

**INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS  
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
VALTER GARCIA**

**INFLUÊNCIA DE CORRENTES HARMÔNICAS EM ESTUDOS DE  
ESTABILIDADE DE TENSÃO UTILIZANDO A CURVA QV EM SISTEMAS  
DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

**FORMIGA - MG  
2021**

**VALTER GARCIA**

**INFLUÊNCIA DE CORRENTES HARMÔNICAS EM ESTUDOS DE ESTABILIDADE  
DE TENSÃO UTILIZANDO A CURVA QV EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Formiga, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

**Área de Concentração:** Sistemas Elétricos de Potência.

**Orientador:** Prof. Dr. Renan Souza Moura

**FORMIGA - MG**

**2021**

VALTER GARCIA

INFLUÊNCIA DE CORRENTES HARMÔNICAS EM ESTUDOS DE  
ESTABILIDADE DE TENSÃO UTILIZANDO A CURVA QV EM SISTEMAS DE  
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de  
Minas Gerais, Campus Formiga, como requisito para  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Avaliado em 23 de março de 2021.

Nota: 95

BANCA EXAMINADORA

*Renan Souza Moura*

Prof. Dr. Renan Souza Moura - Orientador

*Patrick Santos de Oliveira*

Prof. Dr. Patrick Santos de Oliveira - Membro

*Jeane Silva de Souza*

Prof. Me. Jeane Silva de Souza - Membro

Garcia, Valter.

G216i      Influência de correntes harmonicas em estudos de estabilidade de tensão utilizando a curva QV em sistemas de distribuição de energia elétrica / Valter Garcia -- Formiga : IFMG, 2021.  
52p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Renan Souza Moura  
Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação,  
Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* Formiga.

1. Estabilidade de tensão. 2. Sistemas de distribuição de energia elétrica. 3. Fluxo de potência harmônico. 4. Curva QV. I. Moura, Renan Souza. II. Título.

CDD 621.3

*Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Msc. Simoni Júlia da Silveira.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por todas as bênçãos colocadas no meu caminho durante todo meu percurso, me mantendo firme durante todas as provações.

A meu pai, Gomercindo (in memoriam), e minha vozinha, Darci (in memoriam), pelo exemplo de caráter, honestidade, fé e amor. Os dois maiores incentivadores das realizações dos meus sonhos, minhas saudades. A minha mãe, Sirlene, e meus irmãos, Marcelo, Gislaine e Gesiane, que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando em todos os momentos da minha vida.

Aos meus padrinhos, Sirlei e João, por todas as orações, carinho e amor. Minhas primas Lorryne e Luciene, e toda minha família pela convivência, amizade e incentivo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Renan, pelas oportunidades de realizar projetos de iniciação científica, extensão e trabalho de conclusão de curso. Meu muito obrigado pela atenção, paciência, conselhos e por sempre me motivar a seguir em frente.

A todos funcionários e professores do IFMG – *Campus* Formiga pela dedicação e suporte concedido.

Aos meus amigos de longa data, que sempre estiverem me apoiando: Gustavo, Carlos, Suelem, Breno e Cristiane. Também gostaria de agradecer aos meus amigos que fiz neste intervalo, Lilian Barbosa, Bianca H., Larisa M., Sarah S., Vinicius V., Maristela A., Marielly S., Bruno G., Gabriel Fraga, Marcos V., Ygor M., Jean F., Thales G., Matheus Vaz, Luiz F., Fabio Santos e Fabricio Satiro.

Agradeço a paciência e dedicação aos meus parceiros em todos os trabalhos possíveis: Saulo e Matheus. A Beatriz pela amizade e atenção nestes últimos anos de graduação. Ao Victor Gonçalves pela amizade e as longas discussões acadêmicas onde no fim, majoritariamente ambos estiveram errados. Geovanna Garcia Leão, “a menina que me chamou para estudar e me colocou para lavar geladeira”, por ser essa pessoa incrível, parceira de prosa em todos os intervalos, sempre disposta a ajudar.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram, para que fosse possível essa graduação, meu mais sincero obrigado.

*"O que faz andar o barco não é a vela  
enfundada, mas o vento que não se vê".*

Platão

## RESUMO

O aumento na tecnologia na área de eletrônica de potência possibilitou uma melhoria nos processos de controle do fluxo de energia elétrica. Contudo, estes equipamentos podem fornecer correntes elétricas com formato não senoidal aos sistemas elétricos. Altos níveis de distorção no formato senoidal podem ocasionar problemas para as concessionárias de distribuição de energia elétrica, assim como nos equipamentos instalados. Entre os problemas podem ser citados: aumento no nível de tensão, aquecimento nos condutores e equipamentos da rede, atuação indevida dos relés de proteção, torque magnético contrário ao sentido de rotação de máquinas rotativas, aumento do erro em instrumentos de medição de energia elétrica, diminuição da vida útil dos equipamentos, entre outros fenômenos. A expansão dos sistemas elétricos de potência, bem como o seu pleno funcionamento, faz necessário a implementação de ferramentas que possibilitem análises dos efeitos ocorridos durante o processo de fornecimento de energia elétrica. A curva QV é uma ferramenta utilizada em estudos de estabilidade de tensão, sendo possível indicar o suporte reativo daquele barramento em relação ao sistema, e se o sistema é estável ou não sob o ponto de vista de tensão. Dentro deste contexto, este trabalho apresenta a influência de correntes harmônicas em curvas QV em um sistema teste do IEEE com todos os limites operacionais considerados. Sendo analisadas quatro condições: sem harmônicos, harmônicos de sequência direta, harmônicos de sequência inversa, e harmônicos de sequência direta e inversa. Os resultados demonstram que a presença de correntes harmônicas diminui a margem de potência reativa fornecida pela curva QV.

**Palavras Chave:** Estabilidade de tensão; Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica; Fluxo de Potência Harmônico; Curva QV.

## ABSTRACT

The increase in technology in the area of power electronics has enabled an improvement in the processes of control of the flow of electric energy. However, these devices can supply electrical currents with a format not sinusoidal to the electrical systems. High levels of distortion in the sinusoidal format may cause problems for electricity distribution concessionaires, as well as for installed equipment. Among the problems can be mentioned: increase in the voltage level, heating in the conductors and network equipment, improper performance of the protection relays, magnetic torque contrary to the rotation direction of rotating machines, increased error in electrical energy measuring instruments, the decrease in the useful life of the equipment and among others phenomena. The expansion of electrical power systems, as well as their full functioning, makes it necessary to implement tools that enable an analysis of the effects that occurred during the process of electricity supply. The QV curve is a tool used in studies of voltage stability, and it is possible to indicate the reactive support of that bus about the system, and whether the system is stable or not in terms of voltage. Within this context, this work presents the influence of harmonic currents in QV curves in an IEEE test system with all the operational limits considered. Four conditions are analyzed: no harmonics, direct sequence harmonics, reverse sequence harmonics, and direct and reverse sequence harmonics. The results show that the presence of harmonic currents decreases the reactive power margin provided by the QV curve.

**Key words:** Voltage stability; Electricity distribution systems; Harmonic Power Flow; QV curve.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Configuração do sistema elétrico .....  | 19 |
| Figura 2 – Sistema Interligado Nacional .....  | 20 |
| Figura 3 – Diagrama simplificado de uma subestação de distribuição .....   | 21 |
| Figura 4 – Curva de demanda diária.....  | 22 |
| Figura 5 – Modelagem trifásica de uma linha de distribuição .....  | 23 |
| Figura 6 – Classificação geral da estabilidade de sistemas de potência .....   | 25 |
| Figura 7 – Representação de uma curva QV genérica .....  | 27 |
| Figura 8 – Representação de uma curva QV genérica com margem negativa.....   | 28 |
| Figura 9 – Representação de uma curva QV genérica com margem positiva .....  | 29 |
| Figura 10 – Sistema “IEEE 4 Node Test Feeder”.....   | 31 |
| Figura 11 – Configuração dos pólos do sistema “IEEE 4 Node Test Feeder”.....   | 32 |
| Figura 12 – Diagrama da simulação da contribuição harmônica. ....  | 35 |
| Figura 13 – Curvas QV sem a presença de harmônicos. ....   | 40 |
| Figura 14 – Curvas QV com harmônicos de sequência inversa. ....  | 41 |
| Figura 15 – Curvas QV com harmônicos de sequência direta.....  | 42 |
| Figura 16 – Curvas QV com harmônicos de sequência inversa e direta .....   | 43 |
| Figura 17 – Curvas QV com as três condições trabalhadas .....  | 44 |
| Figura 18 – Curvas de tensão no domínio do tempo com a presença de harmônicos de sequência inversa em diferentes pontos da curva QV .....          | 45 |
| Figura 19 – Curvas de tensão no domínio do tempo com a presença de harmônicos de sequência direta em diferentes pontos da curva QV .....           | 45 |
| Figura 20 – Curvas de tensão no domínio do tempo com a presença de harmônicos de sequência inversa e direta em diferentes pontos da curva QV ..... | 46 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Características construtivas do condutor de fase.....  | 32 |
| Tabela 2 – Características construtivas do condutor de neutro .....   | 33 |
| Tabela 3 – Características do banco de transformadores .....  | 33 |
| Tabela 4 – Dados de cargas atendidas por fase.....  | 33 |
| Tabela 5 – Porcentagens do módulo das correntes harmônicas de ordem inversa, em função do módulo da corrente fundamental..... | 36 |
| Tabela 6 – Porcentagens do módulo das correntes harmônicas de ordem direta, em função do módulo da corrente fundamental.....  | 37 |
| Tabela 7 – Porcentagens do módulo das correntes harmônicas de ordem em função do módulo da corrente fundamental .....         | 38 |
| Tabela 8 – Margens de potência reativa da curva QV para o barramento de alimentação principal.....                            | 40 |

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

|         |   |   |
|---------|---|---|
| SIN     | – | Sistema Interligado Nacional                            |
| IEEE    | – | <i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i> |
| SEP     | – | Sistema Elétrico de Potência                            |
| STEE    | – | Sistema de Transmissão de Energia Elétrica              |
| SDEE    | – | Sistema de Distribuição de Energia Elétrica             |
| PRODIST | – | Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica       |
| ANEEL   | – | Agência Nacional de Energia Elétrica                    |

# SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1.INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>14</b> |
| <b>1.1.Motivação</b> .....   | <b>16</b> |
| <b>1.2.Hipóteses</b> .....   | <b>17</b> |
| <b>1.3.Objetivos</b> .....   | <b>17</b> |
| <b>1.6.Publicação</b> .....  | <b>18</b> |
| <b>1.7.Estrutura do Trabalho</b> .....   | <b>18</b> |
| <b>2.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....   | <b>19</b> |
| <b>2.1.Sistemas Elétricos de Potência</b> .....  | <b>19</b> |
| <b>2.2. Características do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica</b> .....                                   | <b>21</b> |
| <b>2.3.Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência</b> .....  | <b>24</b> |
| <b>2.4.Estabilidade de Tensão</b> .....  | <b>25</b> |
| <b>2.5.Curva QV</b> .....  | <b>27</b> |
| <b>2.6.Componentes Harmônicas</b> .....  | <b>29</b> |
| <b>3.METODOLOGIA</b> .....   | <b>31</b> |
| <b>3.1.Sistema “IEEE 4 Node Test Feeder”</b> .....   | <b>31</b> |
| <b>3.2.Levantamento das Curvas QV</b> .....  | <b>34</b> |
| <b>3.2.1.Curva QV Convencional</b> .....   | <b>34</b> |
| <b>3.2.2.Curva QV Com Presença de Harmônicos</b> .....   | <b>34</b> |
| <b>4.RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....   | <b>39</b> |
| <b>4.1.Curvas QV do Barramento de Alimentação Sem a Presença de Correntes Harmônica</b> .....                      | <b>39</b> |
| <b>4.2.Curvas QV do Barramento de Alimentação Com a Presença de Harmônicos de Sequência Inversa</b> .....          | <b>41</b> |
| <b>4.3.Curvas QV do Barramento de Alimentação Com a Presença de Harmônicos de Sequência Direta</b> .....           | <b>42</b> |
| <b>4.4.Curvas QV do Barramento de Alimentação Com a Presença de Harmônicos de Sequência Inversa e Direta</b> ..... | <b>43</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>4.5.Análises das Curvas Obtidas .....</b> | <b>44</b> |
| <b>5.CONCLUSÕES .....</b>                    | <b>47</b> |
| <b>6.TRABALHOS FUTUROS.....</b>              | <b>48</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>      | <b>49</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico ocasionou um aumento considerável no consumo de energia elétrica em todas as camadas da sociedade. Concomitantemente ocorreu uma expansão de todo o processo de abastecimento de energia elétrica – geração, transmissão e distribuição.

O sistema elétrico brasileiro passou por diversas expansões, turbulências e modificações desde o seu surgimento – meados da década de XX. A instabilidade econômica e ausência de incentivo governamental acarretou em uma reestruturação no sistema elétrico brasileiro, com o principal intuito de diminuir a influência do estado no mercado de energia elétrica (LUIZ, 2012).

A implementação do SIN - Sistema Interligado Nacional, realizada para melhorar a qualidade do fornecimento de energia elétrica, garantiu um aumento na confiabilidade da continuidade do serviço, principalmente pelo fato que a qualidade de abastecimento da energia elétrica é um dos fatores essenciais na sociedade (PETRY, 2012).

O aumento na complexidade operativa do sistema elétrico, proveniente da integração de múltiplos SEP (Sistema Elétrico de Potência), fez necessário a utilização de instrumentos para monitorar o estado operativo dos barramentos, mantendo assim as especificações técnicas de qualidade de energia, estabelecidas no Módulo 8 do PRODIST (2018), como o fornecimento de energia elétrica de forma segura, estável, confiável, interrupta e com fator de potência adequado.

Para atender estes fatores de qualidade de energia elétrica, as concessionárias de energia monitoram constantemente o sistema elétrico. Uma das áreas que auxilia os operadores é a estabilidade de tensão, segundo Kundur (2004) estabilidade de tensão é a capacidade de um SEP em manter níveis de tensões adequados em seus barramentos após a incidência de um distúrbio. Um distúrbio é caracterizado por qualquer evento que modifique o ponto de equilíbrio do sistema elétrico, como, tais como: uma variação abrupta de cargas, variação de taps dos transformadores, curto circuitos, atividades de manobra, entre outros (MOURA, 2016).

O aumento da complexidade operativa nos SDEE (Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica), devido principalmente a inserção de novas tecnologias, incentivou a adaptação de ferramentas da área de estabilidade de tensão, que originalmente foram criadas para serem utilizadas em análises em sistemas de geração e transmissão de energia elétrica, nos SDEE, como as curvas PV e QV (PUJARA *et al.*, 2011; BUJAL *et al.*, 2014).

Esta curva permite mensurar o suporte de potência reativa que determinado barramento apresenta em relação ao sistema elétrico. Além disso, a curva QV detecta, por meio de análise de sensibilidade, regiões estáveis e instáveis sob o ponto de vista de tensão.

No trabalho de Kumar *et al.* (2020) é realizada uma análise de estabilidade de tensão em sistemas de 5 e 9 barramentos com várias compensações *shunt* e série. Nas curvas QV apresentadas foram observadas que as compensações *shunt* em comparação com a série proporcionaram uma maior margem de reativo quando aplicadas separadamente. Os resultados também demonstraram que a combinação dos dois tipos de compensações resultava em melhores margens de reativos da curva QV.

Guimarães *et al.* (2011) apresentaram um estudo dos problemas de segurança de tensão do sistema empregando a curva QV para determinar a margem de potência reativa de cada barramento e assim, os locais ideais para a inserção de pequenas unidades de geração distribuída.

Almeida *et al.* (2013) utilizaram a curva QV para estudar o colapso de tensão, propondo assim uma ferramenta de planejamento baseada nos critérios de estabilidade de tensão, analisando a relação entre a geração distribuída e a estabilidade/confiabilidade em SDEE.

No trabalho de Marujo *et al.* (2015) é apresentado métodos de controle de potência reativa e tensão, em um SEP real com as suas devidas condições e limites operativos. Utilizando as curvas QV nas suas análises, é possível reconhecer e classificar a robustez de cada barramento, com as propriedades de estabilidade de tensão.

Moura *et al.* (2016) empregam a curva QV como ferramenta para indicar a robustez dos geradores em relação a margem de potência reativa, mostrando assim informações que podem ser utilizadas em estudos de contingência. Também foi detectado que a margem positiva está ligada a uma possibilidade na instabilidade de tensão. Uma lógica *fuzzy* é projetada para alterar o sistema para operar na região segura.

Sewdien *et al.* (2018) realizaram um estudo da influência do acréscimo no uso de elementos de eletrônica de potência nas análises de estabilidade de tensão em SEP. Demonstraram uma comparação entre as análises estacionárias e no domínio do tempo em aplicações de estabilidade.

A presença de harmônicos na rede elétrica diminui a eficiência e a qualidade de energia elétrica do sistema de distribuição elétrica, (DUNGAN, 2012), esta monografia tem como objetivo analisar a influência de correntes harmônicas no tracejado da curva QV em um SDEE.

### **1.1. Motivação**

O desenvolvimento tecnológico em eletrônica de potência possibilitou uma gama maior de aplicações, no controle de fluxo de energia elétrica, tais como o inversor de frequência. Infelizmente, a utilização de eletrônica de potência distorce os formatos de ondas de tensão e corrente na rede elétrica, diminuindo a eficiência e qualidade da energia fornecida, afetando diretamente o fluxo de potência. Os operadores do SEP devem ficar atentos a esta distorção.

Dentro deste cenário, foi realizada uma análise sobre a influência das correntes harmônicas dentro de um estudo de estabilidade de tensão em SDEE. Mais especificamente, as curvas QV foram obtidas sem e com a presença de harmônicos em um sistema teste do IEEE.



## 1.2. Hipóteses

Visando a relevância do sistema elétrico em manter o fornecimento de energia elétrica de forma contínua, estável e confiável, este trabalho empregou a curva QV para analisar os impactos das correntes harmônicas no estudo de estabilidade de tensão. Dentro deste contexto, foram feitos alguns questionamentos:

- É possível realizar um fluxo de potência que contemple os efeitos de correntes harmônicas em sistemas elétricos de potência?
- Qual a influência dos harmônicos na margem de potência reativa na curva QV?
- As correntes harmônicas são prejudiciais à estabilidade de sistemas de distribuição?

Para responder estas perguntas, foi realizado o estudo de estabilidade de tensão com a curva QV em SDEE. A curva QV foi obtida sem e com a presença de correntes harmônicas em um sistema teste do IEEE.

## 1.3. Objetivos

O objetivo geral desta monografia é analisar o impacto das correntes harmônicas na curva QV em um sistema de distribuição de energia elétrica utilizando o fluxo de potência harmônico.

E como nos objetivos específicos:

- Modelar o fluxo de potência harmônico;
- Calcular a curva QV com a presença de correntes harmônicas;
- Comparar os resultados da curva QV sem e com a presença de correntes harmônicas.

#### **1.4. Publicação**

Renan Souza Moura, Valter Garcia, Paulo Raimundo Gomes de Lima, Antônio Carlos Zambroni de Souza, **Influência de correntes harmônicas em estudos de estabilidade de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica**. VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Santo André, São Paulo, 25 a 28 de agosto de 2020.

#### **1.5. Estrutura do Trabalho**

A monografia está estruturada em cinco capítulos, incluindo este capítulo introdutório.

Capítulo 2: é composto pelo referencial teórico, apresentando conceitos importantes para a compreensão do trabalho.

Capítulo 3: a metodologia utilizada para a confecção dos resultados.

Capítulo 4: os resultados obtidos no trabalho.

Capítulo 5: a conclusão e os trabalhos futuros.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma visão geral dos conceitos requeridos para compreensão do problema. Inicialmente, apresenta-se aspectos gerais de um SEP, de sistemas de transmissão e distribuição, estabilidade de tensão, curva QV e por fim as componentes harmônicas.

### 2.1. Sistemas Elétricos de Potência

O sistema elétrico possui uma vasta variedade de componentes como geradores, transformadores elevadores e abaixadores, linhas de transmissão, chaves seccionadoras, reguladores de tensão, religadores automáticos, linhas de distribuição, relés de proteção, disjuntores, entre outros equipamentos, em todos os processos do fornecimento de energia elétrica. É ilustrado na Figura 1 a configuração do sistema elétrico.

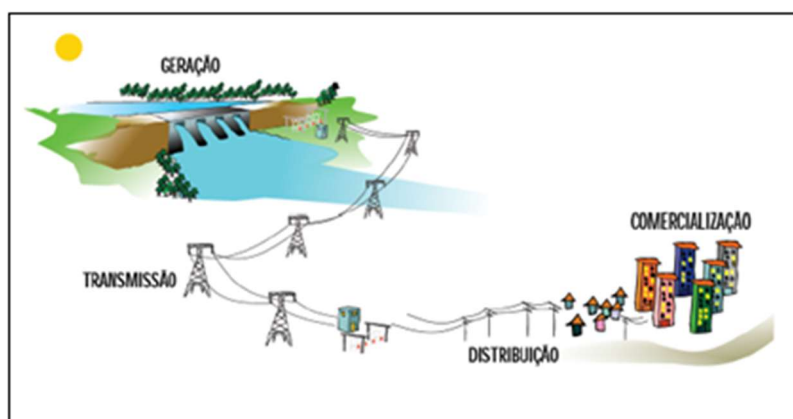


Figura 1 – Configuração do sistema elétrico.

Fonte: (Cartilha “Por dentro da conta de luz” – ANEEL, 2016).

O processo de geração de energia ocorre na conversão de energia cinética em energia elétrica. O fluido de trabalho - vento, água, vapor, entre outros, movimentam as turbinas que são acopladas aos geradores. São utilizados geradores síncronos e as tensões geradas estão entre 10 a 30 kV. As tensões geradas são elevadas em estações elevadoras para serem utilizadas em STEE (Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica).

Os STEE são dimensionados para realizar transferências de energia a grandes distâncias. Utilizam pequenos valores de corrente com o intuito de reduzir as perdas ôhmicas. As linhas de transmissão são conectadas em subestações de distribuição, responsáveis, por sua vez, em fornecer energia elétrica para os consumidores conectados nos sistemas de distribuição de energia elétrica.

Na Figura 2 é possível perceber que apenas algumas poucas regiões não estão conectadas no SIN.

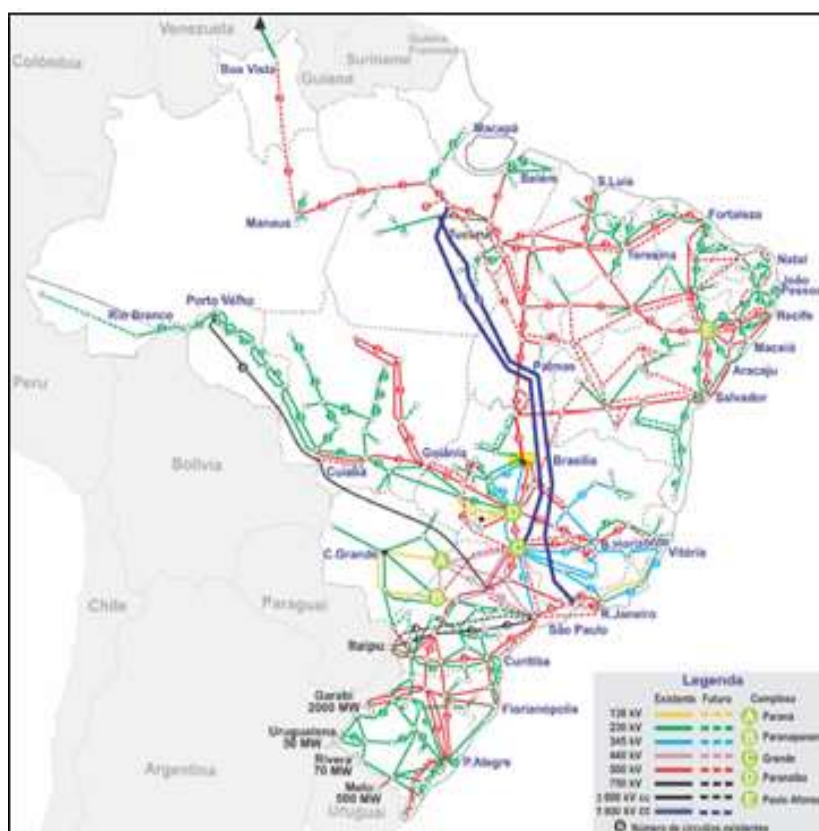


Figura 2 – Sistema Interligado Nacional.

Fonte: (ONS, 2019).

É importante pontuar que neste contexto, este trabalho é destinado ao estudo de estabilidade de tensão em SDEE. Assim, a próxima seção discutirá as características gerais de um SDEE.

## 2.2. Características do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

Os SDEE são responsáveis pela entrega final de energia ao consumidor, e é de total responsabilidade da concessionária de distribuição garantir a operação destes sistemas, mantendo bons índices operacionais. Na Figura 3 é apresentado o diagrama de uma subestação de distribuição, majoritariamente as linhas de distribuição são radiais, ou seja, possuem único sentido de fluxo de potência – do barramento de alimentação à carga.

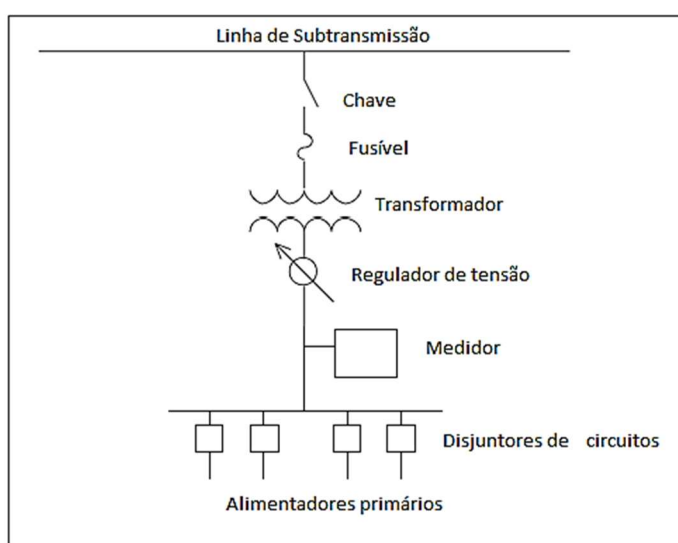


Figura 3 – Diagrama simplificado de uma subestação de distribuição.

Fonte: Adaptado de (KERSTING, 2002).

São equipamentos fundamentais para a operação de um sistema de distribuição: transformadores, reguladores de tensão, isoladores, medidores de tensão e corrente, religadores, chaves, comutadores, equipamentos de proteção, para-raios, postes (KUNDUR, 1993).

Os consumidores são categorizados como: residencial, comercial, rural ou industrial. Podendo ser também divididos em dois grupos: A e B. Sendo classificados de acordo com as tensões entregues pelas concessionárias de energia elétrica, esta classificação está diretamente atrelada com o tipo de carga a ser atendido: baixa, média e alta tensão (MAMEDE, 2010).

Os sistemas de distribuição de energia elétrica apresentam, em geral, linhas radiais, que apresentam único sentido de fluxo de potência – da subestação para os consumidores finais.

Todo o processo de distribuição de energia é regulado pelo PRODIST – conjunto de documentos de regras e requisitos técnicos aos quais as concessionárias de distribuição estão sujeitas.

O fluxo de potência nas linhas de distribuição é por natureza desequilibrado, devido ao espaçamento assimétrico entre os cabos fase e que a maior parte das cargas são monofásicas e alocadas em diferentes fases. Este desequilíbrio apresenta valores diferentes ao longo do dia, como observado na Figura 4.

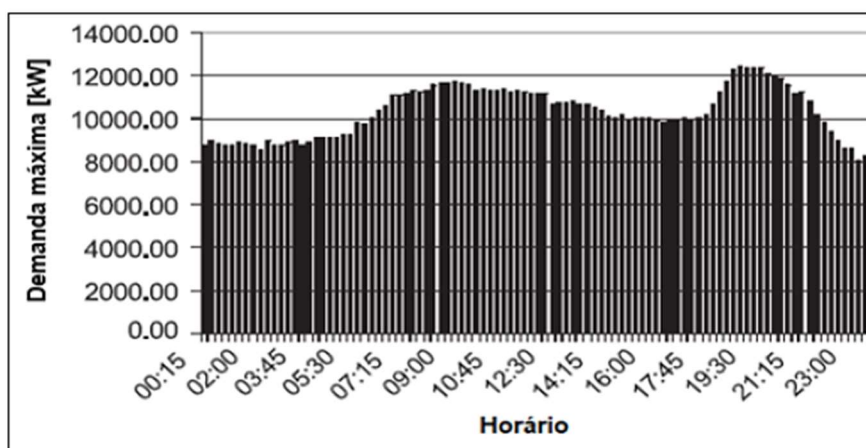


Figura 4 – Curva de demanda diária.

Fonte:(KERSTING, 2002).

Outro fator essencial para uma análise de um sistema de distribuição de energia elétrica é conhecer as perdas ocasionadas neste processo. A perda de potência elétrica é determinada pela diferença entre a potência injetada e a potência entregue. As perdas de potência são divididas em perdas técnicas e não técnicas. As perdas técnicas são características do processo de transporte de energia elétrica, como: efeito joule nos condutores, perdas nos núcleos magnéticos dos transformadores e perdas dielétricas. As perdas não técnicas são decorrentes de indevidas ações humanas como: roubo de energia elétrica e ligações incorretas (GRANADOS, 2018).

Para calcular as perdas nos sistemas de distribuição é necessário a execução de um fluxo de potência do sistema de interesse. Para isso, é indispensável

conhecer as cargas alimentadas neste sistema e a modelagem adequada da rede.

Existe a necessidade encontrar os valores de tensões nos barramentos do sistema. Estes valores devem estar dentro dos limites operativos, o que significa uma boa regulagem de tensão e menores perdas no transporte de energia.

Para encontrar os valores de tensões nos barramentos, existe a necessidade de executar um fluxo de potência. Entretanto, para que o fluxo de potência apresente valores condizentes com a realidade, é necessário desenvolver modelos matemáticos que expressem as linhas de distribuição, pressupondo o desbalanço de cargas entre as fases e a influência da alocação assimétrica dos condutores.

Carson em 1926 apresentou uma técnica para determinar as impedâncias próprias e mútuas de linhas aéreas e subterrâneas, sendo possível também determinar as impedâncias sequenciais e admitância *shunt* em sistemas trifásicos. As admitâncias *shunt* geralmente apresentam valores irrelevantes, em SDEE com baixos níveis de tensão, durante a modelagem das linhas de distribuição como evidenciado por Kersting (2002). Fato também comprovado em Montemezzo (2016), pois é demonstrado que o efeito capacitivo ocasionado entre os condutores fase e terra é mais significativo em valores de tensão elevada, que normalmente são utilizados em STEE.

Assim, um modelo apropriado de linha de distribuição está indicado na Figura 5. Neste modelo de linha, apenas serão considerados os efeitos da impedância série e impedância mútua causados pela passagem de corrente elétrica nos condutores.

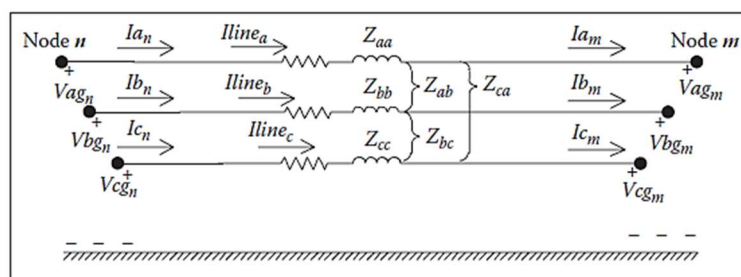


Figura 5 – Modelagem trifásica de uma linha de distribuição.

Fonte: (KERSTING, 2002).

### 2.3. Estabilidade de Sistemas Elétricos de potência

O SEP foi projetado para atender a demanda de energia elétrica, de forma confiável, interrupta e econômica, operando com oscilações mínimas na tensão e frequência. Sendo necessário assim, estudos que analisem o SEP em condições normais e sob possíveis perturbações.

As grandes distâncias entre as unidades geradoras das centrais consumidoras, o aumento de demanda, e a inviabilidade econômica e ambiental na inserção de novas de linhas transmissão resultam na operação de sistemas próximos aos limites operativos, ocasionando um aumento na probabilidade de ocorrência de fenômenos de instabilidade.

Kundur em 1994, define estabilidade em SEP como a capacidade de um sistema em uma determinada condição inicial retornar ao equilíbrio operacional após sujeito a uma perturbação, que pode ser ocasionada por: curto-circuito na linha, inserção ou retirada de blocos de cargas, saída de unidades geradoras, etc.

Os estudos de estabilidades são divididos em três categorias: estabilidade de ângulo, tensão e frequência. Estas classificações auxiliam o desenvolvimento de estudos computacionais para realizar a análise e a melhor ação de controle corretivo a ser implementada. Estas classificações são apresentadas na Figura 6 (VILLASANTI, 2016).

A estabilidade angular é a capacidade de uma máquina síncrona de manter seu sincronismo após uma perturbação, e a estabilidade de frequência a capacidade do SEP em manter a frequência elétrica nominal após um desequilíbrio entre carga e geração.

Conforme indicado anteriormente, esta monografia pretende utilizar uma ferramenta de estabilidade de tensão em SDEE. Assim, a próxima seção é destinada a fornecer mais detalhes sobre este tipo de estabilidade.



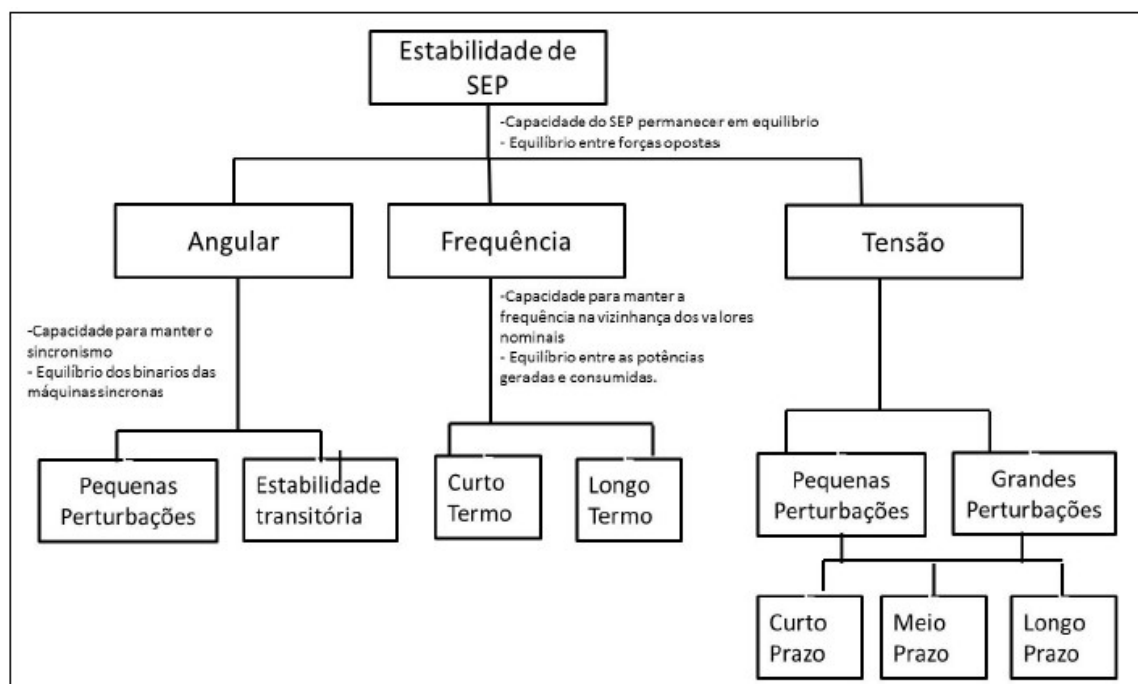


Figura 6 – Classificação geral da estabilidade de sistemas de potência.

Fonte: (VILLASANTI, 2016).

## 2.4. Estabilidade de Tensão

A estabilidade de tensão é a capacidade do SEP em manter condições aceitáveis de tensão em todos os barramentos após uma perturbação, ou seja, o sistema opera em modo de instabilidade de tensão quando a incidência de um distúrbio leva a uma progressiva redução ou elevação da tensão nas barras do sistema (KUNDUR, 1994).

Um sistema sob perturbações tende a compensar as potências da carga realizando ajustes na regulação de tensão, regulação de tapas do transformador e desligamento de motores. Tais eventos subsequentes podem resultar em um esgotamento nas linhas de alta tensão, ocasionando um aumento de consumo de reativos e a diminuição da tensão (VILLASANTI, 2016).

A instabilidade de tensão é ocasionada principalmente pela incapacidade de um SEP em manter um balanço reativo adequado e sustentar as tensões nos barramentos em condições adequadas. Ou seja, um sistema com instabilidade de tensão apresenta uma demanda por potência reativa maior que as suas capacidades das fontes disponíveis (CUTSEM, 1998).

A ausência de disponibilidade de reativos no sistema ocasiona uma instabilidade de característica local, porém podem propagar pela vizinhança, ocasionando uma queda de tensão, ou até mesmo um blecaute; este fenômeno é chamado de colapso de tensão (AGUIAR, 2015).

A estabilidade de tensão é classificada em relação a magnitude do distúrbio: estabilidade de tensão transitórias (grandes perturbações) e estabilidade de tensão de regime permanente (pequenas perturbações). Estabilidade de tensão transitória está diretamente relacionada à habilidade do sistema em manter os valores de tensões em níveis aceitáveis nos barramentos após distúrbios de grandes proporções, como ocorrência de curto-circuito, saída de um grande bloco de cargas ou retirada de geradores. Esta forma de estabilidade é utilizada em simulações não lineares no domínio no tempo, com escalas suficientes para capturar as interações entre os elementos dos sistemas, utilizando modelos dinâmicos.

Já a estabilidade de tensão de regime permanente é a habilidade do SEP em controlar e manter a níveis normais de operação na tensão, após submetido a pequenos distúrbios, como mudanças gradativas na carga, mudanças de *tap* de transformadores, etc. Como os impactos no sistema são pequenos, a utilização de equações algébrico-diferenciais linearizadas no ponto de operação é suficiente para a representação do SEP. A estabilidade de tensão é analisada por meio do emprego de métodos estáticos e/ou dinâmicos.

A análise dinâmica emprega a utilização de equações diferenciais lineares e não-lineares para descrever o comportamento do sistema no domínio do tempo, possibilitando uma reprodução fiel da cronologia de eventos. (KUNDUR, 1994). Contudo este tipo de análise necessita de uma grande quantidade de dados e longos tempos de simulação.

A análise estática é caracterizada principalmente pelo baixo esforço computacional e a exigência de uma menor quantidade de dados e condições a serem consideradas. A análise estática possibilita determinar, em regime permanente, o ponto operativo do sistema em todos os barramentos, a área crítica do sistema, a margem crítica do sistema, a classificação de contingências críticas, a quantidade de reativo necessária para realizar a compensação, o melhor local para inserir esta compensação e a determinação de redução de cargas para preservar o nível de

tensão operacional (OCARIZ, 2007; KUNDUR, 1994).

O método de análise, estático ou dinâmico, deve ser escolhido decorrente do tipo de perturbação envolvido no estudo de interesse e a quantidade de dados disponíveis. As análises dinâmicas e estáticas são complementares, ou seja, devem ser utilizadas em conjunto.

Nesta monografia foi utilizado uma das ferramentas da área de estabilidade de tensão, a curva QV. Esta curva está enquadrada dentro da análise tipo estática e será descrita na próxima seção.

## 2.5. Curva QV

A curva QV é uma ferramenta muito utilizada em estudos de estabilidade de sistemas de transmissão, em que é possível analisar a sensibilidade da variação de tensão nos barramentos com relação a injeção ou absorção de potência reativa (MOURA, 2016).

A curva QV é obtida por meio de sucessivos cálculos de fluxos de potências, onde alterando os valores de tensão na barra, obtém-se os seus respectivos valores de potências reativas necessários para manter as tensões especificadas. A Figura 7 ilustra uma curva QV genérica.

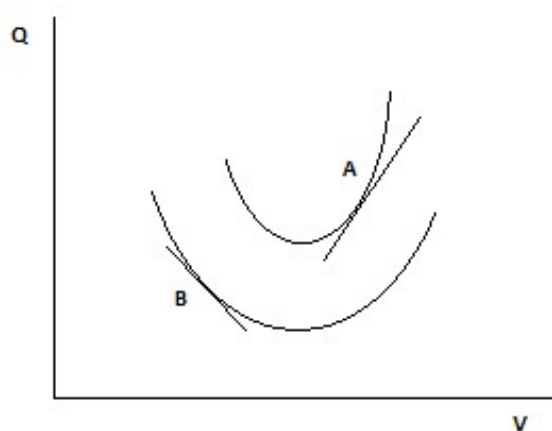


Figura 7 – Representação de uma curva QV genérica.

Fonte: Autor.

A curva QV apresenta duas regiões de estabilidade: região estável e região instável. A região estável está representada pela reta tangente em torno do ponto A, onde é possível observar uma inclinação positiva que significa que o aumento de potência reativa decorre em um aumento de tensão no barramento. A região instável está representada pela reta em torno do ponto B com a inclinação da reta negativa, que significa que o aumento de potência reativa resulta em um decréscimo de tensão no barramento. (MOURA, 2016).

Além de determinar a região de estabilidade do sistema com a curva QV, é possível extrair o nível crítico de tensão e a margem de potência reativa de um barramento.

O Nível Crítico de Tensão é o menor valor de tensão obtido na curva. Este ponto mínimo, no qual  $dQ/dV$  é nulo, representa o limite de estabilidade do sistema e o menor valor de reativo necessário para manter o sistema operando de maneira estável. (GIMÉNEZ, 2015).

A Margem de Potência Reativa é medida pela distância entre o eixo das abcissas, e o ponto mínimo da curva. Esta margem pode ser categorizada como negativa ou positiva. A margem é positiva quando estiver acima do eixo horizontal, e negativa quando estiver abaixo. Nas Figuras 8 e 9 estão apresentadas, respectivamente, margens positivas e negativas de curva QV (MOURA, 2016).

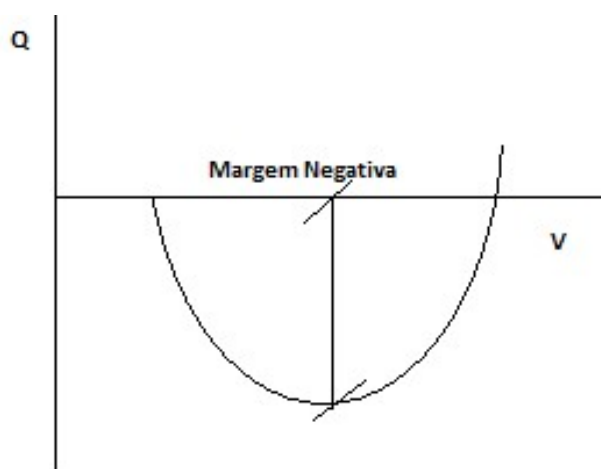


Figura 8 – Representação de uma curva QV genérica com margem negativa.

Fonte: Autor.

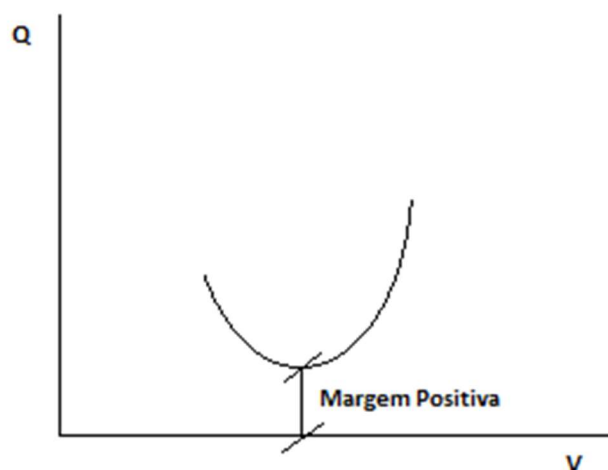


Figura 9 – Representação de uma curva QV genérica com margem positiva.

Fonte: Autor.

A proposta deste trabalho é determinar o impacto das correntes harmônicas na curva QV. Assim, a próxima seção discutirá sobre componentes harmônicas.

## 2.6. Componentes Harmônicas

O aumento da utilização de equipamentos com cargas não lineares na eletrônica de potência resultou em uma perda do formato puramente senoidal das tensões e correntes no sistema elétrico.

A teoria de Fourier demonstra que é possível representar qualquer forma de onda por somatórias de senóides e cossenóides de diferentes frequências, amplitudes e fases. Aplicando a transformada de Fourier é possível decompor o formato de onda gerado por cargas não lineares em ondas senoidais de frequências múltiplas da fundamental (OPPENHEIM *et al.*, 2010).

A corrente harmônica interfere na qualidade de fornecimento de energia elétrica, diminuindo a eficiência do sistema elétrico e a vida útil dos equipamentos, aumentando as perdas nos processos de transmissão e principalmente na distribuição de energia, é mais comum a presença de níveis maiores de harmônicos (NAKAMURA, 2011).

Correntes harmônicas geradas em um barramento propagam pelo sistema e acarretam uma elevação da distorção harmônica da tensão nos outros barramentos, aumentando assim os harmônicos em todo o sistema.

Assim sendo necessário modelagens que possibilitem analisar o sistema de distribuição sobre a influência dos harmônicos, Zambroni *et al.* em 2016 apresenta um método para modelar as impedâncias do sistema sob a influência de correntes harmônicas por meio das equações (1), (2) e (3). Sendo  $h$  é a ordem do harmônico analisado,  $R_1$  a resistência na ordem harmônica fundamental ( $h = 1$ ),  $X_{L1}$  a reatância indutiva na ordem harmônica fundamental ( $h = 1$ ) e  $X_{C1}$  a reatância capacitiva na ordem harmônica fundamental ( $h = 1$ ).

$$R_h = R_1 * \sqrt{h} \text{ } [\Omega] \quad (1)$$

$$X_{Lh} = X_{L1} * h \text{ } [\Omega] \quad (2)$$

$$X_{Ch} = \frac{X_{C1}}{h} \text{ } [\Omega] \quad (3)$$

Os valores das potências reativas e tensões que compõem a curva QV com a presença de correntes harmônicas são calculados utilizando as equações (4) e (5). Sendo  $|V_h|$  o módulo do fasor de tensão para cada harmônico,  $Q_h$  é a potência reativa de cada harmônico e  $h$  é a ordem do harmônico (ANEEL, 2018).

$$V_T = \sqrt{\sum |V_h|^2} \quad (4)$$

$$Q_T = \sqrt{\sum Q_h^2} \quad (5)$$

### 3. METODOLOGIA

Nesta seção é apresentada a metodologia utilizada para obter as curvas QV convencional e com a presença de correntes harmônicas no sistema teste “*IEEE 4 Node Test Feeder*”, todo o processo de simulação foi realizado por meio do *software* MATLAB.

Para demonstrar o efeito da presença das correntes harmônicas na estabilidade de sistemas de distribuição de energia elétrica, foram realizadas diferentes análises.

As componentes harmônicas de sequência nula não serão incluídas, visto que de acordo com a teoria de componentes simétricas, transformadores trifásicos com ligações internas do tipo delta-estrela não permitem a passagem de harmônicos de sequência nula.

#### 3.1. Sistema “*IEEE 4 Node Test Feeder*”

Foi utilizado como base de estudo o sistema teste “*IEEE 4 Node Test Feeder*”. Esse sistema possui quatro barramentos, sendo o barramento 1 representando a fonte de alimentação principal, um transformador conectado entre os barramentos 2 e 3, duas linhas de distribuição e uma carga desbalanceada sendo abastecida no barramento 4. As características do sistema teste podem ser obtidas nas Figuras 10 e 11, e nas Tabelas 1,2, 3 e 4.

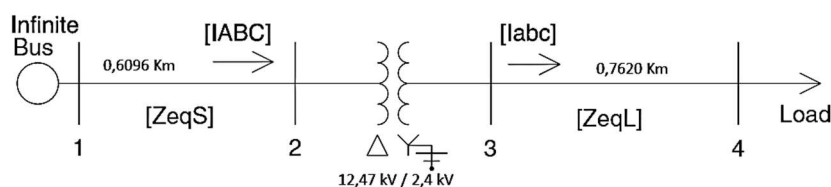


Figura 10 – Sistema “*IEEE 4 Node Test Feeder*”.

Fonte: (KERSTING, 2002).

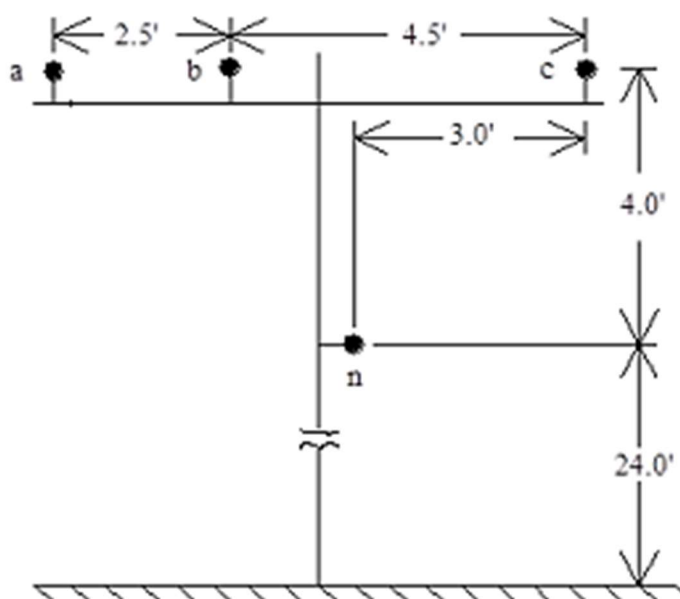


Figura 11 – Configuração dos pólos do sistema "IEEE 4 Node Test Feeder".

Fonte: (KERSTING, 2002).

Tabela 1 – Características construtivas do condutor de fase.

| Condutor de Fase                   |
|------------------------------------|
| Modelo = 336,400 26/7 ASCR         |
| Resistência à 25°C = 0,278 Ω/milha |
| MG=0,0244 ft                       |
| Diâmetro = 0,721 in                |
| Fonte: (KERSTING, 2002).           |



Tabela 2 – Características construtivas do condutor de neutro.

|  |
|--|
| Condutor de Neutro                         |
| Modelo = 4/0 6/1 ASCR                      |
| Resistência à 25°C = 0,445 $\Omega$ /milha |
| MG=0,00514 ft                              |
| Diâmetro = 0,563 in                        |
| Fonte: (KERSTING, 2002).                   |

Tabela 3 – Características do banco de transformadores.

|                          |          |
|--------------------------|----------|
| Tensão no primário       | 12,47 kV |
| Tensão no secundário     | 2,4 kV   |
| Potência                 | 2000 kVA |
| Impedância por fase      | 1+j6 pu  |
| Fonte: (KERSTING, 2002). |          |

Tabela 4 – Dados de cargas atendidas por fase.

|                          |                           |
|--------------------------|---------------------------|
| Fase A                   | 750 kW fp =0,85 indutivo  |
| Fase B                   | 1000 kW fp =0,90 indutivo |
| Fase C                   | 1230 kW fp =0,95 indutivo |
| Fonte: (KERSTING, 2002). |                           |

## 3.2. Levantamento das Curvas QV

### 3.2.1. Curva QV Convencional

Os seguintes procedimentos foram utilizados para calcular as curvas QV sem a presença de harmônicos:

1. Obter as matrizes de impedância empregadas de acordo com as características construtivas do sistema de distribuição;
2. Estabelecer as condições iniciais;
3. Definir as condições de convergência (tolerância mínima de 0,0001 ou atingir o limite de 100 iterações);
4. Utilizar o método de varreduras, similar ao aplicado por Kersting (2002) para obter o cálculo de fluxo de potência;
5. Obtendo-se o ponto operativo, anotar os valores de tensão e potência reativa no barramento de alimentação principal, gerando assim um ponto da curva QV;
6. Reduzir a tensão especificada no barramento de geração e inicie novamente os passos 4 e 5 até a convergência do fluxo de potência não seja obtida.

### 3.2.2. Curva QV Com Presença de Harmônicos

Para simular o efeito das correntes harmônicas foi considerada a carga como a geradora de correntes harmônicas. Assim, existe um fluxo de potência no sentido da carga ao gerador para cada ordem harmônica. A tensão  $V_h$  é o incremento da tensão no barramento 1, utilizado na equação na 4, devido a existência de uma corrente de ordem  $h$ , após a correção das impedâncias por meio das equações (1), (2) e (3). Os valores de corrente de uma determinada ordem harmônica  $h$  são especificados de forma proporcional à corrente de ordem harmônica fundamental

( $h=1$ ). Estes valores de correntes harmônicas estão indicados nas Tabelas 4, 5 e 6.

Neste processo foi considerado o princípio de superposição de efeitos, ou seja, cada ordem de corrente harmônica é uma fonte independente de corrente. As equações (4) e (5) foram utilizadas para calcular os pontos da curva QV com a presença de correntes harmônicas.

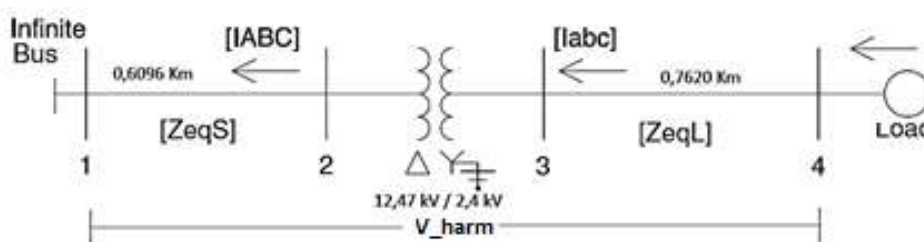


Figura 12 – Diagrama da simulação da contribuição harmônica.

Fonte: Autor.

Os passos da metodologia para calcular as curvas QV com a presença de harmônicos são listados a seguir:

1. Cálculo do fluxo de potência para a frequência fundamental pelo método de varredura;
2. Para cada valor de corrente encontrado no passo 1, especificam-se as correntes harmônicas, em três condições de análise diferentes:
  - Harmônicos de sequência inversa – Tabela 4;
  - Harmônicos de sequência direta – Tabela 5;
  - Harmônicos de sequência direta e inversa – Tabela 6.
3. Correção dos valores de impedância do sistema elétrico de acordo com as equações (1) e (2);
4. Cálculo do fluxo de potência para cada corrente especificada no passo 2;
5. Os pontos das curvas QV são calculados utilizando as equações (4) e (5);

6. Para obter novos pontos na curva QV, são repetidos os passos 1 a 5, com novos valores de tensões no barramento de geração para a frequência fundamental;

7. O processo se encerra quando não existe ponto operativo durante a execução do passo 1.

Tabela 5 – Porcentagens do módulo das correntes harmônicas de ordem inversa, em função do módulo da corrente fundamental

| Harmônico | Porcentagem |
|-----------|-------------|
| 4         | 9,30        |
| 7         | 8,25        |
| 10        | 7,20        |
| 13        | 6,15        |
| 16        | 5,10        |
| 19        | 4,05        |
| 22        | 3,00        |
| 25        | 1,95        |

Fonte: Autor.

Tabela 6 – Porcentagens do módulo das correntes harmônicas de ordem direta, em função do módulo da corrente fundamental

| Harmônico | Porcentagem |
|-----------|-------------|
| 2         | 10,00       |
| 5         | 8,95        |
| 8         | 7,90        |
| 11        | 6,85        |
| 14        | 5,80        |
| 17        | 4,75        |
| 20        | 3,70        |
| 23        | 2,65        |

Fonte: Autor.

Tabela 7 – Porcentagens do módulo das correntes harmônicas de ordem em função do módulo da corrente fundamental

| Harmônico | Porcentagem | Sequência |
|-----------|-------------|-----------|
| 2         | 10,00       | Negativa  |
| 4         | 9,30        | Positiva  |
| 5         | 8,95        | Negativa  |
| 7         | 8,25        | Positiva  |
| 8         | 7,90        | Negativa  |
| 10        | 7,20        | Positiva  |
| 11        | 6,85        | Negativa  |
| 13        | 6,15        | Positiva  |
| 14        | 5,80        | Negativa  |
| 16        | 5,10        | Positiva  |
| 17        | 4,75        | Negativa  |
| 19        | 4,05        | Positiva  |
| 20        | 3,70        | Negativa  |
| 22        | 3,00        | Positiva  |
| 23        | 2,65        | Negativa  |
| 25        | 1,95        | Positiva  |

Fonte: Autor.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os harmônicos causam grandes problemas aos sistemas elétricos e equipamentos. Uma alta quantidade de distorção harmônica de sequência inversa induz campos magnéticos contrários nos estatores de máquinas rotativas, resultando em vibrações, alteração do ponto de operativo em regime permanente e diminuição do torque médio. Em circuitos com distorções harmônicas de sequência zero, as correntes do condutor neutro possuem valores três vezes maiores, sendo prática usual a utilização de transformadores trifásicos em ligações do tipo delta, para impossibilitar a propagação deste efeito para o restante do sistema (MIYASAKA, 2017).

Desta forma faz necessário estudos que analisem a presença das correntes harmônicas de forma isolada. Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos em simulações utilizando o *software* MATLAB em estudos de estabilidade de tensão utilizando a curva QV em SDEE, sem harmônicos, e com harmônicos de sequência direta e/ou inversa.

### 4.1. Curvas QV do Barramento de Alimentação Sem a Presença de Correntes Harmônicas

Como apresentado na metodologia, a primeira análise realizada é a construção da curva QV em sistemas de distribuição de energia elétrica sem a presença de correntes harmônicas.

As curvas QV do barramento de alimentação sem a presença de correntes harmônicas estão dispostas na Figura 13 para as fases A, B e C.

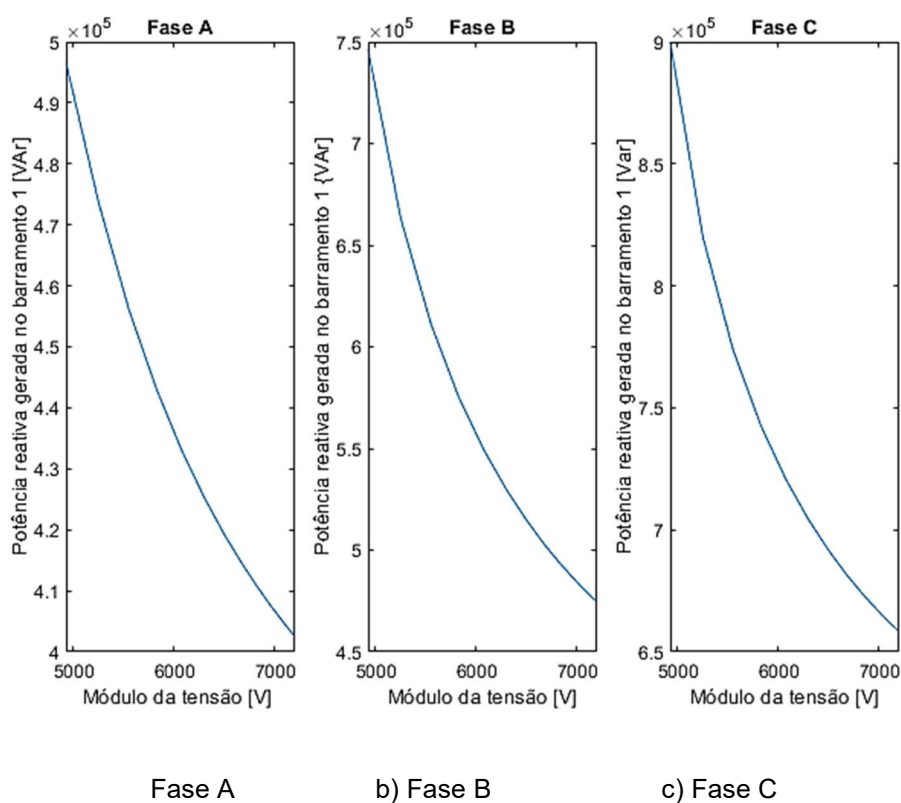


Figura 13 – Curvas QV sem a presença de harmônicos.

É possível visualizar que as curvas estão na região de instabilidade, onde o aumento de potência reativa resulta em um declínio do módulo de tensão. Em relação às curvas em cada uma de suas fases, é possível notar algumas diferenças decorrente da presença de cargas desbalanceadas com distintos fatores de potência.

As curvas QV obtidas estão acima do eixo das abcissas, apresentando assim uma margem de potência reativa positiva. Os valores desta margem se encontram na Tabela 8. Estes valores diferem entre si devido a presença de cargas desbalanceadas, usual em sistemas de distribuição.

Tabela 8 – Margens de potência reativa da curva QV para o barramento de alimentação principal.

| <b>Margens de potência Reativa</b> |              |
|------------------------------------|--------------|
| Fase A                             | 402,493 kVAR |
| Fase B                             | 474,475 kVAR |
| Fase C                             | 658,233 kVAR |



## 4.2. Curvas QV do Barramento de Alimentação Com a Presença de Harmônicos de Sequência Inversa

A segunda condição de análise realizada é referente a influência de harmônicos de sequência inversa na curva QV. As curvas QV obtidas estão dispostas na figura 14 para as fases A, B e C.

As curvas QV em azul são referentes às curvas com presença de correntes harmônicas, e em vermelho as curvas sem os harmônicos, ambas no barramento de alimentação principal do sistema "IEEE4 NODE TEST FEEDER".

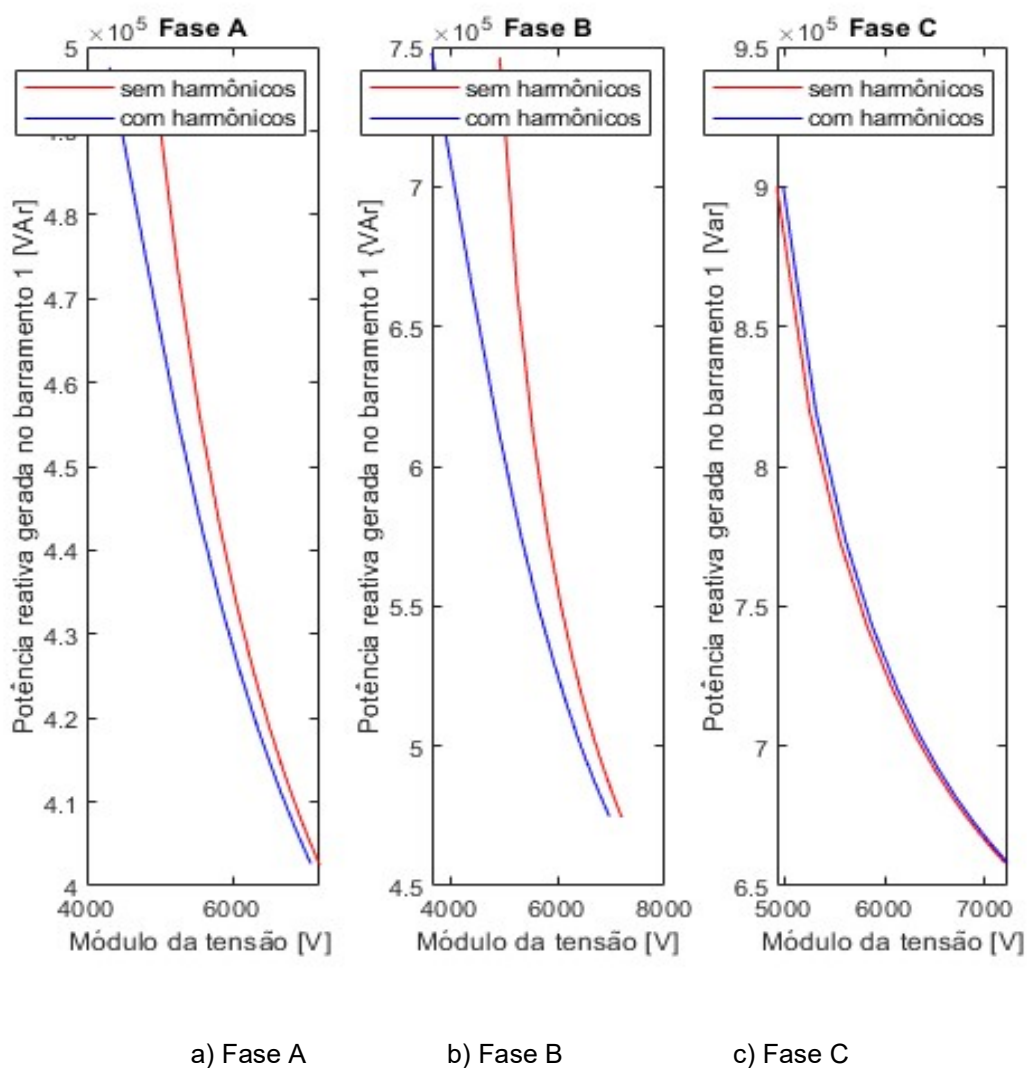


Figura 14 – Curvas QV com harmônicos de sequência inversa.

Nota-se que com a presença de correntes harmônicas de sequência inversa alteraram os tracejados das curvas QV de forma significativa nas fases A e B, apresentando uma redução na margem de potência reativa. Na fase C, não ocorreram mudanças significativas, apresentando um leve aumento na margem e potência reativa.

#### 4.3. Curvas QV do Barramento de Alimentação Com a Presença de Harmônicos de Sequência Direta

A terceira condição de análise realizada é referente a influência de harmônicos de sequência direta na curva QV. As curvas QV obtidas estão dispostas na Figura 15 para as fases A, B e C.

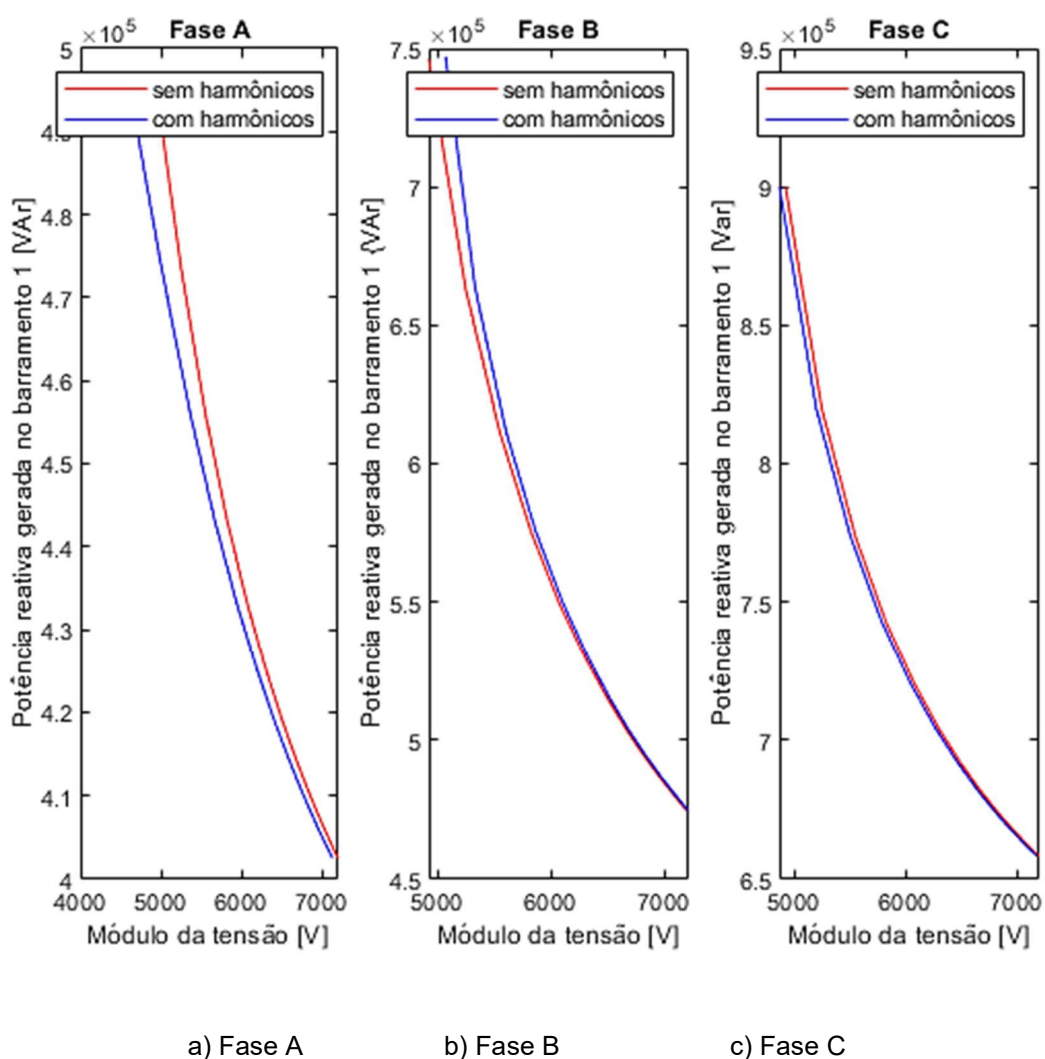


Figura 15 – Curvas QV com harmônicos de sequência direta.

A presença de correntes harmônicas de sequência direta resultou em uma diminuição da margem de potência reativa nas fases A e C, sendo de maneira significativa na fase A. Na fase B não ocorreram mudanças drásticas, porém apresentou uma margem de potência reativa maior que a curva convencional, uma vez que curva apresentou valores maiores de potência reativa para os mesmos valores de tensão.

#### 4.4. Curvas QV do Barramento de Alimentação Com a Presença de Harmônicos de Sequência Inversa e Direta

A quarta condição é a combinação das duas simulações anteriores, referente a influência de harmônicos de sequência direta e inversa na curva QV. As curvas QV obtidas estão dispostas na Figura 16 para as fases A, B e C.

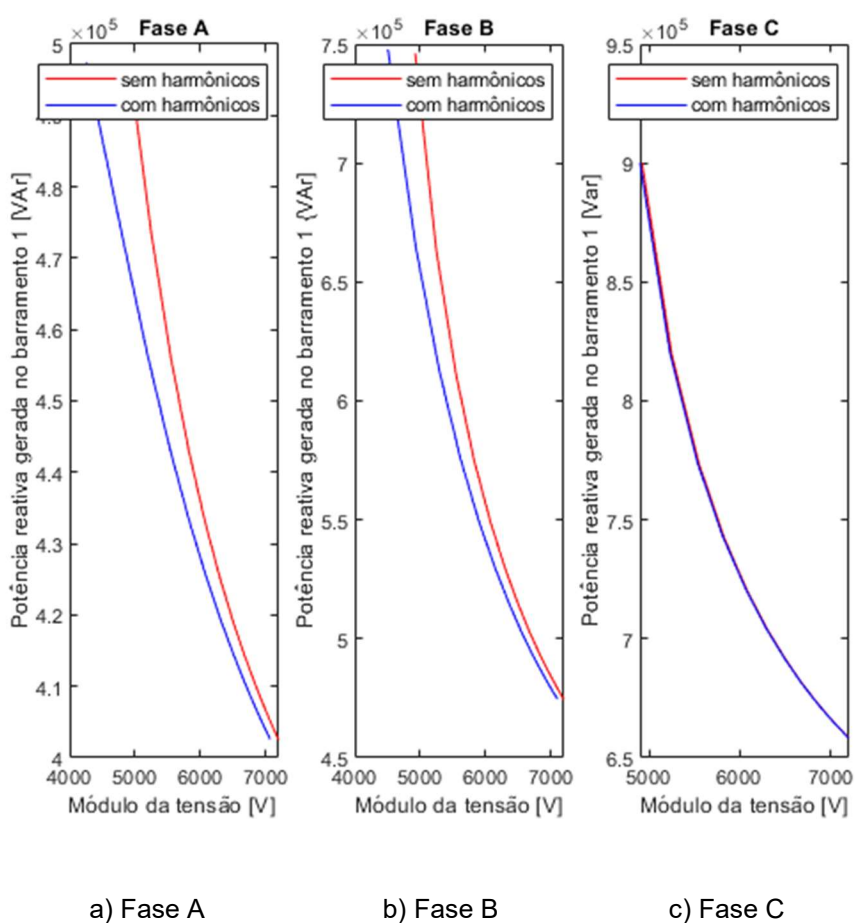


Figura 16 – Curvas QV com harmônicos de sequência inversa e direta.

As curvas com a presença de harmônicos de sequência direta e inversa apresentaram valores de margens de potência reativa inferiores às curvas convencionais em todas as fases. Apresentando variações significativas nas fases A e B, enquanto que na fase C não ocorreram variações drásticas.

#### 4.5. Análises das Curvas Obtidas

Todas as curvas QV obtidas estão dispostas na Figura 17 para as fases A, B e C. Com elas é possível observar que a presença de harmônicos reduziu a margem de potência reativa das curvas QV calculadas.

A presença de apenas harmônicos de sequência inversa aumentou a margem de potência reativa na fase C, e a presença de apenas harmônicos de sequência direta aumentou a margem de potência reativa na fase B.

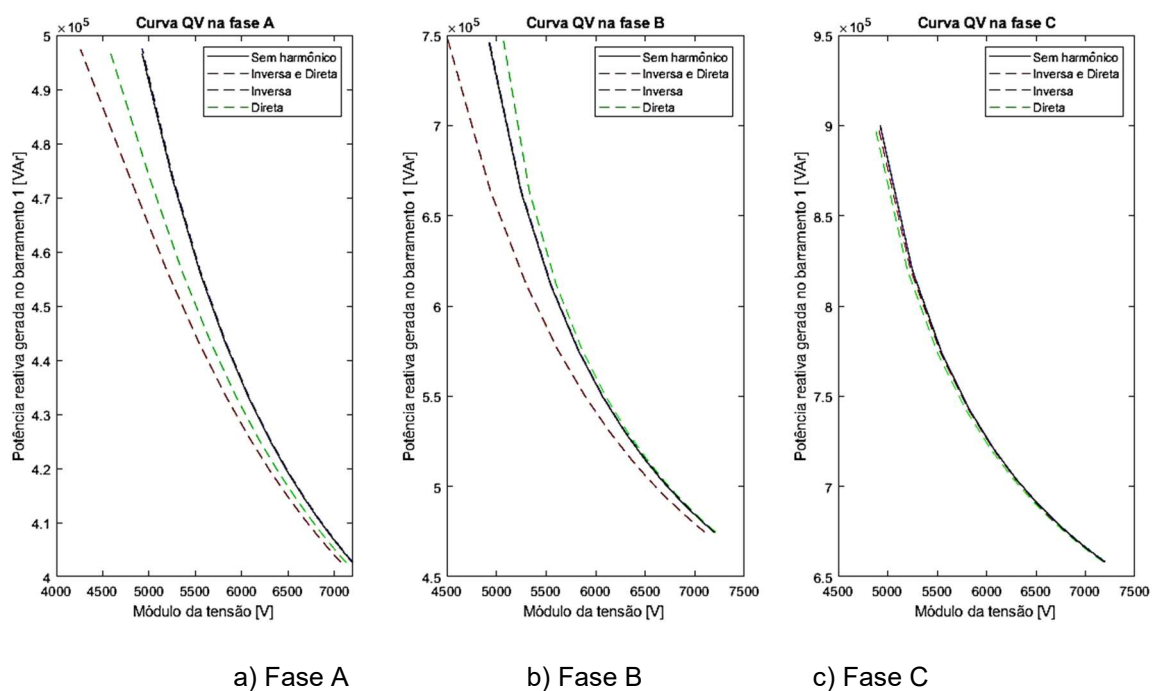


Figura 17 – Curvas QV com as três condições trabalhadas.

Nas Figuras 18, 19 e 20 estão dispostas as formas de ondas de tensões no barramento do alimentador principal, no primeiro e último ponto das curvas QV para as fases A, B e C.

É possível observar que a presença dos harmônicos distorce o formato puramente senoidal das tensões, de forma distinta para cada uma das fases. As maiores distorções ocorreram com a presença dos harmônicos de ordem direta e inversa simultaneamente.

Em todas as simulações, a fase C apresentou uma menor variação na margem reativa da curva QV e uma menor distorção se comparado com as demais fases. Testes adicionais serão desenvolvidos no futuro para tentar explicar este fenômeno observado.

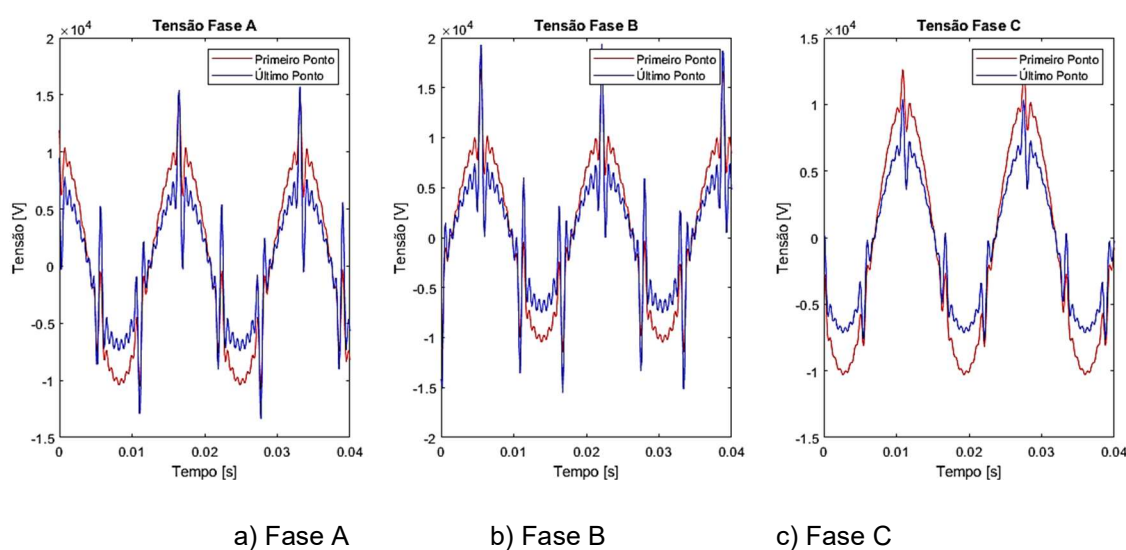


Figura 18 – Curvas de tensão no domínio do tempo com a presença de harmônicos de sequência inversa em diferentes pontos da curva QV.

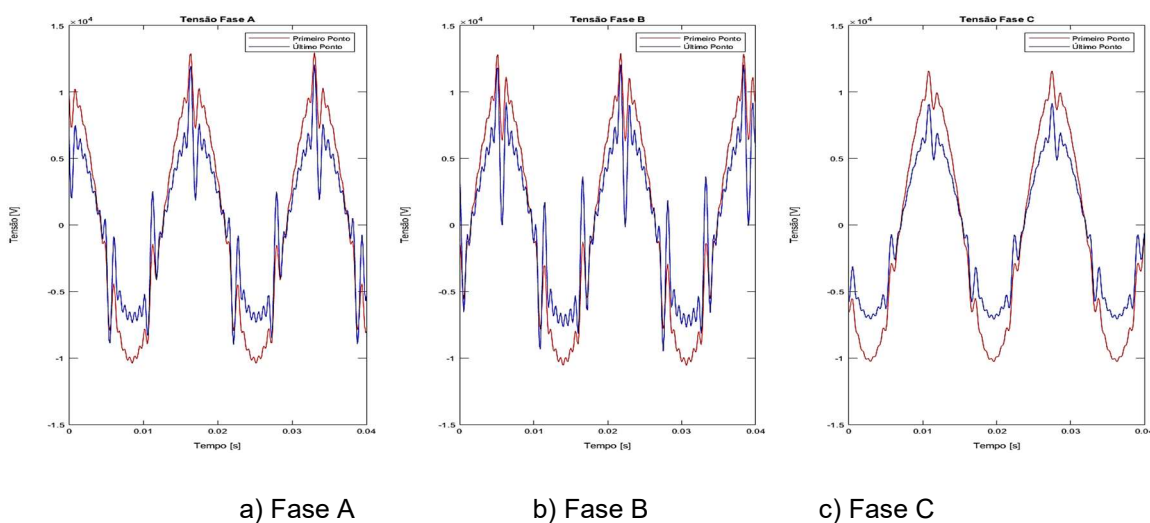


Figura 19 – Curvas de tensão no domínio do tempo com a presença de harmônicos de sequência direta em diferentes pontos da curva QV.

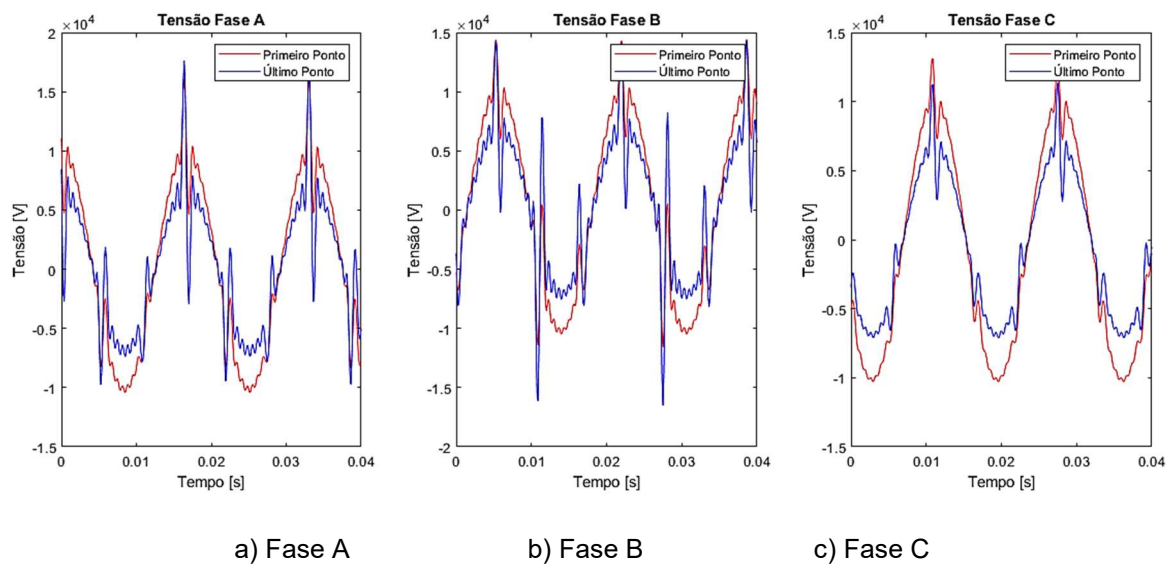


Figura 20 – Curvas de tensão no domínio do tempo com a presença de harmônicos de sequência inversa e direta em diferentes pontos da curva QV.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi averiguado a possibilidade de implementar conceitos de estabilidade de tensão (usualmente utilizados em sistemas de geração e transmissão de energia elétrica), por meio de análises de curva QV em sistemas de distribuição de energia, e a influência de correntes harmônicas nestes sistemas, esta aplicação se mostrou viável, com todos os objetivos alcançados.

O método de cálculo por varredura de tensões e correntes realizados nos cálculos de fluxo de potência apresentou valores condizentes com os disponíveis nas literaturas técnicas, mostrando assim uma opção viável para a análise de sistemas similares.

A modelagem do fluxo de potência harmônica apresentou bons resultados, mostrando a viabilidade desta aplicação. Sendo assim, uma possibilidade para outras análises que necessitem dos valores operativos de um sistema elétrico de potência sob a influência de correntes harmônicas.

Em todas as curvas obtidas, o barramento em análise está operando na região de instabilidade, com margens de potência reativa positiva. Em grande maioria, as curvas QV com harmônicos apresentaram valores de margem de potência reativa menores que a condição sem a presença de harmônicos, com valores distintos para cada condição estabelecida.

Assim, pode-se concluir que as correntes harmônicas além de reduzirem a eficiência do sistema, diminuem, em termos de estabilidade de tensão, o suporte de potência reativa que um barramento pode fornecer para o sistema o qual está conectado.

## **6. TRABALHOS FUTUROS**

A metodologia pode ser aplicada em sistemas maiores e/ou com a presença de outros equipamentos, que respondem de maneiras diferentes a uma grande presença de distorções harmônicas na rede, como motores, geradores, religadores, entre outros.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Energia Elétrica. **Por dentro da conta de luz: informação de utilidade pública**. Brasília, 7. ed. ANEEL, 2016.

Agência Nacional de Energia Elétrica. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional-PRODIST, Módulo 8-Qualidade da Energia Elétrica**. Brasília, 2018. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/modulo-8>>. Acesso realizado em 07 de dezembro de 2020>.

Agência Nacional de Energia Elétrica. **Revisão das regras de geração distribuída entra em consulta pública**. Brasília, 2020. Disponível em: [https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/asset\\_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/revisao-das-regras-de-geracao-distribuida-entra-em-consulta-publica/656877](https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/revisao-das-regras-de-geracao-distribuida-entra-em-consulta-publica/656877). Acessado em 07 de dezembro de 2020.

AGUIAR, L.B. **Colapso e instabilidade de tensão em transmissão de energia elétrica**. Revista de pesquisa científica e tecnologia das instituições DeVry. Brasil, Fortaleza, v. 15, ed. 31, p. 187-224, 2015.

ALMEIDA, A. B. *et al.* **Probabilistic voltage stability assessment considering renewable sources with the help of the PV and QV curve**. *IET Renewable Power Generation*. vol. 7, no. 5, pp. 521-530, Sept. 2013.

BUJAL, N.R., HASAN, A.E. e SULAIMAN, M. **Analysis of voltage stability problems in power system**. *4th International Conference on Engineering Technology and Technopreneuship (ICE2T)*, Kuala Lumpur, Malásia, 27 a 29 de agosto de 2014.

CUTSEM, T. V; VOURNAS, C. **Voltage Stability of Electric Power Systems**. *Kluwer Academic Publisher*. Londres, 1998.

DUGAN, R.C., GRANAGHAN, M.F., SANTOSO, S. e WAYNE H.B. **Electrical Power Systems Quality**. *Tata McGraw Hill Education*. 3 ed., p. 558, 2012.

GIMENEZ, O. A. B. **Curva QV e Vetor Tangente na Análise da Estabilidade de Longo-Termo como Ferramentas de Planejamento**. 2015. 127p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015

GRANADOS, Josué Fernando Leal Granados. **Modelagem de Carga em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 100 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

GUIMARÃES, P. *et al.* **QV and PV curves as a planning tool of analysis**. 4<sup>a</sup> Conferência Internacional sobre Desregulamentação e Reestruturação de Utilidades Elétricas e Tecnologias de Energia (DRPT). Weihai, Shandong, pp. 1601-1606, 2011.

KERSTING, W. H. **Distribution System Modeling and Analysis**. CRC Press. 2 ed., Nova York, USA, 2002.

KUMAR, R. *et al.* **PV and QV Curve Analysis Using Series and Shunt Compensation**. IEEE 9th Power India International Conference (PIICON), SONEPAT, Índia, pp. 1-6, 2020.

KUNDUR, P. *et al.* **Definition and classification of power system stability**. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 19, n. 3, p. 1387-1401, agosto de 2004.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. New York: McGraw-Hill, 1994.

LUIZ, Cicéli Martins. **Avaliação dos Impactos da geração distribuída para proteção do sistema elétrico**. 2012. 154 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

MAMEDE, João Filho. **Instalações Elétricas Industriais**. 9 ed. LTC, 2010.

MARUJO, D. *et al.* **On Control Actions Effects by Using QV Curves**. *On Control Actions Effects by Using QV Curves*. Vol. 30, N. 3, pp. 1298-1305, Maio 2015.

MIYASAKA, Gabriel. **Análise de Perdas Técnicas em Circuitos Secundários de Distribuição**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

MONTEMEZZO, J. F. **Influência dos Parâmetros e Modelos de Linha na Solução do Fluxo de Carga de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 2016. 124 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Dinâmicos e Energéticos), - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Paraná, 2016.

MOURA, R. S. **Estudo do efeito do tipo da curva QV em simulações dinâmicas em sistemas elétricos de potência**. 2016. 87 f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.

MOURA, R. S., GARCIA, Valter., LIMA, P.R.G. **Influência de correntes harmônica sem estudos de estabilidade de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica**. VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), Brasil, Santo André, 25 a 28 de agosto de 2020.

NAKAMURA, R. D. R. **Instalação de capacitores de potência em redes poluídas por harmônicos e com baixa potência de curto-circuito**. 2011. 118p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

OCARIZ, T. **Uma Metodologia de Análise de Sistemas de Potência aplicando o Método Continuado QV e PV no Ambiente de Planejamento de Sistemas Elétricos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) -Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

ONS. **O que é o SIN**. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Acesso em: 9 de outubro de 2020.

OPPENHEIM, A. V.; WILLSLY, A. S. **Sinais e sistemas**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

PETRY, Maitê B. **Desenvolvimento e aplicação de uma ferramenta de análise da tarifa de eletricidade (FATE)**. Revista da Graduação, v. 5, n. 2, 23 out. 2012.

PUJARA, A.J. e VAIDYA, G. **Voltage stability index of radial Distribution network. International Conference on Emerging Trends. Electrical and Computer Technology**. Nagercoil, Índia, 23 a 24 de março de 2011.

SEWDIEN, V. N.; PREECE, R.; TORRES, J. L. R.; e MEIJDEN, M. A. M. M. **Evaluation of PV and QV based Voltage Stability Analyses in Converter Dominated Power Systems. IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)**, Kota Kinabalu, pp. 161-165, 2018.

VILLASANTI, Carolina Montserrat López. **AVALIAÇÃO DE ESTABILIDADE DE TENSÃO COM AUXILIO DE ESTIMAÇÃO DE ESTADO**. 105 p. Dissertação (Mestrado) - Itajubá, Belo Horizonte, 2016.

ZAMBRONI, M.F.S.; PEREIRA, M.L.; SILVEIRA, P.M. e RIBEIRO, P. ***A MATLAB tool to study harmonics penetration in grid unbalanced conditions.*** *17th International Conference on Harmonics and Quality of Power.* Belo Horizonte, Brasil, 16 a 19 de Outubro de 2016.