

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

JOÃO VITOR DA SILVA

**ESTUDO DA ESTABILIDADE DE TENSÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO
COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2015

JOÃO VITOR DA SILVA

**ESTUDO DA ESTABILIDADE DE TENSÃO EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Elétrica – DAELE – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Vasques de Oliveira.

PATO BRANCO

2015

TERMO DE APROVAÇÃO

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado “**ESTUDO DA ESTABILIDADE DE TENSÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**”, do aluno **JOÃO VITOR DA SILVA** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **66** de 2015.

Fizeram parte da banca os professores:

Prof. Dr. Ricardo Vasques de Oliveira (Orientador)

Prof. Me. César Augusto Portolann

Prof. Me. Géremi Gilson Dranka

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que contribuíram, me incentivaram e sempre me apoiaram.

A minha namorada, pela paciência, compreensão e auxílio.

Ao professor orientador, por fornecer o tema e contribuir com a minha formação, tanto acadêmica como pessoal e também profissional.

RESUMO

SILVA, João Vitor. Estudo da Estabilidade de Tensão em Redes de Distribuição com Geração Distribuída. 2015. 89p. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2015.

A estabilidade de tensão tornou-se um assunto de grande importância para os sistemas de distribuição devido ao aumento significativo da demanda e da inserção de fontes de energia renováveis através da geração distribuída. Para o estudo da estabilidade de tensão a pequenas perturbações são utilizadas técnicas de análise estática, tais como as curvas P-V e Q-V, índices de estabilidade e índices de sensibilidade. O uso dessas ferramentas ajuda a prevenir a instabilidade de tensão e fornece informações importantes sobre a margem de estabilidade de tensão e a característica de regulação de tensão do sistema. Este trabalho apresenta e relaciona as ferramentas típicas utilizadas nos estudos de estabilidade de tensão, avaliando-se o efeito das características das redes de distribuição e da inserção da geração distribuída. Para a realização dos estudos são utilizados dois sistemas testes, um fictício de 5 barras e outro sistema de 33 barras tipicamente utilizado nos estudos de estabilidade de tensão. Nos testes realizados são avaliados os efeitos da relação R/X dos cabos e os efeitos dos diferentes níveis de inserção da geração distribuída com diferentes fatores de potência. Através destes estudos, pode-se concluir que estas ferramentas podem ser utilizadas para o planejamento e operação do sistema de distribuição, possibilitando a execução de medidas preventivas para evitar a instabilidade de tensão e a proposição de estratégias efetivas para o controle de tensão.

Palavras-chave: Estabilidade de tensão, Sistemas de distribuição, Curva P-V, Curva Q-V, Índice de estabilidade, Sensibilidade V-Q.

ABSTRACT

SILVA, João Vitor. Voltage Stability Study in Distribution Networks with Distributed Generation. 2015. 89p. Final Course Assignment / Monograph – Electrical Engineering Undergraduate Course, Federal Technological University of Parana. Pato Branco, 2015.

The voltage stability became a topic of great importance for distribution systems due to the increase of load demand and integration of renewable energy sources through distributed generation. Static analysis techniques, such as P-V and Q-V, stability index, and sensitivity index, are typically employed in voltage stability studies. The use of these tools helps to prevent voltage instability and provides important information about the voltage stability margin and about the voltage regulation characteristic of power systems. This work presents and correlates the typical tools employed in the voltage stability studies, evaluating the effect of the distribution network characteristics and the integration level of distributed generation. The studies were carried out based on two test systems, a fictitious system with 5 bus and a 33 bus system, typically employed in voltage stability studies. The carried out studies evaluates the effects of cable X/R ratio and the effects of different levels of integration of distributed generation with different power factors. Based on the carried out analyses, it can be concluded that these tools are useful for planning and operation of the distribution system, enabling the implementation of preventive measures to avoid voltage instability and proposition of effective strategies for voltage control.

Keywords: Voltage stability, Distribution systems, P-V curve, Q-V curve, Stability index, V-Q sensitivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura básica de um SEP.	15
Figura 2: Potência absorvida em função da tensão aplicada à carga.	19
Figura 3: Diagrama unifilar e diagrama fasorial para ilustrar a queda de tensão em um sistema de distribuição.	20
Figura 4: Curva P-V típica.	27
Figura 5: Diagrama unifilar de um sistema de 2 barras.	28
Figura 6: Curva P-V.	31
Figura 7: Curva P-V no caso em que ocorre a divergência do fluxo de potência.	32
Figura 8: Curva Q-V típica.	33
Figura 9: Diagrama unifilar de um sistema de 2 barras com o gerador fictício.	34
Figura 10: Diagrama unifilar de um sistema de 2 barras e seu circuito equivalente.	35
Figura 11: Curva Q-V.	36
Figura 12: Diagrama unifilar de um sistema equivalente de duas barras.	38
Figura 13: Curva P-V e índice VCI.	42
Figura 14: Diagrama unifilar de um sistema de distribuição convencional.	46
Figura 15: Diagrama unifilar de um sistema de distribuição com GD.	46
Figura 16: Diagrama unifilar de um sistema de distribuição para ilustrar a queda de tensão com a GD.	47
Figura 17: Diagrama unifilar do sistema teste 1.	50
Figura 18: Curvas P-V da barra 2 para diferentes tipos de cabos com seus respectivos limites térmicos.	52
Figura 19: Curvas P-V da barra 3 para diferentes tipos de cabos e seu respectivos limites impostos pela linha entre a barra 1 e a barra 2.	53
Figura 20: Curvas P-V das barras 4 e 5 para diferentes tipos de cabos.	54
Figura 21: Índice de estabilidade de tensão (VSI) para diferentes tipos de cabos.	55
Figura 22: Índice de estabilidade de tensão (VCI) para diferentes tipos de cabos.	57

Figura 23: Carregamento máximo da barra 5 determinado através do índice de estabilidade de tensão (VCI) para o cabo 336,4 MCM.....	58
Figura 24: Carregamento máximo do sistema através do índice de estabilidade de tensão (VCI) para o cabo 336,4 MCM.....	59
Figura 25: Curvas Q-V da barra 2 para diferentes tipos de cabos, considerando 50% de carregamento do sistema.....	60
Figura 26: Efeito da injeção de potência reativa na curva P-V da barra 2 com o cabo 4 AWG.....	61
Figura 27: Índice de sensibilidade V-Q para diferentes carregamentos e diferentes tipos de cabos.....	63
Figura 28: Curvas P-V da barra 5 após a inserção da GD na barra 5 com FP=1.	66
Figura 29: Índice de estabilidade de tensão (VSI) após a inserção da GD na barra 5 com FP=1.....	67
Figura 30: Índice de estabilidade de tensão (VSI) após a inserção da GD em diferentes barras.....	68
Figura 31: Curvas P-V da barra 5 após a inserção da GD na barra 5 com diferentes níveis de injeção de potência reativa.....	69
Figura 32: Curvas Q-V da barra 5 após inserção da GD na barra 5 com diferentes níveis de injeção de potência reativa.....	70
Figura 33: Índice de sensibilidade V-Q após a inserção da GD na barra 5 com diferentes níveis de injeção de potência reativa.....	71
Figura 34: Diagrama unifilar do sistema teste 2.....	72
Figura 35: Índice de estabilidade de tensão (VSI) após a inserção da GD em diferentes barras do sistema teste 2.....	73
Figura 36: Índice de sensibilidade V-Q das barras do sistema teste 2.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tensões padronizadas em SEPs.	15
Tabela 2: Especificações dos cabos CA tipicamente utilizados.	17
Tabela 3: Faixa de classificação de tensões em regime permanente para a rede de distribuição primária (1-69 kV).....	23
Tabela 4: Faixa de classificação de tensões em regime permanente para a rede de distribuição secundária (220/127 V).	23
Tabela 5: Carregamento máximo da barra mais fraca para diferentes tipos de cabos (VSI).	56
Tabela 6: Carregamento máximo do sistema reduzido para diferentes tipos de cabos (VSI).	56
Tabela 7: Carregamento máximo da barra mais fraca para diferentes tipos de cabos (VCI).	58
Tabela 8: Carregamento máximo do sistema reduzido para diferentes tipos de cabos (VCI).	59
Tabela 9: Injeção de potência reativa necessária para realizar a mesma variação de tensão em cada barra.	62
Tabela 10: Comparação dos resultados obtidos através das sensibilidades V-Q e curvas Q-V.	64
Tabela 11: Aumento do índice de estabilidade de tensão (VSI) em relação ao sistema sem GD para a inserção em diferentes barras.....	68
Tabela 12: Variação da sensibilidade V-Q após a inserção da GD na barra 5 com diferentes níveis de injeção de potência reativa.....	71
Tabela 13: Aumento do índice de estabilidade de tensão (VSI) em relação ao sistema sem GD para a inserção em diferentes barras.....	74
Tabela 14: Carregamento máximo da barra mais fraca para diferentes condições de carregamento do sistema (VSI).	75
Tabela 15: Carregamento máximo do sistema para diferentes condições de carregamento do sistema (VSI).	75

Tabela 16: Variação da sensibilidade V-Q após a inserção da GD em diferentes barras.

76

Tabela 17: Dados de barra do sistema teste 1.....84

Tabela 18: Dados de linha do sistema teste 1.....84

Tabela 19: Dados de barra do sistema teste 2.....85

Tabela 20: Dados de linha do sistema teste 2.....86

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	13
2. REDES DE DISTRIBUIÇÃO	14
2.1 INTRODUÇÃO	14
2.2 FUNDAMENTOS DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO.....	14
2.2.1 Redes de Distribuição Primária	15
2.2.2 Redes de Distribuição Secundária	16
2.2.3 Cabos	16
2.2.4 Cargas.....	18
2.3 QUEDA DE TENSÃO	20
2.4 REGULAÇÃO DE TENSÃO	21
2.5 QUALIDADE DE ENERGIA.....	22
3. ESTABILIDADE DE TENSÃO	24
3.1 INTRODUÇÃO	24
3.2 CONCEITOS BÁSICOS E DEFINIÇÕES	24
3.3 CARACTERIZAÇÃO	25
3.4 MÉTODOS DE ANÁLISE	26
3.4.1 Curvas P-V	27
3.4.2 Curvas Q-V.....	32
3.4.3 Índices de Estabilidade de Tensão para Redes de Distribuição.....	37
3.4.3.1 <i>Voltage Stability Index</i>	38
3.4.3.2 <i>Voltage Collapse Index</i>	40
3.4.4 Análise da Sensibilidade V-Q	42
4. IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA ESTABILIDADE DE TENSÃO	45

4.1 INTRODUÇÃO	45
4.2 CARACTERÍSTICAS.....	45
4.3 IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA QUEDA DE TENSÃO	47
4.4 CAPACIDADE MÁXIMA DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	48
5. TESTES E RESULTADOS.....	50
5.1 INTRODUÇÃO	50
5.2 SISTEMA TESTE 1	50
5.2.1 Curvas P-V	51
5.2.2 Índices de Estabilidade de Tensão para Redes de Distribuição.....	54
5.2.3 Curvas Q-V.....	60
5.2.4 Análise da Sensibilidade V-Q	62
5.2.5 Impactos da Geração Distribuída na Estabilidade de Tensão.....	65
5.3 SISTEMA TESTE 2	72
5.3.1 Índices de Estabilidade de Tensão para Redes de Distribuição.....	73
5.3.2 Análise da Sensibilidade V-Q	75
6. CONCLUSÕES	78
REFERÊNCIAS	80
APÊNDICE A – Especificações do Sistema Teste 1	84
APÊNDICE B – Especificações do Sistema Teste 2	85

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, percebe-se um aumento no interesse da produção de energia elétrica através de fontes renováveis (HEMDAN; KURRAT, 2008) e conseqüentemente o aumento da conexão da Geração Distribuída (GD) nas redes de distribuição. A GD é classificada como qualquer tipo de geração de energia elétrica conectada diretamente às redes de distribuição localizada próximo ao consumidor (ACKERMANN; ANDERSSON; SODER, 2000), a qual pode ser utilizada para suprir a demanda local ou também para auxiliar no fornecimento de energia elétrica ao resto do Sistema Elétrico de Potência (SEP) (GUEDES, 2006). Com a presença da GD, o comportamento dos sistemas de distribuição e algumas de suas características são afetadas, tais como o fluxo de potência, o perfil e a estabilidade de tensão (ALONSO; AMARIS, 2009).

Para a compreensão dos estudos e análises apresentados neste trabalho é necessário apresentar alguns conceitos e definições referentes à estabilidade de tensão. A estabilidade de tensão refere-se a capacidade do sistema de manter a magnitude de tensão de todas as barras em níveis aceitáveis após ser submetido a uma perturbação. A instabilidade de tensão é caracterizada por um aumento ou uma redução contínua da magnitude de tensão em algumas barras do sistema após o mesmo ser submetido a uma perturbação e o colapso de tensão é a consequência dos eventos resultantes da instabilidade de tensão, o qual pode causar um blecaute ou apresentar níveis de tensões muito baixos em uma parte ou em todo o sistema (KUNDUR, *et al.*, 2004).

A estabilidade de tensão tornou-se um assunto de grande importância para os sistemas de distribuição devido ao aumento significativo da demanda, a transferência de potências elevadas, as restrições econômicas e ambientais e a inserção de fontes de energia renováveis através da GD (ABDEL-AKHER, 2013). Os problemas de estabilidade de tensão de um sistema elétrico de potência estão geralmente relacionados com a capacidade máxima de transmissão e operação deste sistema (PILLCO, 2011), mais especificamente com linhas sobrecarregadas, grandes quedas de tensão e a incapacidade do sistema em atender a demanda de potência reativa (KUNDUR, 1994).

Nos sistemas de distribuição, as redes são tipicamente radiais e possuem uma elevada relação R/X, quando comparada às redes de transmissão, tendo como consequência grandes perdas e quedas de tensão (RAJA; SELVAN; KUMARESAN, 2013). Os cabos utilizados nas redes de distribuição apresentam uma determinada corrente admissível, a qual está relacionada com a temperatura que o cabo atingirá devido a circulação da corrente elétrica (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010). Um aumento no carregamento poderá exceder o limite térmico de operação e danificar estes cabos, ou ainda, se a rede estiver operando próximo de seu limite de estabilidade, levará o sistema ao colapso de tensão (AUGUGLIARO; DUSONCHET; MANGIONE, 2007).

Para a realização do estudo da estabilidade de tensão a pequenas perturbações, que correspondem a variações lentas e graduais no sistema, a análise estática é usualmente utilizada (PILLCO, 2011). Geralmente, as técnicas de análise estática são utilizadas para calcular a margem de estabilidade de tensão e obter informações do comportamento do sistema em regime permanente para um determinado ponto de operação (KUNDUR, *et al.*, 2004).

As curvas P-V e Q-V, consideradas como técnicas de análise estática, têm sido amplamente utilizadas nos estudos de operação e planejamento de sistemas elétricos, pois fornecem informações relacionadas à estabilidade (REIS, 2005; TAYLOR, 1994) e à regulação de tensão. Os índices de estabilidade de tensão para redes de distribuição têm sido utilizados para realizar estimativas da proximidade do sistema à instabilidade de tensão com o objetivo de evitar a ocorrência de um colapso de tensão e permitir a execução de medidas preventivas (REIS, 2005). Os índices de sensibilidade fornecem informações sobre a estabilidade do sistema e o comportamento da tensão de determinada barra devido à variação das potências ativa e reativa. Estes índices são caracterizados por requererem esforços computacionais reduzidos quando comparados à utilização das curvas P-V e Q-V (RAJA; SELVAN; KUMARESAN, 2013).

A função básica da regulação de tensão nos sistemas de distribuição é manter a tensão em regime permanente em níveis aceitáveis. As tensões desejadas podem ser obtidas controlando diretamente a tensão ou controlando o fluxo de potência reativa na rede (VIAWAN, 2008).

O fornecimento de energia elétrica aos consumidores deve ser realizado de modo que o nível e a forma de onda de tensão estejam de acordo com os

parâmetros estabelecidos pelos agentes reguladores. Portanto, a concessionária é responsável pela utilização de recursos e técnicas para realizar o acompanhamento e prever o funcionamento do sistema para determinadas condições de operação através de estudos de estabilidade de tensão, prevenindo a ocorrência de colapsos de tensão e outros problemas relacionados à tensão.

1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Neste contexto, o objetivo desse trabalho é realizar um estudo referente à estabilidade de tensão em redes de distribuição com geração distribuída, onde serão apresentadas e relacionadas as ferramentas típicas utilizadas, avaliando-se o efeito das características das redes de distribuição e da inserção da geração distribuída. O objetivo geral desse trabalho pode ser dividido nos seguintes objetivos específicos:

- Realizar um estudo do estado da arte das ferramentas típicas usadas no estudo de estabilidade de tensão em redes de distribuição com geração distribuída;
- Apresentar os principais índices de estabilidade e sensibilidade de tensão típicos para redes de distribuição;
- Avaliar o impacto da característica R/X no comportamento da tensão da rede de distribuição;
- Avaliar os limites de injeção de potência reativa na rede de distribuição;
- Avaliar o impacto da geração distribuída na estabilidade de tensão do sistema de distribuição;
- Realizar um estudo de estabilidade de tensão em uma rede de distribuição tipicamente utilizada em estudos de sistemas de distribuição (*benchmark system*).

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O texto está organizado de modo a facilitar e apresentar os conceitos necessários para o entendimento do estudo realizado. Na sequência estão descritos os capítulos que compõe o texto:

- **Capítulo 2:** São apresentadas as características básicas de um sistema de distribuição.
- **Capítulo 3:** É apresentada a definição de conceitos relacionados à estabilidade de tensão. Em seguida, são apresentadas as ferramentas típicas utilizadas nos estudos de estabilidade de tensão.
- **Capítulo 4:** É apresentada uma breve definição e conceitos sobre a GD. Em seguida, são apresentados os impactos da geração distribuída nos níveis de tensão das redes de distribuição.
- **Capítulo 5:** São apresentados os resultados obtidos através das ferramentas típicas utilizadas para os estudos da estabilidade de tensão em redes de distribuição.
- **Capítulo 6:** São discutidas as principais conclusões obtidas a partir dos resultados dos sistemas testes utilizados neste trabalho.

2. REDES DE DISTRIBUIÇÃO

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentada uma breve fundamentação sobre as características operacionais e construtivas dos sistemas de distribuição. Será abordado o problema de queda de tensão nas redes de distribuição e serão apontados quais dispositivos podem ser utilizados para realizar a manutenção dos níveis de tensão e assim, melhorar a qualidade da energia entregue aos consumidores e atender aos parâmetros estabelecidos pelos agentes reguladores.

2.2 FUNDAMENTOS DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

A distribuição de energia elétrica para os consumidores é realizada através de um extenso e complexo Sistema Elétrico de Potência (SEP), o qual é dividido em subsistemas, conforme apresentado na Figura 1. O sistema de distribuição inicia após a subestação de distribuição que é alimentada por uma ou mais linhas de subtransmissão. Em alguns casos a subestação de distribuição é alimentada diretamente por uma linha de transmissão, não possuindo o sistema de subtransmissão. Cada subestação de distribuição alimentará uma ou mais redes de distribuição primária (KERSTING, 2002).

Na subestação de distribuição, o transformador da subestação é responsável por reduzir o nível de tensão do sistema de subtransmissão classificado como circuito de Alta Tensão (AT) para uma ou mais redes de distribuição primária classificadas como circuito de Média Tensão (MT). Próximo dos consumidores, há um transformador de distribuição que reduz a tensão da rede primária para a tensão da rede secundária classificadas como circuito de Baixa Tensão (BT), a qual é utilizada para fornecer energia elétrica aos consumidores (SHORT, 2004). Na Tabela 1 estão apresentadas as tensões padronizadas de cada subsistema do SEP.

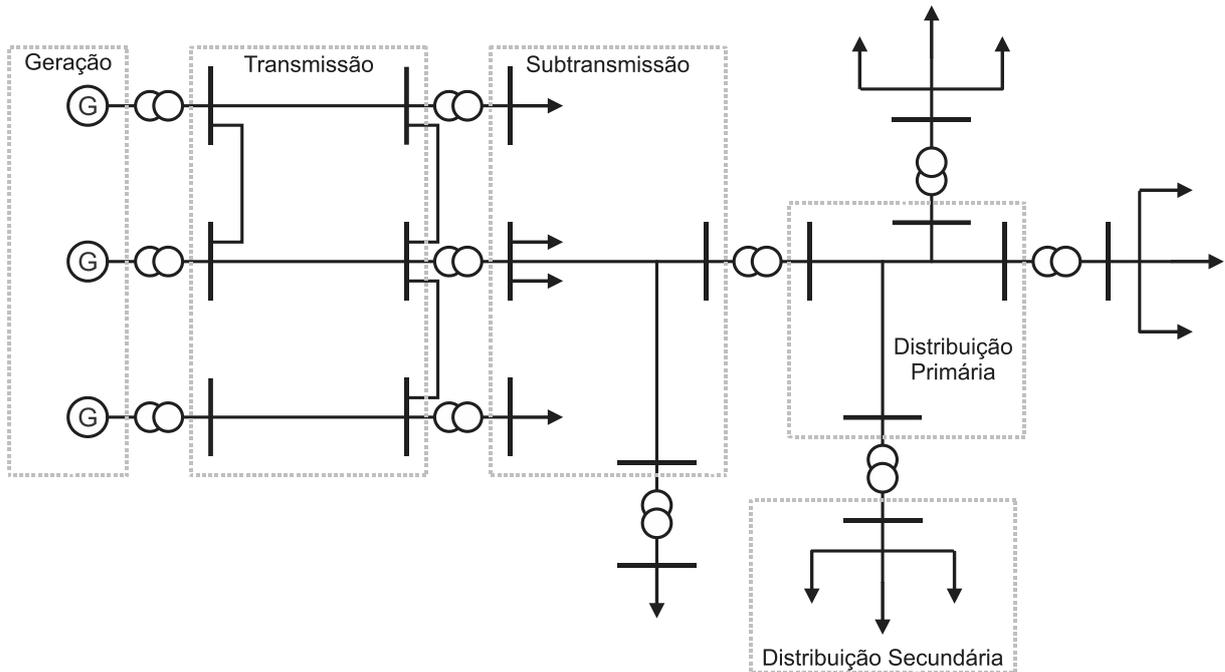


Figura 1: Estrutura básica de um SEP.

Fonte: Adaptado de Kagan, Oliveira e Robba (2010, p. 3).

Tabela 1: Tensões padronizadas em SEPs.

Tensão [kV]	Campo de aplicação
0,220/0,127	Distribuição secundária (BT)
0,380/0,220	
13,8	Distribuição primária (MT)
34,5	
34,5	Subtransmissão (AT)
69,0	
138,0	Transmissão
138,0	
230,0	
345,0	
500,0	

Fonte: Adaptado de Kagan, Oliveira e Robba (2010, p. 4).

2.2.1 Redes de Distribuição Primária

As redes de distribuição primária são responsáveis por fornecer energia elétrica aos consumidores primários, tais como indústrias de médio porte e conjuntos comerciais, e também aos transformadores de distribuição que suprem a rede secundária (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

Estas redes podem ser aéreas ou subterrâneas, sendo as redes aéreas as mais utilizadas, pois apresentam custo reduzido tanto para manutenção como para a instalação. As redes subterrâneas possuem custo elevado e são utilizadas em casos

onde há maior densidade de carga ou restrições paisagísticas (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

As redes de distribuição primária podem ser instaladas com diferentes configurações, as quais apresentam diferentes graus de confiabilidade. As configurações encontradas com maior frequência são a radial e anel em aberto (LEÃO, 2009). As redes radiais são tipicamente utilizadas em redes aéreas de distribuição primária, onde a rede que deriva da subestação atende a um ou mais transformadores de distribuição, e o fluxo de potência apresenta uma única direção da subestação para o consumidor (COPEL, 1999).

2.2.2 Redes de Distribuição Secundária

As redes de distribuição secundária derivam do transformador de distribuição que supre os consumidores de baixa tensão, tais como residências, pequenos comércios e indústrias (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

Assim como nas redes aéreas de distribuição primária, as redes aéreas de distribuição secundária também são tipicamente radiais. Em geral, a partir de um único transformador de distribuição, um ou mais consumidores são atendidos pela rede secundária radial.

Cada subsistema do SEP apresenta um determinado grau de confiabilidade em função da quantidade de potência transportada. Assim, devido a configuração do SEP, a rede de subtransmissão é responsável pela transferência de potência da ordem de centena de MVA, enquanto que a rede de distribuição secundária é da ordem de dezenas de kVA. Portanto, a rede secundária usualmente não conta com recursos para mitigar falhas (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

2.2.3 Cabos

Os cabos utilizados nas redes de distribuição de energia elétrica podem ser de alumínio ou cobre, e de acordo com as características da rede, podem ser nus, protegidos ou isolados. Os protegidos contam com uma capa isolante, a qual protege

a rede contra contatos acidentais, porém não garante a isolação da mesma (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

Os cabos de alumínio nus podem ser classificados como Cabo de Alumínio, CA ou Cabo de Alumínio com alma de Aço, CAA, e os cabos de alumínio protegidos como CA. Os cabos CA não contam com nenhum reforço mecânico, enquanto que os CAA contam com alma de aço que é responsável por fornecer o reforço mecânico (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

Nas redes de distribuição primária, os cabos CA são tipicamente utilizados na área urbana devido a limitação do tamanho do vão entre os postes. Para as redes rurais são utilizados os cabos CA ou CAA, isto vai depender da característica da área onde a rede está instalada. Já para as redes de distribuição secundária, utilizam-se os cabos CA protegidos ou nus (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

Cada cabo possui uma determinada corrente admissível, a qual está relacionada com o efeito Joule, ou seja, com a temperatura que o cabo atingirá devido a circulação da corrente elétrica. Tem-se a corrente admissível em regime permanente, a qual corresponde a uma elevação na temperatura em que o cabo não será danificado, e a corrente admissível para regime em curta duração, a qual corresponde a uma elevação na temperatura por um curto período de tempo em que o cabo não será danificado (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010). Na Tabela 2 estão apresentadas as especificações dos cabos CA tipicamente utilizados e suas respectivas correntes admissíveis em regime permanente.

Tabela 2: Especificações dos cabos CA tipicamente utilizados.

Escala AWG/ MCM	Seção Nominal [mm²]	Resistência Elétrica (R) [Ω/km] 50°C	Reatância Indutiva (X) [Ω/km] para D_{eq}=1090	Relação R/X	Capacidade de Condução de Corrente [A]	Carregamento [MVA] 13,8KV
4	21,15	1,521	0,470	3,236	114	2,72
2	33,54	0,956	0,453	2,110	152	3,63
1/0	53,51	0,601	0,435	1,382	203	4,85
4/0	107,41	0,300	0,409	0,733	314	7,51
336,4	170,50	0,190	0,380	0,500	419	10,02

Fonte: Adaptado de CELG (1996, p. 70) e COPEL (2013, p. 1).

2.2.4 Cargas

As cargas conectadas às redes de distribuição podem ser classificadas de acordo com a sua localização geográfica, a finalidade da utilização, a dependência da energia elétrica, as perturbações causadas, a tarifação e a tensão de suprimento (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

Para a análise do sistema devido à presença destas cargas existem diferentes modelos para representá-las. Geralmente os modelos de cargas são classificados em duas categorias, modelos estáticos e modelos dinâmicos. Nos modelos estáticos, as potências ativa e reativa da carga são expressas como funções algébricas da magnitude de tensão e da frequência em qualquer instante de tempo (SOUZA, 1996). A potência absorvida por uma carga pode variar de acordo com a sua natureza, por exemplo, devido a variação da tensão que a supre, as potências ativa e reativa absorvidas pela carga podem sofrer alterações. A seguir serão apresentados os principais modelos estáticos de cargas utilizados (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

Carga de potência constante: a potência aparente da carga (S_C), pode ser expressa através da soma das potências ativa (P_C) e reativa (Q_C) da carga, as quais, para este tipo de carga são constantes independentemente do valor de tensão, conforme apresentado na equação (2.1), nesse tipo de carga a corrente (I_C) é alterada com a variação do valor de tensão (V_C), conforme apresentado na equação (2.2).

$$S_C = P_C + jQ_C, \quad (2.1)$$

$$I_C = \frac{S_C^*}{V_C^*}. \quad (2.2)$$

Carga de corrente constante com a tensão: a corrente deste tipo de carga não sofre alteração devido a variação do valor de tensão, conforme apresentado na equação (2.3), entretanto, a potência é alterada com a variação do valor de tensão, conforme apresentado na equação (2.4).

$$I_C = I_C \angle \theta, \quad (2.3)$$

$$S_C = V_C I_C^* \quad (2.4)$$

Carga de impedância constante com a tensão: a impedância deste tipo de carga (Z_C) se mantém constante independentemente do valor de tensão, conforme apresentado na equação (2.5), enquanto que a potência é alterada com a variação do valor de tensão, conforme apresentado na equação (2.6).

$$Z_C = R_C + jX_C \quad (2.5)$$

$$S_C = \frac{V_C^2}{Z_C^*} \quad (2.6)$$

Carga do tipo ZIP (Z constante, I constante e P constante): a carga é composta pela combinação dos três modelos apresentados. Cada modelo possui uma porcentagem do valor total da carga, a soma da porcentagem destes modelos equivale à carga total.

Na Figura 2 é possível visualizar a variação da potência absorvida pela carga devido a variação de tensão para os modelos de potência, corrente e impedância constantes com a tensão.

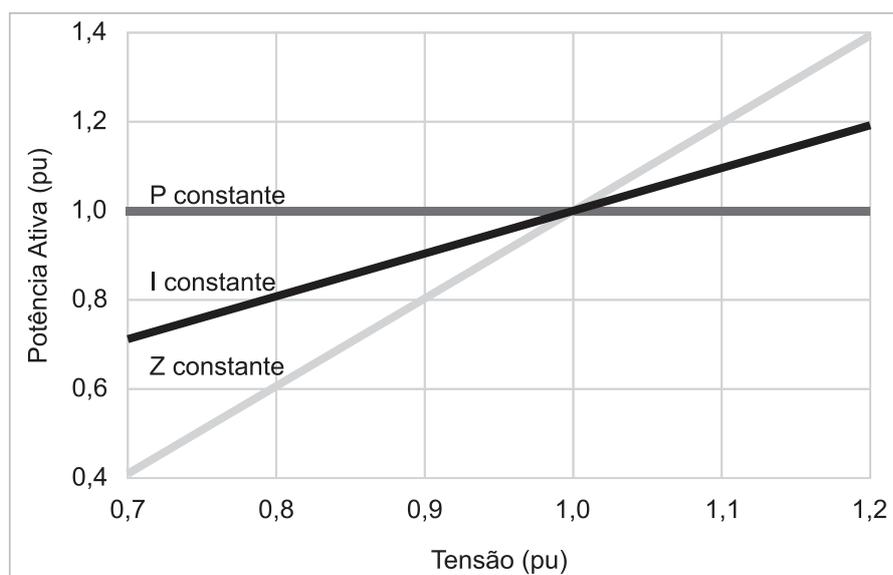


Figura 2: Potência absorvida em função da tensão aplicada à carga.
 Fonte: Adaptado de Kagan, Oliveira e Robba (2010, p. 160).

2.3 QUEDA DE TENSÃO

A queda de tensão típica em uma rede de distribuição trifásica equilibrada pode ser obtida através da análise do diagrama unifilar apresentado na Figura 3.

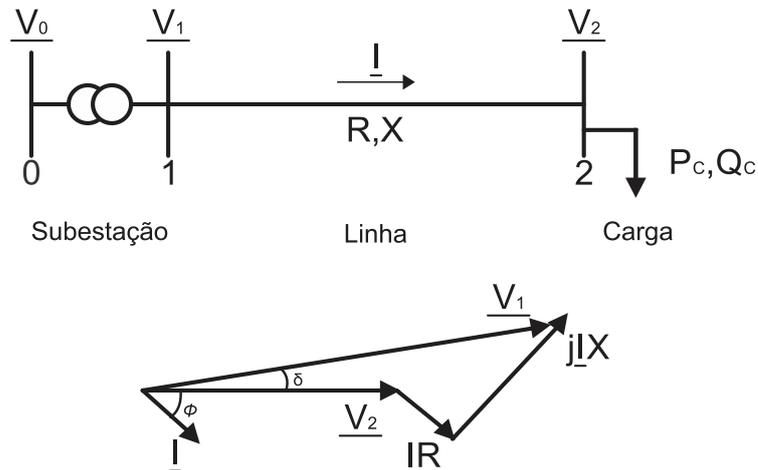


Figura 3: Diagrama unifilar e diagrama fasorial para ilustrar a queda de tensão em um sistema de distribuição.

Fonte: Adaptado de Viawan (2008, p. 19).

Na Figura 3, \underline{V}_1 é a tensão fasorial da barra 1; \underline{I} é a corrente fasorial que percorre a linha; R é a resistência da linha; X é a reatância da linha; \underline{V}_2 é a tensão fasorial da barra 2; P_c é a potência ativa da barra 2; Q_c é a potência reativa da barra 2.

No diagrama fasorial da Figura 3, o fasor da queda de tensão na resistência da linha ($\underline{I}R$) está em fase com o fasor da corrente (\underline{I}), e o fasor da queda de tensão na reatância da linha (\underline{jIX}) está 90° adiantado em relação ao fasor da corrente. A queda de tensão na linha pode ser expressa como o módulo da diferença entre as tensões na barra 1 e 2 da seguinte forma (KERSTING, 2002):

$$\Delta V = \left| \underline{V}_1 - \underline{V}_2 \right| = \left| \underline{I}(R + jX) \right|. \quad (2.7)$$

A corrente que percorre a linha é igual a corrente da carga, e pode ser escrita da seguinte forma:

$$\underline{I} = \frac{\underline{S}_c^*}{\underline{V}_2^*} = \frac{P_c - jQ_c}{\underline{V}_2^*}. \quad (2.8)$$

Substituindo a equação (2.8) na equação (2.7), obtém-se:

$$|\underline{V}_1 - \underline{V}_2| = \left| \frac{(RP_C + XQ_C) - j(XP_C - RQ_C)}{\underline{V}_2} \right|. \quad (2.9)$$

Para o fluxo de potência típico de redes de distribuição, o ângulo δ entre as tensões \underline{V}_1 e \underline{V}_2 é muito pequeno, portanto, a queda de tensão ΔV é aproximadamente igual a parte real da equação (2.9), conforme descrito em (2.10).

$$\Delta V \approx \frac{RP_C + XQ_C}{V_2}. \quad (2.10)$$

A queda de tensão é maior para sistemas de distribuição com tensões reduzidas, baixo fator de potência, circuitos monofásicos e circuitos desbalanceados. O aumento no fator de potência, o aumento da bitola dos cabos, o balanceamento dos circuitos, a redução do fluxo de potência e a redução no comprimento dos cabos resultam na redução da queda de tensão (SHORT, 2004).

2.4 REGULAÇÃO DE TENSÃO

A função básica da regulação de tensão nos sistemas de distribuição é manter a tensão em regime permanente em níveis aceitáveis. As tensões desejadas podem ser obtidas controlando diretamente a tensão ou controlando o fluxo de potência reativa na rede. Os dispositivos normalmente utilizados para controlar a tensão são os transformadores *On-Load Tap-Changer* (OLTC), capacitores *shunts* chaveados e reguladores de tensão série com comutação de *taps* (VIAWAN, 2008).

Um transformador OLTC é um transformador com ajuste automático de *taps*. O OLTC geralmente está localizado nas subestações de alta ou média tensão e a comutação de *taps* pode ser realizada com o transformador energizado. A comutação de *taps* resulta na variação entre o número de enrolamentos do primário e do secundário do transformador, fornecendo um pequeno ajuste na magnitude de tensão, usualmente numa faixa de $\pm 10\%$ (USIDA, 2007). O capacitor *shunt* fornece

potência reativa para compensar a demanda de potência reativa da rede e elevar os níveis de tensão. Os capacitores *shunts* podem ser instalados na subestação ou ao longo da rede de distribuição. O regulador de tensão série com comutação de *taps* é geralmente um autotransformador com ajuste automático de *taps*, o qual é geralmente instalado em redes extensas onde a regulação de tensão via o OLTC ou capacitores *shunts* não é suficiente (VIAWAN, 2008).

Para o controle de tensão e de potência reativa, muitas concessionárias operam os dispositivos localmente utilizando controladores padrões para manter a tensão em níveis aceitáveis e também para minimizar as perdas da rede (VIAWAN, 2008).

2.5 QUALIDADE DE ENERGIA

O fornecimento de energia elétrica aos consumidores deve obedecer a dois conceitos básicos, qualidade de serviço e qualidade do produto (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010). A qualidade de serviço refere-se a continuidade de fornecimento de energia elétrica, a qual está relacionada com as interrupções no sistema provocadas por falhas e por atividades de manutenção programada (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010). Há vários indicadores relacionados à continuidade, porém estes não serão tratados neste trabalho.

A qualidade do produto refere-se basicamente ao nível e a forma de onda de tensão, a qual está relacionada com os parâmetros e valores de referência em regime permanente ou transitório e às perturbações na forma de onda de tensão. Os aspectos considerados são a tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variações de tensão de curta duração e variação de frequência (ANEEL, 2015). Para este trabalho, será realizado a análise do nível de tensão em regime permanente.

Em todo o sistema de distribuição, o nível de tensão em regime permanente deve atender aos limites estabelecidos por normas técnicas regulamentadoras. Para a rede de distribuição primária, os limites e suas classificações estão apresentados na Tabela 3, e para a rede de distribuição secundária, estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 3: Faixa de classificação de tensões em regime permanente para a rede de distribuição primária (1-69 kV).

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação de Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

Fonte: Adaptado de ANEEL (2015, p. 33).

Tabela 4: Faixa de classificação de tensões em regime permanente para a rede de distribuição secundária (220/127 V).

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação de Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231) / (117 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(191 \leq TL < 202$ ou $231 < TL \leq 233) /$ $(110 \leq TL < 117$ ou $133 < TL \leq 135)$
Crítica	$(TL < 191$ ou $TL > 233) / (TL < 110$ ou $TL > 135)$

Fonte: Adaptado de ANEEL (2015, p. 33).

A concessionária é responsável pela utilização de recursos e técnicas para realizar o acompanhamento, em todo o sistema de distribuição, dos níveis de tensão em regime permanente. E quando necessário, utilizar os dispositivos de regulação de tensão para que os níveis de tensão se mantenham dentro dos padrões adequados (ANEEL, 2015).

3. ESTABILIDADE DE TENSÃO

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos, definições e delimitações necessárias para a compreensão de problemas relacionados à estabilidade de tensão, que é o foco desse trabalho. Aborda-se também nesse capítulo os principais fatores que impactam na estabilidade de tensão e as ferramentas típicas utilizadas nos estudos para a realização da análise e da prevenção destes problemas.

3.2 CONCEITOS BÁSICOS E DEFINIÇÕES

As definições apresentadas a seguir possuem como referência a publicação “*Definition and Classification of Power System Stability*” realizada por “IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions” (KUNDUR, *et al.*, 2004).

- A estabilidade de tensão refere-se a capacidade do sistema manter a magnitude de tensão de todas as barras em níveis aceitáveis após ser submetido a uma perturbação.
- A instabilidade de tensão é caracterizada por apresentar o aumento ou a redução contínua da magnitude de tensão em algumas barras do sistema após o mesmo ser submetido a uma perturbação.
- O colapso de tensão é a consequência dos eventos resultantes da instabilidade de tensão, o qual pode causar um blecaute ou apresentar níveis de tensões muito baixos em uma parte ou em todo o sistema.

A estabilidade de tensão pode ser classificada em duas subcategorias:

- Estabilidade de tensão a grandes perturbações: refere-se a capacidade do sistema em manter a magnitude de tensão em níveis aceitáveis após a ocorrência de grandes perturbações, tais como a

perda de geradores ou contingências nas linhas. Para a avaliação do sistema diante destas perturbações são necessárias realizar simulações dinâmicas não-lineares.

- Estabilidade de tensão a pequenas perturbações: refere-se a capacidade do sistema em manter a magnitude de tensão em níveis aceitáveis após a ocorrência de pequenas perturbações, tais como o acréscimo de carga de pequena magnitude. Para estas condições, em um determinado ponto de operação, as equações do sistema podem ser linearizadas permitindo a obtenção de informações de fatores que afetam a estabilidade de tensão.

Destas subcategorias citadas, neste trabalho será abordada apenas uma, a qual é a estabilidade de tensão a pequenas perturbações.

3.3 CARACTERIZAÇÃO

A estabilidade de tensão tornou-se um assunto de grande importância para os sistemas de transmissão e distribuição devido ao aumento contínuo da demanda, a transferência de potências elevadas, as restrições econômicas e ambientais e a inserção de fontes de energia renováveis tanto nos sistemas de distribuição como de transmissão (ABDEL-AKHER, 2013).

Os problemas de estabilidade de tensão de um SEP estão geralmente relacionados com as características construtivas e operacionais do sistema (PILLCO, 2011), tais como linhas sobrecarregadas, localização das cargas, que quando distantes da geração resultam em grandes quedas de tensão e a incapacidade do sistema em atender a demanda de potência reativa (KUNDUR, 1994).

O problema de estabilidade de tensão em sistemas de transmissão tem sido amplamente tratado na literatura, enquanto que para os sistemas de distribuição, este mesmo problema tem sido tratado com menos atenção (AUGUGLIARO; DUSONCHET; MANGIONE, 2007).

Nos sistemas de distribuição, as redes são tipicamente radiais e possuem uma elevada relação R/X quando comparada às redes de transmissão, tendo como consequência grandes perdas e quedas de tensão (RAJA; SELVAN; KUMARESAN,

2013). Quando a rede de distribuição está operando em suas condições normais, um aumento no carregamento resultará em um aumento na queda de tensão. Porém, se toda a rede ou apenas uma barra estiver operando próximo de seu limite de estabilidade, o aumento no carregamento resultará em uma rápida e grande queda de tensão, levando o sistema ao colapso de tensão (AUGUGLIARO; DUSONCHET; MANGIONE, 2007).

O colapso de tensão inicia na barra mais fraca e em seguida, afeta as demais barras fracas do sistema. A barra mais fraca é aquela que apresenta o menor nível de tensão no ponto crítico, a menor margem de potência reativa e a maior variação na magnitude de tensão (PUJARA; VAIDYA, 2011). Para a avaliação destas características, são utilizadas algumas ferramentas, as quais serão apresentadas a seguir.

3.4 MÉTODOS DE ANÁLISE

Para a realização do estudo da estabilidade de tensão a pequenas perturbações, que correspondem a variações lentas e graduais no sistema, a análise estática é usualmente utilizada (PILLCO, 2011). De acordo com Kundur (1994), a análise estática iguala as derivadas das variáveis de estado em relação ao tempo à zero para cada ponto de operação e portanto, as equações que definem o sistema ficam reduzidas a equações algébricas permitindo a utilização de técnicas de análise estática.

Geralmente, as técnicas de análise estática são utilizadas para calcular a margem de estabilidade de tensão, identificar os fatores que influenciam na estabilidade de tensão e obter informações do comportamento do sistema em regime permanente para um determinado ponto de operação (KUNDUR, *et al.*, 2004), para isto, geralmente são necessários a realização de cálculos de fluxo de potência para cada ponto de interesse (MANSOUR, 2013).

Através das técnicas de análise estática, é possível relacionar a variação da magnitude de tensão de determinada barra com a injeção ou com o consumo de potência reativa e também com a potência ativa fornecida à carga (ALMEIDA, *et al.*, 2013). As curvas P-V e Q-V, consideradas como técnicas de análise estática, têm sido

amplamente utilizadas nos estudos de operação e planejamento de sistemas elétricos, pois fornecem informações relacionadas à estabilidade de tensão (REIS, 2005; TAYLOR, 1994). Através das curvas P-V e Q-V, é possível visualizar a magnitude da tensão para diferentes condições de operação do sistema.

3.4.1 Curvas P-V

As curvas P-V mostram a magnitude da tensão para uma determinada barra em função do carregamento do sistema. A Figura 4 ilustra uma curva P-V típica e suas principais especificações.

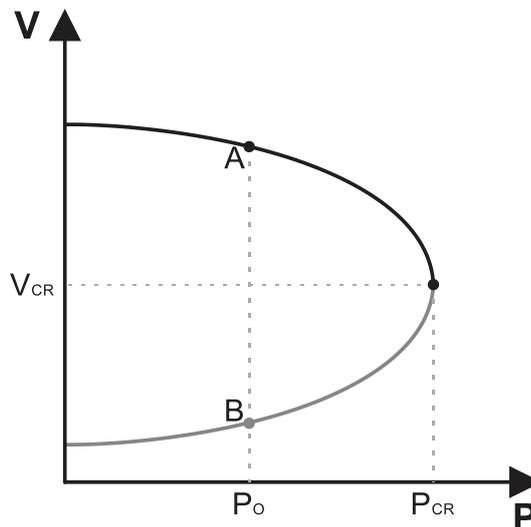


Figura 4: Curva P-V típica.
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4, a potência crítica P_{CR} indica a máxima transferência de potência do sistema. A tensão V_{CR} correspondente à potência P_{CR} , indica a tensão crítica da barra. Para potências menores que P_{CR} , existem dois valores de tensão. No caso da potência P_O , têm-se os pontos A e B. O ponto A apresenta uma tensão superior à do ponto B, porém ambos correspondem ao mesmo carregamento P_O . Para que isto ocorra no ponto B, é necessária uma corrente elevada. A curva P-V tem como característica pontos de operação estáveis na parte superior e instáveis na parte inferior da curva. O ponto A, localizado na parte superior, com valor de tensão maior que V_{CR} , é um ponto de operação estável do sistema. Já o ponto B, localizado na parte inferior, com tensão menor que V_{CR} , é um ponto de operação instável.

Conforme o carregamento é aumentado, haverá um ponto em que somente um valor de tensão será capaz de satisfazer a equação da curva, o qual é denominado P_{CR} e indica a máxima transferência de potência do sistema. Caso a carga solicite uma potência superior à P_{CR} , o sistema será incapaz de fornecer e sofrerá um colapso de tensão (REIS, 2005).

A análise da curva P-V é normalmente utilizada para determinar a margem de carregamento ou a margem de estabilidade de tensão do sistema a partir de um determinado ponto de operação. A margem de carregamento do sistema, expressa em MW ou em porcentagem, corresponde à distância entre o ponto P_O (ponto de operação de interesse) até o ponto crítico P_{CR} (PILLCO, 2011).

Para permitir uma melhor compreensão do levantamento de uma curva P-V genérica e dos fatores que influenciam nas características da curva, será considerado um sistema composto por duas barras, conforme apresentado na Figura 5, onde a barra 1 representa a barra de geração, e a barra 2 representa a barra de carga (REIS, 2005).

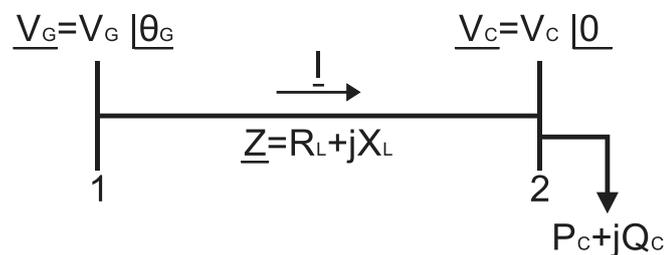


Figura 5: Diagrama unifilar de um sistema de 2 barras.

Fonte: Adaptado de Reis (2005, p. 11).

Na Figura 5, \underline{V}_G é a tensão fasorial da barra 1; $V_G \angle \theta_G$ é o módulo da tensão e o respectivo ângulo da tensão da barra 1; \underline{Z} é a impedância fasorial da linha; R_L é a resistência da linha; X_L é a reatância da linha; \underline{V}_C é a tensão fasorial da barra 2; $V_C \angle 0$ é o módulo da tensão e o respectivo ângulo da tensão da barra 2; P_C é a potência ativa da barra 2; Q_C é a potência reativa da barra 2.

A corrente que circula entre as barras 1 e 2, pode ser expressa por:

$$\underline{I} = \frac{V_G e^{j\theta_G} - V_C e^{j0}}{R_L + jX_L} = \frac{V_G (\cos\theta_G + j\text{sen}\theta_G) - V_C}{R_L + jX_L} \quad (3.1)$$

Sabe-se que:

$$\underline{S}_C = P_C + jQ_C = \underline{V}_C I^*. \quad (3.2)$$

Substituindo a equação (3.1) na equação (3.2) obtém-se:

$$\underline{S}_C = \underline{V}_C I^* = \frac{V_C V_G (\cos\theta_G - j\text{sen}\theta_G) - V_C^2}{R_L - jX_L}. \quad (3.3)$$

Separando as partes reais e imaginárias da equação (3.3), têm-se as expressões de potência ativa e reativa consumida pela carga, dadas por:

$$P_C = \frac{-R_L V_C^2 + V_C V_G (R_L \cos\theta_G + X_L \text{sen}\theta_G)}{R_L^2 + X_L^2}, \quad (3.4)$$

$$Q_C = \frac{-X_L V_C^2 + V_C V_G (X_L \cos\theta_G - R_L \text{sen}\theta_G)}{R_L^2 + X_L^2}. \quad (3.5)$$

Elevando ao quadrado as equações (3.4) e (3.5), têm-se:

$$[P(R_L^2 + X_L^2) + R_L V_C^2]^2 = [V_C V_G (R_L \cos\theta_G + X_L \text{sen}\theta_G)]^2, \quad (3.6)$$

$$[Q(R_L^2 + X_L^2) + X_L V_C^2]^2 = [V_C V_G (X_L \cos\theta_G - R_L \text{sen}\theta_G)]^2. \quad (3.7)$$

Reescrevendo as equações (3.6) e (3.7) obtêm-se:

$$[P(R_L^2 + X_L^2) + R_L V_C^2]^2 - [V_C V_G (R_L \cos\theta_G + X_L \text{sen}\theta_G)]^2 = 0, \quad (3.8)$$

$$[Q(R_L^2 + X_L^2) + X_L V_C^2]^2 - [V_C V_G (X_L \cos\theta_G - R_L \text{sen}\theta_G)]^2 = 0. \quad (3.9)$$

Somando as equações referente às potências ativa e reativa consumidas pela carga, (3.8) e (3.9), respectivamente, obtém-se:

$$(P_C^2 + Q_C^2)(R_L^2 + X_L^2) + V_C^4 - (V_C V_G)^2 + 2P_C R_L V_C^2 + 2Q_C X_L V_C^2 = 0. \quad (3.10)$$

Reescrevendo a equação (3.10), tem-se:

$$V_C^4 + [2(P_C R_L + Q_C X_L - V_G^2)]V_C^2 + (P_C^2 + Q_C^2)(R_L^2 + X_L^2) = 0. \quad (3.11)$$

A equação (3.11) pode ser transformada em uma expressão simplificada da seguinte forma:

$$V_C^4 + bV_C^2 + c = 0. \quad (3.12)$$

O discriminante de (3.12) é representado pela expressão:

$$\Delta = b^2 - 4c, \quad (3.13)$$

e

$$X_A = \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2}, \quad (3.14)$$

$$X_B = \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2}. \quad (3.15)$$

Portanto:

$$V_C = \{\pm\sqrt{X_A}, \pm\sqrt{X_B}\}. \quad (3.16)$$

Resolvendo a equação (3.11) para obter o módulo da tensão V_C , são obtidas 4 soluções conforme mostra a equação (3.16). Porém as soluções de interesse são apenas as positivas $(+\sqrt{X_A}, +\sqrt{X_B})$, que podem ser obtidas a partir de (3.17).

$$V_C = \sqrt{\frac{V_G^2}{2} - R_L P_C - X_L Q_C \pm \sqrt{\frac{V_G^4}{4} - V_G^2(R_L P_C + X_L Q_C) - (X_L P_C - R_L Q_C)^2}}. \quad (3.17)$$

Da equação (3.17), obtêm-se as seguintes equações:

$$V_{CA} = \sqrt{\frac{V_G^2}{2} - R_L P_C - X_L Q_C + \sqrt{\frac{V_G^4}{4} - V_G^2 (R_L P_C + X_L Q_C) - (X_L P_C - R_L Q_C)^2}} \quad (3.18)$$

$$V_{CB} = \sqrt{\frac{V_G^2}{2} - R_L P_C - X_L Q_C - \sqrt{\frac{V_G^4}{4} - V_G^2 (R_L P_C + X_L Q_C) - (X_L P_C - R_L Q_C)^2}} \quad (3.19)$$

onde o ponto V_{CA} corresponde aos pontos de operação estáveis, localizado na parte superior da curva P-V, enquanto que V_{CB} corresponde aos pontos de operação instáveis, localizado na parte inferior da curva.

Para o sistema representado pela Figura 5, através das equações (3.18) e (3.19), é possível traçar a curva P-V realizando o aumento sucessivo do carregamento. Para cada valor de carregamento são obtidos os respectivos valores de tensão, conforme ilustrado na Figura 6.

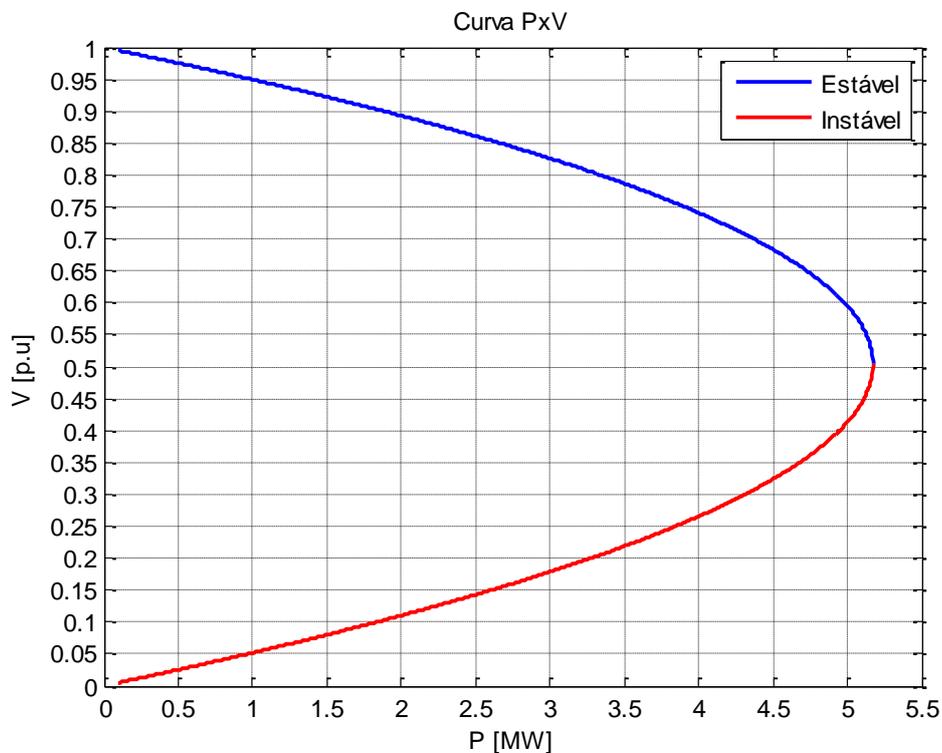


Figura 6: Curva P-V.
Fonte: A autoria própria.

Em sistemas com múltiplas barras, cada ponto da curva P-V é obtido através do cálculo de fluxo de potência, utilizando-se por exemplo, o método de Newton-Raphson. Para cada condição de carregamento é necessário realizar um novo cálculo de fluxo de potência. Devido ao comportamento não linear do SEP, à medida que o carregamento se aproxima do ponto crítico P_{CR} , o método de Newton-Raphson deixa de convergir. Portanto, nas curvas P-V, o ponto em que o método diverge é o ponto crítico do sistema (REIS, 2005; MANSOUR, 2013). A Figura 7 ilustra uma curva P-V para este processo descrito.

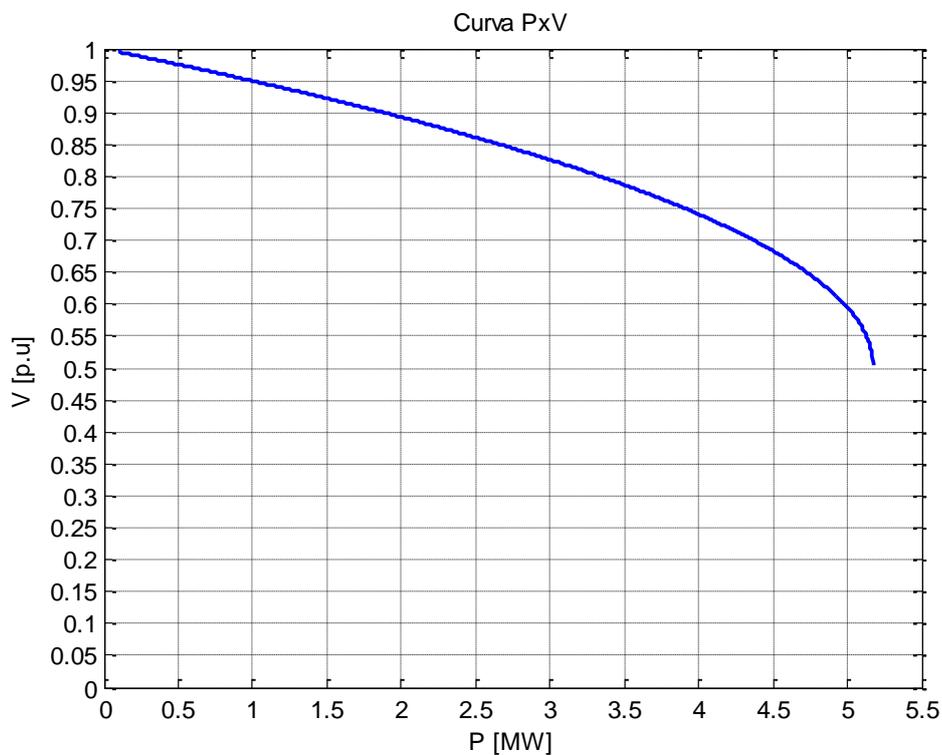


Figura 7: Curva P-V no caso em que ocorre a divergência do fluxo de potência.

Fonte: Autoria própria.

3.4.2 Curvas Q-V

Tal como nas curvas P-V, as curvas Q-V também são utilizadas para realizar análises relacionadas à estabilidade de tensão e à característica de regulação de tensão do sistema, em função da potência reativa injetada. As curvas Q-V fornecem informações sobre a magnitude da tensão e a estabilidade de tensão em função da variação apenas da potência reativa. Ou seja, as curvas Q-V mostram para uma

determinada barra, a relação entre a tensão e a potência reativa injetada na mesma. A Figura 8 ilustra uma curva Q-V típica e suas principais especificações.

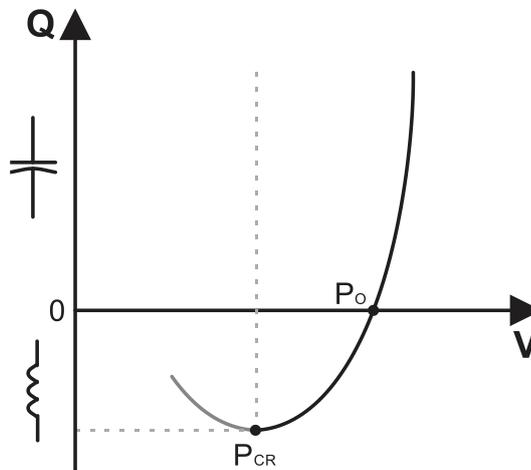


Figura 8: Curva Q-V típica.
Fonte: Adaptado de Taylor (1994, p. 33).

Na Figura 8, o ponto P_{CR} indica o limite de estabilidade de tensão para uma dada potência reativa injetada. Todos os pontos localizados à direita de P_{CR} são considerados estáveis, enquanto que os pontos localizados à esquerda são considerados instáveis. O ponto P_O representa o ponto de operação do sistema, onde a potência reativa injetada é igual a zero. Os pontos localizados acima do eixo da tensão representam o efeito da injeção de potência reativa capacitiva, enquanto que os pontos localizados abaixo representam a injeção de potência reativa indutiva (CUTSEM; VOURNAS, 1998; TAYLOR, 1994).

Através da análise da derivada da curva Q-V é possível determinar a taxa de variação da tensão em função da injeção de potência reativa. Se a derivada dQ/dV é positiva, o sistema é considerado estável. Se a derivada dQ/dV é negativa, o sistema é considerado instável. E quando a derivada dQ/dV é nula, esta indica o limite de estabilidade de tensão, ou seja, o valor mínimo necessário de potência reativa para que o sistema continue operando de maneira estável (KUNDUR, 1994).

A análise da curva Q-V fornece informações sobre a margem de carregamento e a quantidade de compensação reativa necessária para obter um determinado valor de tensão (CUTSEM; VOURNAS, 1998; REIS, 2005). A margem de carregamento, expressa em MVAR ou em porcentagem, representa a distância do ponto de operação P_O até o ponto crítico P_{CR} (TAYLOR, 1994).

As curvas Q-V podem ser determinadas conectando-se um gerador fictício na barra de interesse, o qual, devido a variação de tensão em seus terminais, produz potência reativa. Este gerador é chamado de condensador síncrono pois não gera potência ativa. Para exemplificar a construção de uma curva Q-V, será considerado um sistema composto por duas barras, conforme apresentado na Figura 9, onde a barra 1 representa a barra de geração, e a barra 2 representa a barra de carga com um gerador fictício conectado à ela (CUTSEM; VOURNAS, 1998).

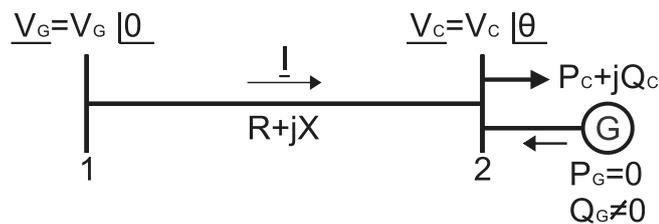


Figura 9: Diagrama unifilar de um sistema de 2 barras com o gerador fictício.
Fonte: Adaptado de Cutsem e Vournas (1998, p. 38).

Na Figura 9, \underline{V}_G é a tensão fasorial da barra 1; $V_G \angle 0$ é o módulo da tensão e o respectivo ângulo da barra 1; R é a resistência da linha; X é a reatância da linha; \underline{V}_C é a tensão fasorial da barra 2; $V_C \angle \theta$ é o módulo da tensão e o respectivo ângulo da barra 2; P_C é a potência ativa da barra 2; Q_C é a potência reativa da barra 2; P_G é a potência ativa do gerador fictício; Q_G é a potência reativa do gerador fictício.

Com o objetivo de simplificar a análise do circuito da Figura 10 (b) e facilitar a compreensão da construção da curva Q-V, será desconsiderado o valor da resistência da linha e a inserção do gerador fictício.

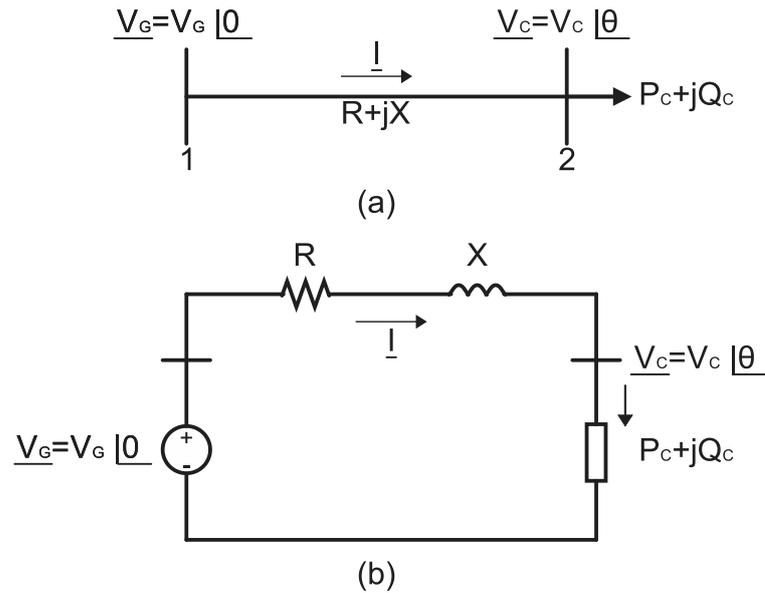


Figura 10: Diagrama unifilar de um sistema de 2 barras e seu circuito equivalente.
Fonte: Adaptado de Cutsem e Vournas (1998, p. 14).

Através da análise da Figura 10 (b), obtém-se:

$$\underline{V}_C = \underline{V}_G - jX\underline{I}. \quad (3.20)$$

Sabe-se que a potência absorvida pela carga é:

$$\underline{S}_C = P_C + jQ_C = \underline{V}_C \underline{I}^*. \quad (3.21)$$

Substituindo a equação (3.20) na equação (3.21), tem-se

$$\underline{S}_C = \underline{V}_C \frac{\underline{V}_G^* - \underline{V}_C^*}{-jX} = \frac{j}{X} (V_G V_C \cos \theta + jV_G V_C \sin \theta - V_C^2). \quad (3.22)$$

Separando as partes real e imaginária da equação (3.22), têm-se as expressões para potência ativa e reativa consumida pela carga, dadas por:

$$P_C = -\frac{V_G V_C}{X} \sin \theta, \quad (3.23)$$

$$Q_c = -\frac{V_c^2}{X} + \frac{V_G V_c}{X} \cos \theta. \quad (3.24)$$

Após a conexão do gerador fictício, o sistema passa a ser representado pela Figura 9. O gerador fictício não gera potência ativa, gera apenas a potência reativa denominada Q_G . Portanto, a nova expressão para a potência reativa absorvida pela carga é dada por:

$$Q_c = -\frac{V_c^2}{X} + \frac{V_G V_c}{X} \cos \theta + Q_G. \quad (3.25)$$

Reescrevendo as equações (3.23) e (3.25), obtém-se:

$$\theta = \sin^{-1} \left(-\frac{P_c X}{V_G V_c} \right), \quad (3.26)$$

$$Q_G = Q_c + \frac{V_c^2}{X} - \frac{V_G V_c}{X} \cos \theta. \quad (3.27)$$

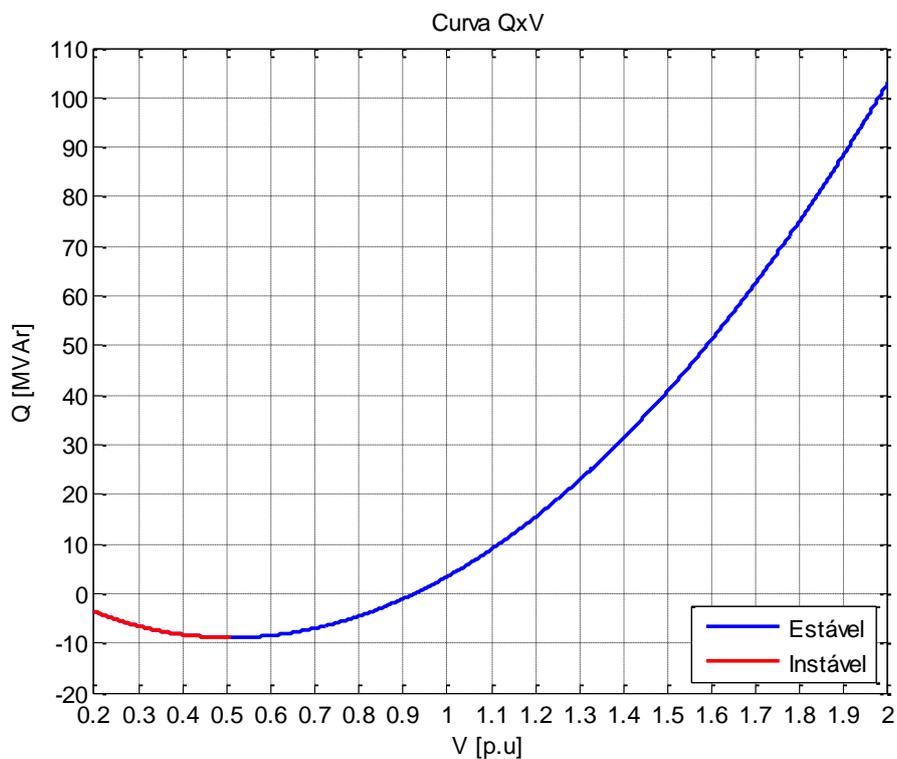


Figura 11: Curva Q-V.
Fonte: Autoria própria.

Para a construção da curva Q-V, a potência ativa P_C é mantida constante. Para cada valor de tensão V_C , o ângulo Θ é calculado através da equação (3.26). Após o cálculo de Θ , calcula-se o valor da potência reativa gerada Q_G através da equação (3.27). Para cada valor V_C é obtido o respectivo valor de Q_G , conforme ilustrado na Figura 11.

As curvas P-V e Q-V apresentam informações de grande importância e facilitam o entendimento de diferentes aspectos da estabilidade de tensão e da característica de regulação de tensão do sistema elétrico de potência. Para a obtenção destas curvas são necessários múltiplos cálculos de fluxo de potência, os quais consomem um elevado tempo e um elevado esforço computacional. Portanto, as análises realizadas através destas curvas não são necessariamente as mais versáteis para o estudo da estabilidade de tensão (KUNDUR, 1994).

Com o objetivo de realizar a análise de estabilidade de tensão e obter informações semelhantes às das curvas P-V e Q-V, serão apresentados a seguir dois métodos que têm sido utilizados na análise estática de estabilidade de tensão em redes de distribuição, os índices de estabilidade de tensão e a análise de sensibilidade V-Q.

3.4.3 Índices de Estabilidade de Tensão para Redes de Distribuição

Os índices de estabilidade de tensão para redes de distribuição são utilizados com o objetivo de evitar a ocorrência de um colapso de tensão e permitir a execução de medidas preventivas. Para isto, são realizadas estimativas da proximidade do sistema à instabilidade de tensão (REIS, 2005), sem a necessidade de traçar as curvas P-V do sistema.

Estes índices são caracterizados por apresentarem esforços computacionais reduzidos quando comparados com o método do cálculo de fluxo de potência continuado tipicamente utilizado para traçar a curva P-V (RAJA; SELVAN; KUMARESAN, 2013).

A utilização destes índices leva em consideração um ponto de operação do sistema. A partir deste ponto de operação é possível avaliar o comportamento do sistema relacionado à estabilidade de tensão através de três passos (AUGUGLIARO; DUSONCHET; MANGIONE, 2007):

- i) Definição de um índice de estabilidade de tensão para cada barra;

- ii) Identificação da barra mais fraca, a qual está mais propensa à ocorrência de um colapso de tensão;
- iii) Realização da estimativa do carregamento máximo da barra mais fraca ou de todo o sistema.

A formulação destes índices é realizada através de um sistema equivalente de duas barras, conforme apresentado na Figura 12. A seguir, serão apresentados dois índices de estabilidade de tensão, o índice VSI (*Voltage Stability Index*) e o índice VCI (*Voltage Collapse Index*).

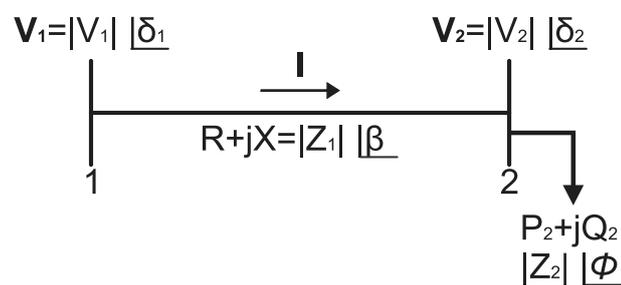


Figura 12: Diagrama unifilar de um sistema equivalente de duas barras.
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 12, V_1 é a tensão fasorial da barra de referência; $|V_1| \angle \delta_1$ é o módulo da tensão e o respectivo ângulo da barra de referência; R é a resistência da linha do sistema equivalente; X é a reatância da linha do sistema equivalente; $|Z_1| \angle \beta$ é o módulo da impedância e o respectivo ângulo da linha do sistema equivalente; V_2 é a tensão fasorial da barra de interesse; $|V_2| \angle \delta_2$ é o módulo da tensão e o respectivo ângulo da barra de interesse; P_2 é a potência ativa da barra de interesse; Q_2 é a potência reativa da barra de interesse; $|Z_2| \angle \Phi$ é o módulo da impedância utilizada para representar a carga da barra de interesse e o respectivo ângulo da impedância da carga.

3.4.3.1 *Voltage Stability Index*

O índice de estabilidade de tensão VSI será abordado nessa subseção. Considerando o sistema equivalente de duas barras representado pela Figura 12, a corrente que percorre a linha é igual a corrente da carga, a qual pode ser expressa por (AUGUGLIARO; DUSONCHET; MANGIONE, 2007):

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R + jX} = \frac{P_2 - jQ_2}{V_2^*}. \quad (3.28)$$

Reescrevendo a equação (3.28) em função da tensão da carga V_2 , obtém-se:

$$V_2^4 - [V_1^2 - 2(P_2R + Q_2X)]V_2^2 + (R^2 + X^2)(P_2^2 + Q_2^2) = 0. \quad (3.29)$$

Resolvendo a equação (3.29) são obtidas quatro soluções. Porém apenas duas soluções são válidas, as quais possuem valores reais e positivos. Para que isto ocorra é necessário satisfazer a seguinte condição:

$$V_1^4 - 4V_1^2(P_2R + Q_2X) - 4(P_2X - Q_2R)^2 \geq 0. \quad (3.30)$$

Para uma determinada condição de carregamento, as soluções válidas obtidas através da equação (3.29) representam dois pontos de operação, um ponto de operação estável (A) e outro instável (B), conforme apresentado na curva P-V da Figura 4. Para cargas modeladas como potência constante, se as soluções obtidas forem iguais, isto quer dizer que o lado esquerdo da equação (3.30) é igual à zero e o ponto de operação resultante coincide com o ponto C da Figura 4, o qual indica o limite de estabilidade de tensão. Para esta determinada condição de carregamento, define-se o fator de carregamento máximo MLF (*Maximum Loadability Factor*), representado por:

$$f_{cx} = \frac{S_x}{S_n}, \quad (3.31)$$

onde S_x representa a potência aparente máxima da carga, na qual ocorre um colapso de tensão e S_n representa o seu valor nominal. O MLF pode ser obtido através da equação (3.30) substituindo respectivamente, P_2 e Q_2 por $f_{cx}P_2$ e $f_{cx}Q_2$. Isolando f_{cx} , obtém-se:

$$f_{cx} = V_1^2 \left[\frac{-RP_2 - XQ_2 + \sqrt{(R^2 + X^2)(P_2^2 + Q_2^2)}}{2(XP_2 - RQ_2)^2} \right]. \quad (3.32)$$

Com base nas informações obtidas através da equação (3.30), a mesma pode ser considerada como um índice de estabilidade de tensão, expresso pela equação (3.33), e quanto maior for o valor obtido através desta equação, mais estável será o sistema.

$$VSI = V_1^4 - 4V_1^2(P_2R + Q_2X) - 4(P_2X - Q_2R)^2. \quad (3.33)$$

De acordo com o sistema representado pela Figura 12, a potência ativa transferida para a carga pode ser expressa como (CHEBBO; IRVING; STERLING, 1992):

$$P_C = \frac{\frac{V_1^2}{Z_1}}{1 + \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)\cos(\beta - \phi)} \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)\cos(\phi). \quad (3.34)$$

Com o aumento do carregamento, haverá um ponto de operação em que a impedância da carga será igual à impedância da linha, este ponto indica o limite de estabilidade de tensão. Portanto, reescrevendo a equação (3.34), tem-se:

$$P_{CR} = \frac{\frac{V_1^2}{Z_1}}{2[1 + \cos(\beta - \phi)]}\cos(\phi). \quad (3.35)$$

Qualquer valor de potência ativa maior que o calculado através da equação (3.35) resultará em um colapso de tensão.

3.4.3.2 Voltage Collapse Index

O índice de colapso de tensão VCI será abordado nessa subseção. Considerando o sistema equivalente de duas barras representado pela Figura 12, sabe-se que (RAJA; SELVAN; KUMARESAN, 2013):

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R + jX}, \quad (3.36)$$

$$P_2 - jQ_2 = \mathbf{V}_2^* \mathbf{I}. \quad (3.37)$$

Substituindo a equação (3.36) na equação (3.37), obtém-se:

$$\frac{\mathbf{V}_2^*(\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2)}{R + jX} = P_2 - jQ_2. \quad (3.38)$$

Reescrevendo a equação (3.38) chega-se a:

$$\mathbf{V}_1 \mathbf{V}_2^* - |\mathbf{V}_2|^2 = (P_2 R + Q_2 X) + j(P_2 X - Q_2 R). \quad (3.39)$$

Equacionando a parte real de (3.39) e reescrevendo-a, obtém-se a equação quadrática dada por:

$$|\mathbf{V}_2|^2 - |\mathbf{V}_1|[\cos(\delta_1 - \delta_2)]|\mathbf{V}_2| + (P_2 R + Q_2 X) = 0, \quad (3.40)$$

onde as soluções podem ser expressas por:

$$|\mathbf{V}_2|^2 = \frac{|\mathbf{V}_1|^2 \cos^2(\delta_1 - \delta_2) \pm \sqrt{|\mathbf{V}_1|^2 \cos^2(\delta_1 - \delta_2) - 4(P_2 R + Q_2 X)}}{2}. \quad (3.41)$$

Para que a magnitude da tensão V_2 seja real e positiva, a seguinte condição deverá ser verdadeira:

$$|\mathbf{V}_1|^2 \cos^2(\delta_1 - \delta_2) - 4(P_2 R + Q_2 X) \geq 0. \quad (3.42)$$

A equação (3.42) pode ser considerada como um índice de estabilidade de tensão, o qual indica a proximidade do ponto de colapso de tensão, conforme apresentado na Figura 13. A reta definida pelo índice VCI, indicada na figura em questão, é calculada a partir da equação (3.43).

$$VCI = |\mathbf{V}_1|^2 \cos^2(\delta_1 - \delta_2) - 4(P_2 R + Q_2 X). \quad (3.43)$$

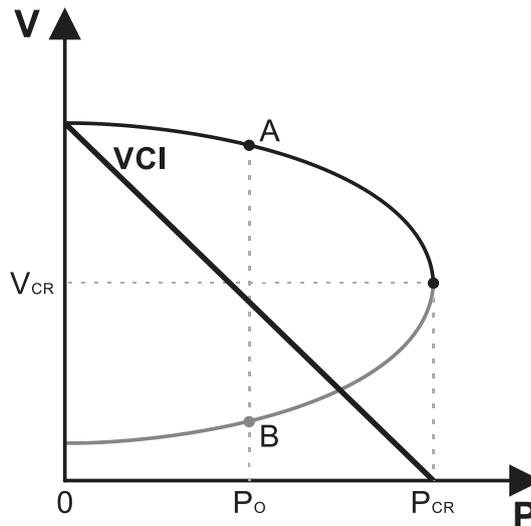


Figura 13: Curva P-V e índice VCI.
Fonte: Adaptado de Raja, Selvan e Kumaresan (2013, p. 900).

Na Figura 13, estão apresentadas a curva P-V obtida através do cálculo de fluxo de potência continuado e o índice VCI calculado através da equação (3.43) para diferentes condições de carregamento. Pode-se observar que o ponto crítico da curva P-V é o ponto de carregamento em que VCI é igual à zero. Portanto, quanto menor for o valor de VCI, mais próximo o sistema estará da ocorrência de um colapso de tensão.

3.4.4 Análise da Sensibilidade V-Q

A análise da sensibilidade V-Q é realizada mediante a linearização das equações de fluxo de potência em um determinado ponto de operação (PILLCO, 2011). Para realizar esta análise é necessário conhecer os parâmetros elétricos das linhas e o carregamento do sistema para a construção da matriz Jacobiana e então obter as sensibilidades V-Q. A estabilidade do sistema pode ser analisada, para todas as barras, através dos sinais das sensibilidades V-Q obtidas (KUNDUR, 1994).

Se for utilizado o método típico para cálculo de fluxo de potência, o método de Newton Raphson, a matriz Jacobiana obtida através dele, é a mesma expressa na equação (3.44) (KUNDUR, 1994).

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix}. \quad (3.44)$$

Em (3.44), $\Delta \mathbf{P}$ é a variação de potência ativa para todas as barras; $\Delta \mathbf{Q}$ é a variação de potência reativa para todas as barras; $\Delta \boldsymbol{\theta}$ é a variação do ângulo da tensão para todas as barras; $\Delta \mathbf{V}$ é a variação da amplitude da tensão para todas as barras; os elementos da matriz Jacobiana (\mathbf{J}) representam a sensibilidade entre o fluxo de potência e a variação de tensão e ângulo nas barras (KUNDUR, 1994).

A estabilidade de tensão é influenciada por ambas as potências, ativa e reativa. No entanto, é possível avaliar a estabilidade de tensão para cada ponto de operação considerando apenas a relação entre a potência reativa e a tensão, para que isto ocorra é necessário manter a potência ativa constante. Esta consideração é semelhante à realizada para obtenção das curvas Q-V. Conseqüentemente, a variação de tensão será obtida considerando-se apenas o efeito da variação de potência reativa, minimizando o esforço computacional necessário (REIS, 2005; KUNDUR, 1994).

De acordo com as considerações realizadas anteriormente, considerando que $\Delta \mathbf{P}$ é zero, através da equação (3.44) obtém-se:

$$\Delta \mathbf{P} = \mathbf{0} = J_{P\theta} \Delta \boldsymbol{\theta} + J_{PV} \Delta \mathbf{V}, \quad (3.45)$$

$$\Delta \mathbf{Q} = J_{Q\theta} \Delta \boldsymbol{\theta} + J_{QV} \Delta \mathbf{V}. \quad (3.46)$$

Reescrevendo a equação (3.45) tem-se:

$$\Delta \boldsymbol{\theta} = -J_{P\theta}^{-1} J_{PV} \Delta \mathbf{V}. \quad (3.47)$$

Substituindo a equação (3.47) na equação (3.46) chega-se a seguinte expressão:

$$\Delta \mathbf{Q} = -J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV} \Delta \mathbf{V} + J_{QV} \Delta \mathbf{V}, \quad (3.48)$$

$$\Delta \mathbf{Q} = J_R \Delta \mathbf{V}. \quad (3.49)$$

Portanto:

$$\mathbf{J}_R = [\mathbf{J}_{QV} - \mathbf{J}_{Q\theta} \mathbf{J}_{P\theta}^{-1} \mathbf{J}_{PV}]. \quad (3.50)$$

Em (3.50), \mathbf{J}_R é a matriz jacobiana reduzida do sistema. Reescrevendo a equação (3.49), obtém-se:

$$\Delta \mathbf{V} = \mathbf{J}_R^{-1} \Delta \mathbf{Q}. \quad (3.51)$$

O elemento i^{th} da diagonal desta matriz, representa a sensibilidade V-Q da barra i . A sensibilidade V-Q de uma determinada barra representa a inclinação da curva Q-V em um determinado ponto de operação (KUNDUR, 1994).

Um critério para que o sistema seja estável é que, para uma determinada condição de operação, para qualquer barra, a amplitude da tensão de determinada barra aumente com a injeção de potência reativa nesta barra. Se em pelo menos uma barra do sistema, a amplitude de tensão diminuir com a injeção de potência reativa, o sistema é considerado instável (KUNDUR, 1994).

Uma sensibilidade V-Q positiva indica uma operação estável, quanto menor for esta sensibilidade, mais estável será o sistema. A estabilidade diminui quando a sensibilidade aumenta, tornando-se infinita no limite de estabilidade de tensão. Já uma sensibilidade V-Q negativa indica uma operação instável. Uma sensibilidade V-Q pequena e negativa, indica uma operação muito instável (KUNDUR, 1994).

4. IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA ESTABILIDADE DE TENSÃO

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos e definições acerca da geração distribuída e seus impactos típicos em sistemas de distribuição, no contexto da estabilidade e regulação de tensão. São apresentadas também algumas considerações que devem ser realizadas antes da conexão da geração distribuída às redes.

4.2 CARACTERÍSTICAS

A Geração Distribuída (GD) pode ser classificada como qualquer tipo de geração de energia elétrica de pequeno porte localizada próximo ao consumidor, a qual pode ser conectada diretamente ao sistema de distribuição nas redes de média ou baixa tensão (ACKERMANN; ANDERSSON; SODER, 2000).

A geração de energia elétrica de forma distribuída é geralmente realizada através de máquinas de corrente alternada, as quais podem ser assíncronas, síncronas e também por conversores estáticos de potência, os quais podem ser utilizados, por exemplo, como interface entre um sistema fotovoltaico e a rede para realizar a conversão CC-CA (FERNANDES, 2012).

Atualmente, com o objetivo de utilizar de maneira racional e eficiente os recursos energéticos disponíveis no meio ambiente, percebe-se um aumento no interesse da produção de energia elétrica através de fontes energéticas renováveis (HEMDAN; KURRAT, 2008) e conseqüentemente o aumento da conexão da GD nas redes de distribuição. Com a presença da GD, o comportamento do sistema elétrico e algumas de suas características são afetadas, tais como o fluxo de potência, o perfil e a estabilidade de tensão (ALONSO; AMARIS, 2009).

Com a conexão da GD nas redes de distribuição e de acordo com a sua capacidade de geração, esta pode fornecer benefícios como a diminuição de perdas nos sistemas de transmissão e distribuição, a melhoria no perfil de tensão, a melhoria

da qualidade de energia e da confiabilidade do sistema (RAJA; SELVAN; KUMARESAN, 2013). Como exemplo, a GD pode ajudar no fornecimento de energia elétrica em horários de pico diminuindo o congestionamento e a degradação dos sistemas de subtransmissão e transmissão (CHEN; MALBASA; KEZUNOVIC, 2013).

Na visão clássica dos Sistemas Elétricos de Potência (SEPs), os sistemas de distribuição são projetados para receber uma grande quantidade de energia elétrica na subestação e então fornecer esta energia para os consumidores. Assim, as potências ativa e reativa fluem do maior nível de tensão para o menor (JENKINS, *et al.*, 2008). As potências fluem em apenas uma direção, da subestação para o consumidor, conforme apresentado na Figura 14. Porém, com a conexão da GD, representada pela Figura 15, os sistemas de distribuição que antes eram circuitos essencialmente passivos, responsáveis apenas por transmitir energia elétrica aos consumidores, agora também apresentam elementos ativos conectados, gerando energia elétrica (JENKINS, *et al.*, 2008; FERNANDES, 2012).

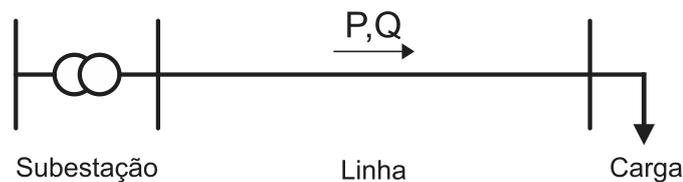


Figura 14: Diagrama unifilar de um sistema de distribuição convencional.

Fonte: Autoria própria.

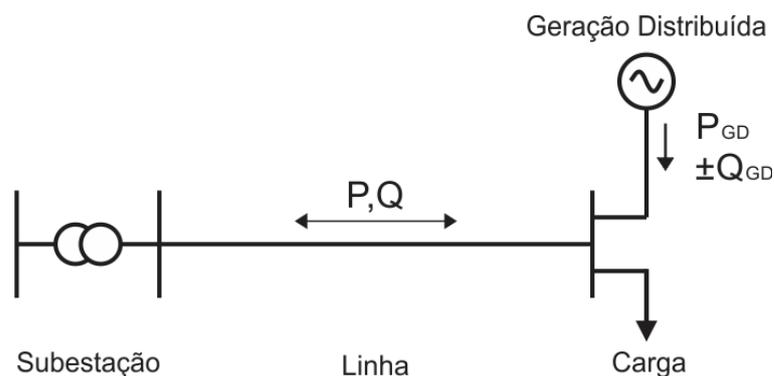


Figura 15: Diagrama unifilar de um sistema de distribuição com GD.

Fonte: Autoria própria.

A presença da GD nas redes de distribuição afeta diretamente os níveis de tensão e as características de estabilidade de tensão. Se bem dimensionada, a GD pode realizar a manutenção destes níveis e aumentar a margem de estabilidade do

sistema, caso contrário, pode causar uma sobretensão ou uma subtensão e diminuir a margem de estabilidade do sistema. Isto vai depender das variáveis referentes a capacidade, localização e o modo de operação da GD, das características das linhas de distribuição e das cargas conectadas à rede (BAGHZOUZ, 2005).

4.3 IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA QUEDA DE TENSÃO

Como já comentado, a GD pode ser conectada à rede através de geradores síncronos, assíncronos ou conversores estáticos de potência. A GD pode operar com fatores de potência capacitivo, indutivo ou unitário, que respectivamente indicam que a GD fornece, absorve ou não realiza a troca de potência reativa com o sistema de distribuição. Os geradores síncronos e os conversores estáticos de potência podem operar com os diferentes modos de potência reativa, enquanto que os geradores assíncronos, em geral, só absorvem a potência reativa (VIAWAN, 2008).

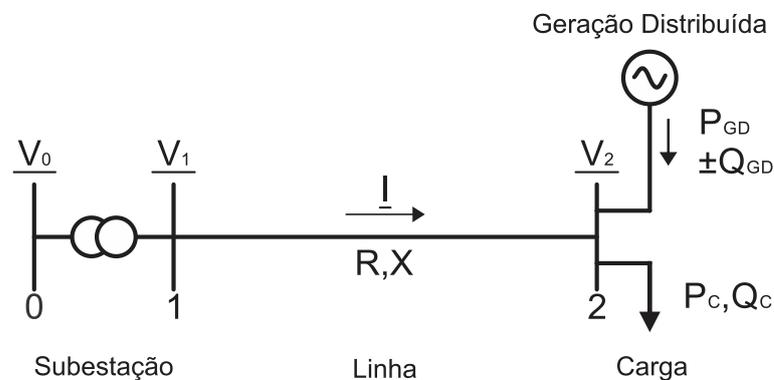


Figura 16: Diagrama unifilar de um sistema de distribuição para ilustrar a queda de tensão com a GD.
 Fonte: Adaptado de Viawan (2008, p. 42).

Na Figura 16, V_1 é a tensão fasorial da barra 1; I é a corrente fasorial que percorre a linha; R é a resistência da linha; X é a reatância da linha; V_2 é a tensão fasorial da barra 2; P_C é a potência ativa da barra 2; Q_C é a potência reativa da barra 2; P_{GD} é a potência ativa da GD; Q_{GD} é a potência reativa da GD.

Para o sistema representado pela Figura 16, a queda de tensão na linha pode ser expressa como (VIAWAN, 2008):

$$\Delta V = V_1 - V_2 \approx \frac{R(P_C - P_{GD}) + X(Q_C - (\pm Q_{GD}))}{V_2}. \quad (4.1)$$

A equação (4.1) mostra que se a GD fornece potência ativa e não realiza a troca de potência reativa com o sistema, ocorre uma redução na queda de tensão ao longo da linha. Se a potência gerada pela GD for maior que a potência solicitada pela carga, a direção do fluxo de potência será da GD até a subestação, resultando em um aumento no nível de tensão. Por outro lado, se a GD absorver potência reativa do sistema, a GD poderá aumentar ou diminuir a queda de tensão na linha, isto dependerá da potência ativa e reativa da GD relacionada à potência ativa e reativa da carga e também da relação R/X da linha (VIAWAN, 2008).

4.4 CAPACIDADE MÁXIMA DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Três fatores técnicos podem limitar a capacidade máxima da GD, níveis de faltas, limites térmicos e limites de tensão (HIRD, *et al.*, 2004). Neste trabalho será realizado a análise do comportamento do sistema de distribuição com a presença da GD relacionada aos limites térmicos e limites de tensão, desconsiderando-se os limites impostos pelos níveis de faltas.

Antes da conexão da GD à rede de distribuição, a concessionária de energia elétrica deverá garantir que os limites dos níveis de tensão, os limites térmicos dos cabos e a capacidade de transferência de potência do transformador da subestação (VIAWAN, 2008) não sejam violados diante das piores condições de funcionamento do sistema, caracterizadas por apresentar (MASTERS, 2002):

- Carregamento máximo e geração nula;
- Carregamento máximo e geração máxima;
- Carregamento mínimo e geração máxima.

O carregamento máximo do sistema e a geração nula da GD são consideradas condições limites quando os níveis de tensão na barra onde a GD está conectada é menor que a tensão mínima permitida.

O carregamento máximo do sistema e a geração máxima da GD são consideradas condições limites quando a GD absorver potência reativa do sistema e

consequentemente aumentar a queda de tensão na linha. Para este caso, a tensão na barra onde a GD está conectada pode ser menor que a tensão mínima permitida.

O carregamento mínimo do sistema e a geração máxima da GD são consideradas condições limites quando: 1) a potência gerada pela GD causar uma elevação na tensão, ultrapassando os limites permitidos; 2) a corrente reversa resultante da potência gerada pela GD excede a capacidade térmica do condutor; 3) a potência reversa gerada pela GD excede a capacidade térmica do transformador da subestação.

Ao limitar a capacidade máxima da GD através das piores condições de funcionamento, a capacidade da GD será restrita desnecessariamente. Para uma limitação mais precisa, deve ser considerado o funcionamento dos dispositivos de regulação de tensão do sistema de distribuição (VIAWAN, 2008). Porém, este tipo de análise não será abordada neste trabalho.

Neste trabalho será avaliado o impacto da GD na margem de estabilidade de tensão do sistema.

5. TESTES E RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir de um sistema teste fictício, no qual foram aplicadas todas as ferramentas, apresentadas anteriormente, utilizadas em estudos de estabilidade de tensão. Será mostrado que estas ferramentas apresentam resultados semelhantes e podem ser utilizadas de forma individual de acordo com o tipo de informação que deseja-se obter do comportamento do sistema. Serão apresentados também, os resultados obtidos a partir de um sistema tipicamente utilizado em estudos de estabilidade de tensão, no qual foram aplicadas algumas destas ferramentas com o objetivo de validar e comprovar os resultados qualitativos obtidos com o sistema teste fictício.

5.2 SISTEMA TESTE 1

O primeiro sistema utilizado, representado pela Figura 17, trata-se de um sistema fictício, o qual representa uma rede de distribuição composta por cinco barras, duas linhas e dois transformadores. Os dados completos deste sistema podem ser encontrados no Apêndice A.

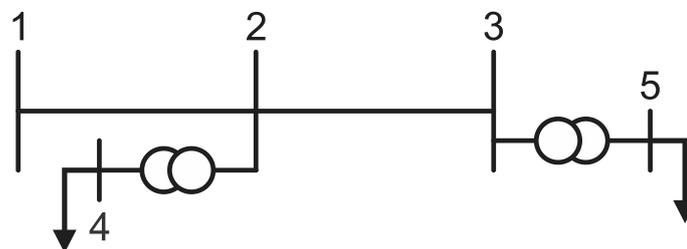


Figura 17: Diagrama unifilar do sistema teste 1.
Fonte: Autoria própria.

5.2.1 Curvas P-V

Para avaliar o comportamento do sistema devido ao acréscimo de carga, foram traçadas as curvas P-V para três cabos distintos tipicamente utilizados em redes de distribuição, 4 AWG, 1/0 AWG e 336,4 MCM. Cada tipo de cabo apresenta uma determinada impedância, a qual pode ser encontrada na Tabela 2. Entre os cabos escolhidos, o cabo mais fino é o 4 AWG, o qual possui uma relação R/X de aproximadamente 3,23, ou seja, a resistência é cerca de 3,23 vezes maior que a reatância. Enquanto que o cabo mais grosso, 336,4 MCM possui uma relação R/X de aproximadamente 0,5, onde a reatância é cerca de 2 vezes maior que a resistência.

As curvas P-V foram traçadas através do *software* ANAREDE, onde foram realizadas três simulações, em cada uma delas foram alteradas simultaneamente as impedâncias das linhas entre as barras 1-2 e 2-3, indicando a troca dos cabos. Para a construção das curvas P-V, foi utilizado o cálculo de fluxo de potência continuado, disponível no *software* ANAREDE, onde o aumento sucessivo do carregamento foi realizado através do incremento de carga ativa e reativa, o qual foi realizado de maneira uniforme em todo o sistema, mantendo o fator de potência constante com valor igual a 0,85.

Para realizar a análise referente à limitação térmica, foram consideradas as correntes máximas admissíveis para cada tipo de cabo, as quais podem ser encontradas na Tabela 2. As correntes foram calculadas através dos dados obtidos do cálculo de fluxo de potência. Para a obtenção destes dados, foi utilizada a ferramenta MATPOWER, que é um pacote computacional desenvolvido para o *software* MATLAB® para o cálculo de fluxo de potência.

Na Figura 18, através das curvas P-V da barra 2, pode-se observar que a potência máxima que o sistema pode transmitir, sem que ocorra um colapso de tensão, varia de acordo com o cabo utilizado. Para o cabo 4 AWG, a potência máxima suportada sem que ocorra um colapso de tensão é 3,50 MW, para o cabo 1/0 AWG é 6,62 MW e para o cabo 336,4 MCM é 10,34 MW. O cabo com a maior relação R/X apresentou no ponto crítico da barra, a menor capacidade de transferir potência e o menor nível de tensão. Enquanto que o cabo com a menor relação R/X, apresentou a maior capacidade de transferir potência e o maior nível de tensão. As linhas pontilhadas na vertical indicam o limite térmico de cada cabo, que está associado à

corrente máxima admissível. Quando este valor é alcançado, dependendo do tempo em que o cabo ficará submetido à potência superior à suportada, o mesmo poderá ser danificado devido ao elevado aquecimento, ou seja, o sistema não será capaz de transmitir a máxima potência devido a limitação térmica imposta pelos cabos.

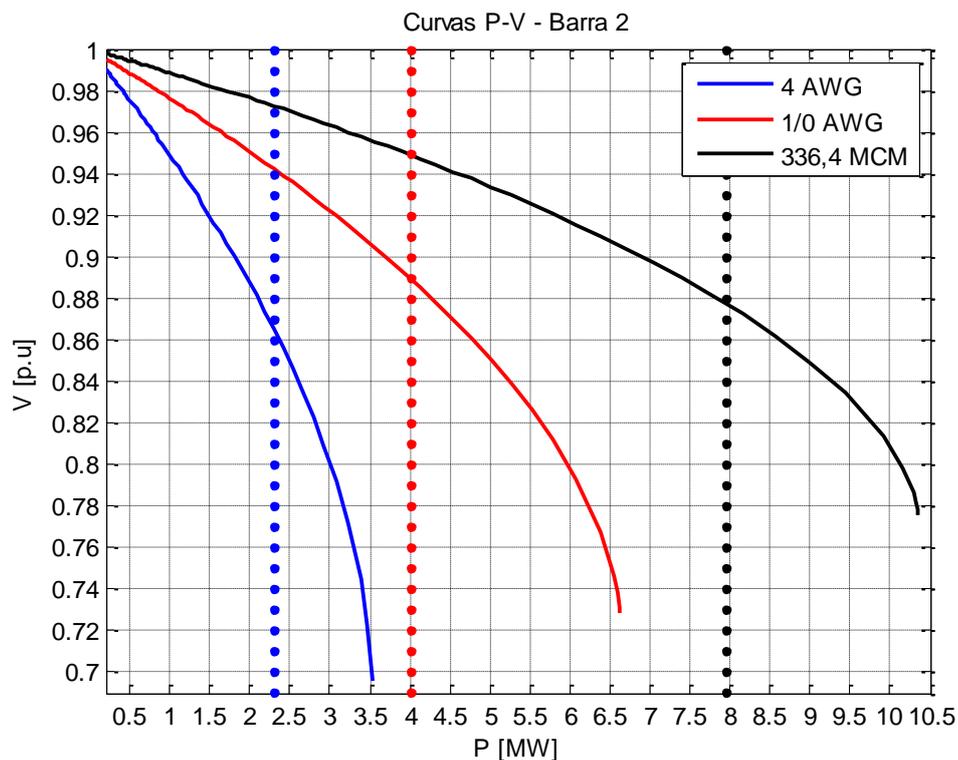


Figura 18: Curvas P-V da barra 2 para diferentes tipos de cabos com seus respectivos limites térmicos.
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 19, são apresentadas as curvas P-V da barra 3, onde as linhas pontilhadas na vertical indicam o momento em que ocorre a violação do limite térmico do cabo entre as barras 1 e 2. Neste caso, a linha entre as barras 2 e 3 não alcança o seu limite térmico de operação, ou seja, quando o cabo entre as barras 1 e 2 alcança o seu limite térmico de operação, como dito anteriormente, o mesmo pode interromper a transferência de potência. O limite térmico de operação do cabo entre as barras 1 e 2 é violado para correntes máximas entre as barras 2 e 3 iguais à 65,27 A, 117,35 A e 222,88 A para os cabos 4 AWG, 1/0 AWG e 336,4 MCM, respectivamente. Portanto, estas correntes são menores que as correntes máximas admissíveis de cada cabo. Pode-se observar também, que os níveis de tensão no ponto crítico da barra 3 são menores que os da barra 2, sendo estes, resultados da maior queda de tensão devido ao aumento da impedância do trecho entre as barras 1 e 3.

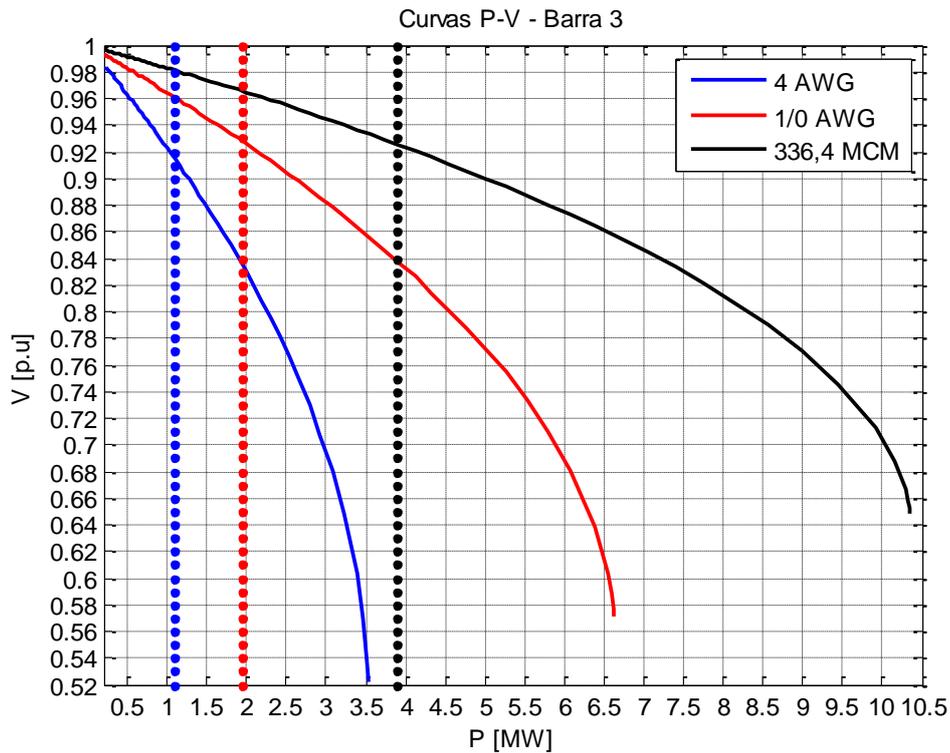


Figura 19: Curvas P-V da barra 3 para diferentes tipos de cabos e seu respectivos limites impostos pela linha entre a barra 1 e a barra 2.
Fonte: Autoria própria.

As curvas P-V das barras 4 e 5 estão representadas pela Figura 20. As barras 4 e 5 estão dispostas após as barras 2 e 3, respectivamente, e estão interligadas por transformadores, nos quais não foram considerados os limites térmicos de operação. Devido à posição destas barras, os níveis de tensão no ponto crítico foram semelhantes aos das barras anteriores à elas, ou seja, da barra 4 foi semelhante ao da barra 2, e da barra 5 foi semelhante ao da barra 3. Para ambas as barras, 4 e 5, o nível de tensão diminuiu devido ao acréscimo da impedância do transformador, o qual resultou numa queda de tensão maior. Os níveis de tensão obtidos nos limites de estabilidade de tensão para a barra 4 variaram entre 0,6631 p.u com o cabo 4 AWG e 0,6765 p.u para o cabo 336,4 MCM e para a barra 5 esta variação estabeleceu-se entre 0,4753 p.u (4 AWG) e 0,5093 p.u (336,4 MCM).

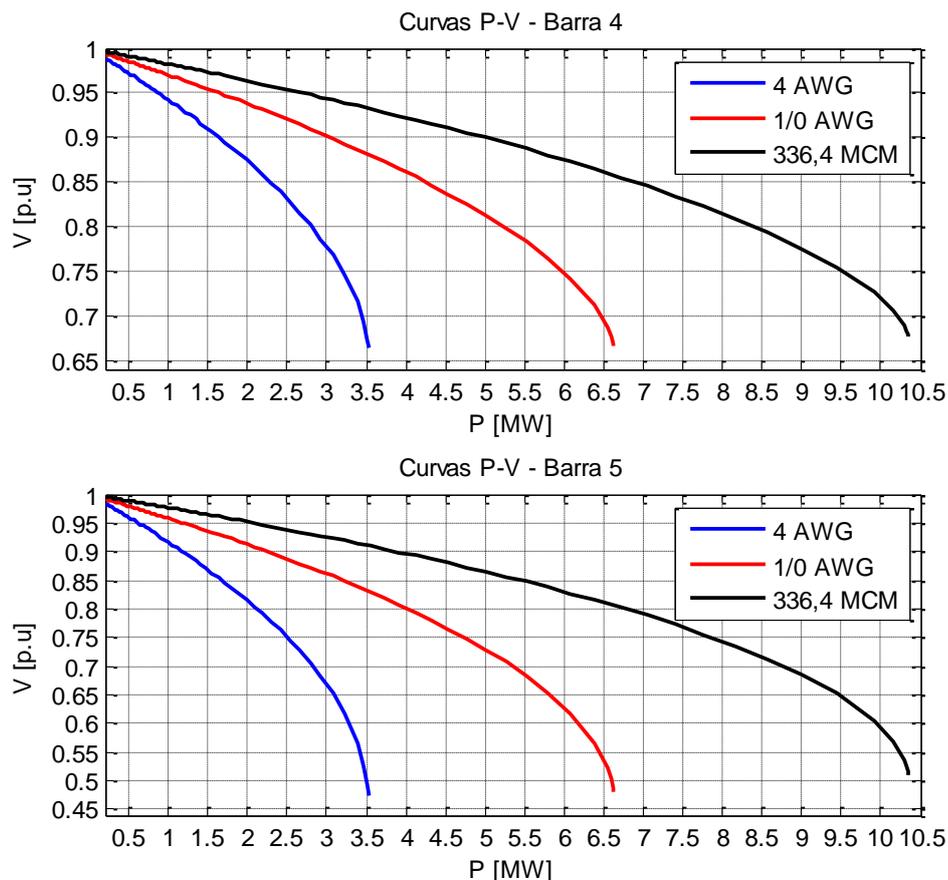


Figura 20: Curvas P-V das barras 4 e 5 para diferentes tipos de cabos.
Fonte: Autoria própria.

5.2.2 Índices de Estabilidade de Tensão para Redes de Distribuição

Os índices de estabilidade de tensão para redes de distribuição são utilizados com o objetivo de identificar as barras mais fracas do sistema e realizar a estimativa do carregamento máximo. As barras consideradas mais fracas “são as barras que apresentam o menor nível de tensão em seu ponto crítico de operação”, as quais podem originar um colapso de tensão.

Os índices VSI foram calculados através da equação (3.33) considerando o sistema com um carregamento de 50% de sua capacidade total. Para obter os dados relacionados ao fluxo de potência do sistema, foi utilizada a ferramenta MATPOWER.

Na Figura 21 é possível observar o valor do índice VSI para cada barra considerando diferentes tipos de cabos. Os índices com menores valores representam as barras mais fracas. Neste caso, os três tipos de cabos apresentaram o mesmo resultado, indicando que a barra mais fraca é a barra 5. Nas curvas P-V obtidas

anteriormente, a barra 5 apresentou em seu ponto crítico, o menor valor de tensão, condizendo com os resultados obtidos através do índice VSI.

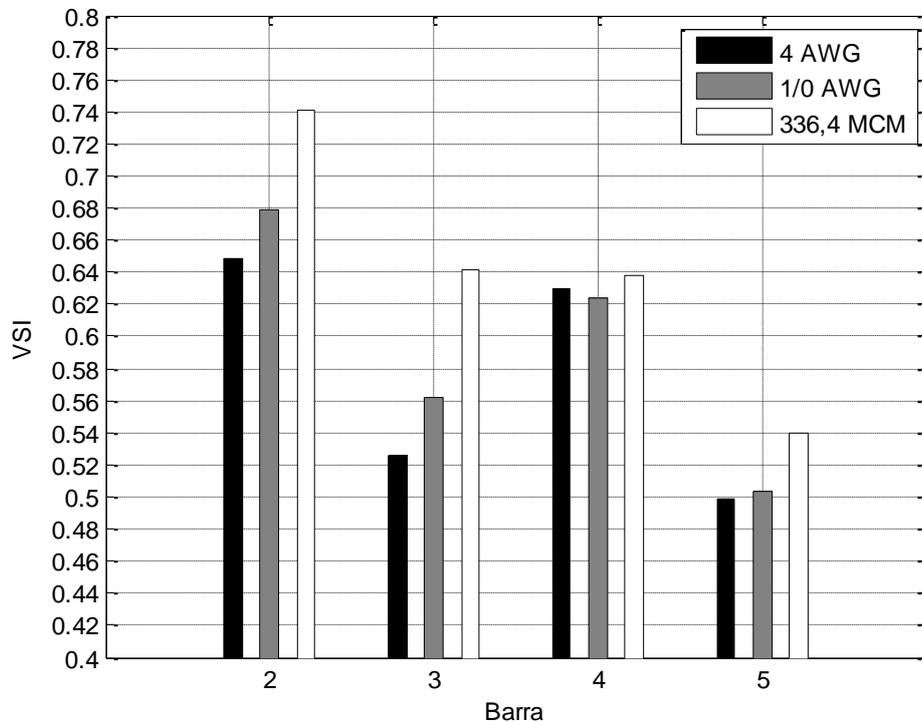


Figura 21: Índice de estabilidade de tensão (VSI) para diferentes tipos de cabos.

Fonte: Autoria própria.

Após a identificação da barra mais fraca, pode-se estimar o carregamento máximo da mesma através da equação (3.35). Para a realização desta estimativa através do índice VSI, foi utilizada a impedância equivalente entre a barra de referência e a barra mais fraca. A estimativa obtida, refere-se ao carregamento máximo da barra mais fraca quando ocorre um aumento de carga uniforme em todas as barras do sistema. Para a realização da estimativa do carregamento máximo da barra mais fraca através do *software* ANAREDE, foi considerado o sistema em sua forma original, onde não foi utilizada nenhuma representação equivalente do sistema. Na Tabela 5 estão apresentados os resultados obtidos do carregamento máximo da barra 5 através do índice VSI e através do fluxo de potência do *software* ANAREDE, os quais foram comparados calculando-se os respectivos erros.

Tabela 5: Carregamento máximo da barra mais fraca para diferentes tipos de cabos (VSI).

Carregamento máximo da barra mais fraca			
Cabo	VSI [MW]	ANAREDE [MW]	Erro [%]
4 AWG	1,640	1,765	7,622
1/0AWG	3,105	3,332	7,311
336,4MCM	4,897	5,174	5,656

Fonte: Autoria própria.

Através dos dados apresentados na Tabela 5, pode-se observar que os resultados obtidos através do índice são menores que os do ANAREDE e, portanto, apresentaram uma determinada margem de segurança, pois sabe-se que com o aumento do carregamento, além do suportado, pode ocorrer um colapso de tensão.

Se o sistema for representado em sua forma reduzida, resultando em um sistema equivalente de duas barras, é possível realizar a estimativa do carregamento máximo do mesmo através da equação (3.32). Para a realização desta estimativa através do índice VSI, foi utilizada a impedância equivalente do sistema reduzido, a qual foi obtida através do método proposto por Jasmon e Lee (1992), no qual são considerados os totais de perdas ativas e reativas do sistema. A estimativa refere-se ao carregamento máximo do sistema quando ocorre um aumento de carga uniforme em todas as barras do sistema. Os resultados obtidos são fatores de carregamento, ou seja, os valores obtidos através da equação (3.32) devem ser multiplicados pelo carregamento atual do sistema, resultando nos valores apresentados na Tabela 6.

Na Tabela 6 estão apresentados os valores do carregamento máximo do sistema reduzido obtidos através do índice VSI e através do *software* ANAREDE. Os resultados obtidos através do *software* ANAREDE referem-se ao sistema em sua forma original, onde não foi utilizada nenhuma representação equivalente do mesmo. A diferença entre estes valores resultou em um erro relativamente pequeno, levando em consideração que a estimativa através do índice é realizada com um único cálculo de fluxo de potência.

Tabela 6: Carregamento máximo do sistema reduzido para diferentes tipos de cabos (VSI).

Carregamento máximo do sistema reduzido			
Cabo	VSI [MW]	ANAREDE [MW]	Erro [%]
4 AWG	3,567	3,528	1,093
1/0AWG	6,708	6,616	1,371
336,4MCM	10,502	10,343	1,514

Fonte: Autoria própria.

Assim como no índice VSI, o índice VCI também fornece informações relacionadas à barra mais fraca e realiza a estimativa do carregamento máximo. Na Figura 22, é possível observar o valor do índice VCI para cada barra do sistema teste 1 com diferentes tipos de cabos, o qual foi calculado através da equação (3.43). Os índices com menores valores representam as barras mais fracas do sistema. Neste caso, para o cabo 4 AWG, a barra mais fraca é a barra 3, e para os cabos 1/0 AWG e 336,4 MCM, a barra mais fraca é a barra 5.

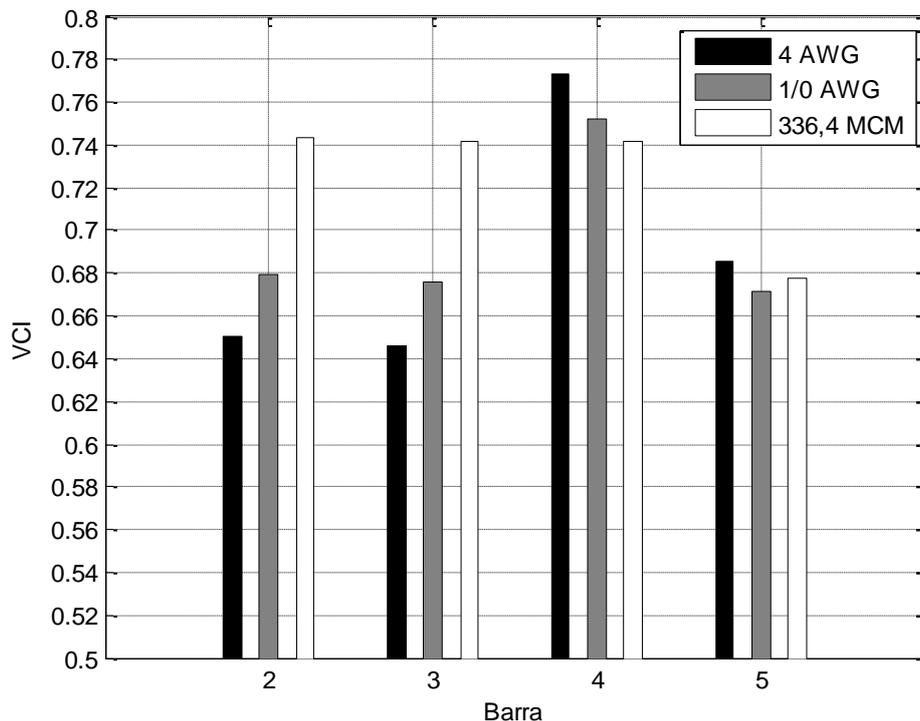


Figura 22: Índice de estabilidade de tensão (VCI) para diferentes tipos de cabos.

Fonte: Autoria própria.

A estimativa do carregamento máximo da barra mais fraca consiste na construção de uma reta, a qual é resultado do cálculo da equação (3.43) para diferentes condições de carregamento do sistema. Para cada condição de carregamento é obtido um ponto. Para obtenção de cada ponto, são necessários os dados resultantes do cálculo de fluxo de potência. A carga considerada no fluxo de potência refere-se à carga apenas da barra mais fraca e a impedância a ser utilizada é a impedância equivalente entre a barra de referência e a barra mais fraca.

Na Figura 23 é possível visualizar a reta obtida para o carregamento máximo da barra 5 com o cabo 336,4 MCM. Os dados obtidos através desta e das

demais retas para os diferentes cabos estão apresentadas na Tabela 7, os quais foram comparados com os resultados obtidos através do *software* ANAREDE.

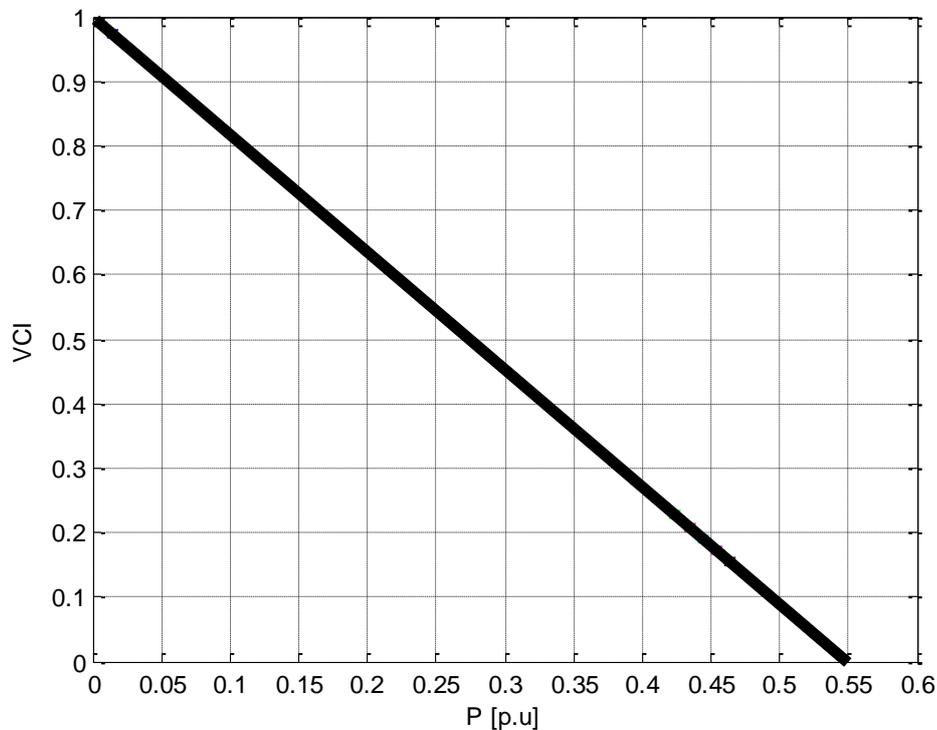


Figura 23: Carregamento máximo da barra 5 determinado através do índice de estabilidade de tensão (VCI) para o cabo 336,4 MCM.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7: Carregamento máximo da barra mais fraca para diferentes tipos de cabos (VCI).

Carregamento máximo da barra mais fraca			
Cabo	VCI [MW]	ANAREDE [MW]	Erro [%]
4 AWG	1,800	1,765	1,944
1/0AWG	3,200	3,332	4,125
336,4MCM	5,500	5,174	5,927

Fonte: Autoria própria.

Se o sistema for representado em sua forma reduzida, resultando em um sistema equivalente de duas barras, é possível realizar a estimativa do carregamento máximo do mesmo.

A estimativa do carregamento máximo do sistema é realizada de forma semelhante à do carregamento máximo da barra mais fraca. São necessárias diferentes condições de carregamento do sistema para a obtenção de cada ponto, a carga considerada no fluxo de potência refere-se à carga total do sistema reduzido, e

a impedância equivalente a ser utilizada, é a impedância do sistema equivalente de duas barras.

Na Figura 24 é possível visualizar a reta obtida para o carregamento máximo do sistema com o cabo 336,4 MCM. Os dados obtidos através desta e das demais retas para os diferentes cabos estão apresentadas na Tabela 8, os quais foram comparados com os resultados obtidos através do *software* ANAREDE.

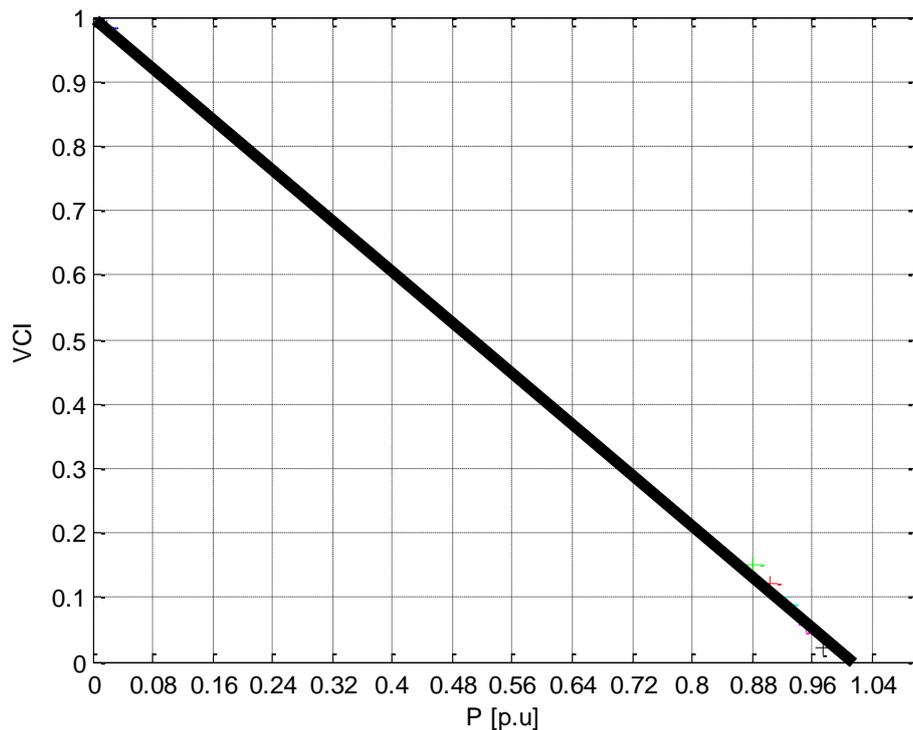


Figura 24: Carregamento máximo do sistema através do índice de estabilidade de tensão (VCI) para o cabo 336,4 MCM.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8: Carregamento máximo do sistema reduzido para diferentes tipos de cabos (VCI).

Carregamento máximo do sistema reduzido			
Cabo	VCI [MW]	ANAREDE [MW]	Erro [%]
4 AWG	3,700	3,5276	4,6595
1/0AWG	6,700	6,6160	1,2537
336,4MCM	10,200	10,3434	1,4059

Fonte: Autoria própria.

5.2.3 Curvas Q-V

Para avaliar a característica de regulação de tensão do sistema, foram traçadas as curvas Q-V de forma a mostrar, para uma determinada barra, a relação entre o valor da tensão e a potência reativa injetada na mesma. As curvas Q-V foram traçadas para cada barra e para três cabos distintos através do *software* ANAREDE, considerando um carregamento de 50% da capacidade total do sistema.

Nas figuras apresentadas a seguir, a interseção das curvas com a reta em que a potência reativa é zero, indica o ponto de operação inicial do sistema. Por exemplo, nas curvas Q-V da barra 2, representadas pela Figura 25, o ponto em que a curva azul, referente ao cabo 4 AWG, cruza a reta, o valor da tensão é aproximadamente 0,9 p.u. Isto quer dizer que quando o sistema estiver utilizando o cabo 4 AWG e apresentar um carregamento de 50% de sua capacidade total, a tensão na barra 2 é 0,9 p.u. Portanto, através da curva Q-V é possível estimar a quantidade de potência reativa necessária para regular a tensão em um determinado valor. Neste caso, se o valor de tensão desejado é 0,95 p.u, é necessário injetar aproximadamente 4 MVar de potência reativa capacitiva na barra 2.

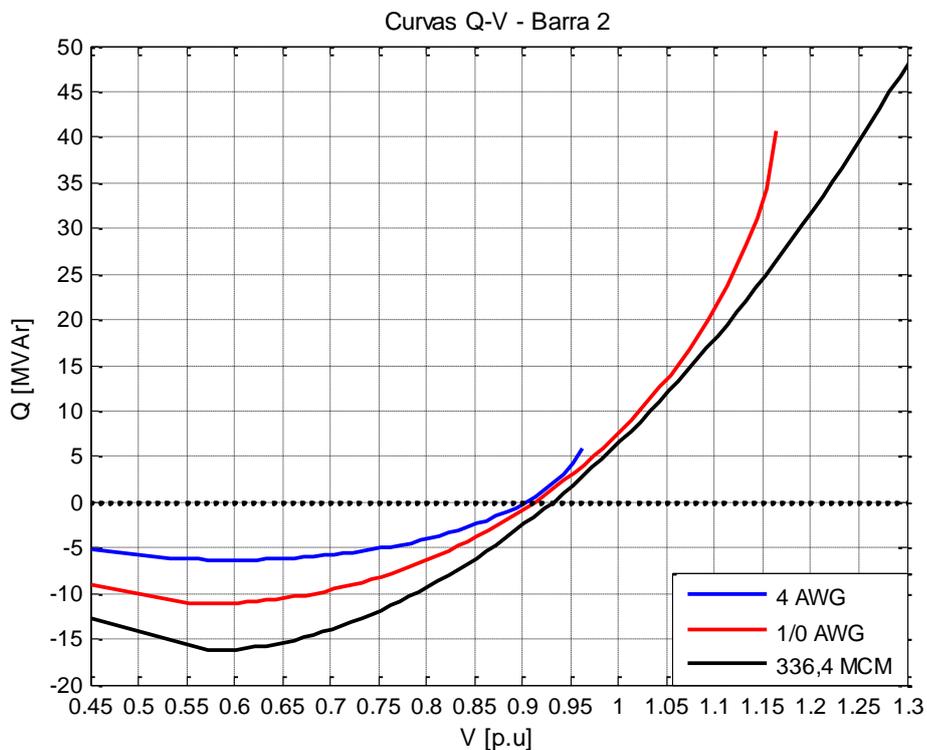


Figura 25: Curvas Q-V da barra 2 para diferentes tipos de cabos, considerando 50% de carregamento do sistema.
Fonte: Autoria própria.

As curvas Q-V das demais barras do sistema apresentaram o mesmo comportamento da curva Q-V da barra 2 e portanto não foram apresentadas. Os resultados obtidos na Figura 25, referente a curva Q-V da barra 2, mostram que com o cabo com a maior relação R/X, 4 AWG, os níveis de tensão que podem ser obtidos através da injeção de potência reativa são menores. As curvas Q-V de cada barra, quando o sistema está utilizando o cabo 4 AWG tendem a ficar mais inclinadas quando comparadas às curvas dos demais cabos, isto quer dizer que para uma pequena variação de tensão, é necessária uma maior injeção de potência reativa. Ainda para o cabo com a maior relação R/X, pode-se observar que a margem de carregamento reativa é menor para cada barra, ou seja, o sistema está mais propenso a ocorrência de um colapso de tensão devido ao aumento da potência reativa indutiva nesta barra.

Para visualizar o efeito da injeção de potência reativa e mostrar a relação entre as curvas P-V e Q-V, na Figura 26 foram traçadas duas curvas P-V para a barra 2, uma delas sem a injeção de potência reativa e a outra com a injeção de potência reativa.

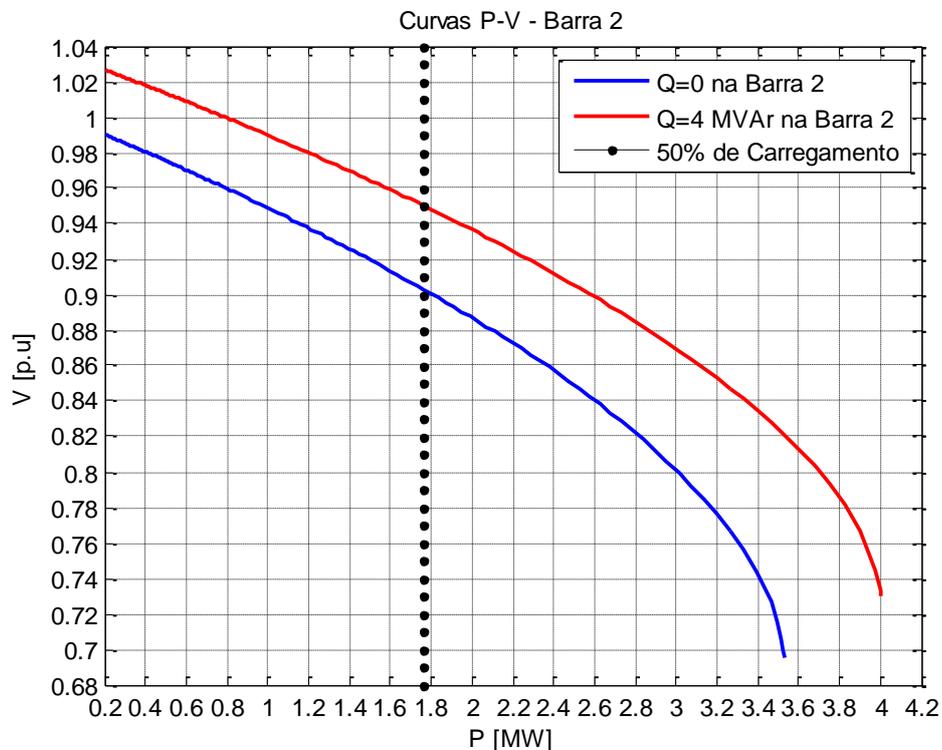


Figura 26: Efeito da injeção de potência reativa na curva P-V da barra 2 com o cabo 4 AWG.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 26, as linhas pontilhadas na vertical indicam o ponto de operação, o qual representa um carregamento de 50% da capacidade total do sistema. Pode-se observar que após a injeção de potência reativa na barra 2, os níveis de tensão da curva P-V aumentaram uniformemente e conseqüentemente, a tensão no ponto de operação também aumentou. Como esperado, o nível de tensão que antes era aproximadamente 0,9 p.u mudou para aproximadamente 0,95 p.u conforme as informações obtidas através da curva Q-V.

Na Tabela 9 estão apresentados os valores de injeção de potência reativa necessários para elevar a tensão em 0,05 p.u. Estes valores referem-se ao sistema com um carregamento de 50% de sua capacidade total e foram obtidos com maior precisão através da análise das curvas Q-V. No caso referente à Figura 26 foi considerada uma injeção de potência reativa de 4 MVar na barra 2, para o cabo 4 AWG, e como pode ser observado na Tabela 9, o valor preciso é de 4,2448 MVar.

Tabela 9: Injeção de potência reativa necessária para realizar a mesma variação de tensão em cada barra.

Cabo	Variação de tensão [p.u]	Potência reativa necessária [MVar]			
		Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5
4 AWG	0,05	4,2448	1,8662	1,5682	0,9993
1/0 AWG	0,05	4,0659	1,8945	1,6352	1,0641
336,4 MCM	0,05	4,7157	2,2501	1,7330	1,1729

Fonte: Autoria própria.

5.2.4 Análise da Sensibilidade V-Q

Semelhante ao índice de estabilidade de tensão que identifica as barras mais propensas à ocorrência da instabilidade, há o índice de sensibilidade V-Q que fornece informações sobre a estabilidade do sistema e o comportamento da tensão de determinada barra devido à variação da potência reativa.

Para índices de sensibilidade V-Q positivos, quanto menor for o valor do índice, mais estável será o sistema, ou seja, “maior será a margem de estabilidade de tensão do sistema”. Caso seja negativo, o sistema será instável. Para realizar o cálculo dos índices de sensibilidade V-Q foi necessário construir a matriz Jacobiana do sistema, a qual foi obtida através da ferramenta MATPOWER. Após isto, os índices de sensibilidade V-Q foram calculados através da equação (3.51) para cada tipo de cabo e com três valores distintos de carregamento do sistema, 25%, 50% e 75%. Os

resultados em questão são apresentados na Figura 27. Todas as sensibilidades V-Q obtidas foram positivas, portanto, o sistema está operando de forma estável. Para os três valores de carregamento e para os três tipos de cabos, os resultados foram semelhantes, a barra com a menor sensibilidade V-Q é a barra 2, portanto, é considerada a barra mais estável, ou seja, “é a barra com a maior margem de estabilidade de tensão”. A barra com a maior sensibilidade V-Q é a barra 5, considerada a menos estável, ou seja, “a barra com a menor margem de estabilidade de tensão”.

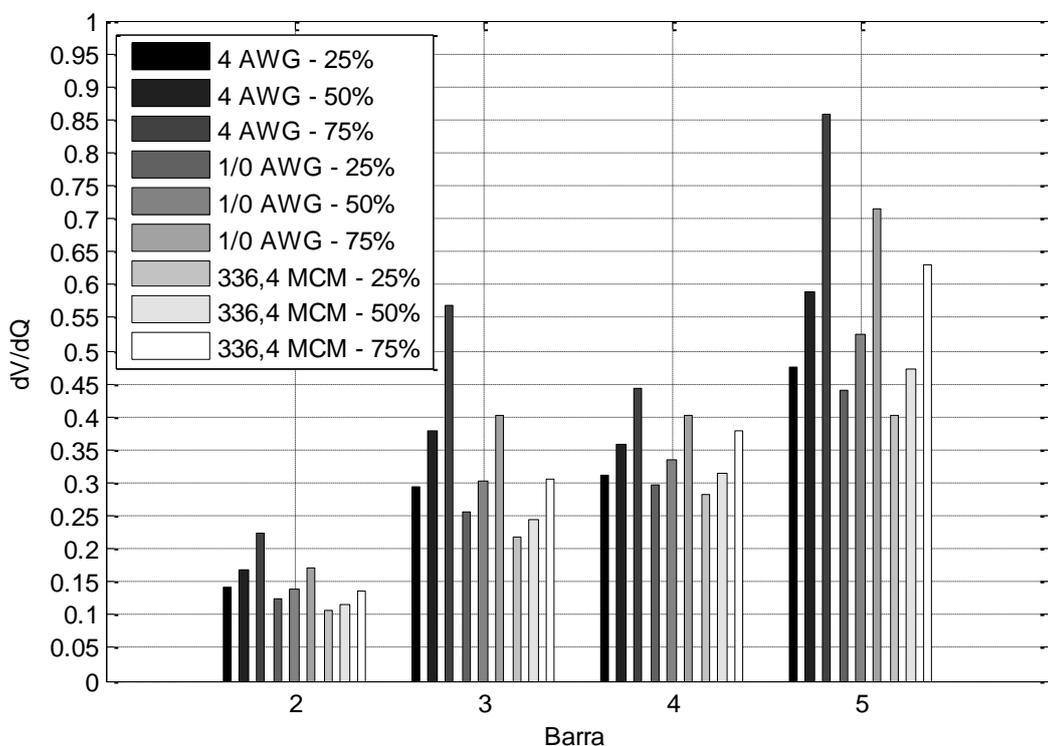


Figura 27: Índice de sensibilidade V-Q para diferentes carregamentos e diferentes tipos de cabos.

Fonte: Autoria própria.

A barra 5 é a barra mais sensível à variação de potência reativa, pois para um determinado valor de variação de potência reativa, a variação da tensão é maior quando comparada às demais barras. Levando em consideração as sensibilidades das barras 2 e 5 para o carregamento de 75% com o cabo de 336,4 MCM, a sensibilidade da barra 2 é 0,1361 e da barra 5 é 0,6308. Sabe-se que:

$$\frac{\Delta V}{\Delta Q} = \text{Sensibilidade}, \quad (5.1)$$

então, se houver uma variação de 0,1 p.u de potência reativa na barra 2, a variação da tensão será 0,0136 p.u. Se houver uma variação de 0,1 p.u de potência reativa na barra 5, a variação da tensão será 0,0630 p.u. Pode-se observar que a variação da tensão na barra 5 é aproximadamente 4,63 vezes maior, portanto, a probabilidade de ocorrer um colapso de tensão devido ao acréscimo de potência reativa é maior na barra 5.

Para relacionar as sensibilidades V-Q com as curvas Q-V, foram calculados os valores de potência reativa necessária para elevar a tensão em 0,05 p.u. Na Tabela 10 estão apresentados os resultados obtidos através dos dois métodos e seus respectivos erros.

Tabela 10: Comparação dos resultados obtidos através das sensibilidades V-Q e curvas Q-V.

Cabo 336,4 MCM – Variação de 0,05 p.u de tensão				
Potência reativa necessária				
	Carregamento	Sensibilidade V-Q [MVar]	Curvas Q-V [MVar]	Erro [%]
Barra 2	25%	4,7170	4,9976	5,9487
	50%	4,3141	4,7157	9,3090
	75%	3,6738	3,9933	8,6967
Barra 3	25%	2,3052	2,4455	6,0862
	50%	2,0383	2,2501	10,3910
	75%	1,6287	1,7888	9,8299
Barra 4	25%	1,7737	1,8731	5,6041
	50%	1,5853	1,7330	9,3168
	75%	1,3238	1,4314	8,1281
Barra 5	25%	1,2447	1,3175	5,8488
	50%	1,0584	1,1729	10,8180
	75%	0,7926	0,8759	10,5100

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 10 contém informações das barras 2, 3, 4 e 5 para três carregamentos distintos, 25%, 50% e 75%, considerando o cabo de 336,4 MCM. Para a obtenção dos resultados através da sensibilidade V-Q foi considerado uma variação de tensão de 0,05 p.u e as sensibilidades de cada barra para cada carregamento foram obtidas através da Figura 27. Após a obtenção destas, a variação de potência reativa foi calculada através da equação (5.1). O resultado desta equação é dado em p.u, portanto foi necessário multiplicá-lo pela potência de base, que neste caso é 10 MVA. Para a obtenção dos resultados através das curvas Q-V, foram utilizadas as curvas de cada barra para cada carregamento, onde verificou-se a quantidade de potência reativa necessária para elevar a tensão do ponto de operação em 0,05 p.u.

Através dos resultados obtidos, apresentados na Tabela 10, observa-se que o erro relativo foi menor para o carregamento de 25% e maior para o carregamento de 50%. As sensibilidades V-Q são obtidas através da matriz Jacobiana e portanto, cada sensibilidade é uma derivada, a qual indica um coeficiente de inclinação para determinado ponto de operação. Ou seja, o índice de sensibilidade é uma linearização que tem validade apenas para as vizinhanças do ponto de operação analisado. Logo, para que os resultados sejam mais precisos é necessário realizar a comparação para uma menor variação de tensão.

5.2.5 Impactos da Geração Distribuída na Estabilidade de Tensão

Os resultados obtidos anteriormente com diferentes tipos de cabos mostraram que os efeitos no comportamento do sistema, relacionado às curvas P-V e Q-V, foram semelhantes, ou seja, para cada tipo de cabo, a capacidade máxima de transferência de potência e a margem de potência reativa variaram de maneira uniforme em todas as barras. Nos índices de estabilidade e sensibilidade, mesmo com a alteração do cabo, a barra considerada mais fraca e menos estável continua sendo a mesma. Portanto, para a análise do efeito da inserção da geração distribuída neste sistema, os testes foram realizados considerando apenas o cabo de 336,4 MCM.

Levando em consideração os resultados obtidos através dos índices de estabilidade e sensibilidade, a barra 5 é classificada como a barra mais fraca e menos estável, e portanto, de acordo com Raja, Selvan e Kumaresan (2013) é a barra mais indicada para a inserção da geração distribuída.

Primeiramente, foram traçadas as curvas P-V de cada barra para três valores distintos de inserção da GD na barra 5 com fator de potência unitário. Os níveis de inserção da GD considerados são 10%, 25% e 50% da capacidade total de carregamento do sistema.

As curvas P-V da barra 5 são apresentadas na Figura 28, onde é possível observar que quanto maior é a inserção da GD, maior é nível de tensão e maior é a capacidade do sistema transferir potência sem que ocorra um colapso de tensão. As curvas das demais barras também apresentaram a elevação nos níveis de tensão e o aumento na capacidade de transferência potência, portanto, não foram apresentadas.

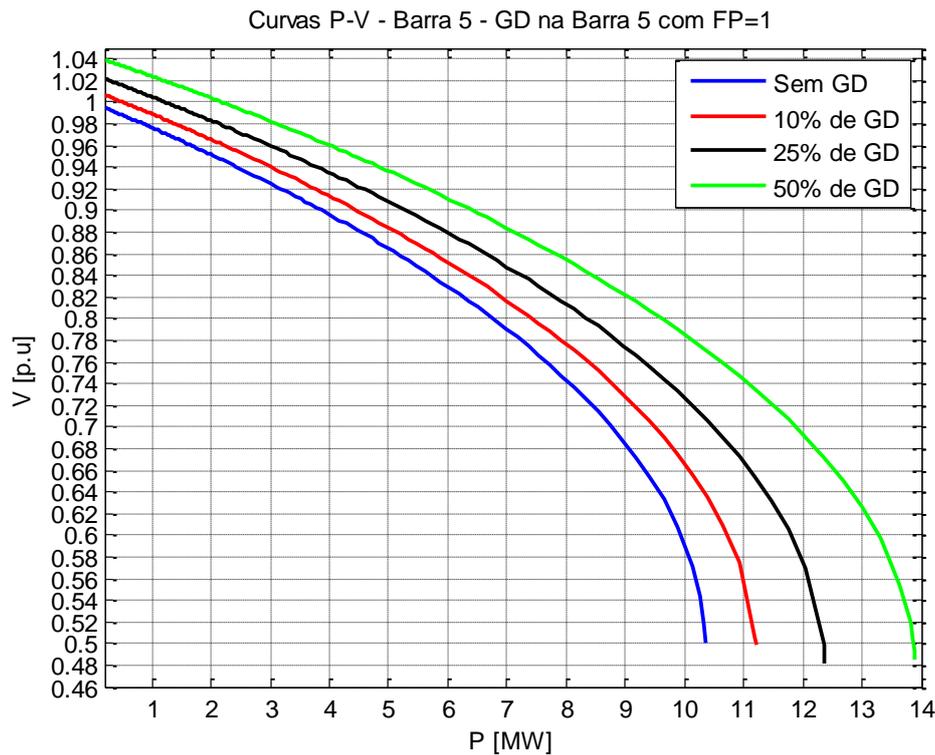


Figura 28: Curvas P-V da barra 5 após a inserção da GD na barra 5 com FP=1.
Fonte: Autoria própria.

Para observar o efeito da inserção da GD nos índices de estabilidade de tensão, os mesmos foram calculados para as mesmas condições de inserção considerando o sistema com um carregamento de 50% de sua capacidade total. Os resultados obtidos, apresentados a seguir na Figura 29, mostram que mesmo com a inserção da GD apenas na barra 5, os valores dos índices aumentaram em todas as barras, assim como os níveis de tensão e a capacidade de transferência de potência nas curvas P-V. Conclui-se então que a margem de estabilidade de tensão do sistema aumentou com a inserção da GD. Como pode ser visto, quanto maior é a inserção da GD, maior é a capacidade de transferência de potência e maior são os valores dos índices de estabilidade obtidos.

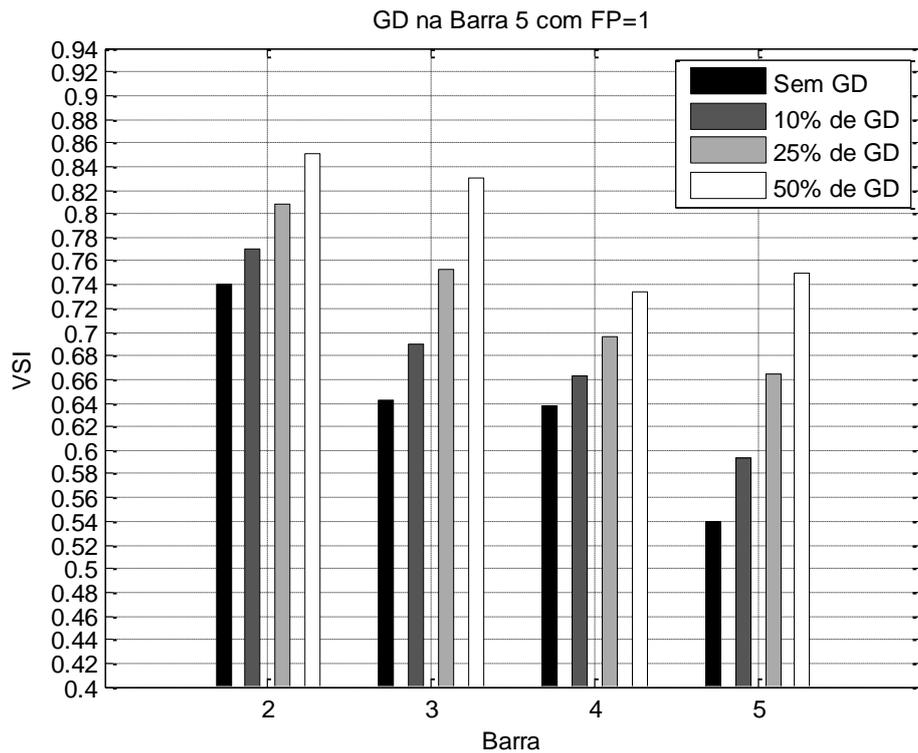


Figura 29: Índice de estabilidade de tensão (VSI) após a inserção da GD na barra 5 com FP=1.

Fonte: Autoria própria.

Para comparar o efeito da inserção da GD em diferentes barras, a mesma foi inserida em cada barra e seus respectivos índices foram calculados. Na Figura 30, pode-se observar que os índices calculados são maiores em três das quatro barras com a inserção da GD na barra 5. A Tabela 11 contém as informações detalhadas da porcentagem de aumento dos valores dos índices em relação ao sistema sem a GD. Cada coluna representa o efeito da inserção em uma determinada barra, a qual é representada por uma determinada linha. Através destes resultados, é possível verificar que a inserção da GD na barra 5 possui maior contribuição com o sistema, conforme indicado pelos índices de estabilidade e sensibilidade.

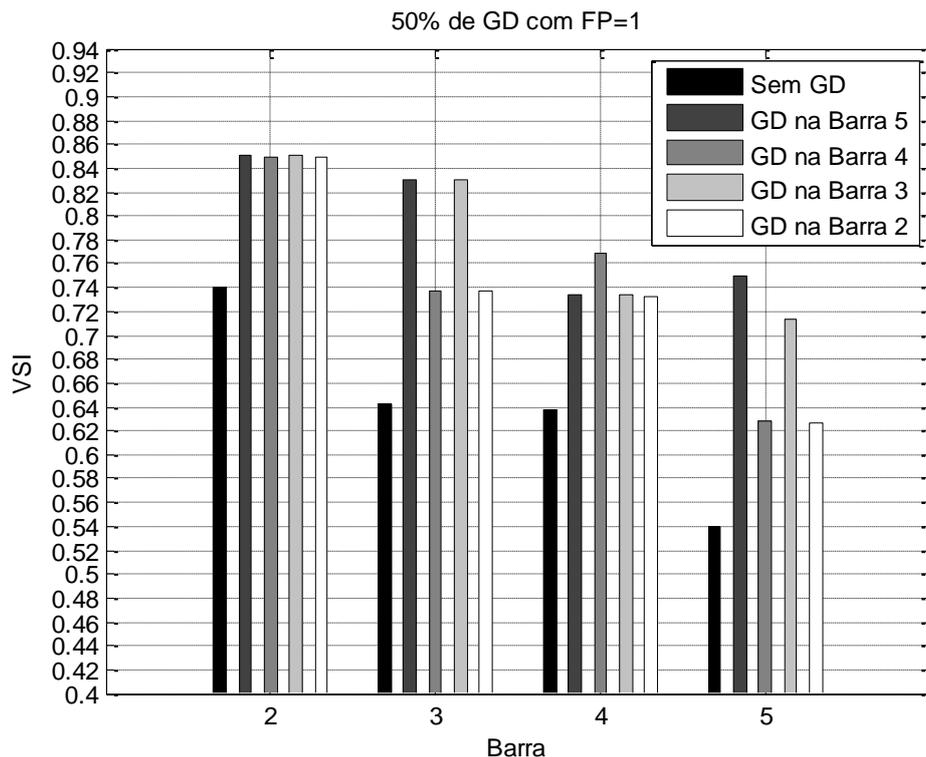


Figura 30: Índice de estabilidade de tensão (VSI) após a inserção da GD em diferentes barras.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 11: Aumento do índice de estabilidade de tensão (VSI) em relação ao sistema sem GD para a inserção em diferentes barras.

Aumento do VSI em relação ao sistema sem GD [%]				
Barra	GD na Barra 5	GD na Barra 4	GD na Barra 3	GD na Barra 2
2	12,9084	12,8021	12,8844	12,7796
3	22,7226	12,9132	22,6825	12,8900
4	13,0294	17,0100	13,0046	12,8960
5	28,0924	14,0387	24,4594	14,0137

Fonte: Autoria própria.

Após visualizar o efeito da inserção da GD com o fator de potência unitário e verificar que a barra 5 é a barra que mais contribui com o aumento da margem de estabilidade de tensão, foram realizados novos testes com a inserção da GD nesta barra considerando o efeito da potência reativa. Foi considerada uma GD com fator de potência igual à 0,8, capacitivo e indutivo, onde a potência ativa equivale à 5,17 MW e a potência reativa à 3,88 MVar. Para avaliar o efeito desta inserção, foram traçadas as curvas P-V e Q-V da barra 5. Foram calculados também, os índices de sensibilidade V-Q, considerando o sistema com um carregamento de 50% de sua capacidade total. As curvas P-V da barra 5 foram traçadas através do *software* ANAREDE, as quais estão apresentadas na Figura 31. Foram traçadas quatro curvas

P-V que representam o efeito sem a GD, a GD apenas com potência ativa e a GD com o fator de potência capacitivo e indutivo.

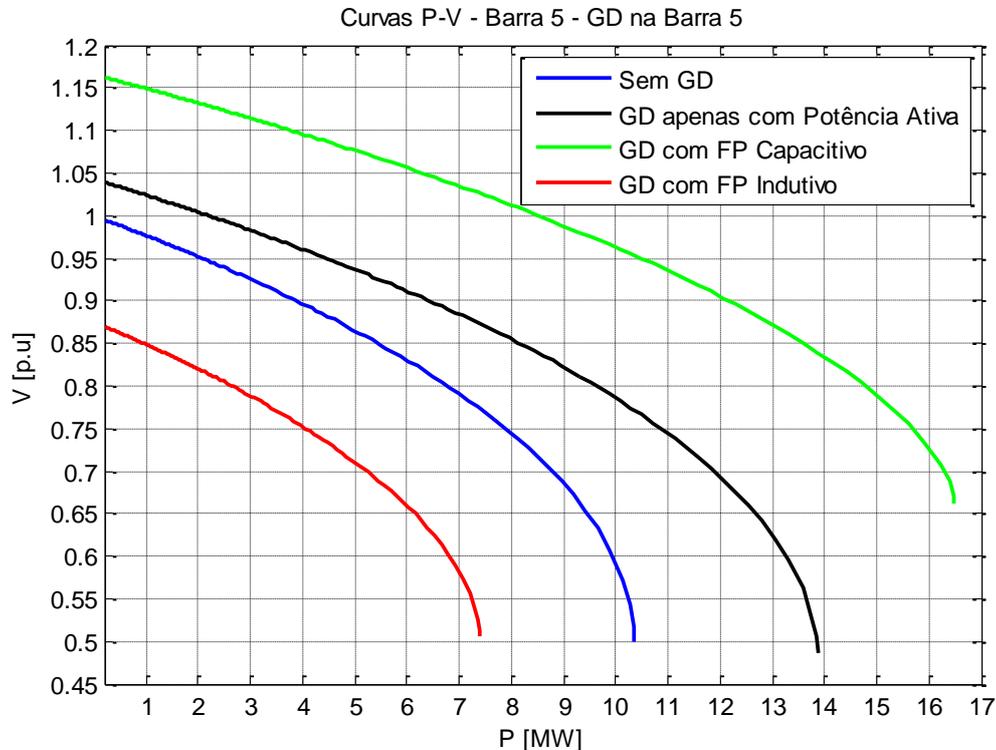


Figura 31: Curvas P-V da barra 5 após a inserção da GD na barra 5 com diferentes níveis de injeção de potência reativa.
Fonte: Autoria própria.

Através da Figura 31, é possível observar que quando a GD fornece apenas potência ativa, os níveis de tensão e a capacidade máxima de transferência de potência são ampliados, conforme apresentado anteriormente nas curvas P-V para diferentes inserções de GD. Quando a GD opera com fator de potência capacitivo, estes limites são ampliados novamente, mostrando-se mais apropriada em casos onde o sistema apresente carregamentos elevados. Enquanto que a GD operando com fator de potência indutivo, reduz a capacidade máxima de transferência de potência, tornando o sistema mais fraco reduzindo os níveis de tensão e diminuindo a margem de estabilidade.

As curvas Q-V da barra 5, apresentadas na Figura 32, foram traçadas através do *software* ANAREDE considerando um carregamento de 50% da capacidade total do sistema. Pode-se observar que ocorreram variações na margem de carregamento de potência reativa, para a GD com fator de potência indutivo, a margem foi reduzida quando comparada ao sistema sem a GD, enquanto que a GD

apenas com potência ativa e com fator de potência capacitivo aumentaram esta margem. Estes resultados mostram que as características de regulação de tensão da barra 5 sofrem influências relevantes devido à presença da GD.

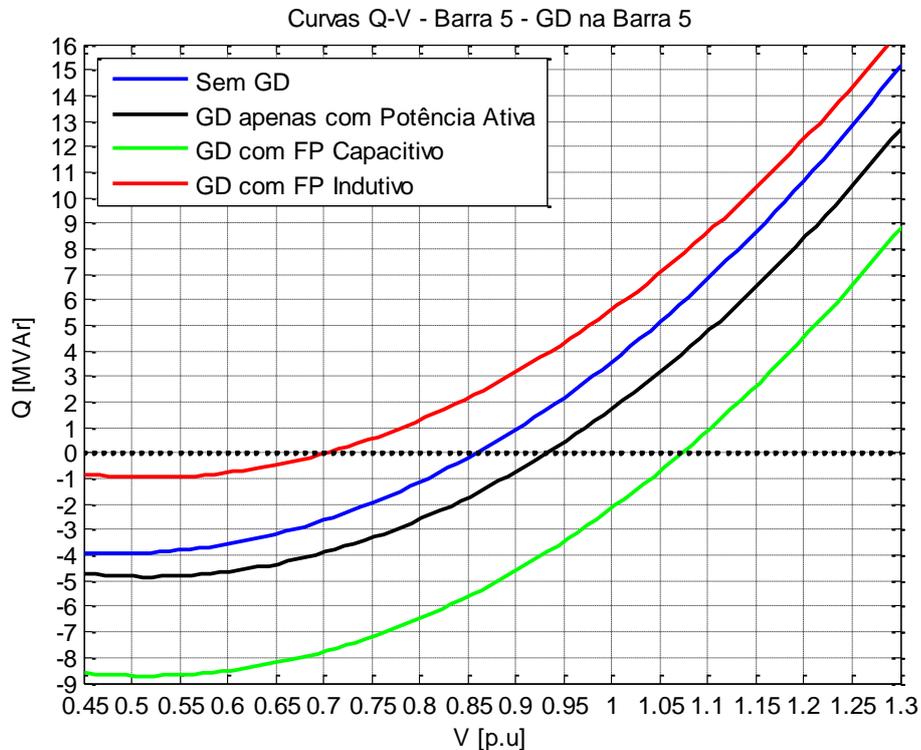


Figura 32: Curvas Q-V da barra 5 após inserção da GD na barra 5 com diferentes níveis de injeção de potência reativa.
Fonte: Autoria própria.

Como mostrado anteriormente através do cálculo da potência reativa necessária para elevar o nível de tensão, conforme a Tabela 10, pode-se observar que as sensibilidades V-Q fornecem as mesmas informações que as curvas Q-V. Diante disto, as sensibilidades V-Q foram calculadas para cada barra e para cada nível de injeção de potência reativa da GD. O carregamento considerado para o cálculo destas sensibilidades foi de 50% da capacidade total do sistema. Os resultados obtidos podem ser visualizados na Figura 33. Através da Figura 33, é possível relacionar as sensibilidades V-Q da barra 5 com as curvas Q-V da barra 5 apresentadas na Figura 32. Quanto maior é o índice de sensibilidade, menor é a margem de carregamento de potência reativa na curva Q-V. Por exemplo, o maior índice de sensibilidade da barra 5 equivale à curva Q-V com a geração distribuída com fator de potência indutivo, enquanto que o menor índice equivale à GD com fator de potência capacitivo.

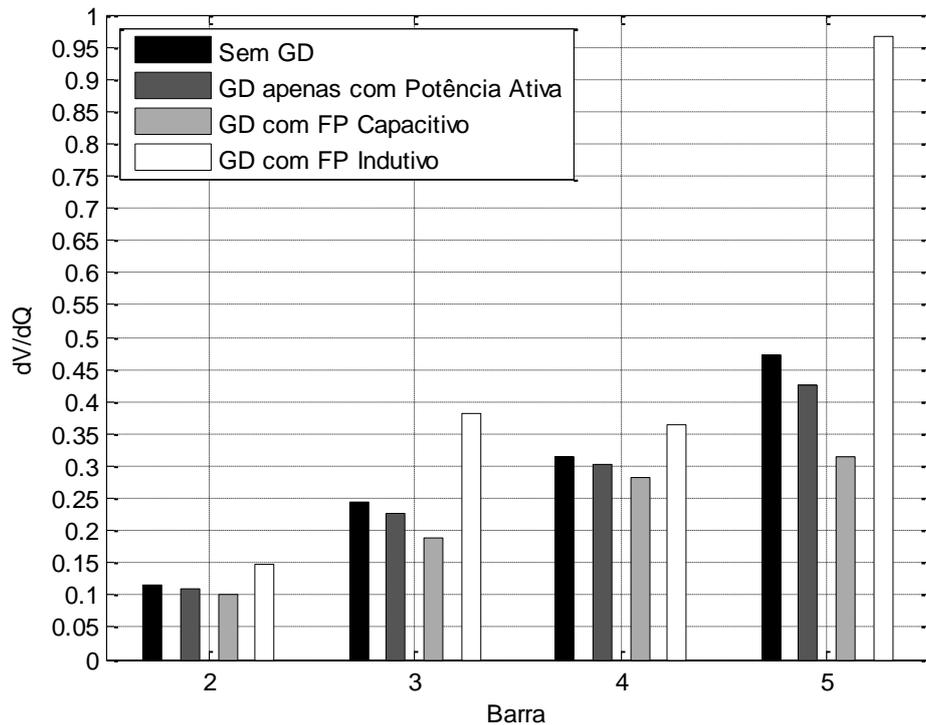


Figura 33: Índice de sensibilidade V-Q após a inserção da GD na barra 5 com diferentes níveis de injeção de potência reativa.

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 12 estão apresentadas as variações das sensibilidades V-Q para diferentes níveis de injeção de potência reativa da GD. A redução nos valores das sensibilidades V-Q representam um aumento da margem de estabilidade, enquanto que o aumento das sensibilidades representam uma redução da margem de estabilidade.

Tabela 12: Variação da sensibilidade V-Q após a inserção da GD na barra 5 com diferentes níveis de injeção de potência reativa.

Barra	Variação da sensibilidade V-Q em relação ao sistema sem GD [%]		
	GD apenas com Potência Ativa	GD com FP Capacitivo	GD com FP Indutivo
2	-4,6229	-15,3972	22,1054
3	-8,4636	-30,4508	35,9083
4	-4,5169	-12,2867	13,2891
5	-10,9061	-49,8799	51,1797

Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar que, para todas as barras, com a presença da GD fornecendo apenas potência ativa e a GD com fator de potência capacitivo, as sensibilidades diminuíram. Já com a GD com fator de potência indutivo, as sensibilidades aumentaram. Isto quer dizer que com a GD com fator de potência

capacitivo, o sistema apresentou características mais estáveis, ou seja, “apresentou um aumento na margem de estabilidade”, enquanto que com o fator de potência indutivo, o sistema apresentou características menos estáveis, ou seja, “apresentou uma redução na margem de estabilidade”, tornando o sistema mais propenso a ocorrência de um colapso de tensão.

5.3 SISTEMA TESTE 2

O segundo sistema utilizado neste trabalho, representado pela Figura 34, trata-se de um sistema de distribuição radial composto por trinta e três barras. Este sistema é tipicamente utilizado para a realização de estudos relacionados à estabilidade de tensão (KUMAR; SELVAN, 2009; RUGTHAICHAROENCHEEP; NEDPHOGRAW; WANARATWIJIT, 2011; EMINOGLU; HOCAOGLU, 2007; RAJA; SELVAN; KUMARESAN, 2013). Os dados completos deste sistema podem ser encontrados no Apêndice B.

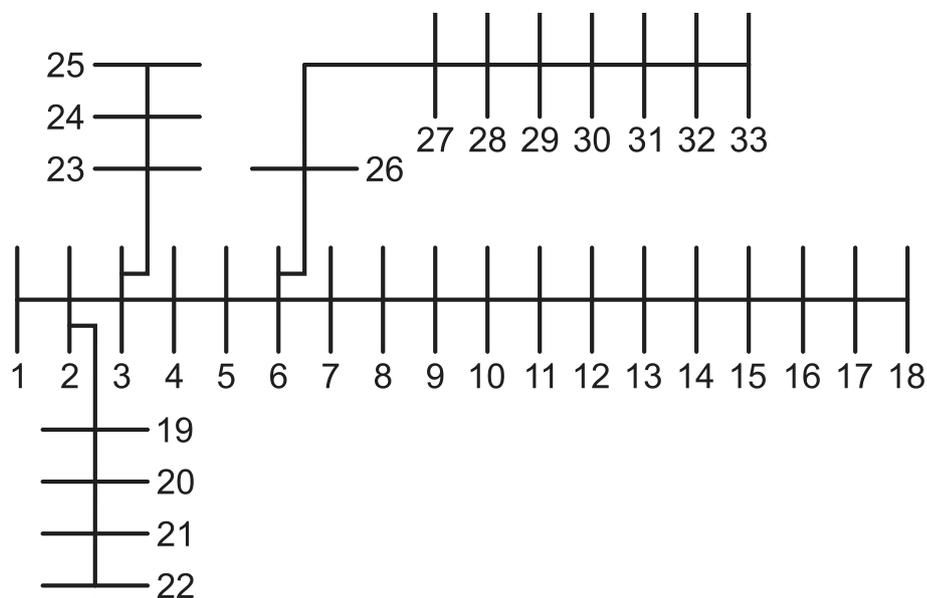


Figura 34: Diagrama unifilar do sistema teste 2.

Fonte: Adaptado de Selvan e Swarup (2004, p. 1172).

5.3.1 Índices de Estabilidade de Tensão para Redes de Distribuição

Com o objetivo de validar e comprovar os resultados qualitativos obtidos com o sistema teste fictício, alguns dos estudos já realizados foram repetidos para este sistema, tais como a identificação da barra mais fraca, o efeito da inserção da GD e a estimativa do carregamento máximo.

Os índices de estabilidade de tensão VSI foram calculados para este sistema considerando o carregamento apresentado no Apêndice B, cerca de 27,621% de sua capacidade total, onde o carregamento de potência ativa equivale à 3,715 MW e de potência reativa à 2,300 MVar. A inserção da GD foi considerada com o fator de potência unitário, possuindo potência ativa de 0,930 MW que é equivalente a 25% do carregamento de potência ativa do sistema. Na Figura 35 são apresentados os índices VSI do sistema sem a GD e com a inserção da GD em três barras distintas. As barras escolhidas foram a 18, 6 e 19, que respectivamente representam o menor valor, um valor intermediário e o maior valor dos índices VSI.

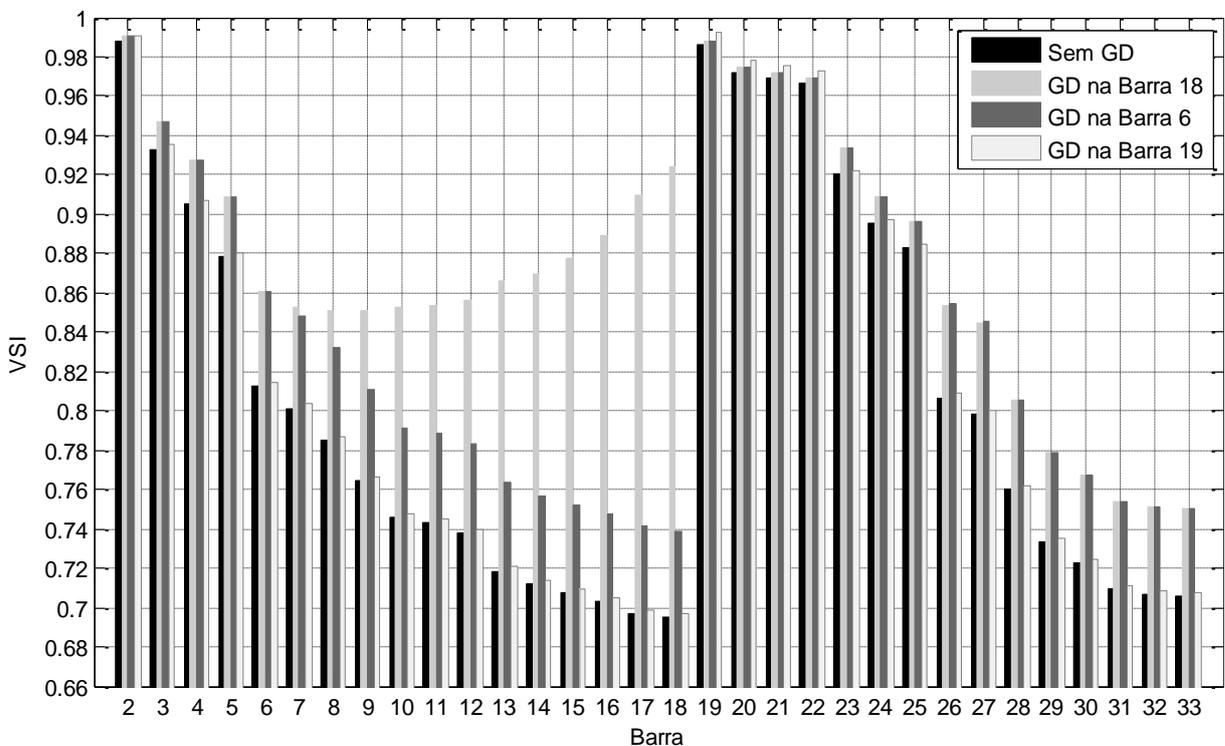


Figura 35: Índice de estabilidade de tensão (VSI) após a inserção da GD em diferentes barras do sistema teste 2.

Fonte: Autoria própria.

Através da Figura 35 é possível visualizar que a inserção da GD na barra 18 resultou na melhor contribuição para a estabilidade de tensão do sistema, ou seja, resultou na maior expansão da margem de estabilidade de tensão do sistema. A segunda maior contribuição foi da barra 6 e a menor contribuição foi da barra 19. Portanto, pode-se concluir que quanto maior é o valor do índice, menor é a contribuição da inserção da GD para a melhoria da margem de estabilidade de tensão do sistema.

Na Tabela 13 estão apresentadas as porcentagens de aumento do índice VSI devido a inserção da GD em cada barra em relação ao sistema sem a GD. Cada coluna representa o efeito da inserção em uma determinada barra, a qual é representada por uma determinada linha.

Tabela 13: Aumento do índice de estabilidade de tensão (VSI) em relação ao sistema sem GD para a inserção em diferentes barras.

Aumento do VSI em relação ao sistema sem GD [%]			
Barra	GD na Barra 18	GD na Barra 6	GD na Barra 19
2	0,2322	0,2329	0,2159
3	1,4962	1,5006	0,2220
4	2,4149	2,4218	0,2256
5	3,3841	3,3937	0,2292
6	5,5394	5,5568	0,2387
7	5,9844	5,5625	0,2403
8	7,7054	5,6185	0,2428
9	10,1422	5,6925	0,2461
10	12,5515	5,7617	0,2493
11	12,9920	5,7716	0,2497
12	13,8306	5,7897	0,2505
13	17,0421	5,8645	0,2539
14	18,1936	5,8919	0,2552
15	19,4062	5,9093	0,2559
16	20,9010	5,9262	0,2567
17	23,3872	5,9514	0,2579
18	24,7696	5,9589	0,2582
19	0,2319	0,2326	0,5963
20	0,2336	0,2343	0,6007
21	0,2339	0,2346	0,6016
22	0,2342	0,2349	0,6023
23	1,4923	1,4966	0,2236
24	1,5129	1,5172	0,2267
25	1,5230	1,5274	0,2282
26	5,5271	5,5445	0,2395
27	5,5567	5,5742	0,2408
28	5,6921	5,7099	0,2469
29	5,7894	5,8075	0,2513
30	5,8317	5,8500	0,2533
31	5,8826	5,9010	0,2556
32	5,8936	5,9120	0,2561
33	5,8970	5,9155	0,2562

Fonte: Autoria própria.

As estimativas do carregamento máximo da barra mais fraca e do carregamento máximo do sistema foram realizadas conforme especificado anteriormente no sistema fictício. Os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14: Carregamento máximo da barra mais fraca para diferentes condições de carregamento do sistema (VSI).

Carregamento máximo da barra mais fraca			
Carregamento do sistema (%)	VSI [MW]	ANAREDE [MW]	Erro [%]
27,621	0,283		15,194
60,000	0,291	0,326	12,027
95,000	0,313		4,153

Fonte: Autoria própria.

Tabela 15: Carregamento máximo do sistema para diferentes condições de carregamento do sistema (VSI).

Carregamento máximo do sistema reduzido			
Carregamento do sistema (%)	VSI [MW]	ANAREDE [MW]	Erro [%]
27,621	18,572		27,568
60,000	17,632	13,452	23,707
95,000	15,583		13,675

Fonte: Autoria própria.

As estimativas foram realizadas para diferentes pontos de operação, ou seja, para diferentes condições de carregamento do sistema devido aos estudos realizados por Augugliaro, Dusonchet e Mangione (2007), os quais mostram que os valores estimados se aproximam mais do valor real quando o carregamento está chegando próximo de seu limite. Os valores considerados reais foram obtidos através do *software* ANAREDE e os respectivos erros foram calculados.

5.3.2 Análise da Sensibilidade V-Q

No sistema fictício as sensibilidades V-Q foram utilizadas para identificar as barras mais propensas a ocorrência de um colapso de tensão, foram relacionadas com as curvas Q-V e foram utilizadas para analisar o comportamento do sistema devido a inserção da GD com fator de potência unitário.

Para o sistema teste 2, as sensibilidades V-Q foram calculadas com o objetivo de identificar as barras consideradas menos estáveis e analisar o comportamento do sistema devido a inserção da GD em diferentes barras. As

sensibilidades V-Q foram calculadas para as mesmas condições dos índices VSI, considerando o mesmo carregamento, a mesma inserção de GD e as mesmas barras. Na Figura 36 são apresentadas as sensibilidades V-Q sem a GD e com a inserção da GD em três barras distintas. A Tabela 16 contém as informações detalhadas da variação das sensibilidades V-Q para cada inserção da GD.

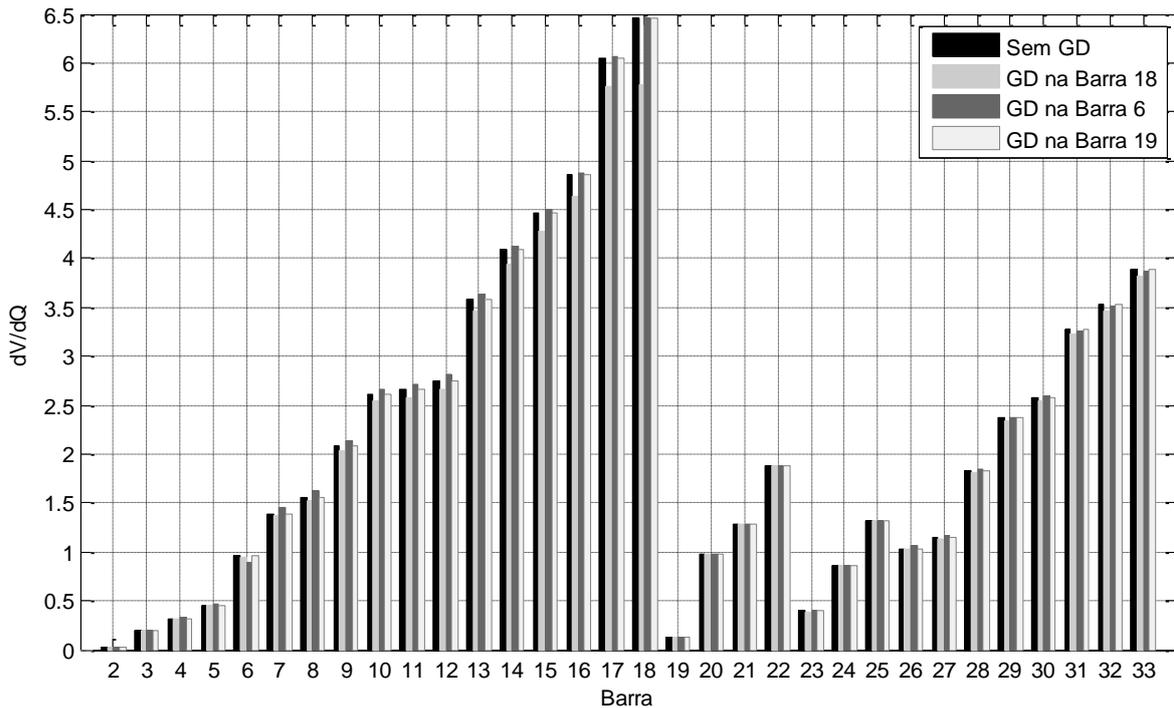


Figura 36: Índice de sensibilidade V-Q das barras do sistema teste 2.
Fonte: Autoria própria.

Tabela 16: Variação da sensibilidade V-Q após a inserção da GD em diferentes barras.

Barra	Variação da sensibilidade V-Q em relação ao sistema sem GD [%]		
	GD na Barra 18	GD na Barra 6	GD na Barra 19
2	-0,0612	0,1290	-0,0539
3	-0,3887	0,7939	-0,0586
4	-0,6268	1,2697	-0,0607
5	-0,8771	1,7456	-0,0629
6	-1,3793	-7,9570	-0,0672
7	-1,3830	5,1178	-0,0662
8	-1,7714	4,4335	-0,0671
9	-2,2691	3,0158	-0,0676
10	-2,7938	2,1219	-0,0684
11	-2,9034	2,0540	-0,0686
12	-3,1096	1,9320	-0,0690
13	-3,8324	1,1350	-0,0697
14	-4,0658	0,8050	-0,0697
15	-4,3322	0,6096	-0,0697
16	-4,6905	0,4364	-0,0697

Barra	GD na Barra 18	GD na Barra 6	GD na Barra 19
17	-5,2638	0,0411	-0,0693
18	-11,6956	-0,0593	-0,0692
19	-0,0589	-0,0149	-0,6400
20	-0,0589	-0,0533	0,0435
21	-0,0590	-0,0547	-0,0024
22	-0,0590	-0,0561	-0,0494
23	-0,3891	0,2030	-0,0581
24	-0,3949	-0,1180	-0,0587
25	-0,3967	-0,2149	-0,0589
26	-1,4126	2,5751	-0,0677
27	-1,4546	2,2282	-0,0684
28	-1,5906	0,8897	-0,0707
29	-1,6697	0,3456	-0,0727
30	-1,7092	0,1850	-0,0739
31	-1,7056	-0,1824	-0,0732
32	-1,7013	-0,2825	-0,0729
33	-1,6882	-0,3998	-0,0722

Fonte: Autoria própria.

Assim como nos índices VSI, a barra que está mais propensa à ocorrência de um colapso de tensão é a barra 18, a qual apresentou a maior sensibilidade V-Q e conseqüentemente é a barra considerada menos estável. Após a inserção da GD na barra 18, pode-se observar que todas as sensibilidades V-Q diminuíram, portanto o efeito da inserção refletiu positivamente em todas as barras, aumentando a margem de estabilidade de tensão do sistema. Já para a inserção na barra 6, as sensibilidades V-Q diminuíram em algumas barras e aumentaram em outras, ou seja, ao mesmo tempo que algumas barras tornaram-se mais estáveis, as demais barras tornaram-se menos estáveis. Para a inserção na barra 19, todas as sensibilidades V-Q diminuíram, tornando o comportamento do sistema mais estável. Quando as sensibilidades resultantes da inserção na barra 19 foram comparadas com às da inserção na barra 18, observou-se que a redução foi menor e, portanto, pode-se concluir que o melhor efeito obtido foi com a inserção da GD na barra 18.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentadas as ferramentas típicas utilizadas em estudos da estabilidade de tensão e das características de regulação de tensão de sistemas de distribuição. As curvas P-V e os índices de estabilidade forneceram informações sobre a proximidade do sistema ao colapso de tensão e realizaram a estimativa do carregamento máximo do sistema. As curvas Q-V e os índices de sensibilidade forneceram informações sobre a estabilidade do sistema e as características de regulação de tensão. Estas ferramentas podem ser utilizadas para o planejamento e operação do sistema de distribuição, possibilitando a execução de medidas preventivas para evitar a instabilidade de tensão e a proposição de estratégias efetivas para o controle de tensão.

Através destas ferramentas foi possível identificar a barra mais propensa a ocorrência de um colapso de tensão e realizar a estimativa do carregamento máximo do sistema. Através dos resultados obtidos nos dois sistemas teste adotados, observou-se que os valores estimados do carregamento máximo aproximaram-se mais do valor obtido através do *software* ANAREDE, quando o carregamento do sistema estava chegando próximo de seu limite. No sistema teste 2, a estimativa do carregamento máximo da barra mais fraca (barra 18) apresentou, para um carregamento de 27,621% da capacidade total do sistema, um erro relativo de 15,194%, enquanto que para um carregamento de 95% da capacidade total do sistema, apresentou um erro relativo de 4,153%. Através dos resultados referentes às características de regulação de tensão, observou-se os limites de potência reativa capacitiva e indutiva em determinada barra e também concluiu-se que a regulação de tensão através dos índices de sensibilidade pode ser mais precisa quando comparada com as análises a partir das curvas Q-V para pequenas variações de tensão.

Para o cabo com a maior relação R/X, quando comparado às demais relações R/X, a corrente admissível em regime permanente é menor e conseqüentemente está mais propenso a ser danificado devido ao seu limite térmico de operação. Nas curvas P-V, no ponto crítico de operação, a maior relação R/X apresentou a menor capacidade de transferir potência e o menor o nível de tensão. No sistema teste 1, a máxima transferência de potência obtida para a maior relação R/X foi de 3,50 MW enquanto que para a menor relação R/X foi de 10,34 MW. Nas

curvas Q-V, apresentou a maior quantidade de potência reativa necessária para realizar a manutenção do nível de tensão e a menor margem de carregamento de potência reativa para o sistema. Apresentou também, o menor índice de estabilidade e o maior índice de sensibilidade. Portanto, a maior relação R/X apresentou o maior impacto negativo na estabilidade de tensão e na regulação de tensão.

A inserção da GD foi realizada com três fatores de potência distintos, sendo eles unitário, capacitivo e indutivo. Nas curvas P-V, a GD com os fatores de potência unitário e capacitivo resultaram, no ponto crítico de operação, em uma maior capacidade de transferir potência e em uma maior magnitude de tensão ao longo do sistema. A GD com o fator de potência capacitivo apresentou resultados superiores quando comparado ao fator de potência unitário. Para o sistema teste 1, a máxima transferência de potência obtida com presença da GD com o fator de potência capacitivo foi de 16,49 MW e com a presença da GD com fator de potência unitário foi de 13,88 MW. Enquanto que a GD com o fator de potência indutivo, resultou, no ponto crítico de operação, na menor capacidade de transferir potência para o sistema e no menor nível de tensão para as barras do sistema. Para o sistema teste 1, a máxima transferência de potência obtida com presença da GD com o fator de potência indutivo foi de 7,39 MW. Nas curvas Q-V, a GD com os fatores de potência unitário e capacitivo aumentaram a margem de carregamento reativa enquanto que a GD com o fator de potência indutivo diminuiu esta margem. A GD com os fatores de potência unitário e capacitivo resultaram em maiores índices de estabilidade e menores índices de sensibilidade para o sistema, enquanto que a GD com o fator de potência indutivo resultou em menores índices de estabilidade e maiores índices de sensibilidade. Portanto, a GD com os fatores de potência unitário e capacitivo contribuíram com a estabilidade de tensão do sistema, o qual apresentou uma maior margem de estabilidade, enquanto que a GD com o fator de potência indutivo impactou de forma negativa na estabilidade de tensão do sistema, o qual apresentou uma menor margem de estabilidade.

REFERÊNCIAS

ABDEL-AKHER, M. Voltage Stability Analysis of Unbalanced Distribution Systems using Backward/Forward Sweep Load-Flow Analysis Method with Secant Predictor. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 7, p. 309-317, March 2013.

ACKERMANN, Thomas; ANDERSSON, Goran; SODER, Lennart. Distributed Generation: A Definition. **Electric Power Systems Research** **57**, p. 195-204, December 2000.

ALMEIDA, Adriano B. et al. Probabilistic Voltage Stability Assessment considering Renewable Sources with the help of the PV and QV Curves. **IET Renewable Power Generation**, v. 7, p. 521-530, September 2013.

ALONSO, M.; AMARIS, H. Voltage Stability in Distribution Networks with DG. **IEEE Bucharest PowerTech**, p. 1-6, July 2009.

ANEEL, Agência N. D. E. E. Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica - Revisão 6. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**, 2015.

AUGUGLIARO, Antonino; DUSONCHET, Luigi; MANGIONE, Stefano. Voltage Collapse Proximity Indicators for Radial Distribution Networks. **9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation**, Barcelona, 2007.

BAGHZOUZ, Y. Voltage Regulation and Overcurrent Protection Issues in Distribution Feeders with Distributed Generation - A Case Study. **Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences**, p. 66b, January 2005.

CELG, Centrais E. D. G. S. **NTD-08 Critérios de Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas**.

CHEBBO, A. M.; IRVING, M. R.; STERLING, M. J. H. Voltage Collapse Proximity Indicator: Behaviour and Implications. **IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution**, v. 139, p. 241-252, May 1992.

CHEN, Po-Chen; MALBASA, V.; KEZUNOVIC, M. Analysis of Voltage Stability Issues with Distributed Generation Penetration in Distribution Networks. **North American Power Symposium (NAPS)**, p. 1-6, September 2013.

COPEL, Companhia P. D. E. **NTC 841001 Projeto de Redes de Distribuição Urbana.**

COPEL, Companhia P. D. E. **NTC 810552/58 Cabo de Alumínio Tipo CA.**

CUTSEM, Thierry V.; VOURNAS, Costas. **Voltage Stability of Electric Power Systems.** New York: Springer Science+Business Media, 1998.

EMINOGLU, U.; HOCAOGLU, M. H. A Voltage Stability Index for Radial Distribution Networks. **42nd International Universities Power Engineering Conference**, p. 4-6, September 2007.

FERNANDES, Tatiane C. D. C. **Aplicação de Técnicas de Estimação Modal para Análise da Estabilidade a Pequenas Perturbações de Sistemas de Distribuição com Geração Distribuída.** 2012. 150p. Dissertação - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

GUEDES, Larissa D. M. **Localização e Dimensionamento de Unidades de Geração Distribuída em Redes de Distribuição Radiais.** 2006. 110p. Dissertação - Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

HEMDAN, Nasser G. A.; KURRAT, Michael. Distributed Generation Location and Capacity Effect on Voltage Stability of Distribution Networks. **Annual IEEE Conference Student Paper**, p. 15-26, February 2008.

HIRD, C.M. et al. Network Voltage Controller for Distributed Generation. **IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution**, v. 151, p. 150-156, March 2004.

JASMON, G B.; LEE, L H. C. C. Distribution Network Reduction for Voltage Stability Analysis and Loadflow Calculations. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 13, p. 9-13, 28 fev. 1992.

JENKINS, Nick et al. **Embedded Generation.** London: The Institution of Engineering and Technology, 2008.

KAGAN, Nelson; OLIVEIRA, Carlos C. B. D.; ROBBA, Ernesto J. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.** 2ª. ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 2010.

KERSTING, William H. **Distribution System Modeling and Analysis.** New York: CRC Press LCC, 2002.

KUMAR, K. V.; SELVAN, M. P. Planning and Operation of Distributed Generations in Distribution Systems for Improved Voltage Profile. **Power Systems Conference and Exposition**, p. 1-7, March 2009.

KUNDUR, P. et al. Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 19, p. 1387-1401, August 2004.

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

LEÃO, Ruth. **GTD – Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. 2009. Apostila - Universidade Federal do Ceará - Departamento de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2009.

MANSOUR, Moussa R. **Método Rápido para Análise de Contingências e Seleção de Controles Preventivos no Contexto de Estabilidade de Tensão**. 2013. 230p. Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

MASTERS, C.L. Voltage Rise: The Big Issue when Connecting Embedded Generation to Long 11 kV Overhead Lines. **Power Engineering Journal**, v. 16, p. 5-12, February 2002.

PILLCO, Edwin C. **A Importância da Região de Estabilidade no Problema de Análise de Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência**. 2011. 114p. Dissertação - Escola de Engenharia de São Paulo - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

PUJARA, A.J.; VAIDYA, G. Voltage Stability Index of Radial Distribution Network. **International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology (ICETECT)**, p. 180-185, March 2011.

RAJA, Pitchaimuthu; SELVAN, Manickavasagam P.; KUMARESAN, Natarajan. Enhancement of Voltage Stability Margin in Radial Distribution System with Squirrel Cage Induction Generator based Distributed Generators. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 7, p. 898-906, August 2013.

REIS, Cláudia S. M. M. D. **Determinação de Índices de Estabilidade de Tensão**. 2005. 142p. Dissertação - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2005.

RUGTHAICHAROENCHEEP, N.; NEDPHOGRAW, S.; WANARATWIJIT, W. Distribution System Operation for Power Loss Minimization and Improved Voltage Profile with Distributed Generation and Capacitor Placements. **4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)**, p. 1185-1189, July 2011.

SELVAN, M. P.; SWARUP, K. S. Distribution System Load Flow using Object-Oriented Methodology. **International Conference on Power System Technology**, v. 2, p. 1168-1173, November 2004.

SHORT, T. A. **Electric Power Distribution Handbook**. New York: CRC Press LLC, 2004.

SOUZA, Antonio C. Z. D. **New Techniques to Efficiently Determine Proximity to Static Voltage Collapse**. 1996. 133p. Thesis - University of Waterloo, Ontario, 1996.

TAYLOR, Carson W. **Power System Voltage Stability**. Singapore: McGraw-Hill, 1994.

USIDA, Wesley F. **Controle Fuzzy para Melhoria do Perfil de Tensão em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 2007. 143p. Dissertação - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

VIAWAN, Ferry A. **Voltage Control and Voltage Stability of Power Distribution System in the Presence of Distributed Generation**. 2008. 169p. Thesis - Division of Electric Power Engineering - Chalmers University of Technology, Göteborg, 2008.

APÊNDICE A – ESPECIFICAÇÕES DO SISTEMA TESTE 1

Este sistema é constituído por cinco barras, sendo uma barra de referência e quatro barras do tipo PQ. A Figura 17, apresentada anteriormente, representa o diagrama unifilar do sistema. Os dados de barra estão apresentados na Tabela 17 e os dados de linha na Tabela 18. Os valores em p.u estão referidos nas bases $S_{base}=10$ MVA e $V_{base}=13,8$ kV.

Tabela 17: Dados de barra do sistema teste 1.

Barra	Tipo	P_L [MW]	Q_L [MVAr]
1	REF	0,00	0,00
2	PQ	0,00	0,00
3	PQ	0,00	0,00
4	PQ	2,59	1,61
5	PQ	2,59	1,61

Fonte: Autoria própria.

Tabela 18: Dados de linha do sistema teste 1.

Barra de origem	Barra de destino	Resistência [p.u]	Reatância [p.u]
1	2	0,05	0,10
2	3	0,05	0,10
2	4	0,02	0,16
3	5	0,02	0,16

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE B – ESPECIFICAÇÕES DO SISTEMA TESTE 2

Este sistema é constituído por trinta e três barras, sendo uma barra de referência e trinta e duas barras do tipo PQ. A Figura 34, apresentada anteriormente, representa o diagrama unifilar do sistema. Os dados de barra estão apresentados na Tabela 19 e os dados de linha na Tabela 20. Os valores em p.u estão referidos nas bases $S_{base}=10$ MVA e $V_{base}=12,66$ kV.

Tabela 19: Dados de barra do sistema teste 2.

Barra	Tipo	PL [MW]	QL [MVar]
1	REF	0,0000	0,0000
2	PQ	0,1000	0,0600
3	PQ	0,0900	0,0400
4	PQ	0,1200	0,0800
5	PQ	0,0600	0,0300
6	PQ	0,0600	0,0200
7	PQ	0,2000	0,1000
8	PQ	0,2000	0,1000
9	PQ	0,0600	0,0200
10	PQ	0,0600	0,0200
11	PQ	0,0450	0,0300
12	PQ	0,0600	0,0350
13	PQ	0,0600	0,0350
14	PQ	0,1200	0,0800
15	PQ	0,0600	0,0100
16	PQ	0,0600	0,0200
17	PQ	0,0600	0,0200
18	PQ	0,0900	0,0400
19	PQ	0,0900	0,0400
20	PQ	0,0900	0,0400
21	PQ	0,0900	0,0400
22	PQ	0,0900	0,0400
23	PQ	0,0900	0,0500
24	PQ	0,4200	0,2000
25	PQ	0,4200	0,2000
26	PQ	0,0600	0,0250
27	PQ	0,0600	0,0250
28	PQ	0,0600	0,0200
29	PQ	0,1200	0,0700
30	PQ	0,2000	0,6000
31	PQ	0,1500	0,0700
32	PQ	0,2100	0,1000
33	PQ	0,0600	0,0400

Fonte: Adaptado de Selvan e Swarup (2004, p. 1173).

Tabela 20: Dados de linha do sistema teste 2.

Barra de origem	Barra de destino	Resistência [p.u]	Reatância [p.u]
1	2	0,0575	0,0293
2	3	0,3076	0,1567
3	4	0,2284	0,1163
4	5	0,2378	0,1211
5	6	0,5110	0,4411
6	7	0,1168	0,3861
7	8	0,4439	0,1467
8	9	0,6426	0,4617
9	10	0,6514	0,4617
10	11	0,1227	0,0406
11	12	0,2336	0,0772
12	13	0,9159	0,7206
13	14	0,3379	0,4448
14	15	0,3687	0,3282
15	16	0,4656	0,3400
16	17	0,8042	1,0738
17	18	0,4567	0,3581
2	19	0,1023	0,0976
19	20	0,9385	0,8457
20	21	0,2555	0,2985
21	22	0,4423	0,5848
3	23	0,2815	0,1924
23	24	0,5603	0,4424
24	25	0,5590	0,4374
6	26	0,1267	0,0645
26	27	0,1773	0,0903
27	28	0,6607	0,5826
28	29	0,5018	0,4371
29	30	0,3166	0,1613
30	31	0,6080	0,6008
31	32	0,1937	0,2258
32	33	0,2128	0,3308

Fonte: Adaptado de Selvan e Swarup (2004, p. 1173).