

**INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS  
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
THAUANY OLIVEIRA SILVA**

**RELAÇÃO ENTRE A MARGEM DE POTÊNCIA REATIVA DE CURVA QV PARA  
BARRAMENTO DE CARGA EM FUNÇÃO DO NÍVEL DE CARREGAMENTO DO  
SISTEMA**

**FORMIGA - MG  
2018**

**THAUANY OLIVEIRA SILVA**

**RELAÇÃO ENTRE A MARGEM DE POTÊNCIA REATIVA DE CURVA QV PARA  
BARRAMENTO DE CARGA EM FUNÇÃO DO NÍVEL DE CARREGAMENTO DO  
SISTEMA**

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

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

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

**Co-Orientadora:** Prof. Ma. Mariana  
Guimarães dos Santos

**FORMIGA - MG**

**2018**

**THAUANY OLIVEIRA SILVA**

**RELAÇÃO ENTRE A MARGEM DE POTÊNCIA REATIVA DE CURVA QV PARA  
BARRAMENTO DE CARGA EM FUNÇÃO DO NÍVEL DE CARREGAMENTO DO  
SISTEMA**

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

Avaliado em: \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

Nota: \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Renan Souza Moura - Orientador

---

Prof. Dr. Fábio Lúcio Corrêa Junior - Membro

---

Prof. Me. Patrick Santos de Oliveira - Membro

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço a Deus por ter sido minha força nos momentos de dificuldades, por ter me dado coragem e sabedoria para continuar minha caminhada.

À minha mãe, Patrícia, pelo exemplo de fé, honestidade e amor ao próximo. Minha melhor amiga, minha maior incentivadora, meu exemplo de luta, meu anjo da guarda, minha eterna saudade. Que você junto a Deus possa está comemorando mais uma conquista desse sonho que construímos juntas. Ao meu pai, César, pelo amor incondicional, pelo incentivo, paciência e por estar ao meu lado em todas as minhas batalhas. À minha madrinha, Tarcilia, por todas as orações, pelo carinho e amor dedicado a mim em todos os momentos. Ao meu irmão, Thulio, pelo incentivo e carinho.

Ao meu namorado Lincoh, por toda paciência, compreensão, incentivo, carinho, amor e por ter sido meu porto seguro nos momentos de dificuldades. Além deste trabalho, dedico todo meu amor a você.

Ao meu orientador, Renan, por todos os conselhos, dedicação, paciência, conhecimentos compartilhados e pelas palavras de incentivo nos momentos onde nada dava certo, sempre me lembrava de que “o importante é ser feliz” e que “vai dar certo”. À minha co-orientadora, Mariana, pela alegria contagiante transmitida, por ser um exemplo de profissional pra mim e por todos os conhecimentos compartilhados. A todos os professores do IFMG pelos ensinamentos compartilhados.

A todos os colegas da empresa CEMIG, em especial ao meu amigo Ivan, pelos ensinamentos que compartilhados durante o estágio contribuíram para o desenvolvimento do meu aprendizado sobre o setor elétrico brasileiro.

Aos meus amigos, em especial ao “Grupo dos Coleguinhas + Samu”, que, através da amizade e momentos de descontração nas horas de estudo, fizeram com que esta jornada se tornasse mais fácil. A minha irmã de coração Jéssika, por estar ao meu lado em todos os momentos, por todo amor e força.

Enfim, a todos que colaboraram para a realização e a conclusão deste trabalho, seja de forma direta ou indireta, o meu muito obrigado.

*"O ideal vale mais do que a vida, é melhor  
perder a vida do que perder o ideal."*

*(Pe. Euclides Bebiano dos Santos).*

## RESUMO

A partir da crise energética brasileira no ano de 2001, o governo apresentou um plano de contingências, onde uma das medidas foi o incentivo a energias renováveis. O interesse da comunidade acadêmica por energias renováveis, como a energia fotovoltaica e energia eólica, aumentaram a necessidade de conhecer a modelagem do sistema de distribuição de energia elétrica. Conceitos utilizados em sistemas de geração e transmissão estão sendo adaptados ao sistema de distribuição, como a curva QV e PV. A curva QV, ferramenta utilizada em estudos de estabilidade de tensão, permite quantificar o suporte de potência reativa do sistema analisado, determinar o nível crítico de tensão e prever a margem de estabilidade de tensão. Considerando fundamental um sistema elétrico operar de forma adequada, o objetivo desse trabalho foi analisar a variação da margem de estabilidade das curvas QV para barramento de cargas em função do nível de carregamento do sistema. Outros objetivos secundários foram: avaliar a adaptação da curva QV em sistema de distribuição de energia elétrica, propor uma nova metodologia de cálculo da curva QV utilizando regulador de tensão e realizar ajustes de grandezas elétricas do sistema seguindo as normas da ANEEL. A metodologia foi testada no sistema teste "*IEEE 4 Node Test Feeder*" e em um alimentador de distribuição de energia real da região metropolitana de Belo Horizonte. A curva QV para barramentos de carga foi obtida utilizando reguladores de tensão. Para avaliação da mudança da margem da curva QV, o processo de obtenção da curva QV foi repetido para vários fatores de carga, simulando a transferência de cargas entre alimentadores de distribuição. Os *softwares* utilizados para desenvolver a rotina computacional foram o MATLAB e o PSS/ADEPT. A metodologia testada permitiu verificar a eficiência da adaptação do conceito da curva QV em sistemas de distribuição utilizando reguladores de tensão. Também foi verificado o decréscimo da margem da curva QV na ocorrência de crescimento de carga no sistema. Por fim, o índice retirado de análises da curva QV mostrou um potencial futuro para demonstrar momentos propícios para efetuar correções de fatores de potência.

**Palavras Chave:** Sistema de Distribuição de Energia, Estabilidade de tensão, Curva QV, Regulador de tensão.

## ABSTRACT

From the Brazilian energy crisis in 2001, the government presented a contingency plan, where one of the measures was the incentive to renewable energies. The interest of the academic community for renewable energies, such as photovoltaic energy and wind energy, increased the need to know the modeling of the electric energy distribution system. Concepts used in generation and transmission systems are being adapted to the distribution system, such as the QV and PV curve. The QV curve, a tool used in voltage stability studies, allows quantifying the reactive power support of the analyzed system, determining the critical voltage level and predicting the voltage stability margin. Considering that an electrical system operates properly, the objective of this work was to analyze the variation of the stability margin of the QV curves for load buses as a function of the loading level of the system. Other secondary objectives were: to evaluate the adaptation of the QV curve in the electric energy distribution system, to propose a new methodology for calculating the QV curve using voltage regulator and to make adjustments of the electrical quantities of the system following ANEEL standards. The methodology was tested in the "IEEE 4 Node Test Feeder" test system and in a power distribution feeder in the Belo Horizonte metropolitan region. The QV curve for load rails was obtained using voltage regulators. In order to evaluate the change in the margin of the QV curve, the process of obtaining the QV curve was repeated for several load factors, simulating the transfer of loads between distribution feeders. The software used to develop the computational routine were MATLAB and PSS / ADEPT. The tested methodology allowed to verify the efficiency of the adaptation of the concept of the QV curve in distribution systems using voltage regulators. It was also verified the decrease of the margin of the QV curve in the occurrence of load growth in the system. Finally, the index taken from the analyzes of the QV curve showed a potential future to demonstrate moments propitious to make corrections of power factors.

**Key words:** Power Distribution System, Voltage stability, QV curve, Voltage regulator.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação da Estabilidade de Sistemas de Potência. ....	21
Figura 2 – Representação de uma curva QV genérica. ....	25
Figura 3 – Diagrama unifilar de um sistema de distribuição. ....	27
Figura 4 – Simplificação de uma subestação. ....	28
Figura 5 – Interligação entre alimentadores de uma subestação. ....	29
Figura 6 – Condutores e imagens. ....	30
Figura 7 – Modelo de Segmento de Linha Trifásico. ....	30
Figura 8 – Modelo de linha de segmento modificado. ....	31
Figura 9 – Modelo de Segmento de Linha Aproximado. ....	31
Figura 10 – Regulador de passo de tensão monofásico. ....	32
Figura 11 – Modelagem do regulador de tensão. ....	34
Figura 12 – Modificação proposta na modelagem do regulador de tensão. ....	34
Figura 13 – Sistema " <i>IEEE 4 Node Test Feeder</i> ". ....	37
Figura 14 – Configuração dos polos do sistema " <i>IEEE 4 Node Test Feeder</i> ". ....	38
Figura 15 – Alimentador real do sistema de distribuição de energia elétrica. ....	39
Figura 16 – Características do alimentador real do sistema de distribuição de energia elétrica. ....	39
Figura 17 – Curva de carga do alimentador real do sistema de distribuição de energia elétrica. ....	39
Figura 18 – Sistema " <i>IEEE 4 Node Test Feeder</i> " com inserção do regulador de tensão. ....	44
Figura 19 – Configuração do regulador de tensão desconsiderando a impedância de compensação. ....	44
Figura 20 – Curva QV barramento de geração. ....	49
Figura 21 – Curva QV barramento de carga com RT. ....	52
Figura 22 – Comparação das curvas QV. ....	54
Figura 23 – Curva QV do alimentador real. ....	55
Figura 24 – Comparação das curvas QV com variação do nível de carregamento sem restrições operacionais. ....	56
Figura 25 – Comparação das curvas QV com variação do nível de carregamento com restrições operacionais. ....	56

Figura 26 – Comparação das curvas QV com variação do nível de carregamento do alimentador real.....	58
Figura 27 – Tendência de crescimento da margem de potência reativa com a variação do nível de carregamento. ....	58
Figura 28 – Comparação das curvas QV com variação do nível de carregamento e adequação a norma. ....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Constantes generalizadas do regulador de passo do tipo B. ....	33
Tabela 2 – Características do sistema " <i>IEEE 4 Node Test Feeder</i> " .....	38
Tabela 3 – Margem de carga da curva QV para barramento de geração. ....	50
Tabela 4 – Comparação entre o valor de referência do regulador e o valor regulado no próprio barramento do regulador. ....	51
Tabela 5 – Margem de carga da curva QV para barramento de carga. ....	52
Tabela 6 – Comparação entre as margens de potência reativa do barramento de carga desenvolvida no MATLAB e PSS/ADEPT. ....	53
Tabela 7 – Comparação entre as margens de potência reativa do barramento de carga e do barramento de geração. ....	53
Tabela 8 – Margem de carga da curva QV para o sistema real. ....	54
Tabela 9 – Margens de potência reativas para os diferentes níveis de carregamento testados. ....	57
Tabela 10 – Margens de potência reativas para os diferentes níveis de carregamento para o alimentador real. ....	59

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEMIG – COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS

CRIC – MÉTODO DE ACOPLAMENTO IMPLÍCITO REATIVO DE RESTRIÇÃO

FC – FATOR DE CARREGAMENTO

IEE – *INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS* (INSTITUTO DE ENGENHEIROS ELETRICISTAS E ELETRÔNICOS)

IET – *INSTITUTION OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY*

LTC – *LOAD TAP CHANGING*

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO

PSE – *POWER AND ENERGY SOCIETY*

PQ – POTÊNCIA ATIVA E POTÊNCIA REATIVA

PV – POTÊNCIA ATIVA VERSUS TENSÃO

QV – POTÊNCIA REATIVA VERSUS TENSÃO

RT – REGULADOR DE TENSÃO

SEP – SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

SE – SUBESTAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

## SUMÁRIO

<b>Capítulo 1- INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1. INTRODUÇÃO.....	14
1.2. MOTIVAÇÃO .....	16
1.3. HIPÓTESES .....	17
1.4. OBJETIVOS.....	18
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
<b>Capítulo 2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
2.1. SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA .....	19
2.1.1 EVOLUÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA .....	20
2.2. ESTABILIDADE EM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA.....	20
2.2.1 ESTABILIDADE DE TENSÃO.....	21
2.2.2 REVISÃO DE FATOS HISTÓRICOS DE PERTURBAÇÕES ENGLOBALANDO INSTABILIDADE DE TENSÃO.....	23
2.3. CURVA QV .....	24
2.4. SISTEMA ELÉTRICO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA .....	26
2.4.1 MODELAGEM DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.. .....	29
2.5. REGULADOR DE TENSÃO.....	31
2.6. MÉTODO DE VARREDURA PARA CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA ....	35
<b>Capítulo 3- METODOLOGIA</b> .....	<b>37</b>
3.1. SISTEMAS TESTE .....	37
3.1.1 SISTEMA " <i>IEEE 4 NODE TEST FEEDER</i> " .....	37
3.1.2 ALIMENTADOR REAL DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE .....	38
3.2. CURVA QV PARA BARRAMENTO DE GERAÇÃO DO SISTEMA " <i>IEEE 4 NODE TEST FEEDER</i> " .....	40
3.3. ESTUDO E VALIDAÇÃO DA PROPOSTA DE CÁLCULO DA CURVA QV UTILIZANDO REGULADOR DE TENSÃO.....	41
3.3.1 CURVA QV UTILIZANDO REGULADOR DE TENSÃO DO SISTEMA " <i>IEEE 4 NODE TEST FEEDER</i> ".....	42
3.3.2 CURVA QV UTILIZANDO REGULADOR DE TENSÃO DO ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA REAL.....	45
3.4. IMPACTO DO NÍVEL DE CARREGAMENTO DO SISTEMA NA MARGEM DE POTÊNCIA REATIVA DA CURVA QV. ....	45
3.4.1. IMPACTO DO NÍVEL DE CARREGAMENTO NO SISTEMA " <i>IEEE 4 NODE TEST FEEDER</i> " .....	45

3.4.2. IMPACTO DO NÍVEL DE CARREGAMENTO NO ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO REAL .....	46
3.5. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ADEQUAÇÃO A NORMAS DA ANEEL DO FATOR DE POTÊNCIA E DO EQUILÍBRIO DE FASES NA MARGEM DE POTÊNCIA REATIVA.....	47
<b>Capítulo 4- RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>49</b>
4.1. CURVA QV PARA BARRAMENTO DE GERAÇÃO DO SISTEMA “IEEE 4 NODE TEST FEEDER” .....	49
4.2. CURVA QV PARA BARRAMENTO DE CARGA UTILIZANDO REGULADOR DE TENSÃO DO SISTEMA “IEEE 4 NODE TEST FEEDER” .....	50
4.2.1. CÁLCULO DA CURVA QV PARA BARRAMENTO DE CARGA DESENVOLVIDO NA PLATAFORMA MATLAB® (2014).....	50
4.2.2. COMPARAÇÃO ENTRE AS MARGENS DE POTÊNCIA REATIVA DA CURVA QV PARA BARRAMENTO DE CARGA DESENVOLVIDO NA PLATAFORMA MATLAB® (2014) E NO SOFTWARE PSS/ADEPT .....	52
4.2.3. COMPARAÇÃO ENTRE A CURVA QV PARA BARRAMENTO DE GERAÇÃO E DE CARGA NO SISTEMA “IEEE 4 NODE TEST FEEDER” .....	53
4.3. CURVA QV UTILIZANDO REGULADOR DE TENSÃO DO ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA REAL .....	54
4.4. IMPACTO DO NÍVEL DE CARREGAMENTO DO SISTEMA NA MARGEM DE POTÊNCIA REATIVA DA CURVA QV. ....	55
4.4.1. IMPACTO DO NÍVEL DE CARREGAMENTO NO SISTEMA “IEEE 4 NODE TEST FEEDER” .....	56
4.4.2. IMPACTO DO NÍVEL DE CARREGAMENTO NO ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO REAL .....	57
4.5. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ADEQUAÇÃO A NORMAS DA ANEEL DO FATOR DE POTÊNCIA E DO EQUILÍBRIO DE FASES NA MARGEM DE POTÊNCIA REATIVA.....	59
<b>Capítulo 5- CONCLUSÕES.....</b>	<b>61</b>
5.1 TRABALHOS FUTUROS .....	61
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>62</b>

## Capítulo 1- INTRODUÇÃO

### 1.1. INTRODUÇÃO

Um sistema elétrico de potência (SEP) deve ser capaz de fornecer energia de forma ininterrupta, econômica, estável e confiável, tendo que operar em condições adequadas ou com variações mínimas de frequência e tensão (KUNDUR e MORISON, 1997).

Uma característica relevante para o apropriado funcionamento de um sistema elétrico é a estabilidade de tensão, que consiste na capacidade de manter níveis adequados de tensão em todos os barramentos, tanto em condições normais ou em perturbações (KUNDUR e MORISON, 1997).

O problema de instabilidade de tensão está relacionado à indisponibilidade de potência reativa, a qual é referente à redução da tensão nos barramentos, iniciando localmente e se espalhando pelo sistema até causar um colapso operativo (KUNDUR, 1994).

Estados críticos de operação do SEP, que são capazes de provocar instabilidades na tensão, resultam em interrupções parciais ou totais do fornecimento da energia elétrica.

Com o intuito de contornar esse problema e promover um aumento de carga do sistema, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) pode intervir manualmente ou por meio de ações de controle (MALANGE, 2008). Assim, conhecer o valor máximo de potência que um determinado barramento suporta em um sistema elétrico de potência é fundamental.

Uma relação útil para análise do suporte de potência reativa de um barramento é a curva QV, que mostra a sensibilidade de tensão na barra devido à injeção ou absorção de potência reativa.

Muitos trabalhos relevantes para a comunidade acadêmica têm abordado a questão da estabilidade de tensão.

O trabalho de WANG *et al.* (2009) apresenta uma abordagem de modelagem *fuzzy* para a descrição da curva QV do sistema de potência para análise de

estabilidade de tensão. O modelo difuso empregado oferece descrições quantitativas e qualitativas para a curva QV.

No trabalho de MOHN *et al.* (2006) é investigado o uso do método de acoplamento implícito reativo de restrição (CRIC) para o motor de um programa de fluxo de potência continuado, que modela melhor o acoplamento ativo / reativo. Esse método é usado para traçar curvas QV para alguns sistemas de energia brasileiros, com todos os limites operacionais considerados.

Em GUIMARÃES *et al.* (2011) é tratado o problema da segurança de tensão do sistema. A margem de carga e a curva QV são usadas no cenário de planejamento para determinar os melhores locais para instalação de geração distribuída.

Ainda no tema de geração distribuída, o trabalho de ALMEIDA *et al.* (2013) estuda a estabilidade e confiabilidade da tensão em um sistema de energia com geração distribuída. Os métodos das curvas PV e QV propostos para a análise de segurança de tensão é considerada conjuntamente com leis de probabilidade.

Assim como os trabalhos de ALMEIDA *et al.* (2013) e GUIMARÃES *et al.* (2011), o estudo realizado por MARQUES *et al.* (2004) abrange a preocupação da implementação da geração distribuída no sistema de distribuição de energia elétrica, aliado a aspectos técnicos como: perfil de tensão, estabilidade de tensão, perdas de potência ativa e reativa e também os tempos críticos de eliminação de faltas considerando diferentes cenários. Neste trabalho é apresentado um estudo preliminar da influência de geradores síncronos distribuídos na operação de um sistema de distribuição de energia elétrica. Os resultados das simulações mostram quais são as principais restrições operativas referentes ao nível máximo de penetração da geração distribuída relacionados com os desempenhos dinâmicos e de regime permanente de sistemas de distribuição de energia elétrica.

É apresentado no trabalho de MARUJO *et al.* (2015) alguns métodos para fins de controle de tensão e potência reativa. A curva QV é usada para primeiramente identificar e classificar um ponto de operação sob o ponto de vista da estabilidade de tensão. Após essa classificação, é proposto um índice para avaliar a robustez de um barramento. Métodos para mudar a região de operação de um barramento são

discutidos com a ajuda de um sistema brasileiro real com todos os limites considerados.

Já em MOURA *et al.* (2016) a curva QV é utilizada para indicar a robustez dos geradores em termos de sua margem de potência reativa. Nesse trabalho é mostrado que uma margem positiva no sistema de transmissão de energia elétrica pode levar o sistema à instabilidade. A lógica difusa é proposta para mover o sistema para uma região segura.

No trabalho de MANZONI (2005) é aplicada a Modelagem Orientada a Objetos para o desenvolvimento de uma base computacional capaz de integrar e dar suporte à construção de um amplo conjunto de ferramentas para simulação e análise de sistemas elétricos. Esta ferramenta possibilitou um estudo mais amplo dos fenômenos que ocorrem em cenários de instabilidade de tensão.

Uma vez justificado por meio de trabalhos publicados a importância do estudo da curva QV relacionada à estabilidade de tensão, esse trabalho de conclusão de curso propõe uma forma de calcular curvas QV em barramentos de carga de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando reguladores de tensão e analisa a variação da margem de potência reativa da curva QV. A metodologia será testada em um sistema teste do IEEE e em um sistema de distribuição real.

## **1.2. MOTIVAÇÃO**

O advento da geração distribuída juntamente com o crescente investimento em energias alternativas como energia fotovoltaica e eólica, interligadas ao sistema de distribuição de energia, aumentou a necessidade de conhecer uma modelagem matemática que consiga descrever com precisão o comportamento do sistema de distribuição de energia elétrica.

Essas fontes de energia alternativas interligadas ao sistema de baixa tensão da distribuição de energia elétrica podem influenciar significativamente no fluxo de potência, no perfil de tensão, na estabilidade e na qualidade da energia elétrica. Por isso, torna-se imprescindível a análise desses possíveis impactos.

Este trabalho realizou um estudo sobre a viabilidade de se adaptar ao sistema de distribuição de energia elétrica o conceito da curva QV, amplamente utilizado em

sistemas de geração/transmissão de energia para avaliar a estabilidade de tensão no sistema. Além disso, foi apresentada uma proposta de cálculo de curva QV para barramentos de carga em sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando reguladores de tensão, realizada uma análise da influência do nível de carregamento do sistema na estabilidade de tensão do mesmo e analisado o comportamento do sistema operando segundo as normas PRODIST- Módulo 8 de fator de potência e CEMIG ND.1.1 de equilíbrio de carga.

### **1.3. HIPÓTESES**

Considerando a importância do sistema de distribuição ser capaz de fornecer energia de forma ininterrupta, estável e confiável, tendo que operar em condições adequadas ou com variações mínimas de tensão, o presente trabalho realizou um estudo da adaptação da curva QV e variação da mesma de acordo com o nível de carregamento do sistema, sendo esta uma ferramenta útil para análise de estabilidade de tensão.

Dessa forma foram feitos os seguintes questionamentos:

- “É possível adaptar conceitos de transmissão em sistemas de distribuição de energia elétrica?”
- “A curva QV para barramento de carga pode ser obtida através de reguladores de tensão?”
- “Qual a influência do nível de carregamento do sistema na curva QV?”
- “Qual o comportamento da curva QV com a realização de ajustes das grandezas elétricas do sistema seguindo as normas da ANEEL?”

Para responder essas perguntas, foi feito um estudo da adaptação da curva QV em sistemas de distribuição para barramento de geração e de carga, sendo utilizada uma metodologia diferente da conhecida na literatura, onde o equipamento de controle da curva QV é o regulador de tensão.

#### **1.4. OBJETIVOS**

Essa monografia tem como objetivo geral a implementação de um algoritmo computacional para cálculo da curva QV no barramento de carga em um sistema de distribuição de energia e avaliação do impacto do nível de carregamento do sistema na curva QV. Para atingir este objetivo, foram desenvolvidas as seguintes etapas:

- A. Validação da adaptação da curva QV em sistema de distribuição de energia elétrica.
- B. Estudo e validação da proposta de cálculo de curva QV para barramento de carga utilizando o regulador de tensão como equipamento controlador da tensão do barramento.
- C. Impacto do nível de carregamento do sistema na margem de potência reativa da curva QV.
- D. Avaliação da influência da adequação as normas da ANEEL do fator de potência e do equilíbrio de carga na margem de potência reativa.

#### **1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO**

Esta monografia é organizada em cinco capítulos. O Capítulo 2 é composto pela revisão bibliográfica, abordando a definição de conceitos imprescindíveis para a compreensão deste trabalho. O Capítulo 3 apresenta a metodologia proposta e sua aplicação nos sistemas teste. O Capítulo 4 esboça os resultados obtidos da metodologia. E, por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho e indicações para trabalhos futuros.

## Capítulo 2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta um levantamento bibliográfico sobre os conceitos essenciais para o melhor entendimento deste Trabalho de Conclusão de Curso. Dessa forma, são abordados os aspectos gerais de um sistema elétrico de potência com ênfase no sistema de distribuição de energia elétrica, o conceito de estabilidade no SEP e suas classificações, a construção da curva QV, o método de cálculo usado no fluxo de potência trifásico e modelagem do regulador de tensão.

### 2.1. SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

O objetivo do sistema elétrico de potência é atender a demanda de energia segundo critérios de qualidade, confiabilidade, economia, dentre outros.

O atendimento da demanda de energia exige a integração de diversos sistemas, que são constituídos basicamente por geradores, transformadores (elevadores e abaixadores), linhas de transmissão, reguladores de tensão e alimentadores de distribuição (SILVA, 2017).

Os geradores são dispositivos que convertem uma fonte primária de energia em energia elétrica com tensões próximas de 10 a 30 kV. Essa energia gerada tem seu nível de tensão elevado através de transformadores e posteriormente é transferida para a linha da rede de transmissão que operam normalmente em 138 kV, 230 kV e 500 kV. A transmissão de elevadas potências com altos níveis de tensão é realizada com o objetivo de diminuir os valores das correntes elétricas. Ao se trabalhar com correntes menores, as bitolas dos condutores de transmissão possuem menores dimensões e ocorre a diminuição das perdas durante a transmissão (MENEZES, 2015).

Os níveis de tensão de transmissão são muito elevados para serem consumidos pelas cargas residenciais. Desse modo, a energia passa por transformadores abaixadores para reduzir o nível de tensão desejado e posteriormente ser utilizada pelo sistema de distribuição de energia elétrica.

O sistema de distribuição fornece a energia elétrica aos grandes, médios e pequenos consumidores. Opera basicamente em três níveis de tensão distintos: alta

tensão (superior a 69 kV e inferior a 230 kV); média tensão (superior a 1 kV e inferior a 69 kV); baixa tensão (igual ou inferior a 1 kV) (LEÃO, 2013).

### **2.1.1 EVOLUÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA**

Os sistemas elétricos de potência (SEP) modernos são caracterizados por serem amplamente interconectados e pela crescente dependência de sistemas de controle para permitir a utilização plena das reservas existentes (PADIYAR, 2008).

O aumento da demanda por energia elétrica, agregado as restrições ambientais e de recursos, representa vários desafios aos planejadores do sistema. O sistema elétrico tem operado cada vez mais próximo do seu limite, acarretando problemas operacionais. Além disso, os requisitos de qualidade, confiabilidade, segurança e economia tornaram-se mais rígidos, o que resulta em um aumento de complexidade das ações operativas.

Com relação ao controle de tensão dos SEP's, o aumento de carga sem um correspondente investimento na capacidade de transmissão ocasiona a situação em que os recursos de controle de tensão e de reativos estão sendo utilizados em condições limites (SILVEIRA, 1999).

Os problemas de instabilidade de tensão são atualmente uma das principais preocupações no planejamento e operação de sistemas elétricos. Dessa forma, os estudos de estabilidade de tensão têm fundamentado os operadores do sistema elétrico de potência na tomada de decisão frente a uma perturbação.

Dentro deste contexto, o estudo dos conceitos de estabilidade e instabilidade de tensão é importante para o entendimento do tema abordado nesse trabalho.

## **2.2. ESTABILIDADE EM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA**

A estabilidade de um sistema elétrico pode ser definida como a capacidade de um sistema de potência recuperar um estado operacional de equilíbrio, previamente determinado pela condição inicial do sistema, após ser submetido a um distúrbio (KUNDUR *et al.*, 2004).

O sistema elétrico de potência deve ser capaz de operar satisfatoriamente sob condições de distúrbios como a variação de uma carga, um curto-circuito em uma linha, um desligamento repentino de elementos do sistema, perda de um grande gerador, entre outros. Estes distúrbios exigem ações remediadoras a fim de eliminar estes tipos de faltas. A duração da perturbação tem influência na estabilidade do sistema (PADIYAR, 2008).

Classificar a estabilidade do SEP em categorias facilita as análises dos problemas de instabilidade. A Figura 1 ilustra de forma geral a categorização do problema de estabilidade em sistemas de potência. A classificação é baseada na natureza física da instabilidade, o tipo de impacto e o tempo de resposta (KUNDUR *et al.*, 2004).

Os conceitos de estabilidade angular e estabilidade de frequência são mais abordados em sistemas de transmissão de energia. Como o foco do trabalho é no sistema de distribuição de energia, será detalhado apenas o conceito de estabilidade de tensão.

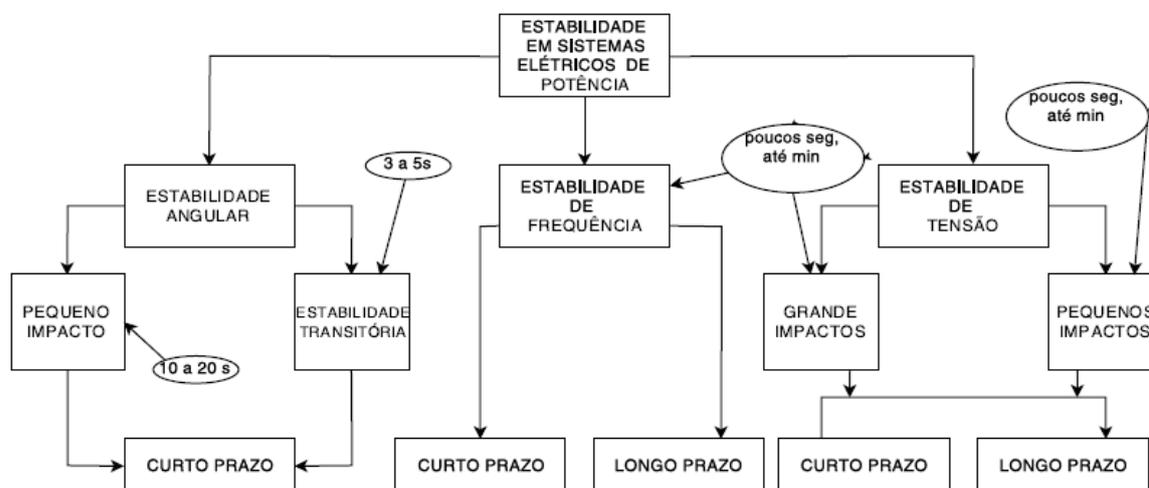


Figura 1 – Classificação da Estabilidade de Sistemas de Potência.

Fonte: Adaptado de (KUNDUR *et al.*, 2004).

### 2.2.1 ESTABILIDADE DE TENSÃO

A estabilidade de tensão de um sistema elétrico pode ser definida como a capacidade de um sistema de potência manter níveis de tensão aceitáveis em todas

as barras, em condições normais de operação e após ser submetido a um distúrbio (KUNDUR e MORISON, 1997).

A instabilidade de tensão ocorre quando um distúrbio qualquer faz com que o sistema tenha um progressivo aumento ou queda de tensão nos barramentos. A redução progressiva de tensão nos barramentos está ligada diretamente a indisponibilidade de potência reativa, que se inicia de forma localizada e se espalha pelo sistema até gerar um colapso operativo (KUNDUR *et al.*, 2004).

O termo colapso de tensão é usado na literatura para identificar uma sequência de eventos relacionados à instabilidade de tensão que leva o sistema a um blecaute ou condições anormais de operação com tensão muito baixa em uma barra (KUNDUR *et al.*, 2004).

A estabilidade de tensão pode ser classificada como: estabilidade de tensão a grandes perturbações e pequenas perturbações.

A estabilidade de tensão a grandes perturbações está relacionada com a habilidade do sistema em se manter estável frente a distúrbios como: perda de geração, uma falta, saída repentina de uma grande carga elétrica, entre outros. Essa capacidade do sistema é determinada pela característica da proteção, do controle e das características da carga (KUNDUR *et al.*, 2004). A análise da estabilidade de tensão a grandes perturbações necessita de estudo não linear do sistema em um período suficiente para englobar as interações de dispositivos como motores, LTCs, entre outros. Como mostrado na Figura 1, o período de análise pode variar de alguns segundos a até minutos.

Assim como a estabilidade de tensão a grandes perturbações, a de pequenas perturbações deve manter o sistema estável, mas frente a distúrbios que podem ser analisados por meio de linearizações em torno de um ponto de equilíbrio. Exemplos de pequenos distúrbios são: variação contínua da carga ao longo do dia, mudança de *tap* de transformadores, ajustes precisos na referência angular do sistema, entre outros.

Outra classificação é o período de análise, podendo ser de curto ou de longo prazo.

A estabilidade de tensão de curto prazo envolve atividades rápidas de algumas cargas, como por exemplo, motores de indução, conversores de corrente

contínua, cargas controladas por componentes eletrônicos, entre outros. A análise deste fenômeno exige soluções por meio de equações diferenciais representativas do sistema e o período de estudo é na ordem de segundos (KUNDUR *et al.*, 2004).

A estabilidade de tensão de longo prazo envolve atividades lentas de alguns equipamentos como: atuação de limitadores de corrente de geradores, LTCs, mudança de *tap* de transformadores, entre outros. O período de estudo pode se estender a alguns minutos e frequentemente análises estáticas podem ser usadas para estimar as margens de estabilidade, assinalar fatores de influência, verificar diferentes condições do sistema e vários cenários (KUNDUR *et al.*, 2004).

### **2.2.2 REVISÃO DE FATOS HISTÓRICOS DE PERTURBAÇÕES ENGLOBALANDO INSTABILIDADE DE TENSÃO**

Os problemas relacionados à instabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência são atualmente um dos maiores desafios para o Operador Nacional do Sistema (ONS), em relação ao planejamento e operação. Dessa forma, é conveniente uma revisão bibliográfica sobre acontecimentos relacionados a essa problemática.

Os estudos do histórico de perturbações que afetam a estabilidade de tensão são de grande valia, servindo para adquirir conhecimentos sobre a natureza de tais fenômenos causadores, os motivos da perturbação, as áreas afetadas, tempo de recomposição do sistema, prejuízo econômico, a carga desligada, entre outros.

A ocorrência de alguns problemas de estabilidade de tensão no mundo e no Brasil reforçam grande preocupação com o tema. No cenário mundial alguns incidentes envolvendo problemas de estabilidade de tensão ganharam destaque, como: Japão, 22 de Agosto de 1970; França, 19 de Dezembro de 1978; Dinamarca, 2 de Março de 1979; Bélgica, 4 de Agosto de 1982; Flórida, 26 de Novembro de 1982; Suécia, 27 de Dezembro de 1983; Flórida, 17 de Maio de 1985; Checoslováquia, 5 de Julho de 1985; Inglaterra, 20 de Maio de 1986; França, 12 de Janeiro de 1987; Japão, 23 de Julho de 1987; WSCC, 2 de Julho de 1996 (SAUER e PAI, 1990; ZAMBRONI, 1999).

No Brasil, podemos destacar dois acontecimentos de instabilidade de tensão que resultaram em blecaute:

- Instabilidade de tensão na cidade de São Paulo no dia 24/04/1997 às 18:15 horas, motivado pelos efeitos do esgotamento de reservas de potência reativa na área de São Paulo perante a impossibilidade de manter a tensão na subestação conversora CC/CA em Ibiúna em 345 kV. Foram afetadas as regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste, com aproximadamente 7600 MW de carga cortados. A recomposição do sistema total foi realizada em cerca de 1 hora e 15 minutos. A causa evidenciada do problema foi a falta de reserva de reativos do sistema para cobrir o horário de pico e o esgotamento do suporte de tensão no sistema de distribuição. A indisponibilidade de equipamentos de controle de tensão em São Paulo foi um fator determinante para a instalação do distúrbio de instabilidade de tensão. Além da falta de ajuste coordenado dos transformadores com os dispositivos de comutação de carga (GOMES, 2001).
- Instabilidade de tensão na cidade de Governador Valadares no dia 13/11/1997 às 9:25 horas, motivado por uma sobrecarga na linha de transmissão 230 kV de Mascarenhas, que provocou o seu desligamento automático pelo sistema de proteção. A propagação do distúrbio gerou a perda da interligação entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, contribuindo para o problema de subtensão no Rio de Janeiro com Espírito Santo. O fenômeno de afundamento de tensão provocou um corte de carga de cerca de 1210 MW (ONS, 2001).

Os dois fatos ocorridos no Brasil são caracterizados como fenômenos de longa duração, com desligamento em cascata. Dessa forma, fica clara a necessidade de se ter ferramentas computacionais que auxiliam na avaliação de locais no sistema elétrico de potência propícios a ocorrência de instabilidade de tensão.

### **2.3. CURVA QV**

Na seção anterior foi mostrado como uma instabilidade de tensão pode afetar um sistema elétrico de potência, que apesar de ser um problema local, pode afetar o

sistema todo. A principal causa que contribui para existência de níveis inaceitáveis de tensão é a incapacidade do SEP suprir a demanda de potência reativa necessária na área sob perturbação.

Uma ferramenta útil para análise da sensibilidade de tensão de uma barra, devido à absorção ou injeção de potência reativa, é a curva QV (MOURA, 2016).

Em condições de operação normal de uma barra, acontece um aumento da tensão com a injeção de potência reativa. Quando ocorre uma diminuição da tensão com a injeção de potência reativa, essa barra é considerada um ponto de instabilidade do sistema. Esta relação pode ser visualizada de forma fácil utilizando a ferramenta curva QV.

Para traçar a curva QV de uma barra, é feita a consideração dessa barra como sendo uma fonte variável independente, pois, calcula-se a capacidade de geração reativa para cada modificação de tensão. É traçada para uma barra de tensão controlada cujos limites de potência reativa são abertos. Através de sucessivos fluxos de potência se altera a tensão da barra e calcula-se a respectiva potência reativa da barra para aquela tensão. As tensões da barra são traçadas no eixo horizontal do gráfico e suas respectivas potências reativas no eixo vertical, como ilustrado na Figura 2.

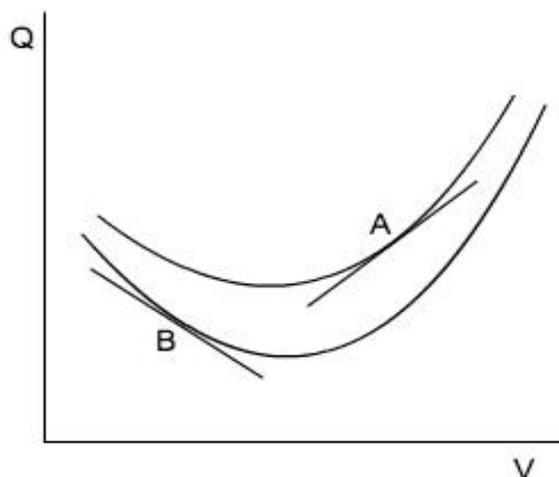


Figura 2 – Representação de uma curva QV genérica.

Fonte: (MOURA, 2016).

Na Figura 2, existe a representação de duas regiões: a estável e instável. A região A é considerada estável, pois aumentando a tensão da barra ocorre um

aumento da potência reativa. Já a região B é caracterizada como instável, ocorrendo à diminuição de potência reativa com o aumento da tensão (MOURA, 2016).

Através da curva QV é possível determinar o nível crítico de tensão e a margem de potência reativa.

O ponto corresponde à derivada  $\frac{dQ}{dV} = 0$  representa o limite de estabilidade de tensão e o valor de potência reativa mínima para operação na região estável (FRANCISCO, 2005).

A margem de potência reativa é definida como a distância do ponto mínimo da curva QV ao eixo horizontal (tensão da barra). A curva QV apresenta margem de potência positiva quando o ponto mínimo estiver acima do eixo horizontal e negativa se tiver abaixo do eixo horizontal. Uma característica relevante em sistemas de transmissão de energia elétrica é o fato que à medida que o sistema se aproxima de um ponto de colapso de tensão, a margem de potência reativa diminui em todas as barras (MOURA, 2016; FRANCISCO, 2005).

Portanto, o conhecimento da margem de potência reativa de uma barra auxilia na obtenção de informações relevante no controle de tensão, como a reserva de geração de potência reativa, as barras mais apropriadas para a compensação, o *déficit* de potência reativa da barra, entre outros.

Um dos objetivos do trabalho é adaptar conceitos de sistemas de transmissão de energia elétrica em sistemas de distribuição de energia elétrica. Por isso, a próxima seção descreverá rapidamente características fundamentais do sistema de distribuição.

## **2.4. SISTEMA ELÉTRICO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA**

O sistema de distribuição tipicamente começa com uma subestação de distribuição que é alimentada por uma ou mais linhas de subtransmissão. Em alguns casos, a subestação de distribuição é alimentada diretamente de uma linha de transmissão de alta tensão, no caso de não existir sistema de subtransmissão. Cada subestação de distribuição atende um ou mais alimentadores primários. Com raras exceções, os alimentadores são radiais, o que significa que existe somente um caminho para a potência fluir da subestação de distribuição para o usuário

(KERSTING, 2002). A Figura 3 mostra o diagrama unifilar típico de um sistema de distribuição de energia.

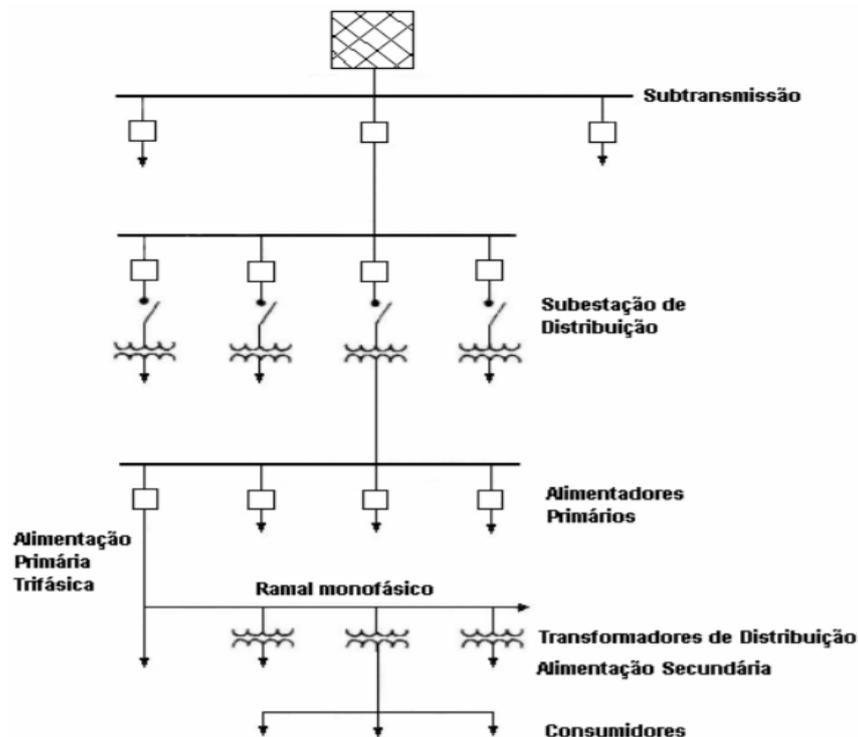


Figura 3 – Diagrama unifilar de um sistema de distribuição.

Fonte: (LEÃO, 2013).

As subestações são pontos de convergência, entrada e saída, de linhas de transmissão ou distribuição (LEÃO, 2013). A Figura 4 ilustra de forma simplificada uma subestação.

Uma subestação de distribuição de energia elétrica é formada basicamente por:

- Chaves de comutação do lado de alta e lado de baixa;
- Transformadores de tensão;
- Reguladores de tensão;
- Equipamentos de proteção;
- Equipamentos de medição;
- Alimentadores primários

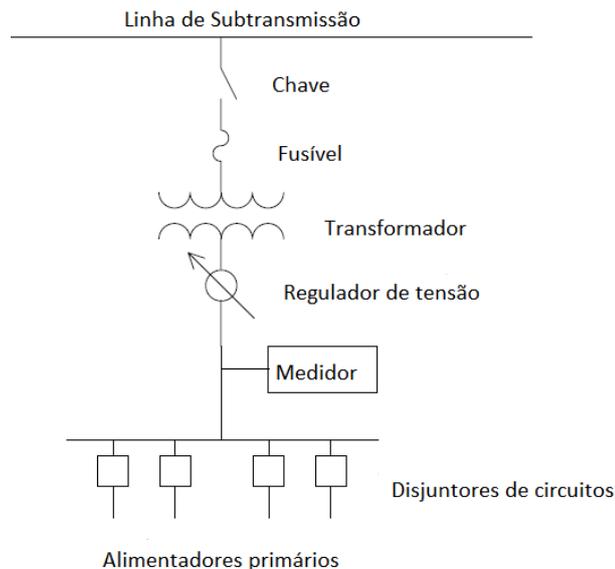


Figura 4 – Simplificação de uma subestação.

Fonte: Adaptado de (KERSTING, 2002).

Os alimentadores de distribuição são caracterizados por ter somente um caminho para o fluxo de potência. São basicamente circuitos que transportam energia elétrica das subestações de distribuição para os transformadores de distribuição (KERSTING, 2002).

Segundo a norma CEMIG ND-1.1 (2008) todo alimentador primário deve ter interligações. A interligação possibilita a transferência total ou parcial de um bloco de cargas quando há a ocorrência de uma falta em sua fonte de alimentação principal, como exemplificado na Figura 5.

No exemplo da Figura 5, dentre as diversas alternativas de alimentação das cargas pelos três alimentadores da subestação (SE 1), simulou-se uma falta no alimentador (Alim. 3). Para possibilitar a transferência do bloco de carga “C”, foi proposta a interligação entre P1 e P2. Dessa forma, criou-se a opção de transferência do Bloco de Carga “C” diretamente para o alimentador (Alim. 2), abrindo a chave “D6” e fechando a chave “D5”.

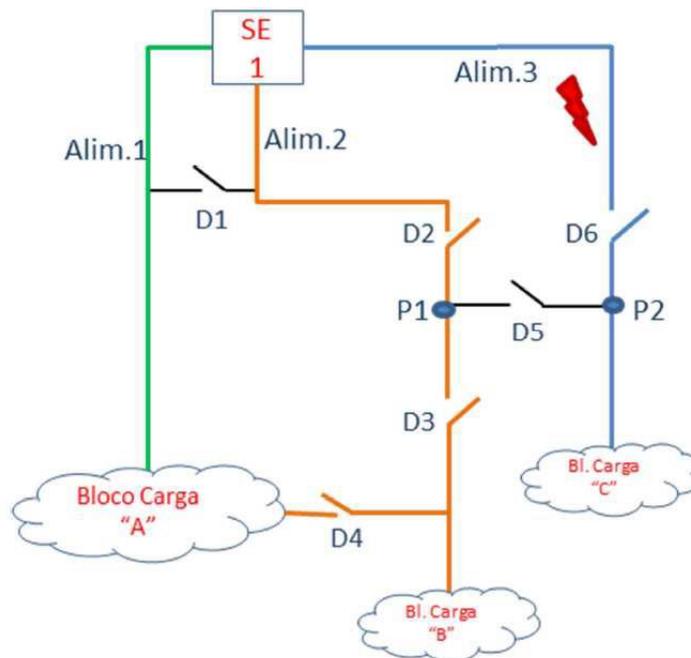


Figura 5 – Interligação entre alimentadores de uma subestação.

Fonte: (CEMIG ND-1.1, 2008).

A carga de um alimentador de distribuição geralmente é desbalanceada, porque uma grande quantidade de cargas monofásicas desiguais deve ser atendida. Um desbalanço adicional é introduzido pelo espaçamento desigual dos condutores de linhas trifásicas aéreas e subterrâneas (KERSTING, 2002).

Segundo a norma CEMIG ND-1.1 (2008) o desequilíbrio máximo recomendado nos troncos de alimentadores é de 20% e o fator de potência diário mínimo desejado é de 92%.

Para estudo do sistema de distribuição é preciso além de entender o seu funcionamento, realizar a modelagem do mesmo, de forma a descrevê-lo mais próximo da realidade nas simulações realizadas.

#### 2.4.1 MODELAGEM DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A determinação de impedâncias série de linhas aéreas e subterrâneas é um passo crítico na análise dos alimentadores de distribuição. CARSON (1926) escreveu um artigo no qual desenvolveu uma técnica onde as impedâncias próprias e mútuas de “n” condutores aéreos e subterrâneos podem ser determinadas,

assumindo que a terra era uma superfície infinita, uniformemente sólida, com uma superfície plana e resistência infinita. Com isso, ele utilizou o método das imagens de condutores, mostrado na Figura 6, onde cada condutor a uma altura dada tem uma imagem do condutor na mesma distância (KERSTING, 2002).

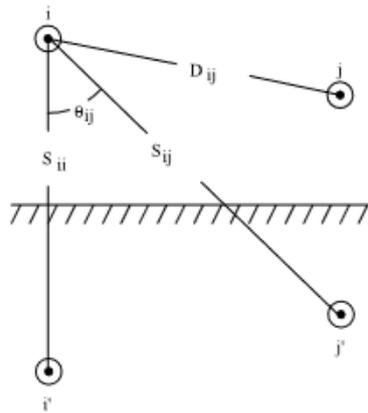


Figura 6 – Condutores e imagens.

Fonte: (KERSTING, 2002).

As admitâncias *shunts* de linhas, que podem ser calculadas através das equações de CARSON (1926) são mais evidentes quando se opera em níveis de tensão elevados. Assim, este tipo de efeito pode ser desprezado em sistemas de distribuição e deve ser apenas considerado na modelagem de linhas de transmissão (MONTEMEZZO, 2016).

Os sistemas de distribuição de energia elétrica exigem uma modelagem trifásica por atender majoritariamente cargas monofásicas e bifásicas, enquanto que a modelagem por diagramas unifilares é suficiente para análises nos sistemas de transmissão. Existem vários modelos de linhas de sistemas de distribuição. O modelo de segmento de linha exato é mostrado na Figura 7. Esse modelo de linha pode ser aéreo ou subterrâneo, sendo eles trifásicos, bifásicos ou monofásicos.

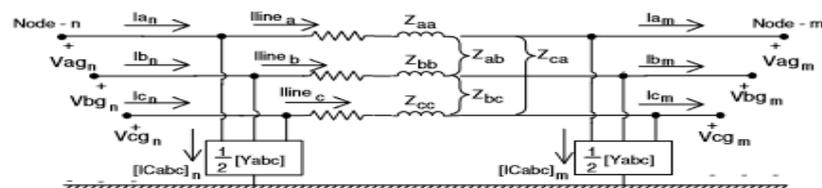


Figura 7 – Modelo de Segmento de Linha Trifásico.

Fonte: (KERSTING, 2002).

Quando um segmento de linha é bifásico ou monofásico, valores nulos são introduzidos na linha e coluna da fase faltante nas matrizes de impedância e admitância *shunt* (KERSTING, 2002).

A admitância *shunt* de uma linha aérea de distribuição de energia elétrica é tão pequena que pode ser negligenciada. A Figura 8 mostra um modelo de linha simplificado com admitância *shunt* negligenciada.

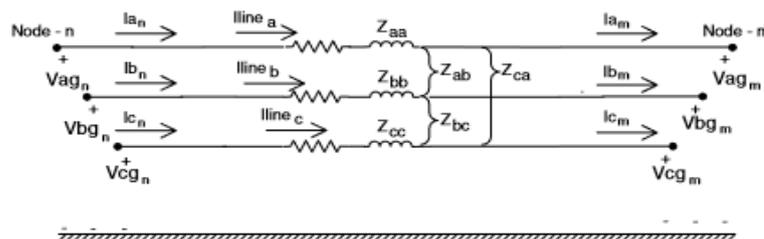


Figura 8 – Modelo de linha de segmento modificado.

Fonte: (KERSTING, 2002).

Além disso, existe também o modelo de segmento de linha aproximado. Este modelo pode ser desenvolvido aplicando a transformação da impedância inversa da teoria de componentes simétricos. Muitas vezes os únicos dados disponíveis para um segmento de linha são as impedâncias de sequência positiva e zero. Quando esta situação é encontrada, o modelo de segmento de linha aproximado pode ser usado (KERSTING, 2002). A Figura 9 ilustra o modelo de segmento de linha aproximado.

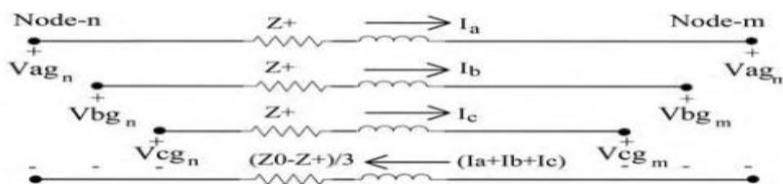


Figura 9 – Modelo de Segmento de Linha Aproximado.

Fonte: (KERSTING, 2002).

## 2.5. REGULADOR DE TENSÃO

Neste trabalho, o controle de tensão da curva QV é realizado por reguladores de tensão. A proposta de se utilizar um regulador de tensão para controlar a tensão de um barramento a fim de traçar a curva QV é inovadora.

Um regulador de tensão é basicamente um autotransformador e possui várias posições de *tap*, podendo operar tanto na configuração elevador de tensão como na condição de abaixador de tensão. O que determina se ele é elevador ou abaixador de tensão é a polaridade que a bobina série se encontra. Para isso, há uma chave inversora de polaridade no circuito que é responsável por determinar a operação do regulador com a finalidade de elevar ou diminuir a tensão. Essa comutação é feita com a ajuda de um reator, que tem o objetivo de interromper a circulação de corrente do circuito durante o processo de comutação (BURATTI, 2016).

Na obra de KERSTING (2002) o regulador de passo de tensão do tipo B monofásico é modelado. As impedâncias série e admitância *shunt* são negligenciadas do circuito equivalente, por possuírem valores muito pequenos. As Figuras 10 (a) e 10 (b) mostram os circuitos equivalente do regulador de passo monofásico na posição de elevação de tensão e abaixamento de tensão respectivamente.

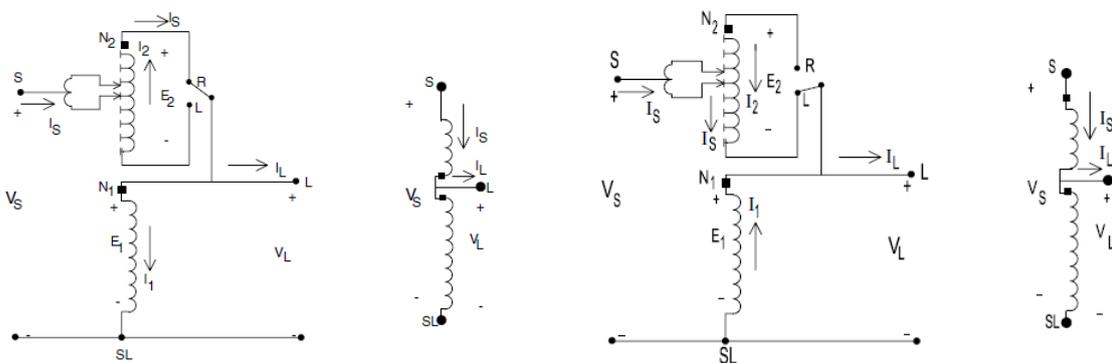


Figura 10 – Regulador de passo de tensão monofásico.

(a) Posição de elevação.

(b) Posição de abaixamento.

Fonte: (KERSTING, 2002).

O circuito primário do sistema do regulador do tipo B é conectado via *taps* ao enrolamento série do regulador. O enrolamento série é conectado ao enrolamento *shunt*, sendo o mesmo conectado diretamente ao circuito regulador. A excitação do núcleo é constante porque o enrolamento *shunt* é conectado diretamente ao circuito regulador (KERSTING, 2002).

As Equações (1) e (2) são respectivamente a tensão e corrente de saída do regulador de tensão do tipo B. Já a Equação (3) mostra o valor da razão do

regulador efetiva como uma função da razão do número de espiras do enrolamento série (N2) para o número de espiras do enrolamento *shunt* (N1), sendo o sinal negativo para a posição de aumento de tensão e o sinal positivo para diminuição. A Equação (3) pode ser modificada para Equação (4) quando a razão de espiras não é conhecida, mas se conhece uma posição particular do *tap*, dessa forma, a regulação efetiva será uma função da posição do *tap*, para cada mudança do *tap* de 0,00625 por unidade. O sinal da Equação (4) para elevação ou diminuição de tensão é o mesmo da Equação (3).

$$V_S = a_r * V_L \quad (1)$$

$$I_S = \frac{1}{a_r} * I_L \quad (2)$$

$$a_r = 1 \pm \frac{N2}{N1} \quad (3)$$

$$a_r = 1 \pm 0,00625 * tap \quad (4)$$

A Tabela 1 mostra um resumo das constantes generalizadas do regulador de passo de tensão do tipo B.

Tabela 1 – Constantes generalizadas do regulador de passo do tipo B.

Constantes generalizadas					
$a = a_r$	$b = 0$	$c = 0$	$d = \frac{1}{a_r}$	$A = \frac{1}{a_r}$	$B = 0$

Fonte: Adaptado de (KERSTING, 2002).

O regulador é modelado para mudar um *tap* por vez começando da posição neutra. O RT vai mudando o *tap* até a tensão do relé estar dentro da largura de banda. Pode existir diferentes *taps* para a mesma carga dependendo se a tensão precisa ser aumentada ou abaixada vinda da posição de *tap* existente (KERSTING, 2002).

Na modelagem do regulador de tensão da Figura 11 proposta por KERSTING (2002), a mudança dos *taps* do regulador é controlada por um compensador de queda de linha. O propósito desse compensador é modelar a queda de tensão da

linha de distribuição do regulador para o centro de carga. Com objetivo de forçar a impedância de linha por unidade ser igual à impedância do compensador por unidade e realizar o controle remoto de tensão.

Nesse trabalho de conclusão de curso uma modificação na modelagem de KERSTING (2002) é realizada e mostrada na Figura 12. A modificação consistiu na exclusão do compensador de queda de linha, que realiza o controle remoto de tensão, que é quando um equipamento em um barramento controla a tensão em outro barramento. Ao traçar uma curva QV para um barramento de carga, o restante do sistema deve ficar em repouso. Sendo assim, um controle remoto de tensão não serve para criar curvas QV. Dessa forma, com a exclusão do controle remoto do regulador, o regulador de tensão conseguiu controlar a tensão do seu próprio barramento e foi possível calcular a curva QV para o barramento de carga.

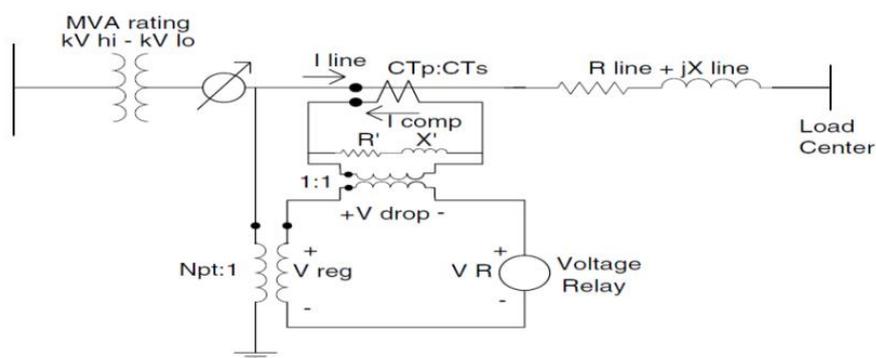


Figura 11 – Modelagem do regulador de tensão.

Fonte: (KERSTING, 2002).

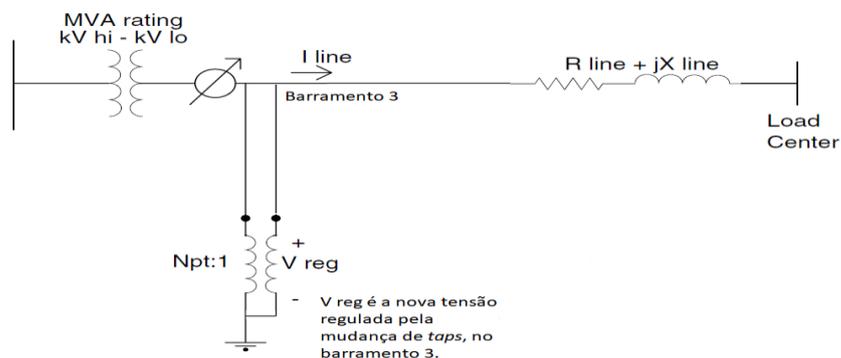


Figura 12 – Modificação proposta na modelagem do regulador de tensão.

Fonte: Adaptado de (KERSTING, 2002).

## 2.6. MÉTODO DE VARREDURA PARA CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA

Para traçar a curva QV em sistemas de distribuição de energia elétrica, é preciso desenvolver uma rotina computacional que realize o cálculo de um fluxo de potência trifásico.

Segundo MOURA (2016), de modo geral, existem três modelos de variáveis que interferem no resultado final do fluxo de potência: variáveis não controláveis ou de perturbação, variáveis de controle ou independentes e as variáveis de estados dependentes.

As variáveis de perturbação são variáveis que estão fora de controle, como as cargas ativas e reativas do sistema, tendo em vista que elas são definidas pelo consumidor. As variáveis de controle são aquelas que estão caracterizadas em cada barramento. Enfim, as variáveis de estado são as que devem ser calculadas em cada barramento (MOURA, 2016).

O cálculo de fluxo de potência para o sistema de distribuição normalmente utiliza o método de varredura, enquanto que em análises de fluxo de potência para sistemas de transmissão, todos os cálculos são baseados no método de *Newton-Raphson*. O artigo de TREVINO (1970) mostra vários casos de difícil convergência em problemas de fluxo de potência utilizando o método de *Newton-Raphson*, o que justifica a escolha de se utilizar o método de varredura em sistemas de distribuição.

O método de varredura é composto de duas partes, sendo elas: varredura para frente e varredura para trás. A varredura para frente calcula as tensões a jusante a partir da fonte. Na primeira iteração as tensões na carga serão as mesmas que as tensões na fonte. A varredura para trás calcula as correntes da carga para a fonte, usando as tensões mais recentes calculadas na varredura para frente. Após a primeira varredura para frente e para trás, é possível calcular novas tensões de carga usando as correntes mais recentes. A varredura continua até que o erro entre as tensões da carga entre duas iterações consecutivas seja menor que um valor de tolerância (KERSTING, 2002).

Para calcular o fluxo de potência de um sistema utilizando o método de varredura é preciso modelar as características estruturais e elétricas do sistema,

como: a natureza das cargas, o cálculo das impedâncias e admitâncias de linhas e os modelos de linhas de distribuição.

## Capítulo 3- METODOLOGIA

Basicamente a metodologia proposta neste trabalho testa uma nova técnica de cálculo da curva QV em barramento de carga para sistema de distribuição de energia, utilizando o regulador de tensão como o equipamento de controle da tensão. Adicionalmente, são conduzidos procedimentos para relacionar a variação da curva QV com o nível de carregamento do sistema e adequações as normas da ANEEL. A metodologia foi simulada em um sistema teste do IEEE, "*IEEE 4 Node Test Feeder*", e em um alimentador de distribuição de energia real da região metropolitana de Belo Horizonte.

### 3.1. SISTEMAS TESTE

Os testes no sistema "*IEEE 4 Node Test Feeder*" foram realizados na plataforma MATLAB ® (2014) e PSS/ADEPT. Já os testes do alimentador de distribuição de energia real foram realizados somente no PSS/ADEPT, devido à complexidade do fluxo de potência.

#### 3.1.1 SISTEMA "*IEEE 4 NODE TEST FEEDER*"

O sistema teste principal do trabalho foi o "*IEEE 4 Node Test Feeder*", conhecido na literatura nas análises de sistemas de distribuição de energia elétrica. É um sistema teste com quatro barramentos normatizado pelo Subcomitê de análise do sistema de distribuição de PSE do IEEE. O sistema é mostrado na Figura 13, as configurações dos polos na Figura 14 e suas principais características estão reunidas na Tabela 2.

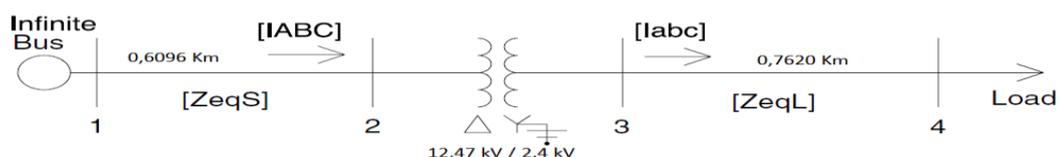


Figura 13 – Sistema "*IEEE 4 Node Test Feeder*".

Fonte: Adaptado de (KERSTING, 2002).

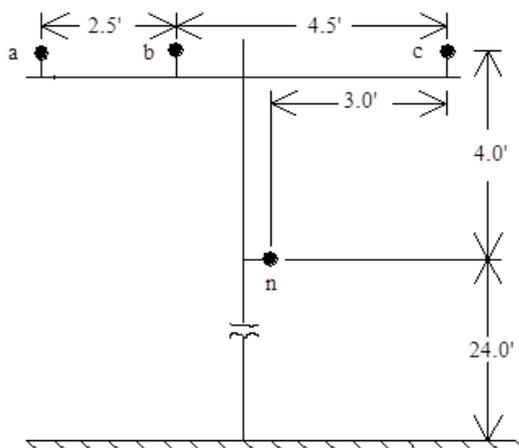


Figura 14 – Configuração dos polos do sistema "IEEE 4 Node Test Feeder".

Fonte: (KERSTING, 2002).

Tabela 2 – Características do sistema "IEEE 4 Node Test Feeder".

<b>Características do sistema "IEEE 4 Node Test Feeder".</b>	
Tensão da barra infinita, balanceada e trifásica	12,47 kV F-F
Condutores de fase para segmento 1-2 e 3-4	336,400 26/7
Condutores de neutro	4/0 6/1 ACSR
Banco de transformador monofásico	2000 kVA
	12.47-2.4 kV
	$Z=1.0+j6$ pu
Carga PQ constante – Fase A	750 kVA, FP=0,85
Carga PQ constante – Fase B	1000 kVA, FP=0,90
Carga PQ constante – Fase C	1230 kVA, FP=0,95

Fonte: Adaptado de (KERSTING, 2002).

### 3.1.2 ALIMENTADOR REAL DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE

O segundo sistema teste do trabalho foi um alimentador real situado na região metropolitana de Belo Horizonte. O sistema teste é mostrado na Figura 15, suas principais características estão reunidas na Figura 16 e curva de carga na Figura 17.

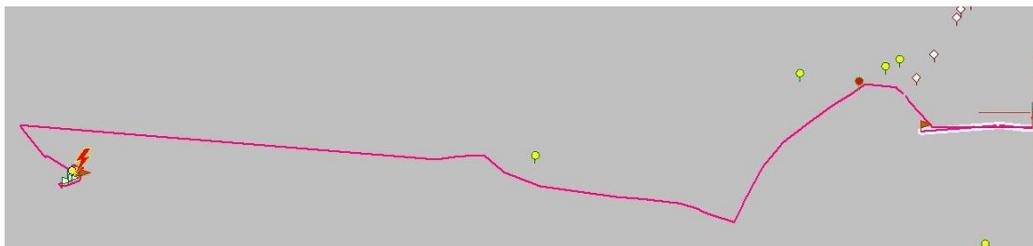


Figura 15 – Alimentador real do sistema de distribuição de energia elétrica.

Fonte: Autor.

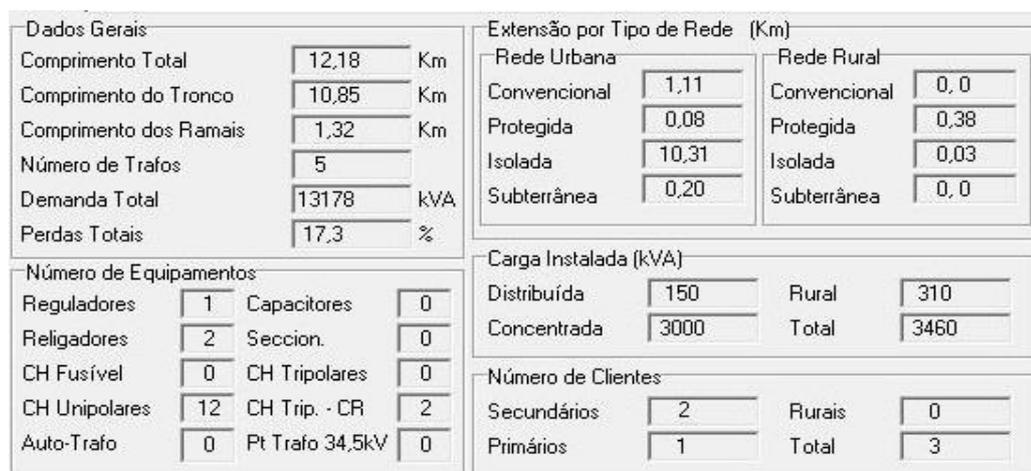


Figura 16 – Características do alimentador real do sistema de distribuição de energia elétrica.

Fonte: Autor.

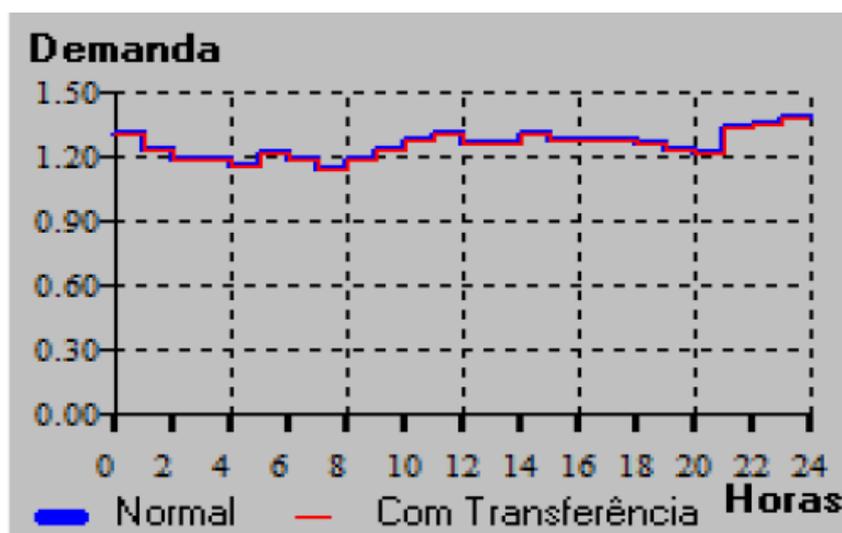


Figura 17 – Curva de carga do alimentador real do sistema de distribuição de energia elétrica.

Fonte: Autor.

Esse alimentador foi escolhido por possuir um regulador de tensão, equipamento utilizado para controlar a tensão da curva QV e ter sua carga instalada

predominante em um cliente primário, o que facilita a alteração do nível de carregamento do sistema, para realização de parte da metodologia proposta.

É um alimentador simples e de pequena extensão se comparado aos demais alimentadores da região metropolitana de Belo Horizonte.

### **3.2. CURVA QV PARA BARRAMENTO DE GERAÇÃO DO SISTEMA “IEEE 4 NODE TEST FEEDER”**

A curva QV para barramento de geração é um estudo mais abrangido em trabalhos acadêmicos, em comparação a curva QV para barramento de carga. O trabalho de SILVA *et al.* (2016) é um exemplo que aborda essa temática.

A curva QV para o barramento de geração foi calculada no sistema teste “IEEE 4 Node Test Feeder” com o intuito de validar a adaptação do conceito de curva QV em sistema de distribuição de energia elétrica e servir de parâmetro para comparação com a curva QV para barramento de carga utilizando regulador de tensão, proposta por este trabalho de conclusão de curso.

O cálculo da curva QV para barramento de geração foi realizado na plataforma MATLAB® (2014) e seguiu os seguintes procedimentos:

- a) Cálculo das matrizes de impedância de fase utilizando o método das imagens, para os dois segmentos de linhas, segmento 1-2 e 3-4.
- b) Definição das matrizes de varredura para frente e para trás para cada elemento série.
- c) Cálculo da impedância em ohms do transformador, da matriz de impedância do transformador e das matrizes de varredura progressiva do mesmo.
- d) Para realizar o processo do fluxo de potência, foram definidas as correntes da carga e da fonte iniciais como zero, assim como a tensão da carga.
- e) A tensão inicial do gerador é a descrita no sistema “IEEE 4 Node Test Feeder”.

- f) A tolerância do processo é 0.0001. E a interação máxima do sistema é 100.
- g) Foi realizada a varredura para frente e para trás, realizando o fluxo de potência, calculado a tensão e a corrente em todas as barras até o sistema convergir. O sistema converge quando o erro é menor que a tolerância.
- h) Quando o sistema convergiu foi calculada a potência reativa para cada fase em relação à tensão do gerador. Após esse procedimento o módulo da tensão do gerador foi decrescido de 500 V, sendo esse decréscimo escolhido arbitrariamente e processo de fluxo de potência foi repetido.
- i) O processo de variação da tensão do gerador e cálculo da potência reativa foi repetido até que módulo da tensão do gerador subtraído da variação de tensão seja zero. De posse de todos os dados calculados a curva QV foi traçada.

Antes de traçar a curva QV para barramento de geração, o primeiro cálculo de fluxo de potência foi comparado com o resultado da obra de KERSTING (2002). A razão desta comparação é que a curva QV é formada por sucessivos fluxos de potência.

Posteriormente, foi traçada a curva QV para barramento de carga, utilizando o regulador de tensão. Para executar tal tarefa, foi necessário primeiramente modelar o regulador de tensão de forma que o mesmo controle a tensão do seu próprio barramento.

### **3.3. ESTUDO E VALIDAÇÃO DA PROPOSTA DE CÁLCULO DA CURVA QV UTILIZANDO REGULADOR DE TENSÃO**

A proposta de utilizar um regulador de tensão para controlar a tensão de um barramento para traçar a curva QV é inovadora. Em trabalhos já realizados sobre a curva QV como o de LUGON *et al.* (2009), PINTO (2013) e REIS *et al.* (2005) é simulado um gerador fictício com limites abertos de geração para obtenção da curva QV do barramento. O gerador fictício tem potência ativa zero e é registrada a

produção de potência reativa, tendo em conta a variação da tensão aos seus terminais.

Nesse trabalho o equipamento de controle da variação da tensão do barramento analisado foi o regulador de tensão. O regulador de tensão controla a tensão do seu próprio barramento e por meio do aumento ou diminuição do *tap* quando a tensão de referência é alterada, a curva QV para barramento de carga é calculada. Como citado no tópico 2.5., a proposta de utilizar o regulador de tensão como equipamento de controle da tensão no barramento, requer uma modificação na modelagem do mesmo, que se fundamenta na omissão do compensador de queda de linha.

### **3.3.1 CURVA QV UTILIZANDO REGULADOR DE TENSÃO DO SISTEMA “IEEE 4 NODE TEST FEEDER”**

Nesse sistema foi utilizado um regulador de passo de tensão do tipo B monofásico para cada fase do sistema, conectados em estrela na barra secundária do nó 3 do sistema teste.

A relação de transformação potencial dos reguladores utilizados é dada na Equação (5). Com o regulador na posição neutra, a tensão regulada é mostrada pela Equação (6), onde  $V_3$  é a tensão da barra 3 antes do regulador de tensão.

$$N_{pt} = \frac{2400}{120} \quad (5)$$

$$V_{reg} = \frac{V_3}{N_{pt}} \quad (6)$$

O esquemático do sistema simulado como a inserção do regulador de tensão em cada fase é ilustrado na Figura 18, que possui as mesmas características do sistema "IEEE 4 Node Test Feeder" sem regulador de tensão. O cálculo do fluxo de potência para obtenção da curva QV que foi realizado na plataforma MATLAB ® (2014) seguiu os seguintes passos:

- a) Cálculo das matrizes de impedância de fase utilizando o método das imagens, para os dois segmentos de linhas, segmento 1-2 e 3-4.
- b) Definição das matrizes de varredura para frente e para trás para cada elemento série.
- c) Cálculo da impedância em ohms do transformador, da matriz de impedância do transformador e das matrizes de varredura progressiva do mesmo.
- d) Para realizar o processo do fluxo de potência, foram definidas as correntes da carga e da fonte iniciais como zero, assim como a tensão da carga.
- e) A tolerância do processo é 0.0001. E a interação máxima do sistema é 100.
- f) Foi realizada a varredura para frente e para trás, calculado a tensão e a corrente em todas as barras até o sistema convergir. O sistema converge quando o erro é menor que a tolerância.
- g) Quando o sistema convergiu foi comparada a tensão regulada pelo regulador de tensão com a tensão de referência, que consiste na tensão que se deseja que o regulador de tensão controle no barramento. Se a tensão regulada for maior ou menor que a tensão de referência ocorre à mudança do *tap* do regulador e o cálculo novamente do fluxo de potência, até a tensão regulada ser bem próxima da tensão de referência.
- h) A tensão de referência foi variada, até a mudança máxima de 150 *taps*, com intuito didático de se ter um maior número de pontos a serem avaliados. A cada variação da tensão de referência e convergência da comparação com a tensão regulada em cada fase, foi calculada a respectiva potência reativa para essa tensão. Com esses dados foi traçada a curva QV para o barramento 3.

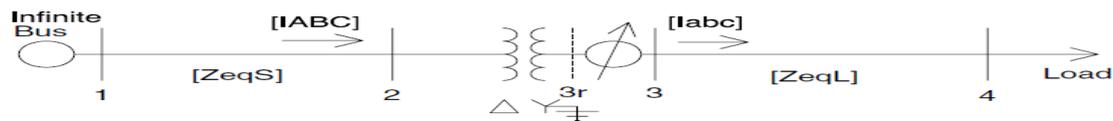


Figura 18 – Sistema "IEEE 4 Node Test Feeder" com inserção do regulador de tensão.

Fonte: (KERSTING, 2002).

Para validação da rotina computacional executada na plataforma MATLAB ® (2014) e da adaptação realizada no regulador de tensão, o sistema "IEEE 4 Node Test Feeder" também foi simulado no PSS/ADEPT e realizada a comparação das margens de potência reativa obtidas nas duas plataformas de cálculo de fluxo de potência.

Na simulação do sistema teste no PSS/ADEPT também foi desconsiderada a impedância de compensação do regulador de tensão, como evidenciado na Figura 19 que ilustra a configuração da impedância de compensação como nula, o que possibilitou que o regulador de tensão realizasse um controle local de tensão.

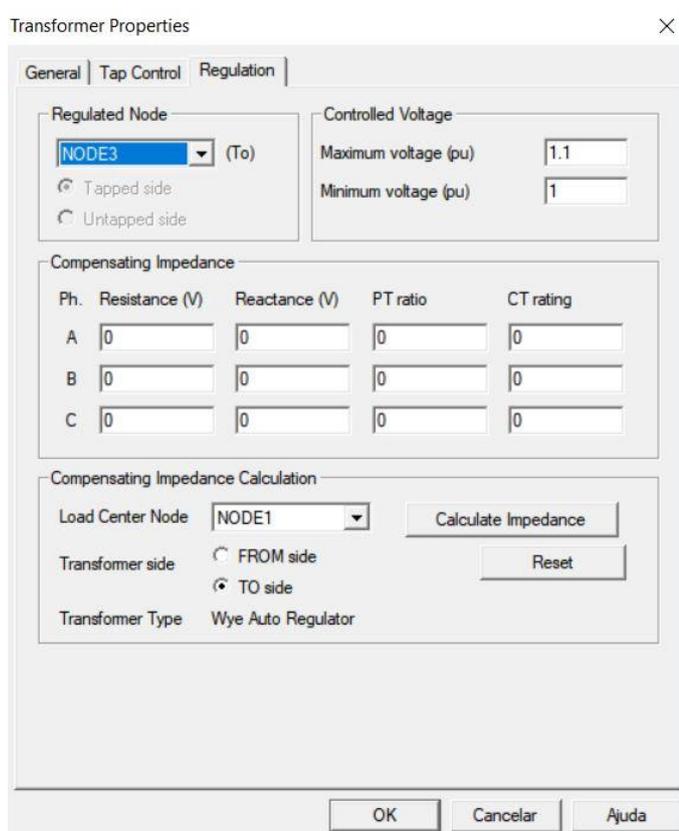


Figura 19 – Configuração do regulador de tensão desconsiderando a impedância de compensação.

Fonte: Autor.

### **3.3.2 CURVA QV UTILIZANDO REGULADOR DE TENSÃO DO ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA REAL**

A curva QV foi traçada realizando a variação da tensão do barramento em teste através da mudança da tensão de controle do RT. A cada mudança da tensão de controle com a tensão de referência em “pu”, foi simulado o fluxo de potência através do *software* PSS/ADEPT e calculado a respectiva potência reativa por fase do barramento. O sistema foi testado até um aumento de tensão de 1,5 pu, que é o usual de ocorrer na prática.

Como mencionado no tópico 3.3.1, nas simulações realizadas no PSS/ADEPT também foi desconsiderada a impedância de compensação do regulador de tensão, dessa forma, foi possível a realização do controle local de tensão e o barramento de estudo foi o barramento secundário do regulador, que está localizado a aproximadamente 1 km do cliente primário principal do alimentador.

Diferentemente do sistema "*IEEE 4 Node Test Feeder*" que utiliza um regulador de tensão por fase, esse alimentador real possui um regulador de tensão trifásico, mas com ajustes de *taps* independente para cada fase, e também possui a regulação efetiva em função da posição do *tap* de 0,00625 por unidade.

### **3.4. IMPACTO DO NÍVEL DE CARREGAMENTO DO SISTEMA NA MARGEM DE POTÊNCIA REATIVA DA CURVA QV.**

Com o objetivo de simular o impacto na margem da curva QV em barramento de carga quando ocorre a transferência total ou parcial de um bloco de cargas entre alimentadores, foi variado o nível de carregamento do sistema teste através da mudança das potências aparentes de cada fase.

#### **3.4.1. IMPACTO DO NÍVEL DE CARREGAMENTO NO SISTEMA “*IEEE 4 NODE TEST FEEDER*”**

Para realização dos testes nesse sistema algumas restrições foram levadas em consideração, como:

- O condutor de fase do sistema teste é o 26/7 ACSR e suporta uma corrente de até 900 A. Segundo a norma CEMIG ND-1.1 (2008) o carregamento máximo de cada tronco interligável deve ser em condições normais de operação, igual a 60% da capacidade nominal do condutor predominante ou do ramo de interligação, respeitando-se a necessidade de transferência. O restante dos 40% da capacidade nominal do condutor servirá de reserva para o atendimento às ocorrências no sistema elétrico. Dessa forma a simulação de transferência de carga do sistema foi aumentada até no máximo 900 A.
- A potência aparente máxima que o sistema pode fornecer é 2000 kVA por fase.

O aumento do nível de carregamento do sistema foi realizado multiplicando as potências aparentes nominais de cada fase por um fator de carregamento denominado como  $FC$ . As Equações (7), (8) e (9) mostram como o nível de carregamento do sistema foi variado na rotina computacional do fluxo de potência. O fator de carregamento ( $FC$ ) foi variado entre 0,8 e 1,2 respeitando as restrições. Nos testes realizados quando o fator de carregamento foi menor que 1, significa que houve a simulação de uma falta na fonte de alimentação principal do sistema teste e transferência parcial do bloco de carga, já quando o fator de carregamento foi maior que 1, o sistema teste absorveu carga parcial de outro alimentador interligado.

$$S_a = FC \times 750 \text{ kVA} \quad \text{Fator de potência} = 0,85 \text{ indutivo} \quad (7)$$

$$S_b = FC \times 1000 \text{ kVA} \quad \text{Fator de potência} = 0,90 \text{ indutivo} \quad (8)$$

$$S_c = FC \times 1230 \text{ kVA} \quad \text{Fator de potência} = 0,95 \text{ indutivo} \quad (9)$$

### 3.4.2. IMPACTO DO NÍVEL DE CARREGAMENTO NO ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO REAL

Para realização dos testes nesse sistema algumas restrições foram levadas em consideração, como:

- O condutor de fase do sistema teste é o 2/0 ACSR e suporta uma corrente de até 270 A.

- A potência aparente máxima que o alimentador do sistema pode fornecer é de 7MVA.

O aumento do nível de carregamento do sistema foi realizado da mesma forma do teste no sistema anterior. Como esse alimentador tem como consumidor predominante um cliente primário, apenas a potência aparente desse consumidor foi multiplicada pelo fator de carregamento ( $FC$ ).

### **3.5. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ADEQUAÇÃO A NORMAS DA ANEEL DO FATOR DE POTÊNCIA E DO EQUILÍBRIO DE FASES NA MARGEM DE POTÊNCIA REATIVA.**

Foram avaliados dois pontos principais para a adequação aos requisitos normatizados pela ANEEL para o bom funcionamento do sistema de distribuição, o fator de potência e o equilíbrio do carregamento das fases.

A adequação as normas da ANEEL foi realizada apenas no sistema teste "*IEEE 4 Node Test Feeder*", que possui um desequilíbrio de corrente e fator de potência abaixo do regulamentado. O alimentador real por ter sua carga predominante em um consumidor primário trifásico, não possui desequilíbrio e o fator de potência está dentro do normatizado, pelo fato da adequação ao fator de potência ser uma preocupação e responsabilidade tanto da concessionária de distribuição de energia elétrica quanto do consumidor primário.

Segundo a ANEEL - PRODIST Módulo 8 (2018) para unidade consumidora ou conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 (noventa e dois centésimos) e 1,00 (um) indutivo ou 1,00 (um) e 0,92 (noventa e dois centésimos) capacitivo, de acordo com regulamentação vigente.

Segundo a norma CEMIG ND-1.1 (2008) o desequilíbrio máximo de corrente recomendado em sistemas de distribuição é de 20%, a ser calculado através da Equação (10).

$$Desequilíbrio(\%) = \frac{3 \times \sqrt{(Ia^2 + Ib^2 + Ic^2) - [(Ia \times Ib) + (Ia \times Ic) + (Ic \times Ib)]} \times 100}{Ia + Ib + Ic} \quad (10)$$

Primeiramente foi calculado o desequilíbrio de correntes do sistema com as características nominais e observado a existência de um desequilíbrio de 41,86%, o que ultrapassa os 20% recomendado pela norma CEMIG ND-1.1 (2008), dessa forma, foi necessário realizar o equilíbrio do carregamento do sistema, a fim de enquadrar no percentual normatizado. O equilíbrio de fase foi realizado transferindo carga da fase “C” para a fase “A” e as respectivas potências após o equilíbrio foram:  $S_a = 950 \text{ kVA}$ ,  $S_b = 1000 \text{ kVA}$ ,  $S_c = 1030 \text{ kVA}$ . O desequilíbrio percentual após a transferência parcial de carga foi 7,05%.

Após o equilíbrio de fases e considerando as novas potências de cada fase, foi realizado o cálculo dos bancos de capacitores necessário para aumentar o fator de potência da fase “A” de 0,85 indutivo para 0,92 indutivo e da fase “B” de 0,9 indutivo para 0,92 indutivo. A fase “C” não necessita de correção, pois já possui um fator de potência de 0,95. As potências reativas dos bancos de capacitores da fase “A” e “B” são respectivamente 156,45 *kVAR* e 52,49 *kVAR*.

Foi traçada a curva QV após a correção do fator de potência e da realização do equilíbrio de corrente, considerando o carregamento nominal do sistema, a fim de estudar o comportamento do sistema quando opera dentro dos padrões normatizados.

## Capítulo 4- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem por objetivo mostrar o desempenho da metodologia proposta no capítulo anterior.

### 4.1. CURVA QV PARA BARRAMENTO DE GERAÇÃO DO SISTEMA “IEEE 4 NODE TEST FEEDER”

A curva QV para barramento de geração é formada por sucessivos fluxos de potência, onde a variável de controle é a tensão do barramento de geração.

O fluxo de potência para o primeiro ponto da curva QV apresentou um resultado muito próximo ao exemplo 10.2 da obra de KERSTING (2002), com um desvio padrão de apenas 1%, o que evidencia que os fluxos de potência dos outros pontos estão corretos.

As curvas QV para barramento de geração obtidas por sucessivos fluxos de potência no sistema teste são apresentadas nas Figuras 20 (a), (b) e (c) e as respectivas margens de potência reativa na Tabela 3.

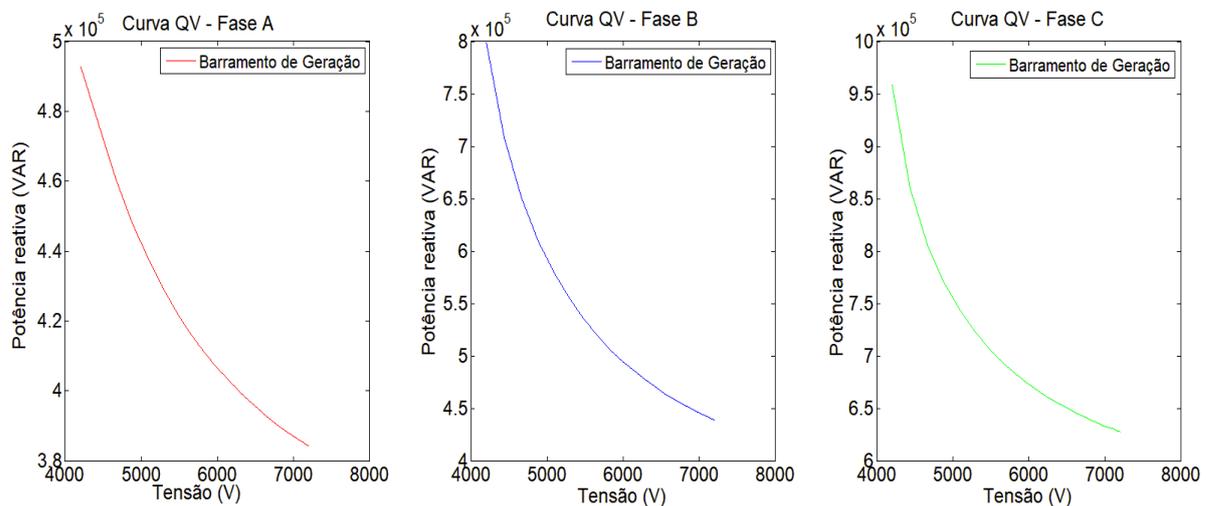


Figura 20 – Curva QV barramento de geração.

(a) Fase A

(b) Fase B

(c) Fase C

Fonte: Autor.

Tabela 3 – Margem de carga da curva QV para barramento de geração.

<b>Margens de potência reativa</b>	
Fase A	$384,257 \times 10^3 \text{ VAR}$
Fase B	$438,707 \times 10^3 \text{ VAR}$
Fase C	$627,625 \times 10^3 \text{ VAR}$

Fonte: Autor.

O carregamento das fases possui um desequilíbrio e diferentes fatores de potência, o que ocasiona diferentes valores para as margens de potência reativa de cada fase.

A curva QV apresenta regiões de instabilidade, onde a potência reativa diminui com o aumento da tensão do barramento.

As três fases apresentam margem positiva, que é quando o ponto mínimo se encontra acima do eixo das abscissas. Não se pode afirmar ainda se um sistema de distribuição de energia elétrica é mais bem condicionado com margem positiva ou negativa da curva QV, devido à modelagem trifásica dos seus componentes. Trabalhos futuros devem ser realizados como forma de responder esta questão, assim como foi feito para sistemas de transmissão no artigo publicado no IET *Generation, Transmission & Distribution* de MOURA *et al.* (2016).

#### **4.2. CURVA QV PARA BARRAMENTO DE CARGA UTILIZANDO REGULADOR DE TENSÃO DO SISTEMA “IEEE 4 NODE TEST FEEDER”**

As análises dos resultados da curva QV para barramento de carga desenvolvida no MATLAB® (2014) e a comparação com as margens da curva QV para barramento de carga feita através dos resultados obtidos PSS/ADEPT serão mostrados nos itens 4.2.1 e 4.2.2 respectivamente. No item 4.2.3. será apresentado a comparação com a curva QV de geração.

##### **4.2.1. CÁLCULO DA CURVA QV PARA BARRAMENTO DE CARGA DESENVOLVIDO NA PLATAFORMA MATLAB® (2014)**

A modificação proposta na modelagem do regulador de tensão permite calcular a curva QV de barramentos de carga, caso o regulador de tensão consiga

controlar o nível de tensão localmente. Assim, antes de se testar a metodologia para cálculo da curva QV desenvolvida na plataforma MATLAB ® (2014), foram realizados testes preliminares, que se basearam no cálculo de vários fluxos de potência onde o valor de referência do regulador de tensão foi alterado e verificado se o controle estava sendo feito de forma correta.

A Tabela 4 mostra algumas comparações entre a tensão de referência do regulador de tensão e a tensão do barramento 3, onde o regulador de tensão foi instalado. Os valores regulados no barramento 3 são próximos do valor de referência, o que comprova que a modificação no regulador de tensão sugerida é válida.

Tabela 4 – Comparação entre o valor de referência do regulador e o valor regulado no próprio barramento do regulador.

<b>Valor de referência do regulador de tensão</b>	<b>Valor da tensão no barramento 3</b>
70 V	FASE A = 69,98 V FASE B = 69,97 V FASE C = 69,80 V
200 V	FASE A = 200,12 V FASE B = 201,83 V FASE C = 201,55 V
360 V	FASE A = 361,83 V FASE B = 361,11 V FASE C = 360,81 V
480 V	FASE A = 482,25 V FASE B = 481,61V FASE C = 481,17 V

Fonte: Autor.

O fluxo de potência com a tensão de referência de 120 V também apresentou um resultado muito próximo ao exemplo 10.2 da obra de KERSTING (2002), com um desvio padrão de apenas 1,3%.

As curvas QV para barramento de carga, utilizando o regulador de tensão como o equipamento de controle da variação da tensão do barramento, são

apresentadas nas Figuras 21 (a), (b) e (c) e as margens de potência reativa do sistema simulado são apresentadas na Tabela 5.

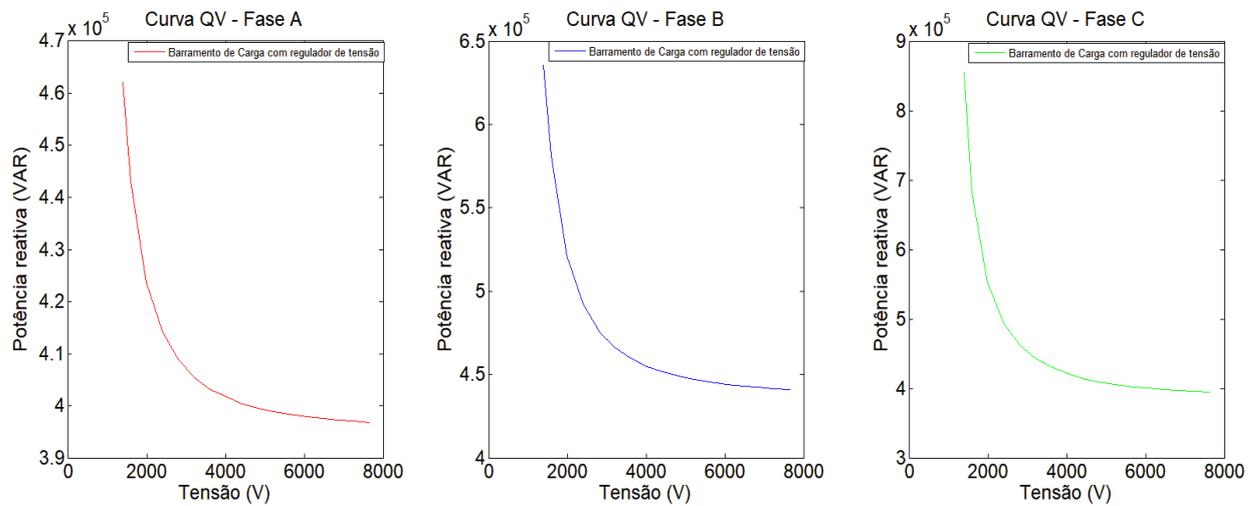


Figura 21 – Curva QV barramento de carga com RT.

(a) Fase A

(b) Fase B

(c) Fase C

Fonte: Autor.

Tabela 5 – Margem de carga da curva QV para barramento de carga.

Margens de potência reativa	
Fase A	$395,145 \times 10^3$ VAR
Fase B	$436,060 \times 10^3$ VAR
Fase C	$384,401 \times 10^3$ VAR

Fonte: Autor.

As três fases apresentam margem de potência reativa positiva e regiões de instabilidade.

#### 4.2.2. COMPARAÇÃO ENTRE AS MARGENS DE POTÊNCIA REATIVA DA CURVA QV PARA BARRAMENTO DE CARGA DESENVOLVIDO NA PLATAFORMA MATLAB® (2014) E NO SOFTWARE PSS/ADEPT

A comparação foi realizada para validar a programação no MATLAB® (2014) e também a modificação no regulador de tensão para cálculo da curva QV.

A Tabela 6 mostra a comparação entre as margens de potência reativa, nota-se que os valores são bem próximos o que comprova que a rotina computacional

desenvolvida no MATLAB® (2014) está correta, assim como as curvas QV construídas no item 4.2.1.

Tabela 6 – Comparação entre as margens de potência reativa do barramento de carga desenvolvida no MATLAB e PSS/ADEPT.

<b>Margens de potência reativa</b>			
<b>MATLAB</b>		<b>PSS/ADEPT</b>	
Fase A	$395,145 \times 10^3 \text{ VAR}$	Fase A	$395,084 \times 10^3 \text{ VAR}$
Fase B	$436,060 \times 10^3 \text{ VAR}$	Fase B	$435,889 \times 10^3 \text{ VAR}$
Fase C	$384,401 \times 10^3 \text{ VAR}$	Fase C	$384,070 \times 10^3 \text{ VAR}$

Fonte: Autor.

#### 4.2.3. COMPARAÇÃO ENTRE A CURVA QV PARA BARRAMENTO DE GERAÇÃO E DE CARGA NO SISTEMA "IEEE 4 NODE TEST FEEDER"

As Figuras 22 (a), (b) e (c) e Tabela 7 mostram a comparação entre as curvas QV para barramento de carga e de geração.

Tabela 7 – Comparação entre as margens de potência reativa do barramento de carga e do barramento de geração.

<b>Margens de potência reativa</b>			
<b>Barramento de geração</b>		<b>Barramento de carga</b>	
Fase A	$384,257 \times 10^3 \text{ VAR}$	Fase A	$395,145 \times 10^3 \text{ VAR}$
Fase B	$438,707 \times 10^3 \text{ VAR}$	Fase B	$436,060 \times 10^3 \text{ VAR}$
Fase C	$627,625 \times 10^3 \text{ VAR}$	Fase C	$384,401 \times 10^3 \text{ VAR}$

Fonte: Autor.

As margens de potência reativa para barramento de geração e de carga são próximas, pois no sistema "IEEE 4 Node Test Feeder" existem somente impedâncias de pequena grandeza entre estes barramentos. Assim sendo, a metodologia proposta utilizando regulador de tensão se mostrou eficiente.

A fase C tem a maior discrepância no valor da margem de geração e carga, o que pode ser explicado por ser a maior carga do sistema.

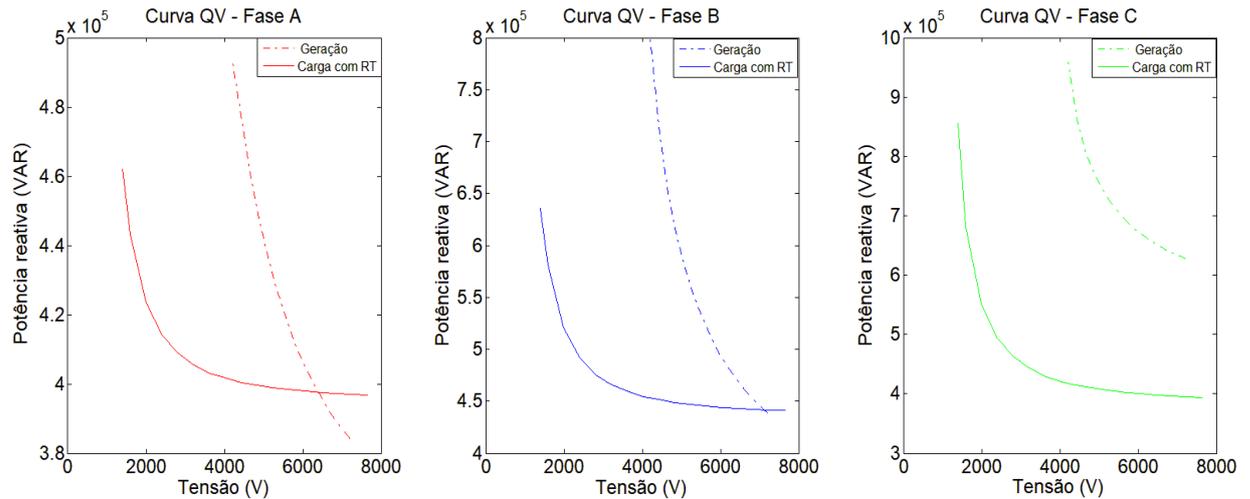


Figura 22 – Comparação das curvas QV.

(a) Fase A

(b) Fase B

(c) Fase C

Fonte: Autor.

Tanto a curva QV para barramento de geração, como a de carga, apresenta regiões de instabilidade, onde a potência reativa diminui com o aumento da tensão do barramento.

### 4.3. CURVA QV UTILIZANDO REGULADOR DE TENSÃO DO ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA REAL

As curvas QV obtidas por sucessivos fluxos de potência no sistema teste são apresentadas nas Figuras 23 (a), (b) e (c) e as respectivas margens de potência reativa na Tabela 8.

Tabela 8 – Margem de carga da curva QV para o sistema real.

<b>Margens de potência reativa</b>	
Fase A	$1334,587 \times 10^3 \text{ VAR}$
Fase B	$1247,198 \times 10^3 \text{ VAR}$
Fase C	$1380,812 \times 10^3 \text{ VAR}$

Fonte: Autor.

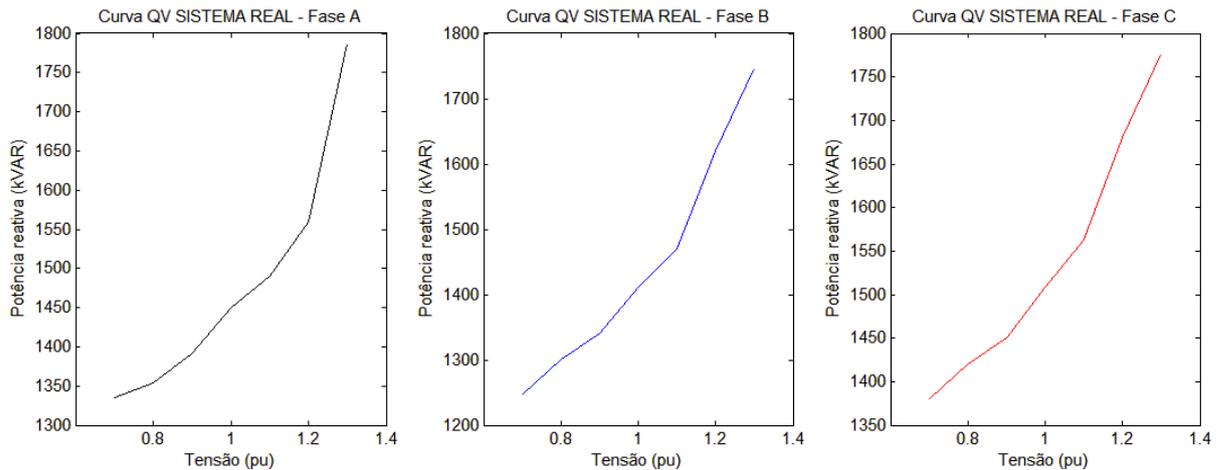


Figura 23 – Curva QV do alimentador real.

(a) Fase A

(b) Fase B

(c) Fase C

Fonte: Autor.

O carregamento das fases possui um desequilíbrio de apenas 3,85% e fatores de potência acima de 0,92, pelo fato do consumidor predominante do alimentador ser um cliente primário, trifásico, equilibrado e o alimentador possuir apenas mais dois consumidores secundários bifásicos no seu tronco. Essa característica ocasiona valores próximos para as margens de potência reativa de cada fase, sendo que a fase “A” e “C” apresentam uma margem de potência reativa um pouco maior, pelo fato de serem as fases que alimentam os consumidores secundários.

As três fases apresentam margem positiva, que é quando o ponto mínimo da curva se encontra acima do eixo das abscissas.

A curva QV apresenta regiões de estabilidade de tensão, onde a potência reativa aumenta com o aumento da tensão do barramento.

#### 4.4. IMPACTO DO NÍVEL DE CARREGAMENTO DO SISTEMA NA MARGEM DE POTÊNCIA REATIVA DA CURVA QV.

Os resultados da alteração da margem de potência reativa da curva QV para barramento de carga no sistema teste “IEEE 4 NODE TEST FEEDER” e no alimentador real serão mostrados nos itens 4.4.1 e 4.4.2 respectivamente.

#### 4.4.1. IMPACTO DO NÍVEL DE CARREGAMENTO NO SISTEMA “IEEE 4 NODE TEST FEEDER”

Para esse sistema foram realizados dois tipos de testes: com restrições limites operacionais do gerador e do cabo de alimentação; e sem restrições. As Figuras 24 (a), (b) e (c) ilustram a variação da curva QV com o nível de carregamento do sistema sem as restrições de limites operacionais e as Figuras 25 (a), (b) e (c) com restrições.

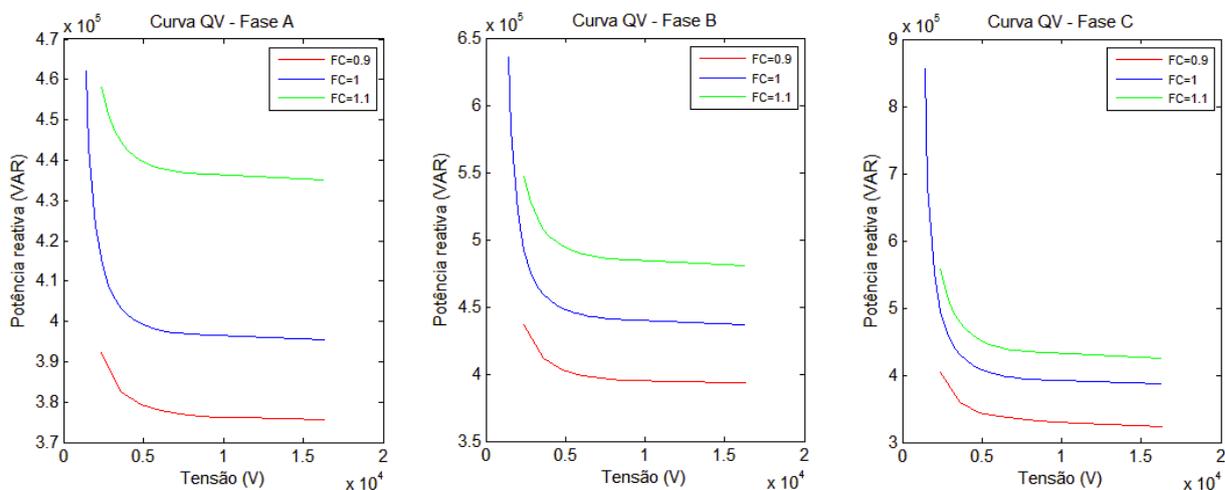


Figura 24 – Comparação das curvas QV com variação do nível de carregamento sem restrições operacionais.

(a) Fase A

(b) Fase B

(c) Fase C

Fonte: Autor.

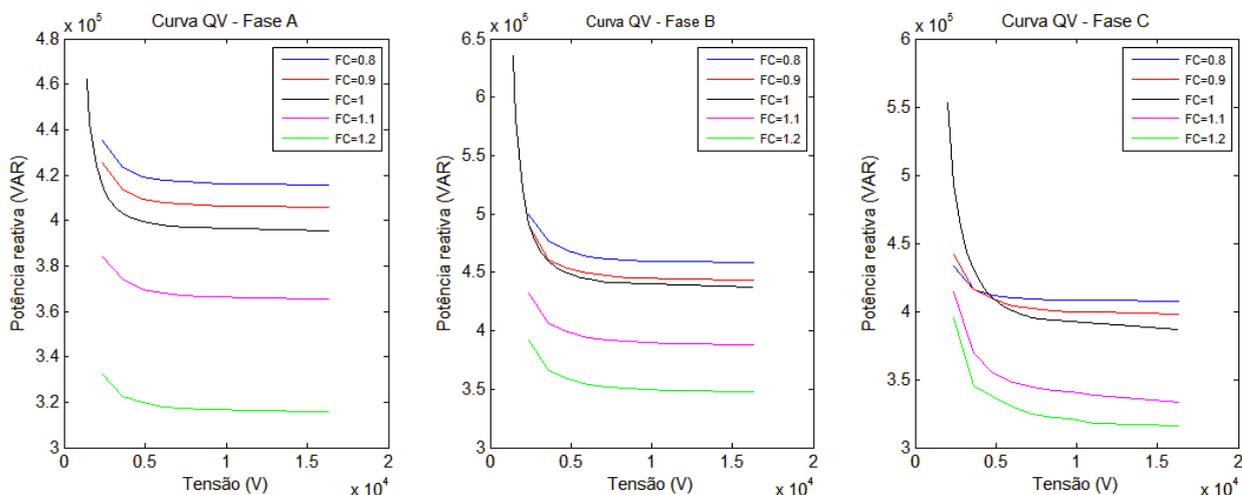


Figura 25 – Comparação das curvas QV com variação do nível de carregamento com restrições operacionais.

(a) Fase A

(b) Fase B

(c) Fase C

Fonte: Autor.

Como é possível notar nas Figuras 24 (a), (b) e (c) , quando não se programa as restrições operacionais do gerador e do cabo de alimentação, a margem aumenta com o incremento positivo de carga e diminui com a atenuação da carga, a razão disso é que toda potência reativa solicitada pela carga é atendida, mas em sistemas de distribuição reais existem as restrições operacionais dos equipamentos e condutores, dessa forma, o correto é considerar as restrições descritas no tópico 3.4.1.

Quando se considera as restrições operacionais, observa-se que, com o aumento do fator de carga, a margem de potência reativa mostrada na curva QV das Figuras 25 (a), (b) e (c) diminui. Isto é esperado, pois este aumento de carregamento faz com que os equipamentos e fontes do sistema fiquem mais próximos dos seus limites operativos. A Tabela 9 ilustra as margens de potência reativas para os diferentes níveis de carregamento testados, considerando as restrições.

Tabela 9 – Margens de potência reativas para os diferentes níveis de carregamento testados.

<b>Carregamento do sistema</b>	<b>Margem da Fase A</b>	<b>Margem da Fase B</b>	<b>Margem da Fase C</b>
FC=0,8	$418,673 \times 10^3 \text{ VAR}$	$460,258 \times 10^3 \text{ VAR}$	$407,659 \times 10^3 \text{ VAR}$
FC=0,9	$404,353 \times 10^3 \text{ VAR}$	$444,722 \times 10^3 \text{ VAR}$	$395,642 \times 10^3 \text{ VAR}$
FC=1	$395,145 \times 10^3 \text{ VAR}$	$436,060 \times 10^3 \text{ VAR}$	$384,401 \times 10^3 \text{ VAR}$
FC=1,1	$364,199 \times 10^3 \text{ VAR}$	$385,796 \times 10^3 \text{ VAR}$	$338,565 \times 10^3 \text{ VAR}$
FC=1,2	$314,938 \times 10^3 \text{ VAR}$	$351,235 \times 10^3 \text{ VAR}$	$315,685 \times 10^3 \text{ VAR}$

Fonte: Autor.

#### **4.4.2. IMPACTO DO NÍVEL DE CARREGAMENTO NO ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO REAL**

O alimentador de distribuição real já possui as restrições operativas dos seus equipamentos no seu banco de dados exportado para realizar a simulação no *software* PSS/ADEPT, dessa forma, somente foi testado o impacto do nível de carregamento do sistema na margem da curva QV com restrições operacionais.

Assim como no sistema teste anterior, ocorre uma diminuição das margens de potência reativa, com o aumento do fator de carga, como pode ser observado nas

Figuras 26 (a), (b) e (c), na Tabela 10 e nas Figuras 27 (a), (b) e (c). A justificativa para ocorrência de tal fato também é o aumento da proximidade dos limites operativos dos equipamentos do sistema com o aumento do nível de carregamento do sistema.

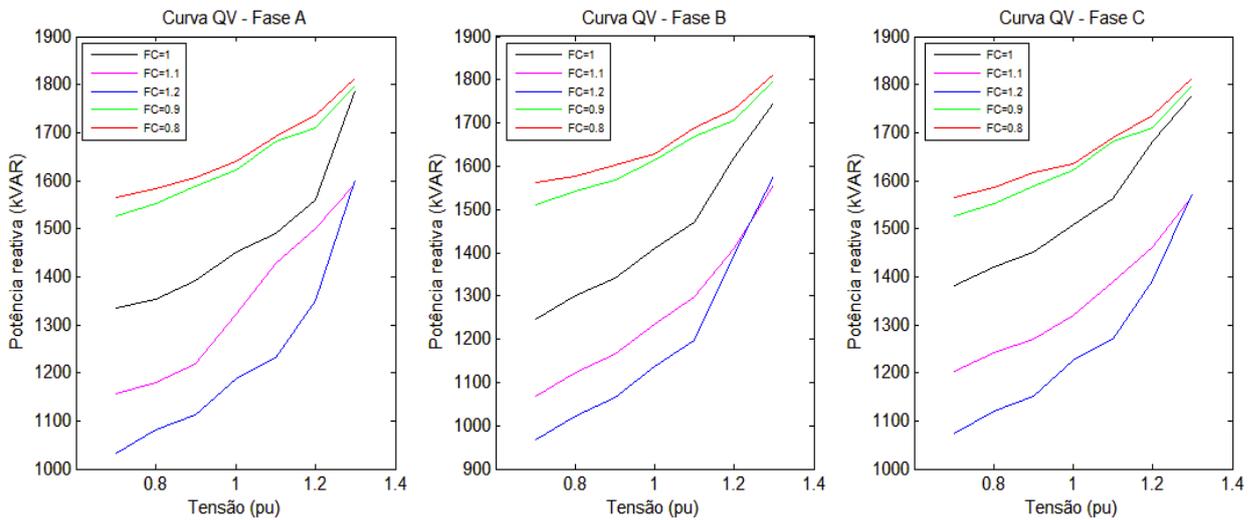


Figura 26 – Comparação das curvas QV com variação do nível de carregamento do alimentador real.

(a) Fase A

(b) Fase B

(c) Fase C

Fonte: Autor.

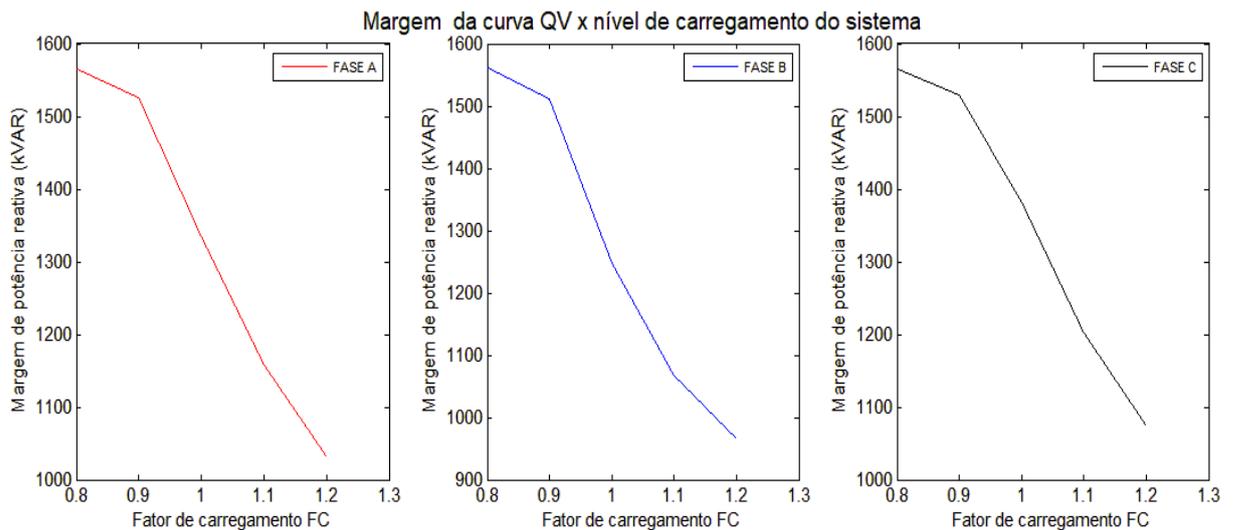


Figura 27 – Tendência de crescimento da margem de potência reativa com a variação do nível de carregamento.

(a) Fase A

(b) Fase B

(c) Fase C

Fonte: Autor.

Tabela 10 – Margens de potência reativas para os diferentes níveis de carregamento para o alimentador real.

Carregamento do sistema	Margem da Fase A	Margem da Fase B	Margem da Fase C
FC=0,8	$1565,408 \times 10^3 \text{ VAR}$	$1561,408 \times 10^3 \text{ VAR}$	$1565,408 \times 10^3 \text{ VAR}$
FC=0,9	$1526,408 \times 10^3 \text{ VAR}$	$1511,408 \times 10^3 \text{ VAR}$	$1529,408 \times 10^3 \text{ VAR}$
FC=1	$1334,587 \times 10^3 \text{ VAR}$	$1247,198 \times 10^3 \text{ VAR}$	$1380,812 \times 10^3 \text{ VAR}$
FC=1,1	$1157,408 \times 10^3 \text{ VAR}$	$1068,608 \times 10^3 \text{ VAR}$	$1201,812 \times 10^3 \text{ VAR}$
FC=1,2	$1031,408 \times 10^3 \text{ VAR}$	$966,10 \times 10^3 \text{ VAR}$	$1073,408 \times 10^3 \text{ VAR}$

Fonte: Autor.

A diminuição da margem de potência reativa ocorre quase na mesma proporção do aumento do nível de carregamento, ou seja, se o nível de carregamento foi aumentado em aproximadamente 20% por exemplo, a margem de potência reativa é diminuída em aproximadamente 20% em relação à margem com carregamento nominal.

#### 4.5. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ADEQUAÇÃO A NORMAS DA ANEEL DO FATOR DE POTÊNCIA E DO EQUILÍBRIO DE FASES NA MARGEM DE POTÊNCIA REATIVA.

As Figuras 28 (a), (b) e (c) mostram uma comparação entre as curvas QV do sistema teste "*IEEE 4 Node Test Feeder*" para diferentes níveis de carregamento e para o sistema operando com um equilíbrio de carga, fator de potência acima de 0,92 e carregamento nominal.

Como é possível notar, as curvas QV com as adequações as normas, estão entre as curvas com características nominais e com fator de carregamento de 0,9. Esse fato pode ser explicado porque um sistema com bom fator de potência (acima de 0,92) precisa de menos corrente elétrica para efetuar o mesmo trabalho do que na condição com um baixo fator de potência.

O equilíbrio da carga das fases evita a ocorrência de sobrecarga e perda de energia / ineficiência energética.

Quando é realizado o ajuste do fator de potência e equilíbrio da carga das fases ocorre um alívio no sistema. Tal fato evidencia a possibilidade de estudar em trabalhos futuros, a curva QV como índice para determinar situações onde devem existir correções de fator de potência.

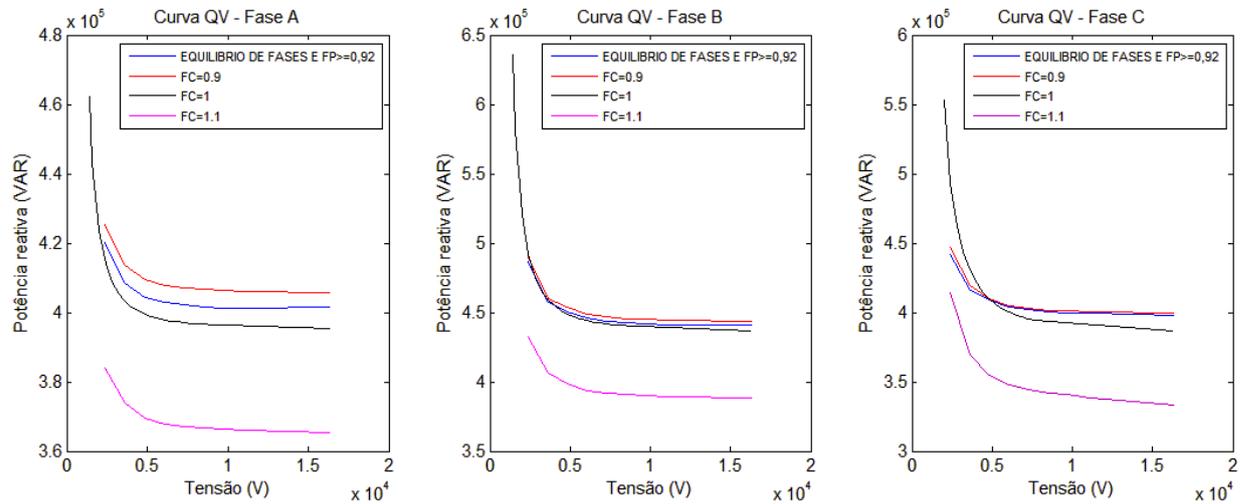


Figura 28 – Comparação das curvas QV com variação do nível de carregamento e adequação a norma.

(a) Fase A

(b) Fase B

(c) Fase C

Fonte: Autor.

## Capítulo 5- CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi verificado que é possível adaptar o conceito da curva QV amplamente usado em sistemas de transmissão de energia elétrica para o sistema de distribuição de energia elétrica.

A metodologia proposta de utilização de reguladores de tensão para cálculo da curva QV para barramento de carga se mostrou eficiente, pois a modificação que permite o controle local de tensão em um regulador manteve o sistema em repouso, o que é fundamental para traçar curvas QV.

Os resultados nos sistemas testes demonstraram que à medida que um sistema aumenta a sua carga, a sua margem de potência reativa da curva QV diminui. Pelo fato da instabilidade de tensão está relacionada com a potência fornecida do sistema, uma menor margem na curva QV poderia fornecer um indício de maior proximidade de instabilidade, pois os equipamentos do sistema estariam mais próximos dos limites operativos.

A adaptação às normas da ANEEL em relação ao fator de potência e equilíbrio de cargas se mostrou uma alternativa para realizar um alívio de carga no sistema, atenuando a ocorrência de sobrecarga e perda de energia / ineficiência energética, fatores esses que podem influenciar na estabilidade do sistema.

Os resultados fornecem uma alternativa de ferramenta a ser implementada para estudos de estabilidade de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica, sendo um tema relevante nas pesquisas acadêmicas atuais, devido à propagação da geração distribuída e energias alternativas.

### 5.1 TRABALHOS FUTUROS

A metodologia de cálculo de curva QV para barramento de carga utilizando reguladores de tensão pode ser analisada em sistemas maiores como os sistemas testes do *IEEE 37 BUS DELTA RADIAL DISTRIBUTION FEEDER*, *IEEE 123 BUS RADIAL DISTRIBUTION FEEDER* e outros alimentadores reais. Além disso, pode-se analisar o tipo de margem da curva QV (positiva ou negativa) em relação ao comportamento do SEP e a possibilidade de se utilizar a curva QV para indicar situações que exigem a correção do fator de potência.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST- Módulo 8**. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/modulo-8> > . Acesso em 03 julho 2018.

BURATTI, R. P. **Reguladores de tensão em redes elétricas com alta penetração de cargas não lineares**. 2016. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2016.

CARSON, J.R. ***Wave propagation in overhead wires with ground return***, Bell System Technical Journal, 5, 539, 1926.

FRANCISCO, G. S. **Avaliação de Ferramentas de Análise de Estabilidade de Tensão**. 2005. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.

GOMES, P. **Segurança Operativa dos Sistema Elétricos: Diagnóstico e perspectivas face à reestruturação do setor elétrico**. Tese (Doutorado) – Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 2001.

GUIMARÃES, P. *et al.* ***QV and PV curves as a planning tool of analysis***, 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), Weihai, Shandong, pp. 1601-1606, 2011.

KERSTING, W. H., ***Distribution System Modeling and Analysis***, CRC Press, Second Edition, New York, USA, 2002.

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

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

KUNDUR, P., MORISON, G. K., ***A Review of Definitions and Classification of Stability Problems in Today's Power Systems***. IEEE PES Meeting, New York, 1997.

LEÃO, R. **Distribuição de Energia Elétrica**. Fortaleza, 2013. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/130060/mod\\_resource/content/1/Subestacoes-texto.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/130060/mod_resource/content/1/Subestacoes-texto.pdf)>. Acesso em: 19 julho 2018.

LUGON, V. B. *et al.* **Curva QV E Índice HHI Para Análise de Colapso de Tensão e Monopólio de Potência Reativa**. Belém, 2009. Disponível em: <<http://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20090923140708-10.pdf>>. Acesso em: 02 maio. 2018.

MALANGE, F. C. V. **Proposta de parametrização para o fluxo de carga continuado visando redução de perdas na transmissão e o aumento da margem estática de estabilidade de tensão**. 2008, 139f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2008.

MANZONI, A. **Desenvolvimento de um Sistema Computacional Orientado a Objetos para Sistemas Elétricos de Potência: Aplicação a Simulação Rápida e Análise da Estabilidade de Tensão**. 2005. 165 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MARQUES, F. A. S. *et al.* **Impactos da expansão da geração distribuída nos sistemas de distribuição de energia elétrica**. Encontro de Energia no Meio Rural, 5., Campinas, 2004. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022004000200004&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000200004&lng=en&nrm=abn)>. Acesso em: 15 Out. 2018.

MARUJO, D. *et al.* **On Control Actions Effects by Using QV Curves**, in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 3, pp. 1298-1305, 2015.

MENEZES, V. P. **Linhas de transmissão de energia elétrica aspectos técnicos, orçamentários e construtivos**. 2015. 87 f. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica), - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

MOHN, F. W. *et al.* **Tracing PV and QV curves with the help of a CRIC continuation method**, in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 3, pp. 1115-1122, 2006.

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. *et al.* **Effects of QV curves in the dynamic behaviour of power systems**. IET Generation, Transmission&Distribution, v. 10, n. 12, p. 2861-2870, 2016.

Norma CEMIG ND-1.1, **Critérios Técnicos para o Planejamento Elétrico da Distribuição de Média Tensão**, Belo Horizonte, 2008.

ONS. **Relatório de análise da perturbação do dia 21/01/2002 às 13h34min envolvendo o sistema interligado nacional, NOS RE-3/045/2002**. 113 páginas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Fevereiro de 2001.

PADIYAR, K. R. **Power system dynamics: stability and control**. 2<sup>a</sup> ed. Hyderabad, India: BS Publications, 2008.

PINTO, S. S. **Comparação da Função Energia com Curvas P-V e Q-V na Análise de Estabilidade de Tensão**. 2013. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.

REIS, C. S. M. M. dos *et al.* **Determinação de índices de estabilidade de tensão**. 2005. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade do Porto, Porto, 2005.

SAUER, P. W., PAI, M. A. **“Power System Steady-State Stability and the LoadFlow Jacobian”**, *IEEE Transactions on Power Systems*, v.5, No.4, pp.1374-1383, Novembro, 1990.

SILVA, A. J. dos S. **Modelagem Matemática de um Sistema de Distribuição Primário de Energia Elétrica em Média Tensão do Município de Ijuí**. 2017. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Unijuí, 2017.

SILVA, G. F. *et al.* **Tratamento de Limites de Geração de Potência Reativa no Problema de Fluxo de Potência Utilizando Análise de Sensibilidade na Formulação de Critérios de Backoff**. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), Natal, 2016.

SILVEIRA, S. F. **Controle de tensão em sistemas elétricos de potência: Estudo de estratégias globais**. 1999. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 1999.

TREVINO, C., **Cases of difficult convergence in load-flow problems**, IEEE Paper n. 71-62-PWR, Presented at the IEEE Summer Power Meeting, Los Angeles, 1970.

WANG, S. C. *et al.* **Analysis of power system QV curve by fuzzy modeling, 2009 ICCAS-SICE**, Fukuoka, pp. 343-347, 2009.

ZAMBRONI, A. C. de S., **“Estabilidade de Tensão-Novas Ferramentas de Análise”**, Departamento de Eletrotécnica: Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, 1999.