



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal  
de Campina Grande

RENATO PINTO DE ANDRADE FILHO



Centro de Engenharia  
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TENSÃO EM UM ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO  
REAL SOB INFLUÊNCIA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA



Departamento de  
Engenharia Elétrica



Campina Grande  
2019

RENATO PINTO DE ANDRADE FILHO

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TENSÃO EM UM ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO REAL SOB  
INFLUÊNCIA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Professor Célio Anésio da Silva, D. Sc.  
Orientador

Campina Grande - 2019

RENATO PINTO DE ANDRADE FILHO

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TENSÃO EM UM ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO REAL SOB  
INFLUÊNCIA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Aprovado em 29/07/2019

**Professora Raquel Aline Araújo Rodrigues, D. Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliadora, UFCG

**Professor Célio Anésio da Silva, D. Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais, Renato e Josilene, por terem sempre me apoiado durante toda a graduação, em especial à minha mãe, por todo seu esforço e abdicção, sem nunca ter desistido dos meus sonhos, sempre me motivando a seguir em frente, durante todos os momentos difíceis.

Agradeço aos amigos que conheci durante a graduação, que não só estiveram presentes em momentos importantes de minha vida, mas também sempre dispostos a ajudar em momentos difíceis, seja com conselhos ou compartilhamento de materiais de estudo (“leites”). Em especial, nesta reta final de curso, agradeço a Amanda Alves, que apesar de ter me conhecido em uma época difícil de minha vida, esteve sempre presente para me aconselhar e me acalmar.

Agradeço ao professor Célio Anésio da Silva, pela disponibilidade e paciência, assim como a orientação para realização deste trabalho.

Enfim, agradeço a todos os professores e funcionários da UFCG (especialmente a Adail e Tchai), amigos e parentes que de alguma forma contribuíram para realização desse sonho.

*“Quando desistir não é uma opção,  
o sucesso é inevitável.”*

Thomas Edison.

## RESUMO

A qualidade de energia elétrica provida pelo sistema elétrico aos consumidores finais depende do funcionamento harmonioso entre os sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Ao longo das últimas décadas, especialmente após a crise do petróleo nos anos 70, a demanda por energia elétrica tem crescido em grandes proporções. Os sistemas de geração distribuída surgiram como uma forma de diversificar a matriz energética dos países, trazendo a geração para pontos geograficamente mais próximos dos consumidores. Apesar da tecnologia solar fotovoltaica ainda ter impacto pequeno quando comparada às outras fontes de geração distribuída, sua crescente expansão é notada nas proximidades dos sistemas de distribuição. O estudo foi realizado para avaliar a influência causada pela geração distribuída quando inserida aos sistemas de distribuição, avaliando o impacto causado em um alimentador de distribuição real. As simulações foram realizadas utilizando o *software* Programa de Análise de Redes – ANAREDE. Os resultados mostraram uma melhoria na qualidade de tensão nas barras do sistema próximas à geração distribuída, através da avaliação de indicadores como a Margem de Estabilidade de Tensão e o Ponto de Colapso de Tensão, mostrando que estes sistemas contribuem para o alívio do carregamento e melhora do perfil de tensão de alimentadores de distribuição.

**Palavras-chave:** sistemas de distribuição de energia elétrica, estabilidade de tensão, fluxo de potência continuado, curvas P-V em sistemas elétricos de potência, *software* ANAREDE.

# ABSTRACT

The quality of electricity provided by the electrical system to consumers depends on the smooth operation of the generation, transmission and distribution systems. Over the past few decades, especially after the oil crisis of the 1970s, demand for electricity has grown to a large extent. Distributed generation systems have emerged as a way of diversifying the energy matrix of countries, bringing generation to geographically points located closer to consumers. Although solar photovoltaic technology still has a small impact compared to other distributed generation sources, its increasing expansion is noticeable in the vicinity of distribution systems. The study was conducted to evaluate the influence caused by distributed generation when inserted into distribution systems by assessing the impact caused on a real distribution feeder. The simulations were performed using the Programa de Análise de Redes – ANAREDE software. The results showed an improvement in the voltage quality in the system buses near the distributed generation, by evaluating indicators such as the Voltage Stability Margin and the Voltage Collapse Point, showing that these systems contribute to the load relief and improvement of the voltage profile of distribution feeders.

**Keywords:** electrical distribution systems, voltage stability, continuation power flow, P-V diagrams in electrical grids, ANAREDE software.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Classificações de estabilidade em SEPs. ....	18
Figura 2: Exemplo de curva P-V. ....	22
Figura 3: Exemplo de curva Q-V. ....	23
Figura 4: Definição da margem de estabilidade de tensão. ....	24
Figura 5: Previsão-correção do FPC. ....	27
Figura 6: Diagrama unifilar do alimentador utilizado. ....	32
Figura 7: Curvas P-V para o caso A (todas as barras). ....	36
Figura 8: Curvas P-V para o caso B (todas as barras). ....	38



# LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Níveis de tensão indicados pelo PRODIST.....	30
Tabela 2: Valores de tensão nas barras para o caso A.....	35
Tabela 3: Valores de tensão nas barras para o caso B.....	37

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAREDE	Análise de Redes Elétricas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CIGRÉ	<i>International Council on Large Electric Systems</i>
GD	Geração Distribuída
FP	Fluxo de Potência
FPC	Fluxo de Potência Continuado
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
INEE	Instituto de Eficiência Energética
MET	Margem de Estabilidade de Tensão
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
SE	Subestação Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\theta$	Ângulo da tensão
$\Omega$	Conjunto de barras vizinhas
K	Número de barras
Mvar	Mega volt ampère reativo
MW	Mega watt
P	Potência ativa
p.u.	Por unidade
P-V	Potência Ativa versus Tensão Eficaz
Q-V	Potência Reativa versus Tensão Eficaz
$P_k$	Fluxo de potência ativa
PQ	Barra de carga
PV	Barra de geração
Q	Potência reativa
$Q_k$	Fluxo de potência reativa
$Q_k^{sh}$	Injeção de potência reativa devido ao elemento <i>shunt</i>
V	Magnitude da tensão

# SUMÁRIO

1	Introdução .....	14
1.1	Objetivos .....	16
1.2	Estrutura do trabalho .....	16
2	Fundamentação Teórica .....	17
2.1	Estabilidade de tensão.....	18
2.2	Métodos de análise .....	20
2.2.1	Análise dinâmica .....	21
2.2.2	Análise estática .....	21
2.3	Curvas P-V e Q-V .....	22
2.3.1	Curva P-V .....	22
2.3.2	Curva Q-V .....	23
2.4	Margem de estabilidade de tensão.....	23
2.5	Fluxo de potência .....	24
2.5.1	Formulação do fluxo de potência.....	25
2.6	Fluxo de potência continuado .....	26
2.7	Geração distribuída e seus impactos na estabilidade de tensão .....	28
2.7.1	Conceituação de geração distribuída.....	28
2.7.2	Impactos da geração distribuída na estabilidade de tensão .....	29
2.8	Limites de tensão.....	30
3	Metodologia .....	31
3.1	Escolha do alimentador de distribuição.....	31
3.2	Cenários de simulação .....	32
4	Análise dos resultados.....	34
4.1	Caso A .....	34
4.2	Caso B.....	37
5	Conclusão .....	39
5.1	Sugestões para trabalhos futuros .....	40
	Referências.....	41

# 1 INTRODUÇÃO

Com o grande aumento da demanda por energia elétrica verificado nas últimas décadas, em especial após a crise do petróleo nos anos 70, foi necessária a busca por alternativas viáveis que reduzam custos, impactos ambientais e favoreçam o consumo e desenvolvimento. Neste aspecto, as fontes renováveis surgem como importante complemento na matriz energética mundial, colocando em evidência a geração distribuída (GD), que leva geograficamente a geração para um ponto mais próximo onde é realizado o consumo, modificando o padrão clássico da relação geração-carga, onde os grandes centros de geração estão localizados a grandes distâncias dos centros de carga. Este novo panorama traz a diversificação das fontes primárias de energia e os diferentes modos de interface que estas realizam com a rede, podendo ser alocadas em diferentes pontos, com as mais diversas capacidades e causando inúmeros impactos às redes de distribuição, inclusive à estabilidade de tensão dos sistemas.

No cenário clássico de geração-carga citado anteriormente, as concessionárias de distribuição de energia elétrica são o elo final entre a transmissão e o consumidor, sendo de interesse principal das concessionárias, a realização do faturamento do consumo. Para isto, diversos estudos são realizados nos sistemas de distribuição, com o objetivo de melhorar a qualidade do fornecimento de energia elétrica, realizando a caracterização das redes, monitoramento de níveis de perdas, realização manutenções e melhoramentos nas redes, entre outros.

Com a introdução de sistemas de geração distribuída próximos à carga, passa a ser de responsabilidade das concessionárias a autorização da conexão de tais sistemas à rede, além do monitoramento da influência que estes geradores causam nos alimentadores.

Os alimentadores de distribuição diferem das linhas de transmissão em diversas características, como nível de tensão, diferentes condutores utilizados, equipamentos de proteção, manobra e transformação, o que desperta interesse para utilização de softwares que simulem a integração entre os geradores distribuídos e o sistema elétrico de distribuição, observando sempre os limites do sistema.

Os sistemas elétricos de potência (SEP) nem sempre conseguem acompanhar a evolução da carga, somado a restrições impostas (ambientais, sociais, elétricas, econômicas, entre outras) que se tornam cada vez mais limitantes, acabam por operar em condições próximas aos limites toleráveis, o que acarreta em um fator preocupante para as empresas de distribuição de energia elétrica, que devem buscar melhorias para o sistema, evitando os efeitos negativos na qualidade do fornecimento. Neste contexto é importante avaliar o comportamento dos sistemas de distribuição ante a influência de diferentes tipos de geração distribuída, principalmente no risco de perda da Estabilidade de Tensão.

As entidades IEEE/CIGRÉ (2004) definem estabilidade de tensão de um sistema elétrico como capacidade do sistema de manter as tensões em seus barramentos dentro de limites aceitáveis, após ser submetido a um distúrbio, a partir de um ponto de operação inicial.

Nos casos em que os sistemas não conseguem manter a estabilidade de tensão, ocorre o fenômeno denominado Instabilidade de Tensão, caracterizada como “o estado de operação do sistema onde a tensão permanece decaindo de forma brusca ou lenta, e as ações automáticas de controle ou dos operadores não evitam tal decaimento” IEEE (1990).

Aqui será tratada a relação entre a margem de estabilidade de tensão dos sistemas e o efeito da inserção de geradores distribuídos. Por serem fontes de potência ativa, os geradores distribuídos podem beneficiar o perfil de tensão dos alimentadores, e conseqüentemente, melhorar a margem de estabilidade de tensão, além de aumentar a capacidade de carregamento. De acordo com SILVA *et al.* (2012), também existem situações onde ocorrerão pioras na qualidade de energia, especialmente na estabilidade de tensão, quando a escolha do local para instalação de geração distribuída não é adequada.

O presente trabalho se propõe a avaliar o comportamento da estabilidade de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica, utilizando o *software* Programa de Análise de Redes - ANAREDE, tomando como base um alimentador de distribuição de energia elétrica real, analisando o sistema sob diferentes tipos de carregamento, e inserção de pontos de geração distribuída com diversas potências e em diferentes locais.

## 1.1 OBJETIVOS

Objetivo Geral:

Avaliar a estabilidade de tensão de um alimentador de distribuição de energia elétrica utilizando o *software* ANAREDE e estudar o impacto da inserção de geração distribuída no sistema.

Objetivos Específicos:

- Conceituar Estabilidade de Tensão;
- Estudar o método do Fluxo de Potência Continuado e sua aplicação na análise da estabilidade de tensão através da obtenção das curvas PV de um sistema de distribuição de energia elétrica;
- Modelar um alimentador de distribuição de energia elétrica no software ANAREDE;
- Avaliar o impacto da inserção de geradores distribuídos no alimentador escolhido e suas influências na margem de estabilidade e no deslocamento da curva P-V;

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho apresenta a seguinte distribuição.

A Seção 1 é introdutória, oferecendo uma breve descrição contextualização da problemática abordada.

A Seção 2 é uma apresentação dos conceitos e ferramentas utilizados para a realização do trabalho.

A Seção 3 descreve a metodologia utilizada para realização do trabalho, bem como fornece o detalhamento acerca dos aspectos considerados nas simplificações da execução.

Na Seção 4, são apresentados os resultados obtidos durante a realização das simulações, e suas implicações.

A Seção 5 é conclusiva e destaca as partes mais importantes após a realização desse trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para avaliar a estabilidade de tensão nos SEP, diversos métodos são utilizados, tendo destaque os seguintes:

- Análise Modal;
- Análise de Sensibilidade
- Cálculos de fluxo de potência;
- Técnicas Baseadas em Inteligência Artificial;
- Curvas PV;
- Curvas QV.

Entre outros, sendo inicialmente de nosso interesse, o foco nas técnicas mais simples e consolidadas.

Para análise da estabilidade de tensão nas etapas de Planejamento da Expansão e da Operação, são utilizados métodos estáticos baseados em cálculo de fluxo de potência, considerando estimativas de carga futura, fornecendo um panorama para elaboração de planos que atendam à demanda futura prevista, respeitando as restrições que são impostas aos SEP.

Algumas ferramentas úteis obtidas a partir do cálculo do fluxo de potência são as curvas P-V e Q-V, que permitem obter informações acerca da variação de tensão nas barras do sistema em função da variação de potência ativa (P-V) e potência reativa (Q-V), sendo a curva P-V a metodologia mais utilizada para determinação da margem de estabilidade de tensão, e a curva Q-V servindo de complemento para avaliar a capacidade do sistema de fornecer potência reativa para controle de tensão. Estas curvas são extensamente utilizadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro (ONS) para operação em tempo real do sistema elétrico brasileiro.

Entretanto, é necessário que a aplicação das técnicas de cálculo de fluxo de potência considere aspectos importantes das redes de distribuição, tais como



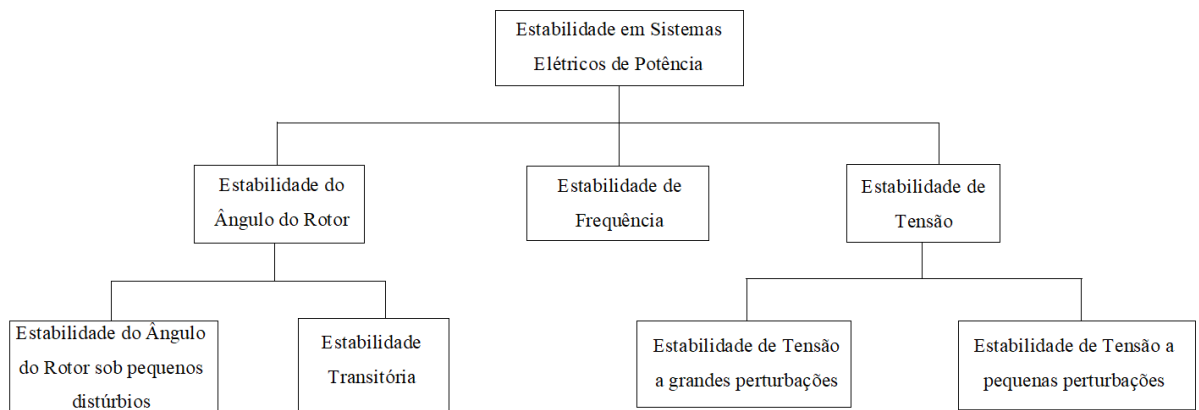
desbalanceamento de fases, presença de trechos bifásicos e monofásicos e redes não transpostas.

## 2.1 ESTABILIDADE DE TENSÃO

Os sistemas elétricos de potência são constantemente submetidos a diversos tipos de distúrbios. O conhecimento de tais distúrbios é fundamental para que haja garantia de qualidade no fornecimento de energia elétrica através da mitigação e previsão das causas destes distúrbios e seus impactos no sistema.

A estabilidade de um sistema elétrico é uma variável importante que compõe os índices de qualidade de energia elétrica, e KUNDUR *et al.* (2004) a define como a capacidade do SEP de se manter em um ponto de equilíbrio, e variáveis importantes para avaliar os níveis de estabilidade são tensão nas barras, ângulo e frequência. A classificação da estabilidade em um SEP é mostrada na figura 1, e depende de diversos fatores, como dimensão da perturbação, os dispositivos e processos envolvidos, e o intervalo de tempo do evento.

Figura 1: Classificações de estabilidade em SEPs.



Fonte: Adaptado de KUNDUR, 2004.

A estabilidade angular está associada com a capacidade dos geradores síncronos de permanecerem em sincronismo após sofrer uma perturbação do sistema, a estabilidade de frequência é a capacidade do sistema de manter sua frequência entre os níveis aceitáveis de operação e a estabilidade de tensão é a capacidade de monitorar e

controlar os níveis de tensão nos barramentos, garantindo a operação do sistema em níveis de tensão aceitáveis, evitando colapsos de tensão.

Como observado na Figura 1, a estabilidade de tensão é subdividida em duas categorias, e suas definições são citadas por KUNDUR *et al.* (2004):

- Estabilidade de tensão a grandes perturbações: grandes perturbações são fenômenos caracterizados por mudanças momentâneas ou permanentes na topologia da rede elétrica, como faltas na rede, perda de unidades geradores ou perda de carga. É necessária uma análise dinâmica do sistema por um período de tempo suficiente para observar a ocorrência de instabilidade.
- Estabilidade de tensão a pequenas perturbações: capacidade do sistema de manter seus níveis de tensão estáveis após sofrer pequenas perturbações. Aqui são utilizadas abordagens estáticas para realização da análise.

É classificada também quanto à duração dos eventos:

- Curta duração: Possui duração da ordem de alguns segundos e é causada pela ação de alguns dispositivos como motores de indução, cargas eletrônicas, entre outros.
- Longa duração: Possui duração da ordem de alguns ou vários minutos e é causada pela ação de equipamentos reguladores de tensão e limitadores de corrente de geradores.

No contexto deste trabalho, os esforços das análises focaram na estabilidade de tensão, frente à pequenas perturbações.

Como dito anteriormente, um SEP é estável do ponto de vista de tensão quando consegue manter os níveis de tensão em todas as suas barras dentro de uma margem de operação, e mantendo a capacidade de retornar ao seu regime de funcionamento anterior após a perturbação cessar. Por outro lado, o sistema é dito instável, quando após sofrer uma perturbação, como aumento de carga ou alteração nas condições de operação do sistema causarem um declínio progressivo nos níveis de tensão em suas barras, impossibilitando que o sistema retorne ao estado anterior.

KUNDUR *et al.* (2004) também associa os limites de geração de potência reativa à capacidade do sistema de se manter na estabilidade de tensão. Quando existe aumento excessivo de carga no sistema e nas barras de tensão controlada (PV), e as fontes de potência reativa não são suficientes para regular a tensão nas barras, a tensão

nos barramentos tende a diminuir até seu valor limite. Com aumento adicional de carga, a tensão continuará em declínio, causando instabilidade no sistema.

Os termos instabilidade de tensão e colapso de tensão são frequentemente empregados de forma parecida. O colapso de tensão é um processo pelo qual uma sequência de eventos acompanhados da instabilidade de tensão leva o sistema a níveis inaceitáveis de tensão em uma parte significativa do sistema de potência, explicado em KUNDUR (1994). Uma das causas que levam ao colapso pode ocorrer quando há uma demanda adicional de potência reativa e o transporte desta potência em uma determinada região se torna difícil, devido por exemplo, às linhas excederem sua capacidade de transmissão.

As principais causas que levam o sistema ao colapso são:

- Aumento de carga;
- Linhas sobrecarregadas;
- Contingências;
- Insuficiência de compensação de potência reativa;
- Geração muito afastada dos centros consumidores.

## 2.2 MÉTODOS DE ANÁLISE

Para realizar a análise da estabilidade de tensão em um SEP, alguns aspectos devem ser observados:

- Se o ponto de operação do sistema é estável;
- Determinação de barras críticas do sistema (se existirem);
- Margem de carga entre o ponto de operação escolhido e o ponto de colapso de tensão. Aqui é utilizado o método do Fluxo de Potência Continuado, que será explicado posteriormente.

As análises de instabilidade de tensão podem ser divididas em dois aspectos: dinâmica e estática, sendo sua escolha dependente apenas da interpretação da natureza do fenômeno.

### 2.2.1 ANÁLISE DINÂMICA

A análise dinâmica permite uma modelagem mais detalhada do sistema elétrico e oferece uma simulação fiel do comportamento do SEP no domínio do tempo após a ocorrência da perturbação ou eventos que possam causar um colapso de tensão no sistema.

Como descrito por FILHO (2001), a análise dinâmica possui a vantagem de produzir resultados mais precisos, devido ao comportamento da carga ser fator decisivo na avaliação da estabilidade de tensão.

Como desvantagem citada por SILVA (2001), temos o maior esforço computacional exigido, pois este tipo de análise necessita da utilização de métodos numéricos para solução de equações diferenciais ordinárias não lineares.

### 2.2.2 ANÁLISE ESTÁTICA

FILHO (2001) explica que a estabilidade de tensão é um fenômeno dinâmico, mas sua dinâmica de ação lenta possibilita a utilização de ferramentas de análise estática, reduzindo a complexidade e economizando tempo e recurso computacional, produzindo resultados semelhantes à análise dinâmica.

Na análise estática, o comportamento dinâmico dos elementos do SEP é desprezado. Essa técnica baseia-se nos conceitos de fluxo de potência e fluxo de potência continuado, tendo como principal objetivo a obtenção da margem de carregamento do sistema, ou ponto de colapso de tensão.

Possui como vantagens a capacidade de proporcionar informações sobre as condições de estabilidade no ponto de equilíbrio considerado, limite máximo de carregamento e margem de estabilidade do ponto de operação escolhido.

Quando o tempo computacional é uma variável importante no estudo da estabilidade de tensão, por exemplo em operações em tempo real, a análise estática torna-se de grande valia.

Neste trabalho, é utilizada a abordagem de análise dinâmica, tendo como ferramenta o *software* Análise de Redes – ANAREDE, através do método do fluxo de potência continuado (FPC), detalhado mais adiante.

## 2.3 CURVAS P-V E Q-V

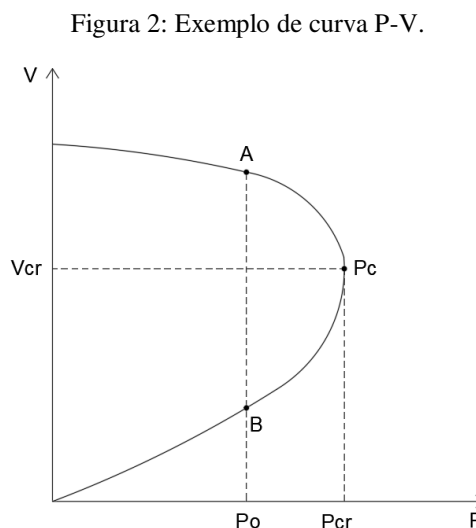
No estudo de estabilidade de tensão, um dos métodos comumente utilizado é a análise das chamadas curvas P-V e Q-V em barramentos críticos do sistema. As curvas P-V permitem a determinação da margem de estabilidade de tensão (MET) do sistema, e as curvas Q-V complementam a análise, determinando o valor mínimo de potência reativa que é necessário para garantir a estabilidade.

### 2.3.1 CURVA P-V

É responsável por mostrar a variação de tensão em uma área, barra ou para o sistema inteiro, em função do aumento de carga. No estudo da estabilidade de tensão, a curva P-V é uma das metodologias mais adotadas, quando se utiliza a análise estática.

A obtenção da curva é dada através do cálculo de sucessivos fluxos de potência (FP), denominado fluxo de potência continuado (FPC), com incremento de carga até causar o colapso de tensão.

A Figura 2 ilustra um exemplo de curva P-V, onde para determinado valor de potência  $P_o$ , é traçada uma reta perpendicular a este ponto, formando uma intersecção com dois valores de tensão A e B. A parte superior da curva abrange os valores de tensão de operação estável, enquanto a parte inferior, valores de tensão mais baixos e instáveis. O ponto  $P_c$  é denominado ponto de colapso de tensão, e encontra-se no ponto de máximo carregamento do sistema ( $P_{cr}$ ).



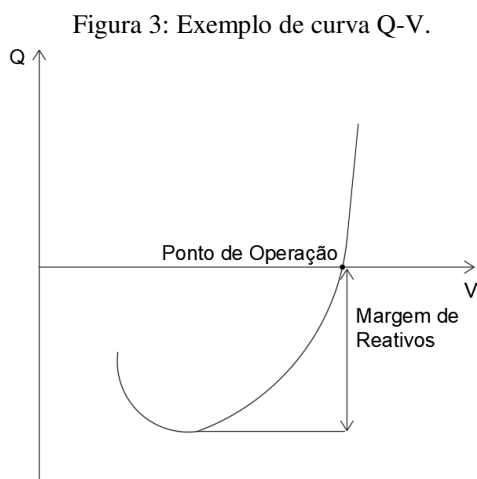
Fonte: Adaptado de REIS, 2005.

Após determinado o ponto crítico da curva, é possível determinar a margem de estabilidade de tensão, que representa a distância entre o ponto de operação ( $P_o$ ) e o ponto crítico ( $P_c$ ).

### 2.3.2 CURVA Q-V

A curva Q-V representa a relação entre a tensão em uma barra e a potência reativa injetada. É obtida pelo mesmo método que a curva P-V e mostra a variação da tensão na barra quando existe injeção ou absorção de reativos.

A Figura 3 ilustra um exemplo de curva Q-V, onde o ponto mínimo é considerado o limite de estabilidade da tensão. A partir deste ponto, um aumento da potência reativa acarreta em uma diminuição da tensão.



Fonte: Adaptado de CANOSSA *et. al.*, 2006.

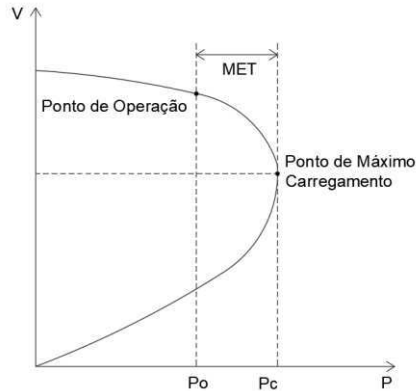
## 2.4 MARGEM DE ESTABILIDADE DE TENSÃO

É do interesse das concessionárias conhecer o quão distante da instabilidade de tensão o sistema se encontra, de forma a prevenir que esta situação ocorra. Um indicador importante neste aspecto é a Margem de Estabilidade de Tensão (MET).

Através da MET, é possível determinar o quanto de carga levaria o sistema à situação de colapso de tensão. O acréscimo de carga pode ser definido pelos diversos modelos existentes na literatura, entretanto, geralmente é escolhido o modelo de

potência constante, por ser de representação mais simples. Definido o modelo de carga, é então traçada a curva P-V do sistema, ou barra, e a MET é determinada como a diferença entre a potência no ponto de carregamento máximo e a potência no ponto de operação, como mostrado na Figura 4.

Figura 4: Definição da margem de estabilidade de tensão.



Fonte: Adaptado de VILELA, 2014.

## 2.5 FLUXO DE POTÊNCIA

O fluxo de potência (FP) em um sistema elétrico de potência é uma técnica desenvolvida para obtenção de valores de grandezas elétricas em um SEP, tais como tensão, ângulo, potência ativa e potência reativa em diversos nós (barras) do sistema elétrico.

Segundo MONTICELLI E GARCIA (2003), o cálculo do FP é classificado como modelagem estática, permite a determinação do estado da rede e sua distribuição de fluxos, através de equações obtidas a partir da utilização das leis de Kirchhoff,.

De acordo com KAGAN *et al.* (2005), o cálculo do fluxo de potência permite obter as seguintes informações:

- Tensões nas barras (nós) da rede, permitindo a verificação do atendimento aos níveis de tensão tecnicamente corretos.
- Corrente e potência que circulam nos trechos da rede.
- De posse das tensões nas barras e as correntes nas linhas, é possível calcular as perdas elétricas, permitindo um maior planejamento da construção, expansão e melhoria do sistema.

### 2.5.1 FORMULAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA

Na formulação básica, a cada barra da rede são associadas quatro variáveis, onde duas entram como dados, e duas como incógnitas a serem determinadas, e o equacionamento detalhado pode ser encontrado em diversos livros-texto sobre sistemas elétricos de potência, como em MONTICELLI E GARCIA (2003). As quatro variáveis de interesse são:

$V_k$  – magnitude de tensão na barra  $k$ ;

$\Theta_k$  – ângulo da tensão nodal na barra  $k$ ;

$P_k$  – potência ativa na barra  $k$ ;

$Q_k$  – potência reativa na barra  $k$ .

Inicialmente são conhecidas apenas duas das quatro variáveis em cada barra, sendo as outras duas obtidas através do cálculo do FP. Definem-se então três tipos de barras:

I) Barra de referência (ou *Slack*):

- São dados  $V_k$  e  $\Theta_k$ ;

- São calculados  $P_k$  e  $Q_k$ ;

II) Barra de geração ou barra PV:

- São dados  $V_k$  e  $P_k$ ;

- São calculados  $Q_k$  e  $\Theta_k$ ;

III) Barra de carga ou barra PQ:

- São dados  $P_k$  e  $Q_k$ ;

- São calculados  $V_k$  e  $\Theta_k$ ;

A barra de referência fornece referência angular para o sistema, além de fechar o balanço de potência no sistema.

Para cada barra, após a formulação do problema, duas equações são obtidas, representando os balanços de potências ativa e reativa, mostradas nas Equações 1 e 2:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \Theta_k, \Theta_m). \quad (1)$$

$$Q_k + Q_k^{sh}(V_k) = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \Theta_k, \Theta_m). \quad (2)$$



Em que:

$k = 1, \dots, N$ , sendo  $N$  o número de barras da rede;

$\Omega_k$  = conjunto das barras vizinhas da barra  $k$ ;

$V_k, V_m$  = magnitudes das tensões das barras terminais do ramo  $k$ - $m$ ;

$\theta_k, \theta_m$  = ângulos das tensões das barras terminais do ramo  $k$ - $m$ ;

$P_{km}$  = fluxo de potência ativa no ramo  $k$ - $m$ ;

$Q_{km}$  = fluxo de potência reativa no ramo  $k$ - $m$ ;

$Q_k^{sh}$  = componente da injeção de potência reativa devido ao elemento shunt da barra  $k$  ( $Q_k^{sh} = b_k^{sh} V_k^2$ ) sendo  $b_k^{sh}$  a susceptância shunt ligada à barra.

As restrições de operação de um problema de fluxo de potência são formadas pelas restrições nas magnitudes das tensões nodais das barras PQ e pelos limites de injeções de potência reativa das barras PV:

$$V_k^{min} \leq V_k \leq V_k^{max}. \quad (3)$$

$$Q_k^{min} \leq Q_k \leq Q_k^{max}. \quad (4)$$

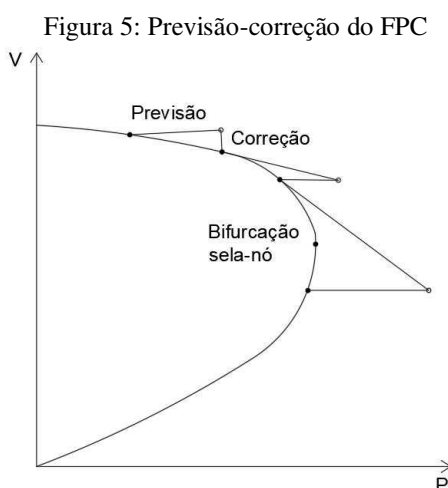
FERRAZ *et al.* (2000) demonstra que próximo ao ponto máximo de carregamento do sistema, os autovalores da matriz Jacobiana começam a apresentar parte real negativa, sinalizando instabilidade, causando problemas de convergência no fluxo de potência. São então utilizadas condições de parada próximas ao ponto de carregamento máximo, evitando a divergência no cálculo do algoritmo.

## 2.6 FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO

O fluxo de potência clássico considera apenas o ponto de operação do sistema, possibilitando apenas o cálculo estático do sistema. Para eliminar esta limitação, é utilizado o método do fluxo de potência continuado (FPC), que permite a avaliação da estabilidade de tensão nas barras com relação ao seu carregamento atual e também com suposto acréscimo de carga. É através do cálculo do FPC que são obtidas as curvas P-V e Q-V.

O cálculo do FPC consiste em calcular várias vezes o fluxo de potência, porém, acrescentando a cada solução, o parâmetro de continuação desejado (geralmente carga ou tensão eficaz).

A formulação mais utilizada do FPC foi desenvolvida por AJJARAPU E CHRISTY (1992), e utiliza duas etapas de cálculo, sendo uma de previsão, que é o cálculo do fluxo de potência após incremento de carga, e uma de correção, através da utilização de parâmetros estatísticos, permitindo o traçado das curvas P-V para cada barra do sistema, como exemplificado na figura 5.



Fonte: Adaptado de AJJARAPU E CHRISTY, 1992.

Com o FPC busca-se encontrar soluções consecutivas para os sistemas não lineares de modo que a partir de uma solução conhecida, seja determinada pelo processo de previsão, uma estimativa que será a condição inicial para a correção e consequente convergência à nova solução.

O procedimento de previsão é necessário para a estimativa na região próxima à solução. A etapa de correção tem por objetivo corrigir a solução estimada, para que se alcance a solução dentro da precisão desejada, evitando, desta forma, a propagação de erros na obtenção da curva.

No *software* ANAREDE é utilizada uma versão do algoritmo de fluxo de potência continuado formulado por AJJAPARU E CHRISTY (1992), que engloba os procedimentos de previsão e correção, que serão utilizados neste trabalho.

## 2.7 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E SEUS IMPACTOS NA ESTABILIDADE DE TENSÃO

Como o propósito deste trabalho é avaliar a estabilidade de tensão em um alimentador de distribuição real sob influência de geração distribuída, aqui serão discutidos os conceitos de geração distribuída e como sua penetração na rede elétrica influencia a estabilidade de tensão.

### 2.7.1 CONCEITUAÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Na literatura são encontradas diversas definições para geração distribuída (GD), dependendo de diversos parâmetros envolvidos, tais como níveis de tensão, capacidade de geração, tipos de fontes naturais utilizadas na geração, entre outros. Destacam-se, entretanto, as definições utilizadas por instituições relacionadas ao assunto, dentre as principais:

O *Institute of Electrical and Eletronics Engineers* (IEEE) denomina de geração distribuída as unidades de geração que são pequenas o suficiente para serem conectadas ao sistema de distribuição e estão localizadas geograficamente próximas ao consumidor.

Para o *International Council on Large Eletric Systems* (CIGRÉ), geração distribuída é um tipo de geração descentralizada, que não é despachada de forma centralizada, além de não ser controlada por órgão responsável pelo despacho de unidades geradoras.

No Brasil, o Procedimento de Distribuição (PRODIST) define geração distribuída como qualquer central de geração de energia elétrica que é conectada diretamente ao sistema de distribuição, podendo operar de diversas formas, em paralelo, isoladamente ou até mesmo despachadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

Para o Instituto de Eficiência Energética (INEE) a geração distribuída é caracterizada por qualquer tipo de geração elétrica que esteja localizada junto ou próxima aos consumidores.

## 2.7.2 IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA ESTABILIDADE DE TENSÃO

A geração distribuída quando conectada em grande escala à rede de distribuição pode causar diversos impactos no sistema. É esperado um incremento da quantidade disponível de GD que operará conectada ao sistema de distribuição (*on-grid*). Neste aspecto, é importante analisar os diferentes tipos de impactos resultantes deste incremento, pois a diversidade tecnológica dos geradores distribuídos é grande, nem sempre sendo possível modelá-los como máquinas síncronas convencionais.

O impacto da GD na estabilidade do sistema pode ser negligenciado quando sua penetração é baixa. Entretanto, à medida que o nível de penetração aumenta, a GD pode começar a influenciar o comportamento dinâmico do sistema como um todo.

SLOOTWEG E KLING (2002) afirmam que a geração distribuída pode aumentar a estabilidade de um sistema, desde que sejam utilizadas tecnologias e localizações adequadas. Seus estudos mostram alguns tipos de impactos causados pelas GD nos diferentes tipos de estabilidade:

- Estabilidade a pequenas perturbações: a utilização da geração distribuída melhora o amortecimento dos modos eletromecânicos e aumenta levemente sua frequência;

- Estabilidade transitória: o desvio máximo potência - ângulo entre os geradores diminui com o aumento da penetração da GD.

- Com o aumento da penetração da GD, é mostrado através da resposta da frequência um comportamento mais rápido, com aumento no desvio máximo de frequência.

- O perfil de tensão nos terminais de carga é aumentado devido ao uso de fontes ativas de GD próxima às extremidades dos alimentadores.

Para que ocorra a maximização dos benefícios proporcionados pelas GD, COSTA (2014) destaca o aumento da margem de estabilidade individual dos geradores, de forma a assegurar a operação contínua e confiável da GD e contribuir efetivamente para a estabilidade global da rede.

## 2.8 LIMITES DE TENSÃO

A qualidade da tensão recebida pelo consumidor de uma concessionária de distribuição de energia elétrica deve ser avaliada a partir de alguns aspectos, entre eles, o principal é a conformidade com os níveis de tensão em regime permanente.

A ANEEL (2016) estabelece que a contratação de tensões maiores que 1 kV junto à distribuidora deverão respeitar os limites entre 95% (noventa e cinco por cento) e 105% (cento e cinco por cento) da tensão nominal de operação do sistema, e ainda, que seja coincidente com a tensão de um dos terminais onde ocorra derivação. Para os consumidores que contratam uma tensão igual ou inferior que 1 kV, a tensão deverá ser igual a própria tensão nominal do sistema.

O PRODIST define para as redes de distribuição com tensões nominais maiores que 1 kV e menores que 69 kV, os níveis de tensão adequados, precários e críticos conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Níveis de tensão indicados pelo PRODIST.

<b>Tensão de Atendimento (TA)</b>	<b>Faixa de Variação de Tensão de Leitura (TL) em relação a Tensão de Referência (TR)</b>
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL \leq 0,93TR$
Crítica	$0,90TR \leq TL \leq 1,05TR$

Fonte: ANEEL, 2010.

## 3 METODOLOGIA

Após o estudo dos conceitos necessários para realizar a análise de estabilidade de tensão em um sistema de distribuição de energia elétrica, a seguir é explicada a metodologia utilizada para realização do trabalho.

### 3.1 ESCOLHA DO ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO

Para modelagem do alimentador de distribuição utilizando o *software* ANAREDE, de propriedade do CEPEL, foram consideradas as seguintes condições:

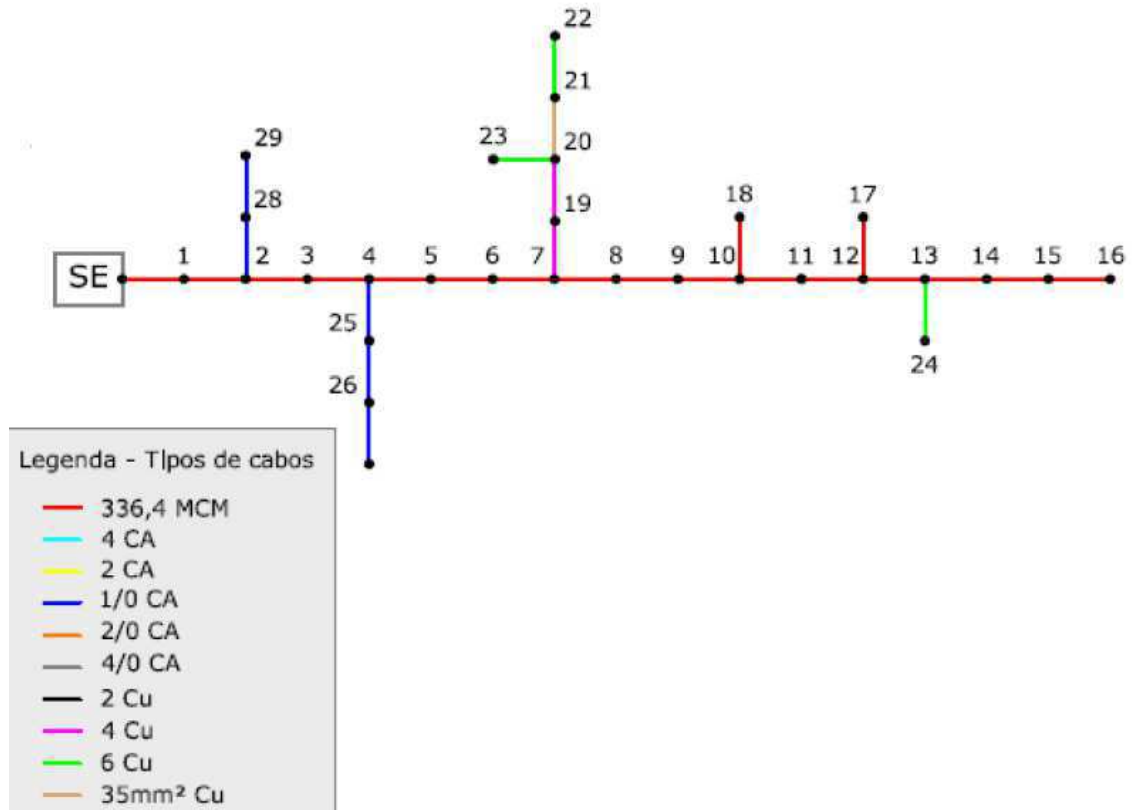
- As redes devem ser exclusivamente trifásicas, de modo a tornar possível a utilização das técnicas de cálculo de fluxo de potência contínuo.
- As redes são consideradas transpostas, para evitar influência de indutâncias mútuas entre as fases e diferenciação de impedâncias ao longo do percurso.
- O alimentador deve conter um número razoável de barras (acima de 10), para que seja possível observar com clareza a influência dos geradores de distribuição alocados ao longo do tronco principal.
- As demais características das redes de distribuição (nível de tensão entre 10 kV e 100 kV, relação X/R baixa, entre outros) deverão ser preservadas.

Após ponderação das condições acima citadas e pesquisa em diversas literaturas, foi escolhido um alimentador de distribuição de uma concessionária da região Sul do país, obtido em BRAUN (2010), com as características citadas a seguir:

- O sistema contém 30 barras, sendo uma barra de referência e as demais, barras PQ.
- O alimentador possui formato radial e é trifásico ao longo de todo seu percurso.
- Existe mudança de condutor nas ramificações do alimentador.
- Os dados de carga foram simplificados para utilizar apenas cargas concentradas nas barras do sistema.
- A numeração das barras é iniciada pelo índice 0 (subestação – SE) para a barra de referência, e 1-29 para as barras PQ.

A Figura 6 mostra o diagrama unifilar do alimentador escolhido, além dos tipos de cabo utilizados.

Figura 6: Diagrama unifilar do alimentador utilizado.



Fonte: Adaptado de BRAUN, 2010.

### 3.2 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

Para realização da modelagem e simulação no ANAREDE, são necessários os seguintes dados:

- Barras:
  - Tensão (em p.u.) e ângulo (em graus) para a barra de referência.
  - Potência ativa (MVA) e potência reativa (Mvar) para as barras PQ.
- Linhas:
  - Capacidade Normal (MVA), que representa a capacidade máxima de potência que a linha pode transportar sem que haja sobrecarga.

- Resistência (em %) e reatância (em %) da linha, referenciadas à impedância base do sistema.

- Geradores distribuídos:

- Potência ativa máxima disponível (MVA) e potência reativa máxima disponível (Mvar).

Os cenários utilizados para simulação serão os seguintes:

- A: Simulação do sistema sem inserção de GD, obtendo as curvas P-V para as barras mais críticas de modo a determinar as MET.
- B: Simulação do sistema com inserção de GD, observando através das curvas P-V das barras mais críticas a influência da GD no deslocamento das curvas e nas METs.

Através do ambiente gráfico do ANAREDE, foi executada a rotina de fluxo de potência continuado no caso A, incrementando a carga de todas as barras em 5% a cada iteração, procurando pelo ponto de colapso de tensão, com o objetivo de gerar as curvas P-V para todas as barras e encontrar as possíveis barras críticas do sistema.

Para o caso B, foi inserido na barra 16 (extremo do alimentador), um gerador distribuído modelado como um gerador síncrono capaz de fornecer apenas potência ativa, com capacidade de geração de 15 MW, e repetido o mesmo procedimento realizado no caso A.



## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após realizada a modelagem no ambiente gráfico do ANAREDE, foi executada a rotina de fluxo de potência continuado, utilizando as opções padrões.

Maiores detalhes sobre a utilização da rotina de fluxo de potência continuado do ANAREDE são explicados por GARCIA (2014).

### 4.1 CASO A

Após simulação do caso A para obtenção das curvas P-V e identificação das barras críticas, notou-se que devido à característica radial do alimentador, as barras que sofrem colapso de tensão mais rápido são as localizadas nas maiores distâncias em relação à subestação.

Foram definidos limites superior (1,05 p.u.) e inferior (0,93 p.u.) de tensão para todas as barras (intervalo dentro dos níveis de tensão adequados indicados pelo PRODIST), de modo a observar quais barras violaram estes limites.

A Tabela 2 mostra todas as barras do sistema e seus níveis de tensão em p.u. após a execução do fluxo de potência continuado, onde são destacadas em negrito as barras que violaram o limite inferior de tensão (0,93 p.u.).

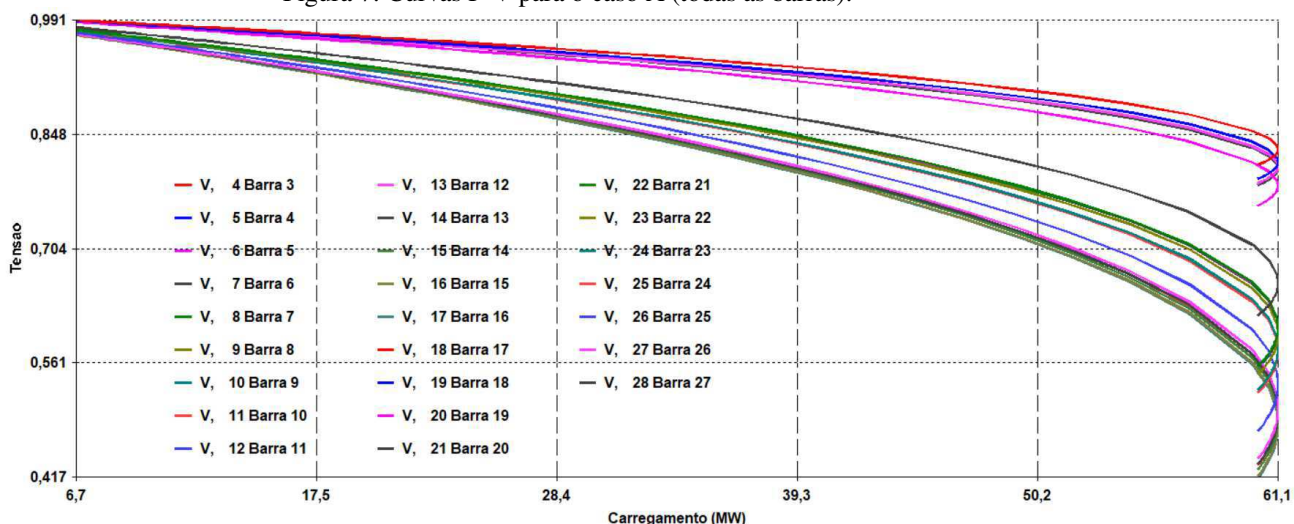
Tabela 2: Valores de tensão nas barras para o caso A.

Identificação da barra	Tensão (p.u.)	Identificação da barra	Tensão (p.u.)
SE	1,000	<b>15</b>	0,420
1	0,988	<b>16</b>	0,417
2	0,961	<b>17</b>	0,441
<b>3</b>	0,810	<b>18</b>	0,524
<b>4</b>	0,792	<b>19</b>	0,557
<b>5</b>	0,759	<b>20</b>	0,556
<b>6</b>	0,621	<b>21</b>	0,556
<b>7</b>	0,558	<b>22</b>	0,556
<b>8</b>	0,547	<b>23</b>	0,555
<b>9</b>	0,528	<b>24</b>	0,443
<b>10</b>	0,524	<b>25</b>	0,792
<b>11</b>	0,476	<b>26</b>	0,787
<b>12</b>	0,441	<b>27</b>	0,784
<b>13</b>	0,434	<b>28</b>	0,961
<b>14</b>	0,428	<b>29</b>	0,953

Fonte: Autoria própria.

É possível notar que a partir da terceira barra, todas as barras seguintes violaram o limite inferior de tensão. As curvas P-V para todas as barras são mostradas na Figura 7:

Figura 7: Curvas P-V para o caso A (todas as barras).



Notamos o ponto de o ponto de carregamento máximo ( $P_c$ ) ocorre em um carregamento de 61,1 MW, e que o ponto de operação do sistema ( $P_o$ ) ocorre em um carregamento de 6,7 MW, sendo possível determinar a MET para o caso A através da equação 5:

$$MET = |P_c - P_o| = 61,1 - 6,7 = 54,4 \text{ MW}. \quad (5)$$

Uma limitação do ANAREDE para a geração de curvas P-V é que são geradas apenas as curvas das barras que violaram o limite inferior de tensão definido antes da simulação.

Como constatado anteriormente e confirmado através da análise da Tabela 2 e das curvas P-V, as barras que sofrem colapso de tensão mais rapidamente, são também as que possuem as maiores quedas de tensão, e também as mais afastadas da subestação. Por este motivo, foi escolhida a barra 16 para instalação do gerador distribuído, de modo a observar o efeito a partir da barra com menor tensão.

## 4.2 CASO B

Após inserção do gerador distribuído na barra 16, o fluxo de potência continuado foi executado novamente no ANAREDE, e os valores de tensão para cada barra são mostrados na Tabela 3, novamente destacando em negrito as barras que violaram o limite predefinido.

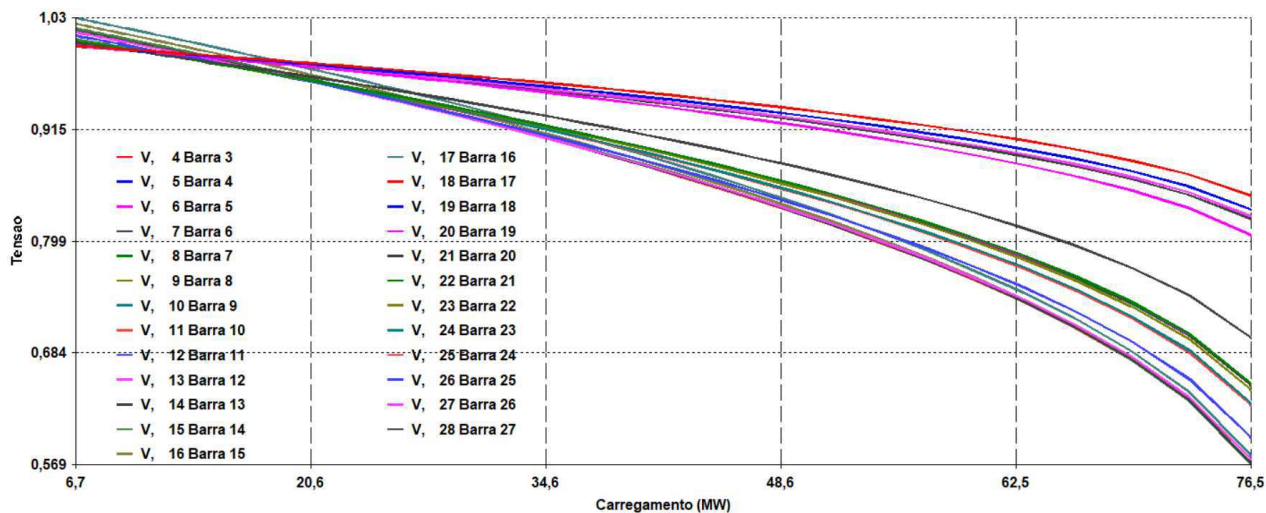
Tabela 3: Valores de tensão nas barras para o caso B

Identificação da barra	Tensão (p.u.)	Identificação da barra	Tensão (p.u.)
SE	1,000	<b>15</b>	0,578
1	1,030	<b>16</b>	0,579
2	1,022	<b>17</b>	0,574
<b>3</b>	0,867	<b>18</b>	0,626
<b>4</b>	0,832	<b>19</b>	0,652
<b>5</b>	0,812	<b>20</b>	0,651
<b>6</b>	0,780	<b>21</b>	0,651
<b>7</b>	0,653	<b>22</b>	0,651
<b>8</b>	0,646	<b>23</b>	0,650
<b>9</b>	0,632	<b>24</b>	0,569
<b>10</b>	0,630	<b>25</b>	0,827
<b>11</b>	0,597	<b>26</b>	0,825
<b>12</b>	0,574	<b>27</b>	0,823
<b>13</b>	0,570	<b>28</b>	0,967
<b>14</b>	0,569	<b>29</b>	0,957

Fonte: Autoria própria.

É possível notar na Tabela 3 que as barras que violaram os limites de tensão foram as mesmas, entretanto, os valores de tensão melhoraram em relação ao caso A, como era esperado devido à inserção de uma geração no extremo do alimentador oposto à fonte (subestação), também mostrado nas curvas P-V da Figura 8.

Figura 8: Curvas P-V para o caso B (todas as barras).



Fonte: Autoria própria.

É interessante notar que no ponto de operação do sistema, devido à inserção da GD, diversas barras ultrapassam o valor de 1 p.u., pois a geração distribuída atua como uma fonte de potência ativa, compensando ligeiramente as quedas de tensão nas barras próximas à sua instalação.

O ponto de carregamento máximo ocorre em torno de 76,5 MW, e a MET para o caso B é de 69,8 MW, confirmando o que já era esperado, o aumento da margem de estabilidade de tensão quando existe inserção de geração distribuída no sistema.

Infelizmente, o ANAREDE possui a limitação de que as curvas P-V são geradas apenas até onde o método do fluxo de potência continuado converge, não sendo possível observar com exatidão o ponto máximo de carregamento.

O carregamento em que a tensão nas barras começa a cair abaixo do valor mínimo de 0,93 p.u. também é elevado em relação ao caso A.

Uma melhoria que poderia ser feita no sistema seria aperfeiçoar a alocação de mais pontos de geração distribuída ao longo do alimentador, e observar se em algum momento ocorre violação de tensão no limite superior, constatando uma possível influência negativa da GD.

## 5 CONCLUSÃO

Com o constante aumento da demanda por energia elétrica, é importante para as concessionárias de distribuição de energia elétrica a medição de indicadores qualidade e confiabilidade dos SEPs, para garantir o fornecimento contínuo de energia elétrica. O estudo de estabilidade de tensão é importante neste aspecto, com o objetivo de monitorar o sistema de modo que os limites operacionais sejam sempre respeitados.

Neste trabalho foi aplicado o *software* ANAREDE como ferramenta de simulação e cálculo do fluxo de potência continuado para analisar indicadores de estabilidade de tensão, como a MET, em um alimentador de distribuição real.

Foi realizada a modelagem de um sistema de distribuição real no ANAREDE de forma a verificar os impactos da inserção de geração distribuída na margem de estabilidade de tensão e no ponto de colapso.

É importante ressaltar que, atualmente os sistemas fotovoltaicos representam 99% dos sistemas aplicados como GD. Uma vez que estes são incapazes de injetar reativos na rede, tem-se uma limitação dos benefícios que esta tecnologia poderia proporcionar ao SEP.

Um efeito observado imediatamente após a inserção de GD, é o aumento da MET e conseqüentemente, deslocamento da curva P-V, possibilitando ao sistema trabalhar com uma quantidade maior de carregamento, sem que o mesmo entre em instabilidade, e posteriormente, colapso de tensão.

Com os testes realizados, não foi possível verificar efeitos negativos da inserção de GD no sistema, onde era esperado aumento indesejado de tensão em algumas barras, podendo ser simulado em testes posteriores, utilizando potências de geração maior ou até mais de um gerador distribuído.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para continuidade do presente trabalho e complementação das análises de estabilidade de tensão em sistemas de distribuição, sugere-se os seguintes itens:

- Utilização de mais de um gerador distribuído, alocado em diferentes pontos do alimentador.
- Análise da variação de geração fotovoltaica ao longo do dia.
- Análise incluindo as curvas de carga do alimentador.
- Análise do alimentador considerando a presença de equipamentos reguladores de tensão.
- Estudo do sistema sob regime de contingências.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, **Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica**, 2ª Edição, Brasília – DF, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, **Procedimento de Distribuição - PRODIST**, Módulo 1. Revisão 5, 2012. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo1\\_Revisao\\_9/1b78da82-6503-4965-abc1-a2266eb5f4d7](http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo1_Revisao_9/1b78da82-6503-4965-abc1-a2266eb5f4d7)> Acesso em: maio de 2019.

AJJARAPU, V., CHRISTY, C., **The Continuation Power Flow: a Tool for Steady State Voltage Stability Analysis**. IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 7, no 1, 1992.

BRAUN, P., **A integração de sistemas solares fotovoltaicos em larga escala no sistema elétrico de distribuição urbana**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2010.

CANOSSA J.H; MALANGE F.C.V; ALVES D.A., **O Papel da barra de folga ou oscilante (Slack ou Swing) no fluxo de carga Parte I: influência no balanço de potência do sistema e nas perdas na transmissão**, ICECE'2007 – *INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND COMPUTER EDUCATION*, Monguaguá, 2007.

CARDOSO, G. S. **Uma visão crítica da Geração Distribuída no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do ABC, Santo André, 2009.

COSTA, J. P. **Análise Estática e Dinâmica de Redes de Distribuição com presença de Geração Distribuída utilizando o software Simulight**. Monografia (Engenharia Elétrica). Faculdade de Engenharia Elétrica (FEE) da Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, 2014.



FERRAZ, C.; MARTINS, N.; JULIO, J.; FALCÃO, D. **Fluxo de Potência Continuado e Análise Modal na avaliação e melhoria da Estabilidade de Tensão do sistema Sul-sudeste**. VII Simpósio de especialistas em planejamento da operação e expansão elétrica. Curitiba, PR, 2000.

FILHO, J. M., **Aspectos Práticos e Teóricos na Análise de Estabilidade de Tensão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.

GARGIA, P. H. V., **Primeiros Passos: Fluxo de Potência Continuado ANAREDE**. Monografia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, **Definition and Classification of Power System Stability**, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 2, Maio de 2004.

IEEE Working Group on Voltage Stability, **Voltage Stability of Power Systems Concepts, Analytical Tools, and Industry Experience**, IEEE Special Publication 90TH0358-PWR, Piscataway, New Jersey, 1990.

INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA - INEE. **O que é Geração Distribuída**. Disponível em <[http://www.inee.org.br/forum\\_ger\\_distrib.asp](http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp)>. Acesso em: maio de 2019.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C.; ROBBA, E., **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 1ª edição. Editora Edgard Blücher, São Paulo, 2005.

KUNDUR, P.; PASERBA, J. AJJARAPU, V.; ANDERSSON, G.; BOSE, A.; CANIZARES, C.; HATZIARGYRIOU, N.; HILL, D.; Stankovic, A.; TAYLOR, C.; VAN CUTSEM, T.; VITTAL, T. **Definition and classification of power system stability**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 19, n. 2, p.1387-1401, maio. 2004.

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

MONTICELLI, A. J.; GARCIA, A. V.; **Introdução a Sistemas de Energia Elétrica**. Editora Unicamp, Campinas, 2003.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). *Diretrizes e Critérios para estudos elétricos, procedimentos de rede, submódulo 23.3*, julho de 2001. Disponível em: <www.ons.org.br>. Acesso em: abril de 2019.

REIS, C. S., **Determinação de Índices de Estabilidade**. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2005.

SILVA, H.J.B. da, AFFONSO, C.M., SOUZA, A.M., OLIVEIRA, R.C.L. *Alocação e Dimensionamento de Uma ou Múltiplas Fontes de Geração Distribuída Considerando Estabilidade de Tensão e Perdas*. In XIX Congresso de Automática. Campina Grande – PB, pp. 3430-3436, 2012

SILVA, L. C. **Uma Expansão dos Métodos de Curvas-PV e de Análise Modal Estática para o Estudo da Estabilidade de Tensão em Sistemas de Energia Elétrica**. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - UNICAMP, Campinas, 2001.

SLOOTWEG, J. G., KLING, W. L. *Impact of Distributed Generation on Power Systems Transient Stability*. IEEE – Engineering Society Summer Meeting, Chicago, EUA., 25 julho, 2002.

VILELA, A. O. R., **Margem de estabilidade de tensão no planejamento dos sistemas elétricos – Análise do impacto do despacho da geração**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.