proveniente do aumento da corrente eficaz devido a ressonância série, além do aparecimento de ressonância paralela entre capacitores para correção do fator de potência e o restante do sistema, podendo causar sérios danos ao sistema em consequência das sobretensões e sobrecorrentes (WEG, 2016).

Como os harmônicos causam problemas de qualidade de energia elétrica, desta forma, torna-se necessário a investigação de conteúdos harmônicos através de indicadores de distorção harmônicas, para que através da regulamentação vigente, verifique-se se os conteúdos harmônicos presentes no sistema estão dentro dos níveis máximos tolerados. Os indicadores de distorção harmônicos são definidos com o propósito de mensurar a conformidade senoidal da tensão e corrente.

2.3.1 Valor Eficaz Verdadeiro

O valor eficaz, ou *rms* (*Root mean square*), de uma onda periódica qualquer é definido como:

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} f^2(t) dt} \quad (9)$$

tal que:

$f(t)$ – Sinal periódico;

T – Período.

Substituindo $f(t)$ pela série trigonométrica de Fourier.

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{a_0^2}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} a_h^2 + \sum_{h=1}^{\infty} b_h^2 \right)} \quad (10)$$

Na forma complexa, temos:

$$F_{rms} = \sqrt{\left(c_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{h=1}^{\infty} c_h^2 \right)} \quad (11)$$

tal que:

a_h, b_h e c_h – São valores de pico.

Diante do exposto, o valor *rms* verdadeiro para uma onda de tensão e corrente periódicas não senoidais são calculados a seguir:

$$V_{rms} = \sqrt{V_{cc}^2 + \frac{1}{2} \sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} = \sqrt{V_{cc}^2 + \sum_{h=1}^{\infty} V_{rms,h}^2} \quad (12)$$

$$I_{rms} = \sqrt{I_{cc}^2 + \frac{1}{2} \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} = \sqrt{I_{cc}^2 + \sum_{h=1}^{\infty} I_{rms,h}^2} \quad (13)$$

2.3.2 Distorção Harmônica Total de Tensão (DHT_V) – IEEE Std. 1459-2010

$$DHT_V = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_{rms,1}^2}}{V_{rms,1}} = \frac{V_{rms,H}}{V_{rms,1}} \quad (14)$$

tal que:

V_{rms} – tensão *rms* verdadeira;

$V_{rms,1}$ – tensão *rms* fundamental;

$V_{rms,H}$ – tensão *rms* residual.

Assim:

$$V_{rms} = \sqrt{V_{rms,1}^2 (1 + DTH_V^2)} \quad (15)$$

2.3.3 Distorção Harmônica Total de Corrente (DHT_I) – IEEE Std. 1459-2010

$$DHT_I = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_{rms,1}^2}}{I_{rms,1}} = \frac{I_{rms,H}}{I_{rms,1}} \quad (16)$$

tal que:

I_{rms} – Corrente *rms* verdadeira;

$I_{rms,1}$ – Corrente *rms* fundamental;

$I_{rms,H}$ – Corrente *rms* residual.

Assim:

$$I_{rms} = \sqrt{I_{rms,1}^2 (1 + DTH_I^2)} \quad (17)$$

2.3.4 Distorção Harmônica Total Efetiva (*DHTE*)

O indicador de distorção harmônica total efetiva considera a relação entre o valor residual e o valor eficaz verdadeiro. Deste modo o valor de *DHTE* é considerado menos conservativo, visto que tende a ser menor que o *DHT*.

Desta forma, temos:

$$DHTE_V = \frac{V_{rms,H}}{V_{rms}} \quad (18)$$

$$DHTE_I = \frac{I_{rms,H}}{I_{rms}} \quad (19)$$

tal que:

V_{rms} e I_{rms} – Valores de tensão e corrente *rms* verdadeiros;

$V_{rms,H}$ e $I_{rms,H}$ – Valores de tensão e corrente residuais.

Para sinais com distorção harmônica menores do que 30%, os valores de *DHT* e *DHTE* são praticamente iguais.

2.3.5 Fator de Distorção Harmônica Individual (*DHI*)

O fator de distorção individual (*DHI*) é utilizado para quantificar a distorção harmônica individual de tensão e corrente. Desta forma, através da Eq. (18) é possível medir a relação entre componente harmônica *h* e a componente fundamental.

$$DHI = \frac{C_h}{C_1} \times 100\% \quad (20)$$

tal que:

C_h – Componente harmônica de tensão ou corrente de ordem *h*;

C_1 – Componente fundamental de tensão ou corrente.

2.3.6 Fator K – IEEE Std. 1100-2005

O *Fator K* é utilizado para se calcular o aumento do aquecimento nos enrolamentos de um transformador devido à circulação de correntes harmônicas. Dessa forma, se pelo transformador circular correntes harmônicas, o mesmo sofrerá um aquecimento adicional que poderá levá-lo a sofrer uma redução da sua vida útil ou avaria. Portanto, o *Fator K* é um coeficiente que descreve o calor adicional que ocorre num transformador que alimenta cargas não lineares (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

O cálculo do *Fator K* segundo a IEEE Std. 1100-2005 pode ser realizado através da seguinte expressão:

$$Fator\ K = \sum_{k=1}^N h^2 \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \quad (21)$$

tal que:

h – Ordem harmônica;

N – Maior ordem harmônica significativa;

$\frac{I_h}{I_1}$ – Relação entre a corrente *rms* da harmônica de ordem h e da corrente *rms* nominal da fundamental.

Transformadores convencionais destinados a alimentação de cargas lineares possuem um fator $K = 1$. Já transformadores com fator $K > 1$ são projetados para suportar diferentes níveis de distorções harmônicas.

Os transformadores de fator tipicamente encontrados no mercado são: $K = 4$; $K = 9$; $K = 13$; $K = 20$; $K = 30$; $K = 40$ e $K = 50$ (IEEE Std. 1100 - 2005).

É importante salientar que o número do fator K não indica linearidade na tolerância de circulação de harmônicos. Exemplo.

$K = 4$ Tem quatro vezes mais tolerância que o $K = 1$;

$K = 13$ Tem duas vezes a tolerância do $K = 4$;

$K = 30$ Tem duas vezes a tolerância do $K = 13$.

3 MÉTODO DE PESQUISA

Neste capítulo são apresentados os métodos e ferramentas que foram utilizados para o desenvolvimento do trabalho.

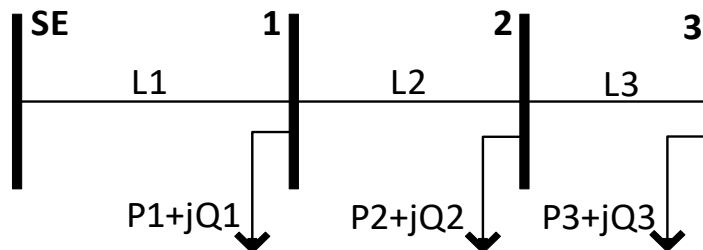
3.1 Implementação do Fluxo De Potência

O primeiro passo para o desenvolvimento do trabalho se deu com a implementação do algoritmo de Fluxo Potência, conforme proposto na subseção 2.2.2.1, pois o mesmo se faz necessário para a avaliação dos resultados com o sistema operando com a frequência fundamental, ou seja, 60 Hz. Os resultados obtidos do Fluxo Potência fundamental fornecem os valores de tensões e correntes, onde os valores de tensões são utilizados para dar início do segundo passo para a realização deste trabalho, que é a implementação do Fluxo Potência Harmônico.

3.1.1 Fluxo de Potência Fundamental

Na Figura 4, é apresentado um sistema para exemplificar o funcionamento do método criado por Shirmohammadi et al (1988). Para este exemplo utilizaremos uma tensão de base no alimentador de 13,8 kV e uma impedância nos cabos de $z = 0,2047 + j0,3450 \Omega/km$.

Figura 4 - Sistema radial de exemplo



Fonte: Autoria Própria.

tal que:

SE – Subestação;

$P_i + jQ_i$ – Carga instalada na barra i , $i = 1,2,3$;

L_k – Trecho entre as barras, $k = 1,2,3$.

Para realização dos cálculos utilizou-se os dados de cargas Tabela 1.

Tabela 1 - Potência das cargas

Carga	P (kW)	jQ (kVar)
P1+jQ1	350	150
P2+jQ2	175	50
P3+jQ3	175	50

Fonte: Autoria própria.

As impedâncias de cada trecho estão apresentadas na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 - Impedância dos trechos

Trecho	Distância (km)	Impedância(Ω)
L1	6	1,228 +j2.070
L2	5	1,024+j1,725
L3	4	0,819+j1,380

Fonte: Autoria própria.

Primeiramente, calcula-se as correntes solicitadas pelas cargas, conforme mostrado na Tabela 3, de acordo com a Eq. (5), desconsiderando as impedâncias dos trechos L_k ,

Tabela 3 - Corrente e tensão das cargas na primeira iteração

Barra	Tensão na Barra (kV)	Corrente (A)
1	13,8 \angle 0°	25,3772 \angle – 1,9635°
2	13,8 \angle 0°	13,1886 \angle – 15.9455°
3	13,8 \angle 0°	13,1886 \angle – 15.9455°

Fonte: Autoria própria.

Posteriormente, faz-se o somatório de corrente Eq. (6), partindo-se da parte extrema, nesse caso a barra L3 do sistema, em sentido à SE, sendo os dados apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Somatório de corrente nos trechos

Trecho	Corrente no trecho	Corrente total (A)
1	$I_1+I_2+I_3$	$51,3697\angle - 9,0903^\circ$
2	I_2+I_3	$26,3771\angle - 15,9455^\circ$
3	I_3	$13,1886\angle - 15,9455^\circ$

Fonte: Aatoria própria.

Agora, considera-se as impedâncias de cada trecho e utiliza-se dos valores de corrente obtidos anteriormente para se obter os valores de queda de tensão Eq. (7). Os valores da queda de tensão são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Tensão nas barras para primeira iteração

Barra	Tensão na Barra (kV)
1	$13,7005\angle - 0,3463^\circ$
2	$13,6622\angle - 0,4995^\circ$
3	$13,6471\angle - 0,5609^\circ$

Fonte: Aatoria própria.

Na Tabela 6, apresentamos a diferença de valores do módulo de tensão inicial com relação aos valores ao módulo de tensão após a primeira iteração.

Tabela 6 - Comparação das tensões

Tensão inicial (KV)	Tensão Primeira iteração (KV)	Diferença
13,8	13,7005	0,0995
13,8	13,6622	0,1378
13,8	13,6471	0,1529

Fonte: Aatoria própria.

Encerra-se o processo iterativo, caso essa diferença seja usualmente no valor de 0,0001 (KAGAN et al, 2005), caso contrário, continua-se o processo iterativo e, na próxima iteração, a tensão encontrada na iteração corrente será utilizada para recalculer os valores de corrente pela equação (5) e (6), e novamente, atualiza-se os valores de tensão nas barras pela Eq. (7). Esse processo se repete até que alcance a convergência ou um determinado número

iterações. Nesse exemplo o algoritmo convergiu com cinco iterações e o resultado final é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Tensão nas barras para última iteração

Barra	Tensão na Barra(KV)
1	13,7007 $\angle - 0.3399^\circ$
2	13,6625 $\angle - 0,4902^\circ$
3	13,6473 $\angle - 0,5504^\circ$

Fonte: Autoria própria.

3.1.2 Fluxo de Potência Harmônico em Rede De Distribuição

No Fluxo Potência Harmônico escolhe-se as frequências de interesse para o estudo em questão, por exemplo, 180 Hz, 300 Hz e 420 Hz, consecutivamente 3^a, 5^a e 7^a harmônicas.

Nesta seção apresentaremos o método desenvolvido por Archundia-Aranda e Mota-Palomino (2010), baseado no algoritmo (*Backward/Forward*) para a resolução do fluxo de potência harmônico em sistemas de distribuição radiais. O método proposto consiste em quatro etapas. Assim, cada passo deste método será descrito a seguir.

Na primeira etapa, realiza-se o cálculo do fluxo de potência fundamental, já apresentado.

Na segunda etapa, como que as tensões nas barras já são conhecidas, define-se qual o modelo de carga será utilizado de acordo com as informações disponíveis e a natureza da carga, podendo ser modelada como uma carga série, carga paralela ou carga série-paralela. (ARANDA; MOTA-PALOMINO, 2010)

A terceira etapa, consiste em obter o valor para a tensão harmônica de inicialização, realizando apenas uma iteração de varredura *Backward/Forward*.

Backward: Partindo-se das barras extremas com direção a barra da subestação *SE*, calcula-se a corrente harmônica presente em cada trecho *Lk*.

$$J_{Lk}^{(h)} = \sum (J_{Lk}^{(h)} + J_{Hk}^{(h)}) \quad (22)$$

tal que:

$J_{Lk}^{(h)}$ – Corrente harmônica (h), no trecho Lk , para iteração , $n = 1$;

$J_{Hk}^{(h)}$ – Corrente harmônica injetada (H), na barra k , para iteração n ;

h – Harmônica de interesse, $h > 1$;

H – Maior ordem de Harmônica de interesse.

Forward: Partindo-se da barra da subestação, considerando as impedâncias nos trechos $Z_L^{(h)}$ Eq. (23), e seguindo até as barras extremas, inicializa-se as tensões harmônicas Eq. (24) para cada barra k .

$$Z_{Lk}^{(h)} = R_{Lk} + jXL_{Lk}^{(h)} * h \quad (23)$$

tal que:

$Z_{Lk}^{(h)}$ – Impedância harmônica (h) no trecho Lk ;

R_{Lk} – Componente resistiva da impedância no trecho Lk ;

$jXL_{Lk}^{(h)}$ – Componente indutiva (h) da impedância no trecho Lk .

Assim,

$$V_k^{(h)} = V_k^{(h)} - Z_{Lk}^{(h)} J_{Lk}^{(h)} \quad (24)$$

tal que:

$V_k^{(h)}$ – Tensão harmônica (h) de inicialização, na barra k , para iteração n , $n = 1$;

Na quarta etapa, calcula-se as correntes harmônicas absorvidas pelas cargas Eq. (25), e inicia-se varredura Backward Eq. (26).

$$J_{\omega}^{(h)} = \frac{V_k^{(h)}}{Z_{Lk}^{(h)}} \quad (25)$$

tal que:

$J_{\omega}^{(h)}$ – Corrente harmônica (h) absorvida pela carga.

$$J_{Lk}^{(h)} = \sum(J_{Lk}^{(h)} + J_{\omega}^{(h)} + J_{Hk}^{(h)}) \quad (26)$$

As tensões harmônicas em todas as barras são encontradas realizando-se uma varredura *Forward* Eq. (26).

$$V_k^{(h)} = V_k^{(h)} - Z_{Lk}^{(h)} J_{Lk}^{(h)} \quad (27)$$

tal que:

$V_k^{(h)}$ – Tensão harmônica (h), na barra k , para iteração n , $n = 2, 3; \dots; N$

Na quinta e última etapa, repete-se as varreduras *Backward/Forward*, da quarta etapa, até que um critério de parada seja alcançado, utilizando-se da Eq. 27. Adotando-se como critério de parada um coeficiente de tolerância ε e determina-se a maior diferença entre as tensões calculadas nas barras. Caso a diferença entre a tensão calculada na iteração atual e a iteração anterior seja maior que o coeficiente de tolerância, define-se um número de iterações.

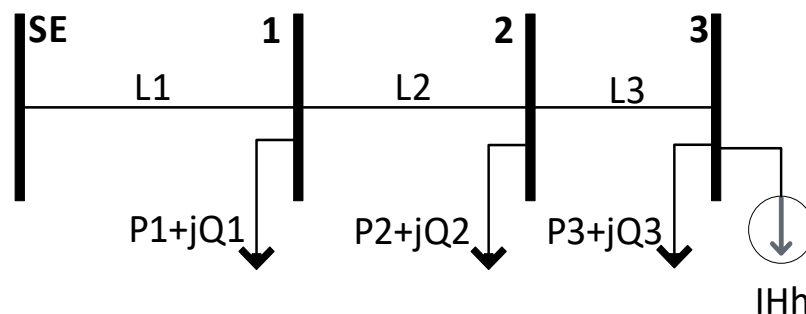
$$\left| V_k^{(h)(n)} - V_k^{(h)(n-1)} \right| \leq \varepsilon \quad (28)$$

$V_k^{(h)(n)}$ – Tensão harmônica (h) calculada na barra k , na iteração (n);

$V_k^{(h)(n-1)}$ – Tensão harmônica (h) calculada na barra k , na iteração ($n - 1$);

Na Figura 5 é apresentado um sistema para exemplificar o funcionamento do método do fluxo de potência harmônico.

Figura 5 - Sistema radial com injeção de corrente harmônica



Fonte: Autoria própria

tal que:

SE – Subestação;

$P_i + jQ_i$ – Carga instalada na barra i , $i = 1,2,3$;

I_{Hh} – Corrente Harmônica I_H , de ordem h , $h = 3, 5, 7 \dots H$

L_k – Trecho entre as barras, $k = 1,2,3$.

A primeira etapa é implementação do fluxo de potência fundamental, já foi discutido anteriormente na subseção 3.1.1. A segunda etapa, consiste na escolha do modelo de carga de acordo com as informações das mesmas. Para este exemplo, iremos detalhar apenas os processos da terceira, quarta e quinta etapa.

A Tabela 8, apresenta os valores de correntes harmônicas que serão injetadas na Barra 3.

Tabela 8 - Corrente Harmônica de 3ª ordem injetada nas Barras 3

Barra	Corrente (A)
1	$0 \angle 0^\circ$
2	$0 \angle 0^\circ$
3	$4,3962 \angle 0^\circ$

Fonte: Autoria própria.

A terceira etapa consiste em obter a tensão harmônica de inicialização. Para isto, partindo-se da parte extrema, nesse caso a Barra 3 do sistema de exemplo, em direção à subestação SE , utilizando-se a Eq. (22), realiza-se a somatória corrente harmônica presente em cada trecho do sistema.

Nessa etapa, realiza-se apenas uma iteração de varredura inversa *Backward*. Os valores de corrente harmônicas presente em cada trecho Lk são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Correntes harmônicas presente em cada trecho

Trecho	Corrente no trecho	Corrente total (A)
L1	$I_1+I_2+I_3$	$4,3962 \angle 0^\circ$
L2	I_2+I_3	$4,3962 \angle 0^\circ$
L3	I_3	$4,3962 \angle 0^\circ$

Fonte: Autoria própria.

As impedâncias de cada trecho Lk Eq. (23), são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Impedâncias dos trechos

Trecho	Distância (km)	Impedância(Ω)($h=3$)
L1	6	$1,228 + j6,210$
L2	5	$1,024 + j5,175$
L3	4	$0,819 + j4,140$

Fonte: Autoria própria.

Utilizando-se da Eq. (24), realiza-se apenas uma varredura *Forward*, para a obtenção dos valores de tensões harmônicas de inicialização, sendo os resultados apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Tensão harmônica de inicialização

Barra	Tensão na Barra (V)
1	$27,8290 \angle -101,1856^\circ$
2	$51,0205 \angle -101,1889^\circ$
3	$69,5735 \angle -101,1892^\circ$

Fonte: Autoria própria.

A quarta etapa consiste na obtenção dos valores das correntes harmônicas absorvidas pelas cargas em cada barra Eq. (25), com os dados apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Correntes harmônicas absorvidas pelas cargas

Barra	Corrente (A)
1	$0,0363\angle - 154,3533$
2	$0,0377\angle - 142,6443^\circ$
3	$0,0516\angle - 142,5532^\circ$

Fonte: Autoria própria.

Após a obtenção das correntes harmônicas absorvidas pelas cargas, através de um processo iterativo, primeiramente, de varredura *Backward*, partindo-se da parte extrema do sistema, nesse caso a Barra 3, em sentido à subestação *SE*, realiza-se um somatório das correntes harmônicas presentes em cada trecho, utilizando-se da Eq. (26). As correntes obtidas nesta etapa estão apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Somatório de corrente nos trechos

Trecho	Corrente no trecho	Corrente harmônica (h=3) (A)	Corrente harmônica absorvida pela carga (h=3) (A)	Corrente total no trecho (A)
L1	I1+I2+I3	$0\angle 0^\circ$	$0,0363\angle - 154,3533$	$4,2931\angle - 0,9341^\circ$
L2	I2+I3	$0\angle 0^\circ$	$0,0377\angle - 142,6443^\circ$	$4,3252\angle - 0,0543^\circ$
L3	I3	$4,3962\angle 0^\circ$	$0,0516\angle - 142,5532^\circ$	$4,3553\angle - 0,4131^\circ$

Fonte: Autoria própria.

Após o processo anterior, realiza-se varredura *Forward*, obtendo-se os valores de tensões harmônicas em cada barra Eq. (27). Os valores são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Tensão nas barras para primeira iteração

Barra	Tensão na Barra (V)
1	$27,1768\angle - 102,1210^\circ$
2	$49,9957\angle - 102,0257^\circ$
3	$68,3760\angle - 101,9121^\circ$

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 15, apresentamos a diferença, em módulo, de valores da tensão harmônica de inicialização com relação aos valores de tensão para a primeira iteração.

Tabela 15 - Comparação das tensões

Tensão harmônica de inicialização (V)	Tensão Primeira iteração (V)	Diferença
27,8290∠ – 101,1856°	27,1768∠ – 102,1210°	0,6522
51,0205∠ – 101,1889°	49,9957∠ – 102,0257°	1,0248
69,5735∠ – 101,1892°	68,3760∠ – 101,9121°	1,1975

Fonte: Autoria própria.

A quinta e última etapa, repete-se as varreduras *Backward/Forward*, da quarta etapa, até que um critério de parada seja alcançado, utilizando-se da Eq. (28). ou caso haja um número iterações pré-determinadas. Nesse exemplo, o algoritmo convergiu com quatro iterações, sendo o resultado final é apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 - Tensão nas barras para última iteração

Barra	Tensão na Barra(KV)
1	27,1767∠ – 102,1209°
2	49,9957∠ – 102,0256°
3	68,3760∠ – 101,9121°

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 17 apresenta os valores de tensão fundamental e tensão harmônica após o último processo de iteração.

Tabela 17 - Tensão fundamental e tensão harmônica - Exemplo

Barra	Tensão fundamental (kV)	Tensão harmônica (V) h=3
1	13,7007∠ – 0,3399°	27,1768∠ – 102,1210°
2	13,6625 ∠ – 0,4902°	49,9957∠ – 102,0257°
3	13,6473 ∠ – 0,5504°	68,3760∠ – 101,9121°

3.2 Modelagem do Problema

Para a realização deste trabalho, serão considerados dois casos. No primeiro caso, as três correntes harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordem serão injetadas simultaneamente em uma barra de carga do sistema. No segundo caso, serão injetadas correntes harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordem simultaneamente em todas as barras de carga do sistema.

A quantidade de corrente a ser injetada será determinada de acordo com a Eq. 28, abaixo.

$$J_{Hk}^{(h)} = \frac{I_{carga,k}^1}{h} \quad (29)$$

tal que:

h – Ordem harmônica;

$J_{Hk}^{(h)}$ – Corrente harmônica (h), na barra k ;

$I_{carga,k}^1$ – Módulo da corrente fundamental da carga, na barra k ;

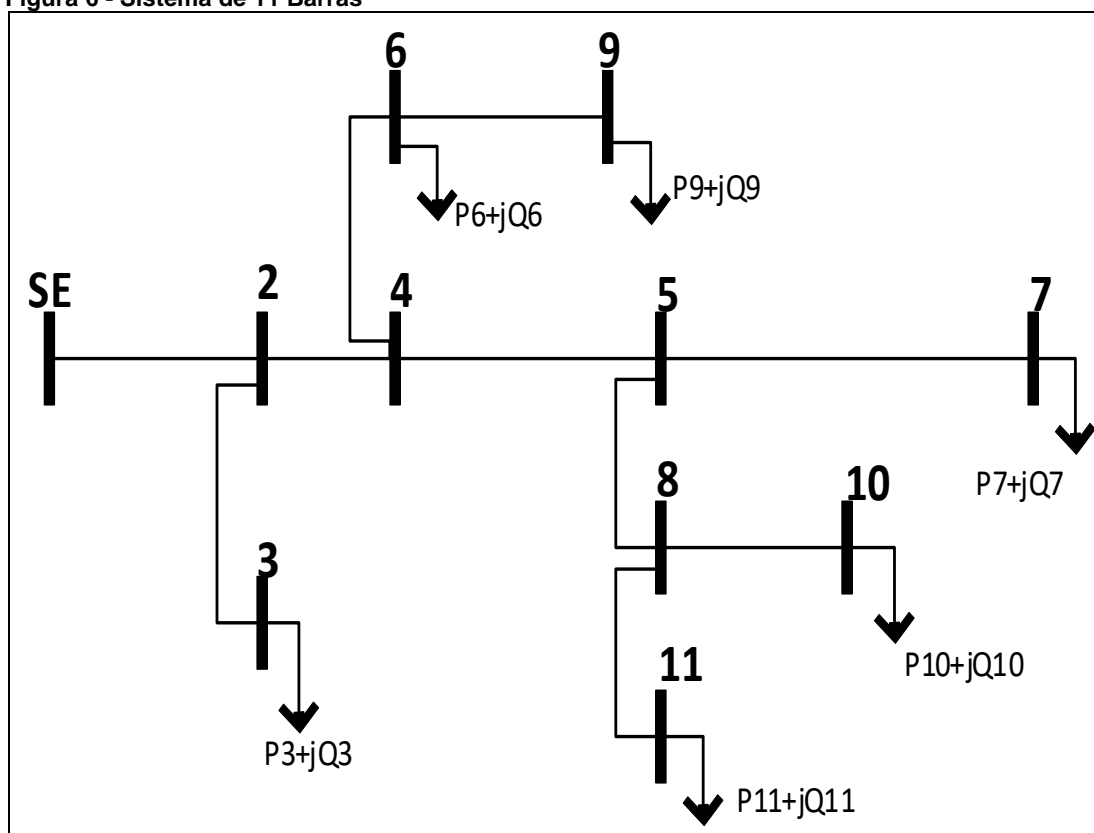
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados a análise e resultados obtidos na aplicação do algoritmo do fluxo de potência fundamental e o harmônico no sistema de 11 barras. Posteriormente os valores obtidos com algoritmo serão comparados com o sistema modelado no software *ATPDraw*, sendo este, utilizado para validar a metodologia proposta neste trabalho.

4.1 Sistema de Potência Analisado

O sistema de potência escolhido para a aplicação deste estudo é um sistema de 11 barras (Kagan, 2005), apresentado na Figura 6. Nele poderemos verificar se o algoritmo desenvolvido encontra soluções de acordo com o estado de operação do sistema.

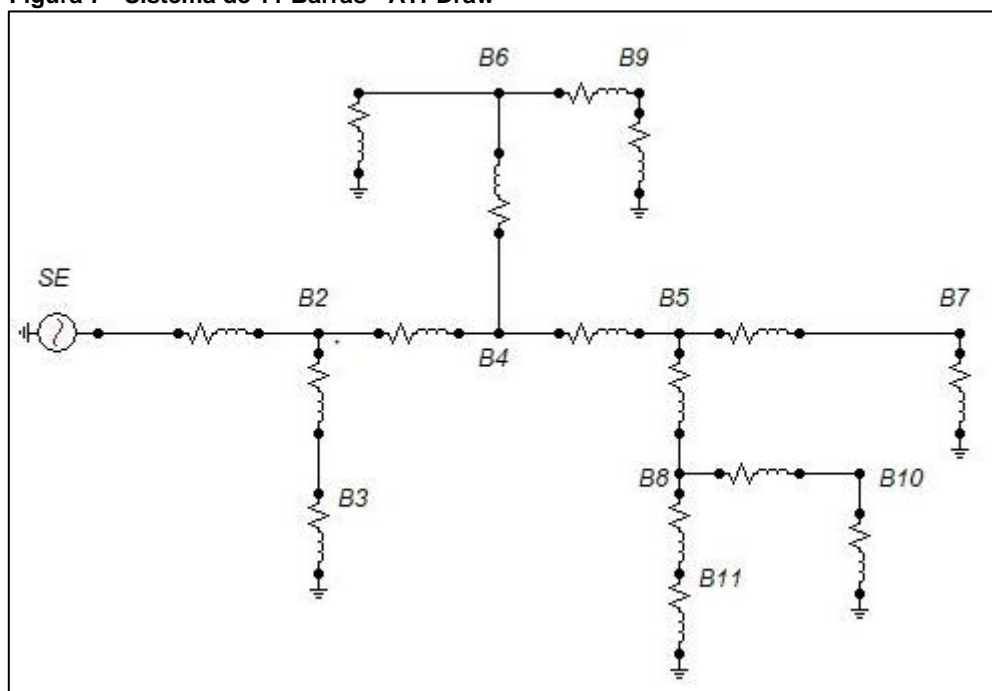
Figura 6 - Sistema de 11 Barras



Fonte: Kagan (2005, p. 186)

A Figura 7, apresenta o sistema de 11 Barras modelado no *ATPDraw*.

Figura 7 - Sistema de 11 Barras - ATPDraw



Fonte: Autoria Própria

O sistema de 11 barras, é composto por seis barras de carga e uma subestação. Os dados de carga das barras e a impedância das linhas são exibidos na Tabela 18.

Tabela 18 - Dados do sistema de 11 barras

Barra	Apontador	P[kW]	Q[kVAr]	R[Ω]	X[Ω]
2	1	0	0	1.6376	2.7600
3	2	500	200	1.6376	2.7600
4	2	0	0	1.0234	1.7250
5	4	0	0	2.4565	4.1400
6	4	750	300	2.4565	4.1400
7	5	250	50	3.6846	6.2101
8	5	0	0	0.4094	0.6900
9	6	1000	700	1.2281	2.0701
10	8	750	350	0.6142	1.0350
11	8	250	50	0.8188	1.3799

Fonte: Autoria Própria

As Tabelas 19 e 20, apresentam a os valores de tensão e corrente fundamental obtidos com o FP implementado comparando-os com os valores de tensão e corrente fundamentais obtidos à partir do software *ATPDraw*.

Tabela 19 - Resultado comparativo para as tensões - Sistema de 11 barras

Barra	FP (60Hz) implementado		FP (60 Hz) <i>ATPDraw</i>	
	Tensão (KV)	Ângulo (°)	Tensão (KV)	Ângulo (°)
SE	13,800	0	13,800	0
2	12,886	-2,242	12,886	-2,242
3	12,779	-2,609	12,779	-2,609
4	12,392	-3,567	12,392	-3,567
5	11,969	-5,139	11,969	-5,139
6	11,650	-5,468	11,650	-5,468
7	11,864	-5,691	11,864	-5,691
8	11,911	-5,351	11,911	-5,351
9	11,415	-5,989	11,415	-5,989
10	11,841	-5,579	11,841	-5,579
11	11,888	-5,474	11,888	-5,474

Fonte: Autoria Própria

Tabela 20 - Resultado comparativo para as correntes - Sistema de 11 barras

Trecho (Lk)	FP (60Hz) implementado		FP (60 Hz) <i>ATPDraw</i>	
	Corrente (A)	Ângulo (°)	Corrente (A)	Ângulo (°)
SE-2	327,913	-30,690	327,911	30,690
2-3	42,142	-24,410	42,142	-24,411
2-4	286,061	-31,614	286,059	-31,613
4-5	112,072	-25,389	112,071	-25,388
4-6	175,072	-35,594	175,071	-35,594
5-7	21,489	-17,001	21,489	-17,001
5-8	90,867	-27,365	90,866	-27,365
6-9	106,937	-40,981	106,937	-40,981
8-10	69,896	-30,596	69,895	-30,595
8-11	21,447	-16,784	21,447	-16,783

Fonte: Autoria Própria

4.2 Primeiro Caso – Injeção de Correntes Harmônicas em uma Barra de Carga do Sistema.

Para a exposição deste primeiro caso, foram injetadas três correntes harmônicas na barra de carga 7 do sistema, apresentado na Figura (6). Escolheu-se esta barra para realização dos estudos, devido a sua distância do alimentador SE.

4.2.1 Injeção de corrente harmônica na barra 7.

A Tabela 21, apresenta os valores de corrente harmônicas injetadas para a Barra 7, utilizando-se da Eq. (29).

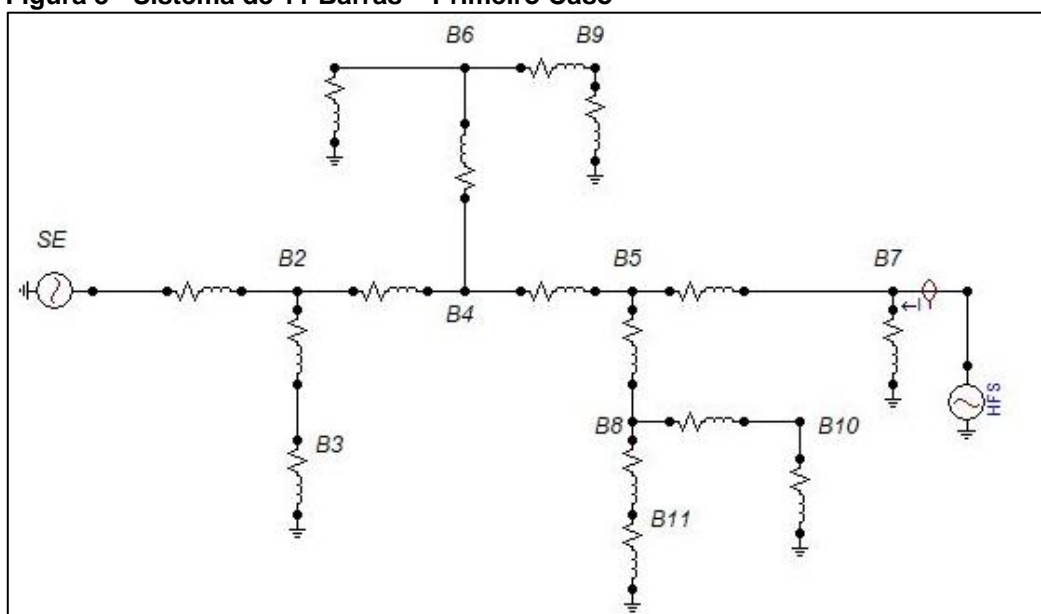
Tabela 21 - Correntes harmônicas injetadas na Barra 7

Barra (k)	I_{carga}^1	$J_k^{(3)}$	$J_k^{(5)}$	$J_k^{(7)}$
7	21,49	$7,16\angle 0^\circ$	$4,30\angle 0^\circ$	$3,07\angle 0^\circ$

Fonte: Autoria Própria

A Figura 8, apresenta o sistema de 11 Barras com injeção de correntes harmônicas na Barra 7 modelado no ATPDraw.

Figura 8 - Sistema de 11 Barras – Primeiro Caso



Fonte: Autoria Própria

4.2.2 Valores de tensão e correntes para a harmônica de 3ª ordem.

As Tabelas 22 e 23 apresentam os valores de tensões e correntes obtidos com o algoritmo do fluxo de potência com relação aos valores obtidos com o software *ATPDraw* para as harmônicas de 3ª ordem.

Tabela 22 - Tensões para a 3ª harmônica

<i>Barra</i> (<i>k</i>)	FP (3ª harmônica) implementado		FP (3ª harmônica) <i>ATPDraw</i>		<i>Erro (%)</i>	
	Tensão (V)	Ângulo (°)	Tensão (V)	Ângulo (°)	<i>Tensão</i>	<i>Ângulo</i>
2	46,192	70,702	46,192	70,701	0,0001	0,0001
3	45,425	70,184	45,425	70,184	0,0001	0,0001
4	75,544	70,897	75,544	70,897	0,0001	0,0002
5	153,234	71,947	153,234	71,947	0,0001	0,0001
6	68,367	68,856	68,367	68,856	0,0002	0,0002
7	282,914	73,923	282,914	73,923	0,0000	0,0001
8	151,797	71,626	151,797	71,626	0,0001	0,0002
9	66,363	68,429	66,363	68,429	0,0002	0,0002
10	150,155	71,346	150,156	71,345	0,0001	0,0002
11	151,120	71,344	151,120	71,344	0,0001	0,0002

Fonte: Autoria Própria

Tabela 23 - Correntes para a 3ª harmônica

<i>Trecho</i> (<i>Lk</i>)	FP (3ª harmônica) implementado		FP (3ª harmônica) <i>ATPDraw</i>		<i>Erro (%)</i>	
	Corrente (A)	Ângulo (°)	Corrente (A)	Ângulo (°)	<i>Corrente</i>	<i>Ângulo</i>
SE-2	5,473	-8,111	5,473	-8,111	0,0001	0,0012
2-3	0,103	-160,011	0,103	-160,012	0,0019	0,0007
2-4	5,564	-7,610	5,564	-7,610	0,0001	0,0017
4-5	6,138	-5,843	6,138	-5,843	0,0000	0,0016
4-6	0,602	-169,282	0,602	-169,282	0,0003	0,0001
5-7	6,839	-2,559	6,839	-2,559	0,0000	0,0002
5-8	0,793	-156,231	0,793	-156,230	0,0003	0,0005
6-9	0,326	-176,108	0,326	-176,108	0,0001	0,0001
8-10	0,569	-163,117	0,569	-163,116	0,0004	0,0003
8-11	0,238	-139,620	0,238	-139,619	0,0019	0,0006

Fonte: Autoria Própria

4.2.3 Valores de tensão e correntes para a harmônica de 5ª ordem.

As Tabelas 24 e 25 apresentam os valores de tensões e correntes obtidos com o algoritmo do fluxo de potência com relação aos valores obtidos com o software *ATPDraw* para as harmônicas de 5ª ordem.

Tabela 24 - Tensões para a 5ª harmônica

<i>Barra</i> <i>(k)</i>	FP (5ª harmônica) implementado		FP (5ª harmônica) <i>ATPDraw</i>		<i>Erro (%)</i>	
	<i>Tensão (V)</i>	<i>Ângulo (°)</i>	<i>Tensão (V)</i>	<i>Ângulo (°)</i>	<i>Tensão</i>	<i>Ângulo</i>
2	42,921	75,854	42,921	42,921	0,0000	0,0002
3	42,047	75,434	42,047	42,047	0,0000	0,0001
4	70,294	76,011	70,294	70,294	0,0000	0,0002
5	143,519	76,796	143,519	143,519	0,0000	0,0002
6	62,802	74,473	62,802	62,802	0,0000	0,0002
7	268,828	78,507	268,828	268,828	0,0000	0,0001
8	141,817	76,501	141,817	141,817	0,0000	0,0002
9	60,834	74,183	60,834	60,834	0,0000	0,0002
10	140,020	76,287	140,020	140,020	0,0000	0,0002
11	140,815	76,182	140,814	140,815	0,0001	0,0002

Fonte: Autoria Própria

Tabela 25 - Correntes para a 5ª harmônica

<i>Trecho</i> <i>(Lk)</i>	FP (5ª harmônica) implementado		FP (5ª harmônica) <i>ATPDraw</i>		<i>Erro (%)</i>	
	<i>Corrente (A)</i>	<i>Ângulo (°)</i>	<i>Corrente (A)</i>	<i>Ângulo (°)</i>	<i>Corrente</i>	<i>Ângulo</i>
SE-2	3,089	-7,379	3,089	-7,379	0,0000	0,0017
2-3	0,067	-168,001	0,067	-168,002	0,0028	0,0005
2-4	3,152	-6,976	3,152	-6,976	0,0001	0,0022
4-5	3,513	-5,683	3,513	-5,683	0,0001	0,0021
4-6	0,369	-174,580	0,369	-174,580	0,0001	0,0001
5-7	4,012	-2,769	4,012	-2,769	0,0000	0,0001
5-8	0,534	-163,226	0,534	-163,225	0,0008	0,0004
6-9	0,191	-179,872	0,191	-179,872	0,0001	0,0001
8-10	0,359	-170,515	0,359	-170,514	0,0001	0,0002
8-11	0,183	-148,817	0,183	-148,817	0,0027	0,0006

Fonte: Autoria Própria

4.2.4 Valores de tensão e correntes para a harmônica de 7ª ordem.

As Tabelas 26 e 27 apresentam os valores de tensões e correntes obtidos com o algoritmo do fluxo de potência com relação aos valores obtidos com o software *ATPDraw* para as harmônicas de 7ª ordem.

Tabela 26 - Tensões para a 7ª harmônica

<i>Barra</i> (<i>k</i>)	FP (7ª harmônica) implementado		FP (7ª harmônica) <i>ATPDraw</i>		<i>Erro (%)</i>	
	Tensão (V)	Ângulo (°)	Tensão (V)	Ângulo (°)	<i>Tensão</i>	<i>Ângulo</i>
2	41,366	78,832	41,366	78,832	0,0001	0,0002
3	40,459	78,501	40,459	78,500	0,0000	0,0001
4	67,786	78,956	67,786	78,956	0,0001	0,0002
5	138,740	79,560	138,740	79,560	0,0001	0,0002
6	60,264	77,770	60,264	77,770	0,0001	0,0002
7	261,735	80,992	261,735	80,992	0,0001	0,0001
8	136,911	79,306	136,911	79,306	0,0001	0,0002
9	58,336	77,555	58,336	77,555	0,0001	0,0002
10	135,080	79,140	135,079	79,140	0,0001	0,0002
11	135,699	79,005	135,699	79,005	0,0001	0,0002

Fonte: Autoria Própria

Tabela 27 - Correntes para a 7ª harmônica

<i>Trecho</i> (<i>Lk</i>)	FP (7ª harmônica) implementado		FP (7ª harmônica) <i>ATPDraw</i>		<i>Erro (%)</i>	
	Corrente (A)	Ângulo (°)	Corrente (A)	Ângulo (°)	<i>Corrente</i>	<i>Ângulo</i>
SE-2	2,133	-6,323	2,133	-6,323	0,0001	0,0021
2-3	0,048	-171,846	0,048	-171,846	0,0032	0,0004
2-4	2,180	-6,005	2,180	-6,005	0,0001	0,0026
4-5	2,440	-5,018	2,440	-5,018	0,0001	0,0024
4-6	0,263	-176,798	0,263	-176,798	0,0001	0,0001
5-7	2,821	-2,550	2,821	-2,550	0,0000	0,0000
5-8	0,398	-167,235	0,398	-167,235	0,0010	0,0004
6-9	0,133	179,090	0,133	179,090	0,0003	0,0001
8-10	0,258	-173,839	0,258	-173,839	0,0000	0,0001
8-11	0,145	-155,457	0,145	-155,456	0,0031	0,0006

Fonte: Autoria Própria

Os resultados apresentados para os valores de tensões e correntes, obtidos com o FP implementado em relação aos resultados para os valores de tensões obtidos com o *ATPDraw*, se mostram próximos, pois não houve nenhum valor que apresente um erro significativo, onde, o maior erro encontrado para as tensões foi de 0.0002% para as três ordens harmônicas e de 0.0032% para as correntes.

4.2.5 Valores eficazes de tensão e corrente para injeção na barra 7

Após a obtenção dos valores das tensões e correntes para as injeções das harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordem, onde os mesmos, se mostraram satisfatórios, com relação aos valores obtidos através do software *ATPDraw*, possibilitando desta forma o cálculo dos valores de tensão eficaz Eq. (12), apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 - Tensão Fundamental e Eficaz - Primeiro caso

Barra (k)	Tensão Fundamental (kV)	Tensão Eficaz (kV)	Δ (%)
SE	13,800	13,800	0,000
2	12,886	12,886	0,002
3	12,779	12,779	0,002
4	12,392	12,393	0,005
5	11,969	11,971	0,022
6	11,650	11,650	0,005
7	11,864	11,874	0,078
8	11,911	11,913	0,022
9	11,415	11,415	0,004
10	11,841	11,844	0,022
11	11,888	11,890	0,022

Fonte: Aatoria Própria

De acordo com a Tabela 28, podemos verificar que não houve uma diferença significativa entre a tensão fundamental e a tensão eficaz.

Através da Eq. (13), obteve-se os valores eficazes de corrente, Tabela 29.

Tabela 29 - Corrente Fundamental e Eficaz - Primeiro caso

Trecho (<i>Lk</i>)	Corrente Fundamental (A)	Corrente Eficaz (A)	Δ (%)
SE-2	327,913	327,980	0,020
2-3	42,142	42,142	0,000
2-4	286,061	286,141	0,028
4-5	112,072	112,321	0,223
4-6	175,072	175,074	0,001
5-7	21,489	23,078	7,396
5-8	90,867	90,873	0,006
6-9	106,937	106,938	0,001
8-10	69,896	69,900	0,005
8-11	21,447	21,449	0,012

Fonte: Aatoria Própria

Já para os resultados apresentados na Tabela 29, podemos perceber que no trecho 5-7 a corrente eficaz ficou acima em 7,396% com relação a corrente fundamental. Este fato, deve-se a injeção de corrente, que ocorreu exatamente na barra 7.

4.2.6 Distorção harmônica total ($DHTv$), efetiva ($DHTEv$) e individual ($DHIV$) de tensão

A Tabela 30, apresenta os valores para Distorção harmônica total de tensão ($DHTv$) e Distorção harmônica efetiva de tensão ($DHTEv$) distorção individual de tensão ($DHIV$).

Tabela 30 - Distorções Harmônicas de Tensão - Primeiro caso

Barra (k)	($DHTv$)	($DHTEv$)	$DHIV$ ($H = 3$)	$DHIV$ ($H = 5$)	$DHIV$ ($H = 7$)
2	0,0059	0,0059	0,35847	0,3331	0,3210
3	0,0058	0,0058	0,35548	0,3290	0,3166
4	0,0100	0,0100	0,60960	0,5672	0,5470
5	0,0210	0,0210	1,28028	1,1991	1,1592
6	0,0095	0,0095	0,58685	0,5391	0,5173
7	0,0396	0,0396	2,38456	2,2658	2,2061
8	0,0209	0,0209	1,27445	1,1907	1,1495
9	0,0094	0,0094	0,58138	0,5329	0,5111
10	0,0208	0,0208	1,26808	1,1825	1,1408
11	0,0208	0,0208	1,27123	1,1845	1,1415

Fonte: Autoria Própria

De acordo com a Tabela 30, podemos perceber que os valores para ($DHTv$) e ($DHTEv$) são praticamente iguais, isso se deve a sinais com baixa distorção harmônica (< 30%). (*IEEE Std.1459 – 2010*)

Já com relação as distorções individuais, podemos perceber, como já era esperado, as maiores distorções foram ocasionadas na Barra 7, sendo esta a barra de injeção das correntes, dessa forma acarretou distorções em outras barras próximas, no caso a Barra 5, Barra 8, Barra 10 e Barra 11.

4.2.7 Distorção harmônica total ($DHTi$), efetiva ($DHTEi$) e individual ($DHIi$) de corrente

A Tabela 31 abaixo, apresenta os valores para Distorção Harmônica Total de Corrente ($DHTi$), Distorção Harmônica Efetiva de Corrente ($DHTEi$) e distorção individual de corrente ($DHIi$).

Tabela 31 - Distorções Harmônicas de Correntes - Primeiro caso

Trecho (Lk)	$(DHTi)$	$(DHTEi)$	$DHIi$ ($H = 3$)	$DHIi$ ($H = 5$)	$DHIi$ ($H = 7$)
SE-2	0,0202	0,0202	1,6690	0,9419	0,6506
2-3	0,0031	0,0031	0,2451	0,1585	0,1147
2-4	0,0236	0,0236	1,9451	1,1017	0,7622
4-5	0,0668	0,0666	5,4772	3,1350	2,1771
4-6	0,0043	0,0043	0,3438	0,2110	0,1500
5-7	0,3916	0,3647	31,8255	18,6699	13,1296
5-8	0,0114	0,0114	0,8726	0,5875	0,4379
6-9	0,0037	0,0037	0,3051	0,1787	0,1247
8-10	0,0103	0,0103	0,8134	0,5140	0,3685
8-11	0,0156	0,0156	1,1117	0,8542	0,6766

Fonte: Aatoria Própria

Para as distorções harmônicas de corrente ($DHTi$) e ($DHTEi$), podemos perceber através da Tabela 31, que os resultados ficaram próximos em quase todas as barras, exceto na Barra 7, isso deve-se a uma distorção menor do 30%, segundo a IEEE 519 – 2010. Já para as distorções individuais podemos perceber a propagação da distorção harmônica pelo ramo principal em direção à subestação, pois as barras presentes neste ramo foram as que obtiveram os valores mais levados para os indicadores individuais de corrente.

4.2.8 Fator K

Considerando o conteúdo harmônico presente no sistema para este primeiro caso, na subestação *SE* não requer um transformador com *Fator K* maior do que $K = 1$, pois para este caso, o valor calculado ficou em *Fator K* = 1,007. Desta forma, adota-se para este caso um transformador com *Fator K* = 1, onde que, este transformador não está preparado para a circulação de correntes com frequências diferentes da frequência fundamental, ficando destinado apenas a alimentação de cargas lineares. Porém essa situação pode mudar caso haja o crescimento das cargas não lineares.

4.3 Segundo Caso – Injeção de Correntes Harmônicas em Todas as Barras de Carga do Sistema.

Para o segundo caso de estudo foram injetadas três correntes harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordem em todas as seis barras de carga do sistema, já apresentado na Figura (7). Os valores das correntes harmônicas que serão injetadas, utilizando-se da Eq. (29), estão apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 - Correntes harmônicas injetadas

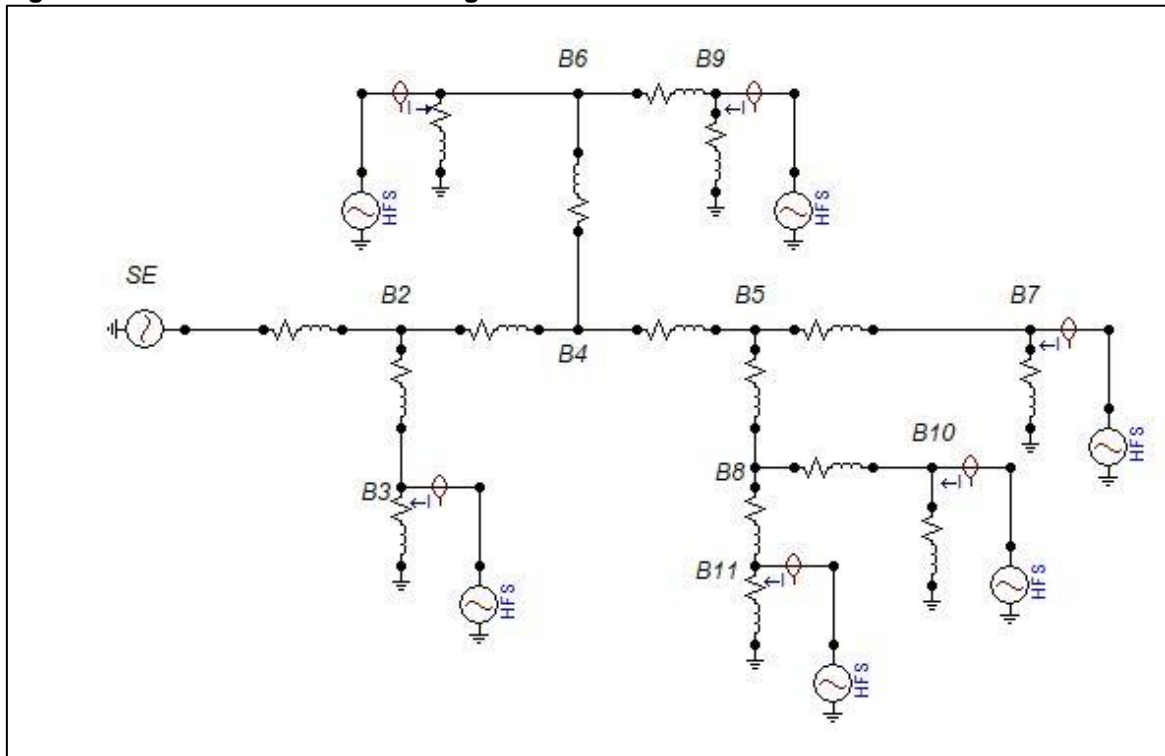
Barra (k)	I_{carga}^1	$J_k^{(3)}$	$J_k^{(5)}$	$J_k^{(7)}$
3	42,14	14,05∠0°	8,43∠0°	6,02∠0°
6	175,07	58,36∠0°	35,01∠0°	25,01∠0°
7	21,49	7,16∠0°	4,30∠0°	3,07∠0°
9	106,94	35,65∠0°	21,39∠0°	15,28∠0°
10	69,90	23,30∠0°	13,98∠0°	9,99∠0°
11	21,45	7,15∠0°	4,29∠0°	3,06∠0°

Fonte: Autoria Própria

De acordo com a Tabela 32, apresentada acima, as correntes harmônicas que serão injetadas correspondem à aproximadamente 33% para a harmônica de 3ª ordem, 20% para a harmônica de 5ª ordem e 14% para a harmônica de 7ª ordem. Desta forma, torna-se possível uma análise comparativa entre os valores de injeção de corrente harmônica com relação aos valores omitidos com as distorções individuais de corrente.

A Figura 9, apresenta o sistema de 11 Barras com injeção de correntes harmônicas nas Barras 3, 6, 7, 9, 10 e 11 modelado no ATPDraw.

Figura 9 - Sistema de 11 Barras – Segundo Caso



Fonte: Autoria Própria

4.3.1 Valores de tensão e correntes para a harmônica de 3ª ordem.

As Tabelas 33 e 34 apresentam os valores de tensões e correntes obtidos com o algoritmo do fluxo de potência com relação aos valores obtidos com o software *ATPDraw* para as harmônicas de 3ª ordem.

Tabela 33 - Tensões para a 3ª harmônica

<i>Barra (k)</i>	FP (3ª harmônica) implementado		FP (3ª harmônica) <i>ATPDraw</i>		Erro (%)	
	Tensão (V)	Ângulo (°)	Tensão (V)	Ângulo (°)	Tensão	Ângulo
2	939,914	72,395	939,915	72,395	0,0001	0,0001
3	1040,272	72,595	1040,273	72,595	0,0001	0,0001
4	1464,640	72,307	1464,642	72,306	0,0001	0,0001
5	1802,178	71,153	1802,181	71,153	0,0001	0,0002
6	2387,043	73,093	2387,046	73,093	0,0001	0,0001
7	1898,247	70,437	1898,249	70,437	0,0001	0,0002
8	1847,828	71,082	1847,831	71,082	0,0001	0,0002
9	2535,160	73,160	2535,163	73,160	0,0001	0,0001
10	1900,163	71,098	1900,166	71,098	0,0001	0,0002
11	1869,356	70,924	1869,358	70,924	0,0001	0,0002

Fonte: Autoria Própria

Tabela 34 - Correntes para a 3ª harmônica

<i>Trecho (Lk)</i>	FP (3ª harmônica) implementado		FP (3ª harmônica) <i>ATPDraw</i>		Erro (%)	
	Corrente (A)	Ângulo (°)	Corrente (A)	Ângulo (°)	Corrente	Ângulo
SE-2	111,359	-6,418	111,359	-6,418	0,0001	0,0011
2-3	11,897	-4,345	11,897	-4,345	0,0002	0,0066
2-4	99,471	-6,665	99,471	-6,665	0,0001	0,0017
4-5	26,786	-12,648	26,786	-12,648	0,0001	0,0020
4-6	72,884	-4,470	72,885	-4,470	0,0001	0,0014
5-7	5,203	-21,552	5,203	-21,552	0,0002	0,0003
5-8	21,660	-10,518	21,660	-10,518	0,0002	0,0029
6-9	23,402	-4,580	23,402	-4,580	0,0000	0,0013
8-10	16,536	-7,155	16,536	-7,155	0,0003	0,0023
8-11	5,244	-21,176	5,244	-21,177	0,0002	0,0036

Fonte: Autoria Própria

4.3.2 Valores de tensão e correntes para a harmônica de 5ª ordem.

As Tabelas 35 e 36 apresentam os valores de tensões e correntes obtidos com o algoritmo do fluxo de potência com relação aos valores obtidos com o software *ATPDraw* para as harmônicas de 5ª ordem.

Tabela 35 - Tensões para a 5ª harmônica

<i>Barra (k)</i>	FP (5ª harmônica) implementado		FP (5ª harmônica) <i>ATPDraw</i>		<i>Erro (%)</i>	
	<i>Tensão (V)</i>	<i>Ângulo (°)</i>	<i>Tensão (V)</i>	<i>Ângulo (°)</i>	<i>Tensão</i>	<i>Ângulo</i>
2	888,200	77,958	888,200	77,958	0,0001	0,0001
3	984,438	78,152	984,439	78,152	0,0001	0,0001
4	1383,180	77,872	1383,181	77,872	0,0000	0,0001
5	1683,731	76,602	1683,731	76,602	0,0000	0,0002
6	2271,257	78,731	2271,258	78,731	0,0000	0,0001
7	1760,337	75,689	1760,337	75,689	0,0000	0,0002
8	1725,393	76,536	1725,393	76,536	0,0000	0,0002
9	2415,467	78,844	2415,468	78,844	0,0000	0,0001
10	1774,992	76,593	1774,992	76,593	0,0000	0,0002
11	1742,600	76,331	1742,600	76,331	0,0000	0,0002

Fonte: Autoria Própria

Tabela 36 - Correntes para a 5ª harmônica

<i>Trecho (Lk)</i>	FP (5ª harmônica) implementado		FP (5ª harmônica) <i>ATPDraw</i>		<i>Erro (%)</i>	
	<i>Corrente (A)</i>	<i>Ângulo (°)</i>	<i>Corrente (A)</i>	<i>Ângulo (°)</i>	<i>Corrente</i>	<i>Ângulo</i>
SE-2	63,914	-5,274	63,914	-5,275	0,000	0,002
2-3	6,929	-3,287	6,929	-3,287	0,000	0,009
2-4	56,990	-5,516	56,990	-5,516	0,000	0,003
4-5	14,509	-12,445	14,509	-12,446	0,000	0,003
4-6	42,622	-3,162	42,622	-3,162	0,000	0,002
5-7	2,602	-26,801	2,602	-26,801	0,000	0,000
5-8	12,005	-9,364	12,005	-9,365	0,000	0,005
6-9	13,843	-2,623	13,843	-2,623	0,000	0,003
8-10	9,523	-4,665	9,523	-4,665	0,000	0,003
8-11	2,632	-26,606	2,632	-26,607	0,000	0,006

Fonte: Autoria Própria

4.3.3 Valores de tensão e correntes para a harmônica de 7ª ordem.

As Tabelas 37 e 38 apresentam os valores de tensões e correntes obtidos com o algoritmo do fluxo de potência com relação aos valores obtidos com o software *ATPDraw* para as harmônicas de 7ª ordem.

Tabela 37 - Tensões para a 7ª harmônica

<i>Barra (k)</i>	FP (7ª harmônica) implementado		FP (7ª harmônica) <i>ATPDraw</i>		Erro (%)	
	Tensão (V)	Ângulo (°)	Tensão (V)	Ângulo (°)	Tensão	Ângulo
2	867,521	80,871	867,521	80,871	0,0000	0,0001
3	962,390	81,047	962,390	81,047	0,0001	0,0001
4	1350,434	80,793	1350,433	80,793	0,0000	0,0001
5	1632,287	79,614	1632,285	79,614	0,0001	0,0002
6	2228,129	81,583	2228,129	81,583	0,0000	0,0001
7	1696,835	78,718	1696,833	78,717	0,0001	0,0002
8	1672,162	79,557	1672,160	79,557	0,0001	0,0002
9	2371,603	81,692	2371,603	81,692	0,0000	0,0001
10	1721,135	79,624	1721,134	79,624	0,0001	0,0002
11	1686,628	79,354	1686,626	79,354	0,0001	0,0002

Fonte: Autoria Própria

Tabela 38 - Correntes para a 7ª harmônica

Trecho (<i>Lk</i>)	FP (7ª harmônica) implementado		FP (7ª harmônica) <i>ATPDraw</i>		Erro (%)	
	Corrente (A)	Ângulo (°)	Corrente (A)	Ângulo (°)	Corrente	Ângulo
SE-2	44,742	-4,284	44,742	-4,284	0,0000	0,0021
2-3	4,895	-2,500	4,895	-2,499	0,0006	0,0102
2-4	39,850	-4,503	39,850	-4,503	0,0001	0,0030
4-5	9,748	-11,164	9,748	-11,164	0,0003	0,0034
4-6	30,189	-2,357	30,189	-2,357	0,0000	0,0027
5-7	1,596	-27,972	1,596	-27,972	0,0003	0,0001
5-8	8,233	-7,951	8,233	-7,952	0,0004	0,0057
6-9	9,870	-1,772	9,870	-1,772	0,0001	0,0034
8-10	6,741	-3,229	6,741	-3,229	0,0000	0,0032
8-11	1,614	-28,065	1,614	-28,067	0,0009	0,0078

Fonte: Autoria Própria

4.3.4 Valores eficazes de tensão e corrente para injeção em todas as barras de carga

Após a obtenção dos valores das tensões e correntes para as injeções das harmônicas de 3^a, 5^a e 7^a ordem, onde os mesmos, se mostraram satisfatórios, com relação aos valores obtidos através do software *ATPDraw*, possibilitando desta forma o cálculo dos valores de tensão eficaz Eq. (12), apresentados na Tabela 39.

Tabela 39 - Tensão Fundamental e Eficaz - Segundo caso

Barra (k)	Tensão Fundamental (kV)	Tensão Eficaz (kV)	Δ (%)
1	13,800	13,800	0
2	12,886	12,980	0,7275
3	12,779	12,895	0,9076
4	12,392	12,627	1,8971
5	11,969	12,329	3,0078
6	11,650	12,310	5,6681
7	11,864	12,262	3,3473
8	11,911	12,290	3,1873
9	11,415	12,173	6,6430
10	11,841	12,245	3,4093
11	11,888	12,276	3,2641

Fonte: Autoria Própria

Para este segundo caso, podemos perceber através da Tabela 39, principalmente nas barras 6 e 9, que os valores da tensão eficaz sofreram um aumento significativo se comparados com o valor da tensão fundamental. Esse aumento deve-se principalmente pela circulação de correntes harmônicas presentes neste caso.

Através da Eq. (13), obteve-se os valores eficazes das correntes, Tabela 40.

Tabela 40 - Corrente Fundamental e Eficaz - Segundo caso

Trecho (<i>Lk</i>)	Corrente Fundamental (A)	Corrente Eficaz (A)	Δ (%)
SE-2	327,913	354,985	8,256
2-3	42,142	44,603	5,841
2-4	286,061	310,743	8,628
4-5	112,072	116,546	3,993
4-6	175,072	196,699	12,353
5-7	21,489	22,319	3,866
5-8	90,867	94,540	4,043
6-9	106,937	110,780	3,594
8-10	69,896	72,767	4,107
8-11	21,447	22,293	3,947

Fonte: Autoria Própria

Já para os resultados apresentados na Tabela 40, podemos perceber que no trecho 4-6 a corrente eficaz teve uma variação de 12,353% em relação a corrente fundamental. Este fato deve-se principalmente pela maior concentração de carga nessa região.

4.3.5 Distorção harmônica total ($DHTv$), efetiva ($DHTEv$) e individual ($DHIV$) de tensão

A Tabela 41 abaixo, apresenta os valores para Distorção harmônica total de tensão ($DHTv$) e Distorção harmônica efetiva de tensão ($DHTEv$) distorção individual de tensão ($DHIV$).

Tabela 41 - Distorções Harmônicas de Tensão - Segundo caso

Barra (k)	$(DHTv)$	$(DHTEv)$	$DHIV$	$DHIV$	$DHIV$
			$(H = 3)$	$(H = 5)$	$(H = 7)$
2	0,1208	0,1200	7,29398	6,8927	6,7322
3	0,1350	0,1338	8,14072	7,7038	7,5312
4	0,1957	0,1921	11,81893	11,1616	10,8973
5	0,2471	0,2399	15,05733	14,0677	13,6379
6	0,3414	0,3231	20,49008	19,4962	19,1260
7	0,2609	0,2524	15,99950	14,8371	14,3019
8	0,2545	0,2466	15,51401	14,4861	14,0391
9	0,3705	0,3474	22,20955	21,1610	20,7767
10	0,2633	0,2547	16,04716	14,9901	14,5352
11	0,2576	0,2494	15,72518	14,6589	14,1881

Fonte: Autoria Própria

Considerando os valores para as distorções harmônicas de tensão, observa-se que todos os valores para ($DHTv$) e ($DHTEv$) apresentados na Tabela 41, são praticamente iguais, isso deve-se principalmente por o sistema apresentar uma distorção harmônica ($< 30\%$), segundo *IEEE Std.1459 – 2010*.

4.3.6 Distorção harmônica total ($DHTi$) e efetiva ($DHTEi$) de corrente

A Tabela 42 abaixo, apresenta os valores para Distorção Harmônica Total de Corrente ($DHTi$), Distorção Harmônica Efetiva de Corrente ($DHTEi$) e distorção individual de corrente ($DHIi$).

Tabela 42 - Distorções Harmônicas de Corrente - Segundo caso

Trecho (Lk)	$(DHTi)$	$(DHTEi)$	$DHIi$	$DHIi$	$DHIi$
			(H = 3)	(H = 5)	(H = 7)
SE-2	0,4147	0,3830	33,9600	19,4911	13,6446
2-3	0,3467	0,3276	28,2313	16,4420	11,6154
2-4	0,4243	0,3906	34,7725	19,9222	13,9306
4-5	0,2854	0,2744	23,9003	12,9463	8,6978
4-6	0,5122	0,4559	41,6310	24,3456	17,2439
5-7	0,2807	0,2703	24,2125	12,1107	7,4249
5-8	0,2872	0,2760	23,8373	13,2120	9,0609
6-9	0,2705	0,2611	21,8835	12,9447	9,2300
8-10	0,2895	0,2781	23,6574	13,6250	9,6444
8-11	0,2837	0,2730	24,4493	12,2735	7,5239

Fonte: Autoria Própria

Para a distorção harmônica de corrente, a norma IEEE 519-2014, os limites de distorção individual de corrente são estabelecidos através de uma relação entre corrente de curto circuito e a corrente de carga, de forma que, quanto maior for essa relação, maior serão as distorções admissíveis no sistema. Já com relação aos indicadores individuais de corrente podemos perceber que os mesmos ficaram bem próximos se comparados com os valores percentuais de injeção propostos na modelagem do problema.

4.3.7 Fator K

O valor do *Fator K*, considerando um transformador na *SE*, ficou *Fator K* = 3,899. Desta forma, adota-se para este caso um transformador com fator *K* = 4. Assim, este transformador receberá um tratamento térmico especial capaz de suportar o sobreaquecimento causado pela circulação de correntes com frequências diferentes da frequência fundamental.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho possibilitou estimar o estado do sistema com a inserção de cargas não lineares e o nível de distorção que as cargas não lineares são capazes de produzir na rede elétrica utilizando-se da implementação de um algoritmo para o cálculo do fluxo de potência fundamental (frequência de 60 Hz) e harmônico com frequências múltiplas inteira da fundamental.

Os resultados obtidos demonstram que o algoritmo proposto foi capaz gerar valores de tensão e correntes harmônicas com erros próximos de zero quando comparados aos valores de tensão e correntes harmônicas obtidos com a utilização do software *ATPDraw*, desta forma, o algoritmo desenvolvido possibilita a utilização para estudos futuros relacionados aos impactos causados por cargas não lineares.

Outro fato importante da implementação do algoritmo proposto, se diz respeito a sua facilidade e praticidade para a realização de estudos aplicados a um sistema com um maior número de barras. Enquanto que, no *ATPDraw* deve-se modelar barra por barra, trecho por trecho e ainda realizar cálculos externos demandando um maior tempo. Já para o algoritmo proposto, cria-se apenas um arquivo de entrada, e nesse arquivo insere-se dados referente as cargas em cada barra, impedâncias de cada trecho e o apontador de cada barra.

Desta forma, o algoritmo proposto é capaz de apresentar várias soluções, alterando-se apenas alguns parâmetros de entrada.

PROPOSTA DE CONTINUIDADE DE PESQUISA

São propostas de continuidade deste trabalho:

- Validar o algoritmo em outros sistemas de distribuição;
- Validar o algoritmo utilizando softwares dedicados a estudos de fluxo harmônico;
- Realizar estudos com relação aos modelos de cargas considerando harmônicos;
- Levantar curvas de impedância versus frequência para estudo de ressonância;
- Realizar estudos de ressonância devido a instalação de bancos de capacitores;

REFERÊNCIAS

ARCHUNDIA-ARANDA, I; MOTA-PALOMINO, R. O. **Harmonic load flow method for radial distribution networks**. 2010. Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010 14th International Conference on. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5625416&newsearch=true&queryText=Harmonic%20Load%20Flow%20Method%20for%20Radial%20Distribution%20Networks>> Acesso em: 12 de outubro de 2017.

BHUTAD, A. G.; KULKARNI, S. V.; KHAPARDE, S. A. **Three-phase load flow methods for radial distribution networks**. 2003. TENCON 2003. Conference on Convergent Technologies for the Asia-Pacific Region (Volume 2). Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1273285>> Acesso em: 24 de outubro de 2017.

CANOSSA, Jaine H. **Um Programa iterativo para fluxo de potência**. 2007. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

CARVALHO, Marcus R. **Estudo comparativo de fluxo de potência para sistemas de distribuição radial**. 2006. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

CESPEDES, R. G. **New method for the analysis of distribution networks**. 1991. Power Delivery, IEEE Transactions on (Volume: 5, Issue: 1). Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=107303&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel3%2F61%2F3272%2F00107303.pdf%3Farnumber%3D107303>> Acesso em: 20 de outubro de 2017.

DUGAN, R; MCGRANAGHAN, M; SANTOSO, S; BEATY, H. **Electrical Power Systems Quality**, Third Edition, McGraw-Hill Education.

GARCIA, Flávio R. **Harmônicas em sistemas elétricos de potência**. 2008. 50 f. Disponível em: <http://www.iesa.com.br/institucional/pdf/pdf_reativa/ap_harmonicasep.pdf> Acesso em: 18 de outubro de 2017.

IEEE Std. 1100, 2005. **IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment**. Disponível em; <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1638205&newsearch=true&queryText=IEEE%20Std%201100-2005>>. Acesso em: 21 de outubro de 2017.

IEEE Std. 1459, 2010. **IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions**. Disponível em; <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=5439061>>. Acesso em: 26 de outubro de 2017.

HIYAMA, T.; HAMMAM, M.S.A.A. ; ORTMEYER, T.H. **Distribution system modeling with distributed harmonic sources**. 1989. Power Delivery, IEEE Transactions on (Volume: 4, Issue: 2). Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=25617>> Acesso em: 14 de outubro de 2017.

KAGAN, Nelson; OLIVEIRA, C. C. B.; ROBBIA, E. J. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

LEÃO, R.; SAMPAIO, R.; ANTUNES, F. **Harmônicos em Sistemas Elétricos**. 1 ed., Rio de Janeiro, Elsevier, 2014.

MANSOUR, Moussa R. **Algoritmo para obtenção de planos de restabelecimento para sistemas de distribuição de grande porte**. 2009. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional). Módulo 8 – Revisão 8. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo8_Revisao_8/9c78cfab-a7d7-4066-b6ba-cfbda3058d19>.

PUGER, Elson B. **Fluxo de carga não-iterativo para análise de sistemas de distribuição de energia elétrica.** 2013. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

ROSA, William M. da. **Ferramenta para análise estática em sistemas elétricos de potência com uso de sensibilidade.** 2014. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do ABC, Santo André, 2014.

SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W.; SEMLYEN, A.; LUO, G. X. **A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks.** 1998. Power Systems, IEEE Transactions on (Volume:3 , Issue: 2). Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=192932&newsearch=true&queryText=%20a%20compensation%20based%20power%20flow%20method%20for%20weakly%20meshed%20distribution%20transmission%20networks>> Acesso em: 11 de outubro de 2017.

SOUZA, Alexandre A. A. de; KAGAN, Nelson; UDAETA, Miguel E. M.; GEUS, Klaus de. **Estudo de viabilidade econômica na utilização de MicroGrid no sistema de distribuição elétrica de energia de média tensão.** 2014. In Congresso Internacional de Energia Elétrica. Buenos Aires, set. 2014. Disponível em: <<http://www.cidel2014.com/papers/825.pdf>> Acesso em: 13 de setembro de 2017.

VARIZ, Abilio M.; PEREIRA, José L. R.; Jr, Sandoval C.; BARBOSA, P. G. **Cálculo do fluxo de harmônicos em sistemas de potência trifásicos utilizando o método de injeção de correntes com solução iterativa.** Revista Controle & Automação. V. 19, nº 4, p. 178-198, abril, maio e junho 2008.

WEG, **Manual para correção do fator de potência.** Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-correcao-do-fator-de-potencia-958-manual-portugues-br.pdf>> Acesso em: 13 de outubro de 2017

VIANNA, M. P. **Gerenciamento de potência reativa em sistemas de distribuição utilizando controlador fuzzy de fator de potência.** 2009. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

WILLIAMS, S. M; BROWNFIELD, G.T.; DUFFUS, J.W. **Harmonic propagation on an electric distribution system: field measurements compared with computer simulation.** 1993. Power Delivery, IEEE Transactions on (Volume:8, Issue: 2). Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=216858>> Acesso em: 14 de outubro de 2017.