

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - CAMPUS FORMIGA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Thales Henrique de Souza Vieira

**DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE CURVAS QVS EM SISTEMA DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR MEIO DE EQUAÇÕES
MATEMÁTICAS.**

FORMIGA – MG.

2022

Thales Henrique de Souza Vieira

**DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE CURVAS QVS EM SISTEMA DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR MEIO DE EQUAÇÕES
MATEMÁTICAS.**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso de Bacharelado em
Engenharia Elétrica do Instituto Federal de
Minas Gerais - *Campus* Formiga para
obtenção do grau de bacharel em Engenharia
Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Renan Souza
Moura

FORMIGA – MG.

2022

Vieira, Thales Henrique de Souza
V658d Determinação do comportamento de curvas QV em sistema de distribuição por meio de equações matemáticas / Thales Henrique de Souza Vieira -- Formiga : IFMG, 2022.
60p. : il.

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

1. Sistema de distribuição de energia. 2. Estabilidade de tensão. 3. Curva QV.
4. Curva PV. 5. Fluxo de potência. I. Moura, Renan Souza. II. Título.

CDD 621.3

THALES HENRIQUE DE SOUZA VIEIRA

**DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE CURVAS QVS EM
SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR MEIO DE
EQUAÇÕES MATEMÁTICAS.**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso de Bacharelado em
Engenharia Elétrica do Instituto Federal de
Minas Gerais - Campus Formiga para
obtenção do grau de bacharel em
Engenharia Elétrica.

Avaliado em: 06 de julho de 2022.
Nota: 88,5

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Renan Souza Moura - Orientador



Prof. Dr. Cristian Adolfo Alvez



Prof. Msc. Felipe de Sousa Silva

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por atender as minhas preces nos momentos mais difíceis, pela força e persistência para continuar ao longo da caminhada.

Aos meus pais Fábio e Cristina, por todo o apoio e incentivos durante a minha trajetória, pela ajuda em todos os momentos de dificuldade.

Aos meus irmãos Guilherme, Jordânia, Luis Filipe, pela amizade e companheirismo.

Aos meus avós José Luis e Maria, pelo exemplo de amor e dedicação em prol da família. A minha Vó Maria Vieira(in memoriam) e ao meu avô José Vieira, pelos incentivos ao estudo e todo o carinho dedicados.

A todos meus amigos e companheiros de graduação, que estiveram juntos comigo nos estudos e nos momentos de descontração.

Ao meu orientador professor Dr. Renan, pela paciência, dedicação e conselhos para o desenvolvimento deste trabalho.

E a todos que contribuíram de alguma forma na minha graduação.

RESUMO

Os sistemas elétricos de potência necessitam de uma operação com alto grau de confiabilidade, garantindo a entrega de energia elétrica aos consumidores. Com o crescente aumento das cargas nos sistemas de potência, e com a inserção de sistemas de geração distribuída tais como a energia fotovoltaica, torna-se evidente que a modelagem dos sistemas de distribuição deve ser bem desenvolvida para que análises, como os estudos de estabilidade de tensão, sejam bem sucedidas. Dentro deste contexto, este trabalho identifica o equacionamento da curva QV para diferentes valores de carga em um sistema teste de distribuição de energia e analisa o comportamento dos coeficientes destas equações em função do carregamento. Os resultados demonstraram que ocorreu uma mudança abrupta nos coeficientes das equações que descreveram as curvas QV à medida que o sistema se aproximava da sua carga máxima. Estas mudanças podem servir de alerta para os operadores dos sistemas elétricos de potência.

Palavras chave: Sistema de distribuição de energia, Estabilidade de Tensão, Curva QV.

ABSTRACT

Electric power systems require an operation with a high rate of reliability, ensuring the delivery of electric energy to consumers. With the increasing loads on power systems, and with the insertion of distributed generation systems such as photovoltaic energy, it becomes evident that the modeling of distribution systems must be well developed so that analyses, such as voltage stability studies, can be successful. In this context, this work identifies the equation of the QV curve for different load values in a test system of energy distribution and analyzes the behavior of the coefficients of these equations as a function of the load. The results showed that there was an abrupt change in the coefficients of the equations that described the QV curves as the system approached its maximum load. These changes can serve as a warning to operators of electrical power systems.

Key words: Electric Power System, Voltage Stability, QV Curve.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama unifilar do SEP.....	17
Figura 2 - Arranjos típicos de alimentação da subestação.....	19
Figura 3 - Diagrama unifilar de uma subestação.....	20
Figura 4 - Topologia padrão de uma rede de distribuição de média tensão.....	22
Figura 5 - Rede de distribuição típica.....	23
Figura 6 - Condutores e imagens.....	24
Figura 7 - Modelo de linha exato.....	26
Figura 8 - Modelo transformador trifásico.....	27
Figura 9 - Carga conectada em estrela.....	28
Figura 10 - Fluxo de potência entre barramentos.....	29
Figura 11 - Fluxograma do método iterativo.....	31
Figura 12 - Classificação da Estabilidade de Sistemas de Potência.....	32
Figura 13 - Curva QV típica.....	36
Figura 14 - Curva QV com margem positiva de potência reativa.....	36
Figura 15 - Curva QV com margem negativa de potência reativa.....	36
Figura 16 - Curva PV típica.....	37
Figura 17- Curvas QV de um sistema com variação de carga.....	38
Figura 18 - Sistema teste IEEE.....	39
Figura 19 - Configuração dos polos do sistema teste.....	40
Figura 20 - Exemplo equacionamentos no Curve Fitting.....	43
Figura 21 - Fluxograma da metodologia.....	44
Figura 22 - Curvas PV sistema teste.....	45
Figura 23 - Curvas QV.....	46
Figura 24 - Curvas QV Fase A.....	47
Figura 25 - Curvas QV Fase B.....	47
Figura 26 - Curvas QV Fase C.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tensões Usuais no SEP.	18
Tabela 2 - Dados do sistema teste.	40
Tabela 3 - Carga máxima sistema teste.	45
Tabela 4 - Margens de potência reativa das curvas QV.	48
Tabela 5 - Equações lineares das curvas QV da Fase A.	49
Tabela 6 - Equações do 2° grau das curvas QV da Fase A.	50
Tabela 7 - Equações do 3° grau das curvas QV da Fase A.	50
Tabela 8 - Coeficientes das equações lineares das curvas QV fases B e C.	51
Tabela 9 - Coeficientes das equações do 2° das curvas QV fases B e C.	52
Tabela 10 - Coeficientes das equações do 3° das curvas QV fases B.	53
Tabela 11 - Coeficientes das equações do 3° das curvas QV fases C.	54
Tabela 12 - Variação dos coeficientes lineares das curvas QV das fases.	55
Tabela 13 - Variação dos coeficientes das equações do segundo grau das curvas QV das fases.	55
Tabela 14 - Variação dos coeficientes das equações do terceiro grau das curvas QV das fases A e B.	56
Tabela 15 - Variação dos coeficientes das equações do segundo grau das curvas QV da fase C.	56

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica

AT - Alta tensão

BT - Baixa tensão

Fc - Fator de carga

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

MATLAB - MATrix LABorator

MT - Média tensão

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

PIB - Produto Interno Bruto

PV - Potência Ativa versus Tensão

QV - Potência Reativa versus Tensão

SEs - Subestações

SEP - Sistema Elétrico de Potência

SIN - Sistema Interligado Nacional

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Contexto.....	13
1.2. Motivação	14
1.3. Hipóteses.....	15
1.4. Objetivos.....	15
1.5. Estrutura do trabalho.....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. Sistemas Elétricos de Potência	17
2.2. Distribuição de energia elétrica	18
2.2.1. Subtransmissão	18
2.2.2. Subestação de distribuição.....	19
2.2.3. Rede Primária de distribuição.....	21
2.2.4. Rede secundária de distribuição	23
2.3. Modelagem do sistema de distribuição.....	23
2.3.1. Modelagem de linhas de distribuição	23
2.3.2. Modelagem dos transformadores.....	27
2.3.3. Modelagem das cargas.....	28
2.4. Fluxo de Potência.....	29
2.4.1. Método iterativo de progressão modificada	30
2.5. Estabilidade do Sistemas Elétricos de Potência.....	31
2.6. Ferramentas de análise de estabilidade de tensão	35
2.6.1. Curva QV	35
2.6.2. Curva PV	37
2.7. Necessidade de previsão de equação matemática.....	37
3. METODOLOGIA	39

3.1.	Sistema IEEE 4 <i>Node test feeder</i> .	39
3.2.	Curva PV do sistema teste.	40
3.3.	Curva QV do sistema teste.	41
3.4.	Equacionamento das curvas QV.	43
3.5.	Fluxograma.	43
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1.	Curva PV sistema teste de distribuição.	45
4.2.	Curva QV sistema teste de distribuição.	46
4.3.	Curvas QV com variação do fator de carga do sistema teste de distribuição.	47
4.4.	Equacionamento das curvas QV	49
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
5.1.	Trabalhos Futuros	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1.INTRODUÇÃO

1.1.Contexto

O sistema elétrico de potência (SEP) é formado pelo conjunto de unidades geradoras, instalações de transmissão e distribuição, e tem a função de fornecer energia elétrica aos diversos consumidores conectados as suas redes. Necessitando operar com desempenho aceitável, respeitando critérios de segurança e qualidade estabelecidos, com viabilidade econômica e baixos impactos ao ambiente (KUNDUR e MORISON, 1997).

Com a crescente demanda energética, devido a fatores de crescimento econômico e populacional, são importantes os estudos que ajudem no planejamento e manutenção do sistema elétrico no contexto atual. No Brasil, em 2022, são previstos um aumento de carga de 2,7% no Sistema Interligado Nacional (SIN), considerando um incremento do PIB de 1,3%, chegando a 71.373 MW de consumo médio. Para o período de 2022-2026, é previsto um crescimento médio anual de carga de 3,4% e 81.604 MW de consumo médio ao final do período (ONS, 2021).

A operação dos sistemas em níveis cada vez mais estressantes, do ponto de vista do carregamento, faz com que os sistemas fiquem mais vulneráveis em relação à queda de tensão. Neste cenário, o estudo de estabilidade de tensão em SEP tem se tornado um tema de grande relevância para diversos engenheiros, pesquisadores e empresas envolvidas na operação do SEP (KRAUER, 2007).

A estabilidade de tensão em SEP está relacionada com a capacidade de fornecimento de potência reativa nos barramentos. Em condições normais de estabilidade de rede, o aumento de injeção de potência reativa em um barramento provoca aumento de tensão. Caso contrário, se a injeção de reativos provocar diminuição na tensão, é sinalizado uma instabilidade. Caso permaneça na condição de instabilidade pode resultar em um colapso de tensão, causando interrupções no fornecimento em determinadas partes do sistema (KUNDUR, 1994).

No trabalho de FRANCISCO (2005), é utilizado diferentes técnicas de análises nos problemas de estabilidade de tensão. Sendo verificado a aplicação destas análises para ações de controle e de sinalização de reforços das redes A partir da identificação das barras e áreas críticas do sistema.

Em CORTEZ (2001) foi desenvolvido uma proposta de critério e procedimentos para a avaliação de estabilidade de tensão em sistemas de grande porte.

Com a intenção de evitar a ocorrência de instabilidades no sistema, o Operador Nacional do Sistema (ONS) tem a função de intervir a partir de ações de controle. Quando se preocupa

com a estabilidade de tensão, é de interesse conhecer os valores limites de potência reativa nos barramentos do sistema (SILVA, 2018).

Uma ferramenta bastante útil para análise de fornecimento de potência reativa é a curva QV. A utilização da curva pode ajudar a identificar os barramentos críticos do sistema e os valores de injeção de potência reativa necessários para manter a tensão estável.

Diversos trabalhos relevantes nos estudos de estabilidade de tensão utilizaram a ferramenta da curva QV. No Trabalho de PINTO (2013), foi verificado que a curva QV pode auxiliar em estudos que demandam alocação de cargas reativas e compensação. Condicionado ao estudo de perdas em linhas, pode ser uma importante ferramenta para análises de compensação de reativos e manutenção dos níveis de tensão, e a dependência de cada barramento com seus adjacentes.

No estudo de GUIMARÃES et al. (2011), são utilizados a análise da curva QV e a margem de carga para o cenário de planejamento dos melhores locais para a instalação de geração distribuída.

WANG et al. (2009) mostra que a partir do emprego de uma modelagem fuzzy é possível obter uma descrição quantitativa e qualitativa das curvas QV do sistema elétrico, contribuindo para as análises de estabilidade de tensão.

Em PAIVA (2007), a curva QV é utilizada em conjunto com a determinação da margem de carga e o desenvolvimento de uma rotina computacional, sendo possível calcular as margens de potência reativa em todas as barras dos sistemas analisados.

Na pesquisa de MOURA (2016), a curva QV é utilizada como ferramenta para indicar a robustez de geradores através de sua margem de potência reativa. Através do estudo, foi possível verificar que um tipo de margem de potência positiva pode levar um sistema a instabilidade.

No trabalho de SILVA (2018) é verificado a utilização de reguladores de tensão para cálculo da curva QV. O trabalho expõe que a curva QV pode ser uma importante ferramenta para a análise de estabilidade de tensão em sistemas de distribuição de energia.

1.2.Motivação

Visto a relevância da ferramenta da curva QV, em estudos de estabilidade de tensão e a necessidade de desenvolvimento nas análises dos sistemas de distribuição, esse trabalho propõe uma metodologia para cálculo da curva QV em sistemas de distribuição e uma forma de expressá-la por meio de equações. Além disso, busca-se analisar o comportamento dos

coeficientes das equações para diferentes valores de cargas. Se este comportamento resultar em mudanças bruscas de seus coeficientes em pontos próximos ao do máximo carregamento, pode ser possível detectar a carga máxima através dos coeficientes da curva QV.

1.3.Hipóteses

Com base na importância da curva QV nos estudos de estabilidade de tensão, o presente trabalho, ao propor um método de análise através do equacionamento das curvas QV de sistemas de distribuição, levanta as seguintes hipóteses:

- É possível expressar matematicamente a curva QV? Se sim, considerando que cada curva QV é obtida com carga constante, como as equações obtidas para a curva QV se comportam com o aumento da carga?
- As equações apresentarão mudanças significativas de seus coeficientes com o aumento da carga? Se sim, será possível por meio destas equações detectar pontos de carregamento próximos dos limites operacionais?

1.4.Objetivos

Objetivo principal desta monografia é realizar análises de estabilidade de tensão através da determinação de equacionamentos de curvas QV, com diferentes níveis de carregamento. Para atingir esse objetivo foi desenvolvido as seguintes etapas:

- Determinação do máximo carregamento de um sistema utilizando a curva PV.
- Determinação da curva QV de um sistema.
- Determinação de diferentes curvas QV com o incremento de cargas até atingir o máximo carregamento do sistema.
- Determinação dos equacionamentos das diferentes curvas QV
- Avaliação dos coeficientes das equações das curvas QV.

1.5.Estrutura do trabalho

Este trabalho é dividido em 5 capítulos, sendo o capítulo 1 a introdução sobre o tema. Posteriormente, o capítulo 2 fornece uma revisão bibliográfica de alguns conceitos importantes

para o entendimento do trabalho. No capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada, no capítulo 4 os resultados obtidos, e por fim no capítulo 5 as considerações finais.

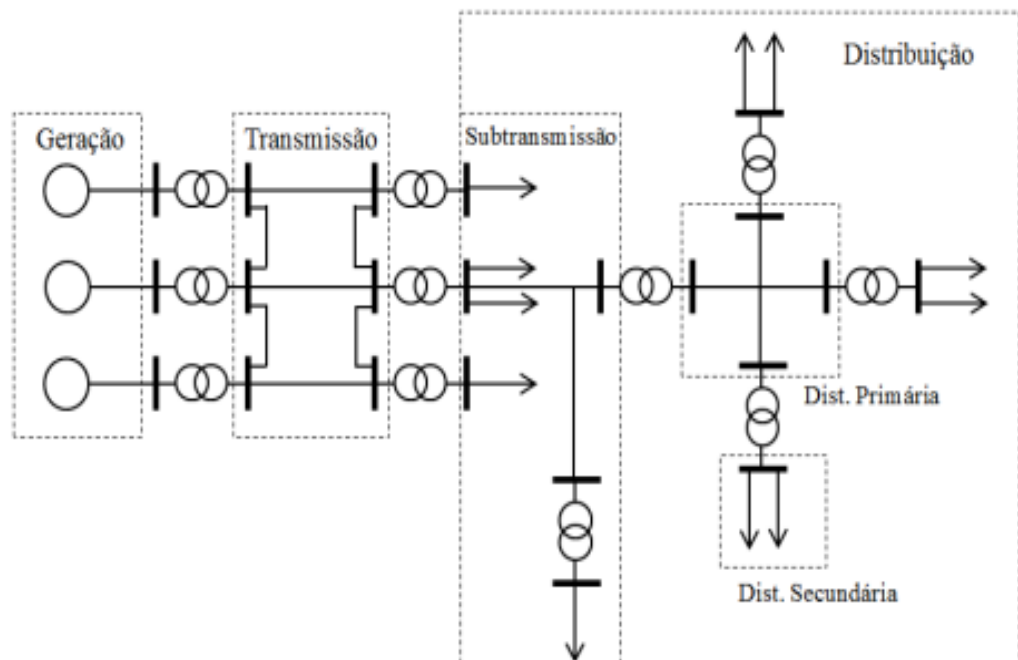
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Sistemas Elétricos de Potência

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) tem a função de converter a energia obtida através de fontes renováveis ou não em eletricidade, e transportar essa energia gerada até os pontos de consumo, sendo estes geralmente situados a longas distâncias. No Brasil, em decorrência do potencial hídrico disponível, as hidrelétricas compõem a maior parcela da geração (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

Os SEP são subdivididos em grupos de geração, transmissão e distribuição. A maior parte da geração é feita em grandes usinas, tendo a tensão gerada elevada, para que em sequência a energia possa fluir nas linhas de transmissão com elevados níveis de tensão, proporcionando menores perdas nos sistemas. As linhas de transmissão são conectadas as subestações de subtransmissão, sendo essas o elo de conexão com as subestações de distribuição e os consumidores finais. A Figura 1 exemplifica as divisões do SEP (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

Figura 1 - Diagrama unifilar do SEP.



Fonte: (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

Os valores de tensões comumente empregados no SEP são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Tensões Usuais no SEP.

Tensões Usuais em Sistemas de Potência			
Tensão (kV)		Campo de aplicação	Área do sistema de potência
Padronizada	Existente		
0,220/0,127	0,110	Distribuição Secundária (BT)	Distribuição
0,380/0,220	0,230/0,115		
13,8	11,9	Distribuição Primária (MT)	
34,5	22,5	Subtransmissão (AT)	
34,5	88,0		
69,0			
138,0	440,0 750,0	Transmissão	Transmissão
138,0			
230,0			
345,0			
500,0			

Fonte: (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

2.2. Distribuição de energia elétrica

Segundo a ANEEL, o sistema de distribuição é o conjunto de redes, instalações e equipamentos elétricos que operam em níveis de alta tensão (superior ou igual a 69 kV e inferior a 230 kV), média tensão (superior a 1 kV e inferior a 69 kV) e baixa tensão (igual ou inferior a 1 kV).

2.2.1. Subtransmissão

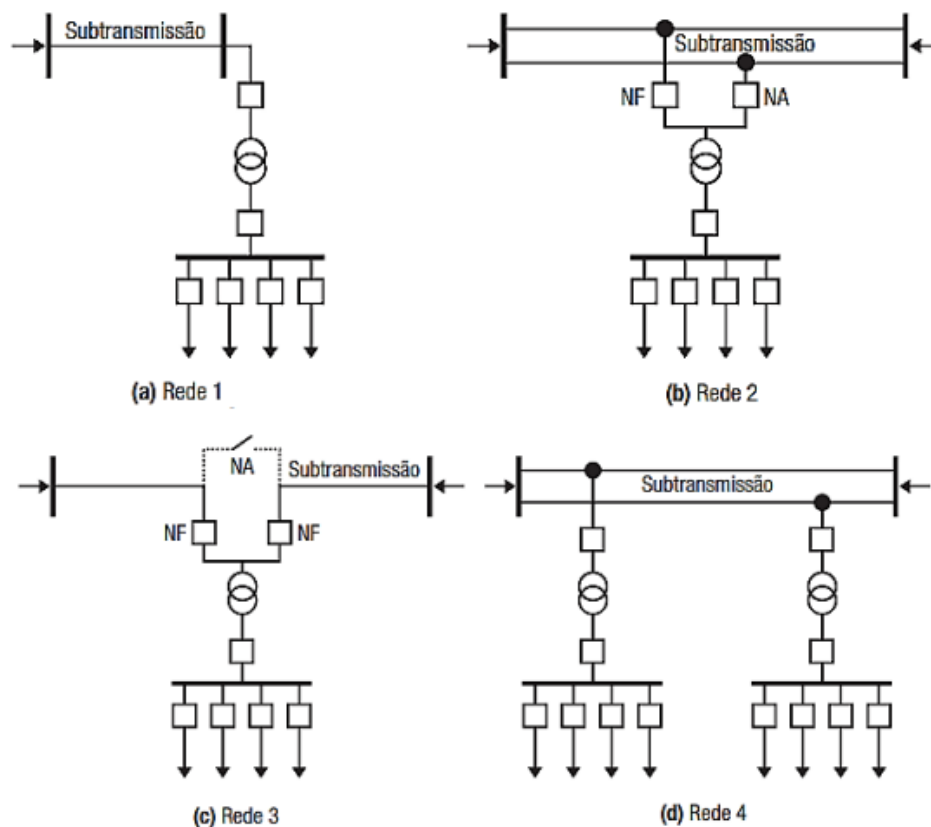
O sistema de subtransmissão é o elo que interliga os grandes blocos de potência com a distribuição de energia aos consumidores. São iniciados nas subestações (SEs) de subtransmissão, que recebem energia com elevados valores de tensão e potência advindos das linhas de transmissão. Partindo das SEs de subtransmissão, as linhas trifásicas alimentam as SEs de distribuição e os consumidores de grande porte (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

Os níveis de tensão empregados na subtransmissão usualmente são de 138kV ou 69kV, ou em alguns casos 34,5kV. Os consumidores nessa faixa de tensão são grandes indústrias, estações de tratamento e bombeamento de água (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

2.2.2. Subestação de distribuição

As SEs de distribuição são responsáveis pela entrega de energia aos consumidores de médio e pequeno porte. Na Figura 2 são visualizados diferentes arranjos de ligação das linhas de subtransmissão com as SEs de distribuição, em que há esquemas com suprimento de energia único e suprimento de duas fontes (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

Figura 2- Arranjos típicos de alimentação da subestação.



Fonte: (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

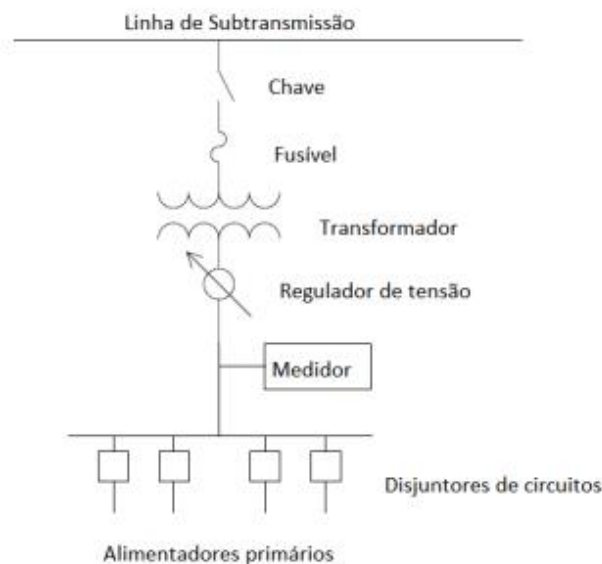
Os diferentes arranjos de uma subestação, que combinam o chaveamento de alta tensão, transformadores abaixadores e chaveamento de tensão primária, proporcionam um grau de confiabilidade e flexibilidade de operação distintos. A escolha do arranjo de subestação está associada a aspectos funcionais e econômicos. Em todos os esquemas da Figura 2, o bloco

situado imediatamente a montante do transformador representa um disjuntor, chave fusível ou chave seccionadora (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

A Figura 2.a) representa o menor custo de instalação, e é utilizado em casos que o transformador da SE não excede a faixa de 10 a 15MVA. No entanto, essa configuração fica dependente do trecho de linha de subtransmissão, pois caso ocorra algum defeito, o fornecimento da SE é interrompido. Na Figura 2.b), caso ocorra um defeito em um dos barramentos da rede de subtransmissão ou de um dos trechos de linha, o suprimento na SE não é interrompido. A configuração da Figura 2.c) é semelhante com a da Figura 2.b), exceto pelas chaves seccionadoras utilizadas. E por fim, o arranjo da Figura 2.d) é de confiabilidade e de custos inferiores aos esquemas 2.b) e 2.c), sendo utilizável em regiões com em que há vários centros de carga, com baixa densidade de carga (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

A subestação de distribuição fornece energia para um ou mais alimentadores primários. Na maioria dos casos, os alimentadores são radiais, ou seja, somente existe um caminho para o fluxo de potência, da subestação até os consumidores finais (KERSTING, 2012).

Figura 3 - Diagrama unifilar de uma subestação.



Fonte: (KERSTING, 2012).

Como visualizado na Figura 3, os principais componentes do sistema de distribuição são:

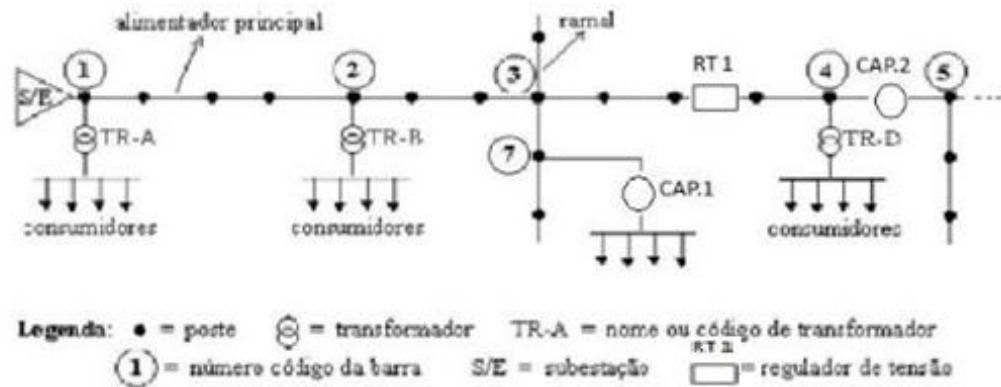
- Transformadores de tensão: Tem a função de adequar a tensão a níveis de distribuição aos seus consumidores. Na representação da Figura 3 é mostrado um único transformador. No entanto, as subestações podem ter uma quantidade maior de transformadores, sendo normalmente trifásicos.;
- Reguladores de tensão: Nos sistemas de distribuição, existe queda de tensão entre a subestação e o ponto de consumo. Deste modo, utilizam-se reguladores para que a tensão fique em níveis aceitáveis, de acordo com os padrões estabelecidos. Os reguladores podem ser instalados no barramento da subestação ou no início de cada alimentador.
- Equipamentos de proteção: Os equipamentos de proteção visam a proteger a instalação da ocorrência de curto-circuito, sobrecarga e descargas atmosféricas. Na Figura 3, estão representados dispositivos de proteção somente no lado de alta tensão, porém os sistemas são projetados com dispositivos de proteção em ambos os lados. Além disso, fora da subestação são instalados outros dispositivos de proteção;
- Equipamentos de medição: Cada subestação tem uma estrutura de medidores. Atualmente os medidores digitais são mais utilizados. Esses medidores registram os valores mínimo, médio e máximo de corrente, tensão, potência, fator de potência, em um intervalo de tempo especificado. Os medidores podem monitorar a saída de cada transformador da subestação e/ou a saída de cada alimentador;
- Banco de capacitores: Tem a função de compensar o reativo da rede, adequando o fator de potência. São instalados nas SEs ou em lugares estratégicos do sistema.

2.2.3. Rede Primária de distribuição

Os alimentadores primários são a parte do sistema de distribuição que conecta a subestação aos consumidores de nível de média tensão, e aos transformadores de distribuição. A faixa de tensão dos alimentadores é de 11,9kV a 34,5kV, sendo empregado 13,8kV na maioria dos casos no Brasil (PAULA, 2016).

Os alimentadores são predominantemente radiais. Tal característica oferece algumas vantagens: facilidade de proteção contra corrente de falta, facilidade no controle de tensão, facilidade de predição e controle do fluxo de potência, menor corrente de falta na maior parte da rede, e menores custos (KERSTING, 2012).

Figura 4 - Topologia padrão de uma rede de distribuição de média tensão.



Fonte: (FELBER, 2010).

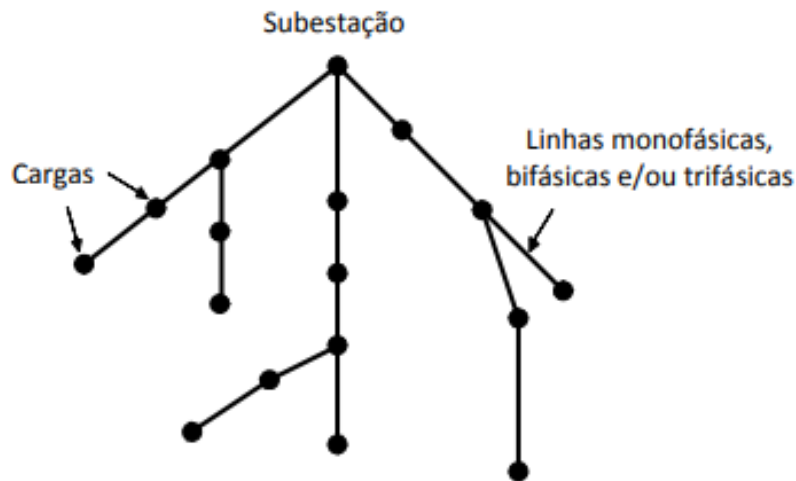
Uma rede de alimentador primário é composta por 3 ou 4 fios (ligação em delta ou estrela), o que caracterizam o corpo principal da rede, de onde alguns ramos podem ser derivados, como visualizado na Figura 4. Os demais componentes da rede são situados de acordo com a necessidade de atendimento as cargas. Cada trecho de linha apresenta características próprias como comprimento, tipo e bitola de cabos, configuração espacial dos cabos (PAULA, 2016).

As linhas de distribuição primária apresentam uma série de parâmetros, as quais são denominadas de “constantes quilométricas” de linha. Esse nome é dado devido aos parâmetros serem medidos ou calculados para um trecho de um quilômetro de linha. Os parâmetros série do modelo de linha são: indutâncias próprias e mútuas, resistências ôhmicas. Os parâmetros em derivação são: condutâncias, que em geral são desprezíveis para os cálculos, e capacitâncias. As constantes quilométricas podem ser definidas em componentes por fase, ou componentes simétricas (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

As redes de distribuição podem ser aéreas ou subterrâneas, com as áreas podendo ser do tipo convencional, compacta isoladas ou compacta protegidas. A implementação das redes áreas é maior, devido os menores custos de instalação e manutenção, porém utilizam-se as subterrâneas em lugares com altas densidades de carga ou restrições paisagísticas (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

Uma característica inerente ao sistema de alimentação primária é o desbalanceamento das fases. Ainda que na rede primária predominam-se as cargas trifásicas, é comum encontrar cargas bifásicas e monofásicas, principalmente em zonas rurais. Na Figura 5 é mostrado as ramificações e cargas desbalanceadas, tipicamente encontradas nos sistemas de distribuição (CARVALHO, 2012).

Figura 5 - Rede de distribuição típica



Fonte: (CARVALHO, 2012).

2.2.4. Rede secundária de distribuição

As Estações Transformadoras (ETs) realizam o abaixamento da tensão da rede primária para níveis da rede secundária. No Brasil os valores padronizados de tensão da rede secundária são: 220/127, predominantemente empregados na região sul e sudeste, e 380/220, nas demais regiões do país (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

As conexões na rede podem ser trifásicas, bifásicas e monofásicas. Os consumidores da rede secundária são compostos de comércios, indústrias de pequeno porte e majoritariamente residências. (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

2.3. Modelagem do sistema de distribuição

2.3.1. Modelagem de linhas de distribuição

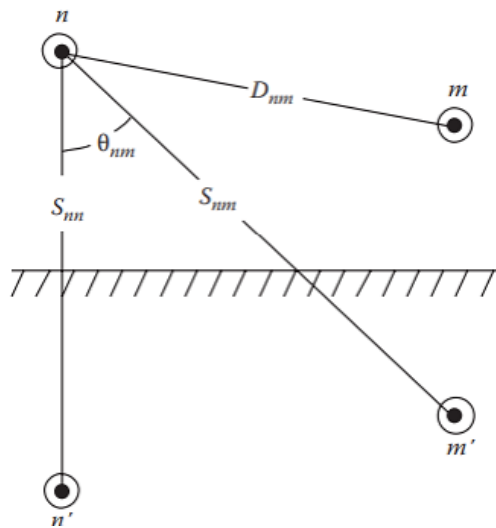
A modelagem matemática de linhas de distribuição é baseada nas características elétricas e construtivas da linha, tais como a resistência, indutância, condutância, capacitância, distâncias e topologia de rede utilizada. A modelagem é feita a partir da determinação das matrizes com os parâmetros de impedância série e shunt.

Os parâmetros de resistência dos cabos geralmente são tabelados pelo fabricante. Já os parâmetros de indutância podem ser determinados utilizando o método de Carson. Na publicação do artigo de CARSON (1926), ele desenvolveu um método para o cálculo das

impedâncias próprias e mútuas de n condutores aéreos. Essas equações também podem ser utilizadas para cabos subterrâneos (KERSTING, 2012).

No artigo de Carson, foi considerado que a terra era uma superfície infinita, uniformemente sólida, com uma superfície plana e resistência infinita. A partir disso, ele fez uso de imagens de condutores, pois cada condutor a uma distância dada da terra tem uma imagem do condutor na mesma distância abaixo do chão, conforme mostrado na Figura 6. O cálculo de impedâncias próprias e mútuas é dado pelas equações (2.1) e (2.2) (KERSTING, 2012).

Figura 6 – Condutores e imagens.



Fonte: (KERSTING, 2012).

$$z_{ii} = r_i + \omega P_{ii} G + j(X_i + 2\omega G \cdot \ln \frac{S_{ii}}{RD_i} + 4\omega Q_{ii} G) \quad (2.1)$$

$$z_{ij} = 4\omega P_{ij} G + j(2\omega G \cdot \ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} + 4\omega Q_{ij} G) \quad (2.2)$$

$$X_i = 2\omega G \ln \frac{RD_i}{GMR_i} \quad (2.3)$$

$$P_{ij} = \frac{\pi}{8} - \frac{1}{3\sqrt{2}} k_{ij} \cos \theta_{ij} + \frac{k_{ij}^2}{16} \cos 2\theta_{ij} \cdot (0,6728 + \ln \frac{2}{k_{ij}}) \quad (2.4)$$

$$k_{ij} = 8,565 \cdot 10^{-4} \cdot S_{ij} \cdot \sqrt{\frac{f}{\rho}} \quad (2.5)$$

$$Q_{ij} = -0,038610 + \frac{1}{2} \ln \frac{2}{k_{ij}} + \frac{1}{3\sqrt{2}} k_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (2.6)$$

z_{ii} é a impedância própria do condutor i (Ω / milha);

z_{ij} é a impedância mútua entre os condutores i e j (Ω / milha);

r_i é a resistência do condutor i (Ω / milha);

ω é a frequência angular do sistema (rad /s);

$G = 0,1609347 \times 10^{-3}$ (Ω / milha);

RD_i é o raio do condutor i (ft);

GMR_i é o raio médio geométrico do condutor i (ft);

f é a frequência do sistema (Hz);

ρ é a resistividade do solo (Ω -m);

D_{ij} é a distância entre os condutores i e j (ft);

S_{ij} é a distância entre o condutor i e a imagem do condutor j (ft);

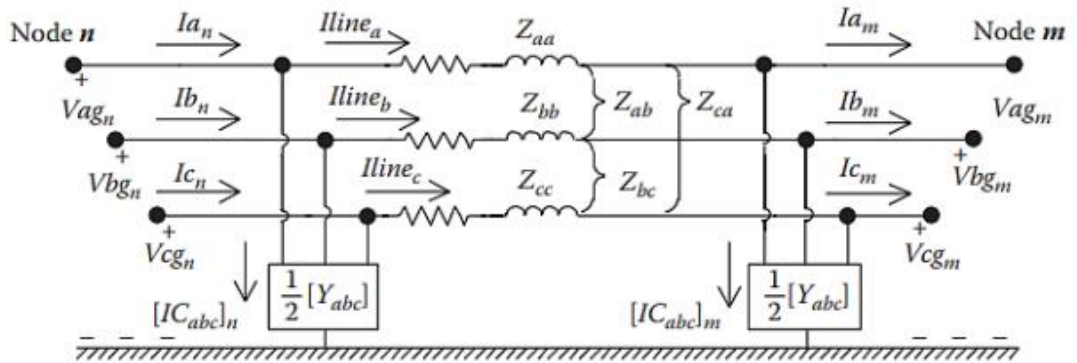
θ_{ij} é o ângulo entre um par de linhas desenhadas do condutor i para sua própria imagem e para a imagem do condutor j .

Utilizando as Equações (2.1) e (2.2), é montado a matriz primitiva de impedâncias, com dimensão $n_{cond} \times n_{cond}$, relativo ao número de condutores envolvidos no sistema em análise. Em linhas de distribuição, além das três fases, podem existir o cabo de neutro, ou linhas paralelas entre si. A matriz primitiva de impedâncias está representada pela Equação (2.3):

$$[Z_{primitiva}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & \cdots & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & \cdots & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & \cdots & Z_{cn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

O modelo de linha exato é representado na Figura 7. Caso a linha analisada for bifásica ou monofásica, as matrizes de impedâncias são formadas introduzindo valores nulos nas colunas e linhas das fases faltantes.

Figura 7 – Modelo de linha exato.



Fonte: (KERSTING, 2012).

A partir do modelo de linha exato, aplicando a lei de Kirchhoff de tensões no circuito da Figura 7, é obtido a relação de tensão e corrente entre os nós do seguimento de linha. A forma matricial particionada está indicada pela Equação (2.4):

$$\begin{bmatrix} [VLG_{abc}]_n \\ [I_{abc}]_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [a] & [b] \\ [c] & [d] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [VLG_{abc}]_m \\ [I_{abc}]_m \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

As matrizes [a], [b], [c] e [d] são conhecidos como matrizes de linha generalizadas, e são calculadas em função das impedâncias e admitâncias da linha, mostradas nas Equações de (2.5) a (2.8):

$$[a] = [U] + \frac{1}{2}[Z_{abc}] \cdot [Y_{abc}] \quad (2.9)$$

$$[b] = [Z_{abc}] \quad (2.10)$$

$$[c] = [Y_{abc}] + \frac{1}{4}[Y_{abc}][Z_{abc}] \cdot [Y_{abc}] \quad (2.11)$$

$$[d] = [U] + \frac{1}{2}[Z_{abc}] \cdot [Y_{abc}] \quad (2.12)$$

As matrizes de admitância shunt, devido as características dos sistemas de distribuição, normalmente são desprezadas, por apresentar valores na ordem de 10^{-6} , sendo insignificantes para os cálculos (KERSTING, 2012).

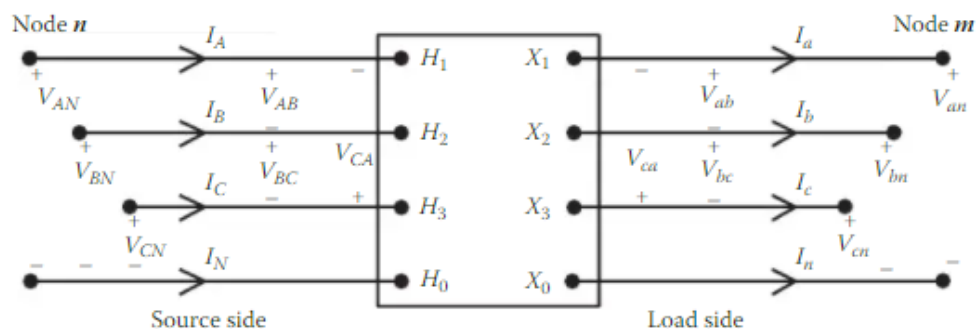
2.3.2. Modelagem dos transformadores

Os transformadores dos sistemas de distribuição são de grande importância na adequação dos níveis de tensão para os consumidores finais. Na maioria dos casos, os transformadores encontrados nas subestações são unidades trifásicas, contendo taps de regulação de tensão no lado de baixa (KERSTING, 2012).

Uma variedade de conexões de transformadores podem ser aplicadas, sendo elas: delta-delta; delta-estrela, delta-estrela aterrada; estrela-delta; estrela-estrela. Nas análises dos sistemas de distribuição, é muito importante que as modelagens de cada uma das conexões sejam feitas da forma correta (KERSTING, 2012).

Na Figura 8 é mostrado a representação de um transformador trifásico, com as tensões e correntes no lado da fonte (Nó n) e do lado da carga (Nó m). O modelo da Figura 8 pode representar um transformador abaixador ou elevador de tensão (KERSTING, 2012).

Figura 8 - Modelo transformador trifásico.



Fonte: (KERSTING, 2012).

As matrizes que representam as relações de tensão e corrente entre os lados, estão apresentadas nas Equações (2.9) e (2.10):

$$[VLN_{ABC}] = [A_t] \cdot [VLN_{abc}] - [B_t] \cdot [I_{abc}] \quad (2.13)$$

$$[I_{ABC}] = [C_t] \cdot [VLN_{abc}] + [D_t] \cdot [I_{abc}] \quad (2.14)$$

As matrizes $[A_t]$, $[B_t]$, $[C_t]$, $[D_t]$, são matrizes generalizadas da modelagem dos transformadores e definidas de acordo com o tipo de ligação do transformador. São

demonstradas detalhadamente na obra “*Distribution System Modeling and Analysis*” da referência de KERSTING (2012).

2.3.3. Modelagem das cargas

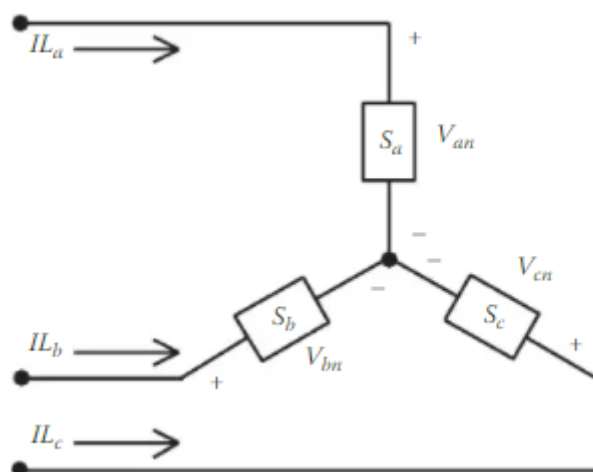
Normalmente, as cargas nos sistemas de distribuição são especificadas pela potência complexa consumida. A tensão especificada sempre será a tensão do barramento do lado de baixa da subestação de distribuição. As cargas conectadas aos alimentadores de distribuição podem ser modeladas com ligação em estrela ou em delta, podendo ser trifásicas, bifásicas ou monofásicas, com qualquer grau de desbalanceamento (KERSTING, 2012).

Os modelos de cargas podem ser dos tipos: Impedância constante (Z); Corrente constante (I); Potência ativa e reativa constantes (P); ou cargas com a combinação destes modelos (ZIP) (KERSTING, 2012)..

Os modelos de carga desenvolvidos são usados em um processo iterativo de um programa de fluxo de potência onde as tensões em um determinado barramento são inicialmente assumidas. Através da convergência do programa de fluxo de potência, todas as tensões do sistema podem ser conhecidas. (KERSTING, 2012).

Na Figura 9 é mostrado a representação de uma carga trifásica ligada em estrela.

Figura 9 - Carga conectada em estrela.



Fonte: (KERSTING, 2012).

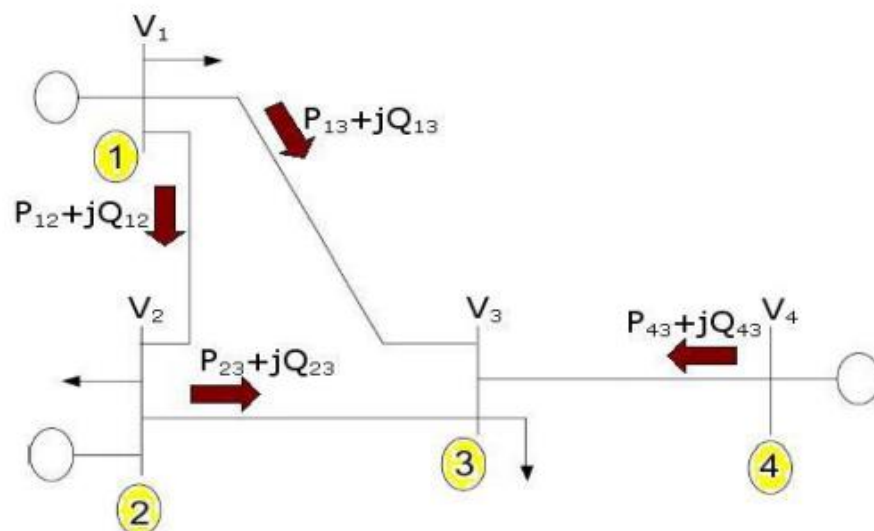
2.4. Fluxo de Potência

As análises de fluxo de potência são bastante utilizadas em SEP. Consistem na determinação das tensões complexas em cada barramento do sistema, no cálculo dos valores de potência ativa e reativa que fluem pelo sistema, nas perdas envolvidas, e outras variáveis de interesse, dado um nível de carga e geração especificados, e as informações de topologia e parâmetros da rede. Através do fluxo de potência é possível analisar as características de funcionamento global do sistema (FILHO, 2000).

Dentre as aplicações do fluxo de potência, estão a análise de segurança que permite a simulação dos limites de operação, permitindo o desenvolvimento de medidas preventivas e corretivas, dando confiabilidade ao sistema. O cálculo de fluxo de potência também pode ser utilizado em planejamentos de expansão, verificando assim o funcionamento da nova configuração de rede (FILHO, 2000).

As equações para os cálculos de fluxo de potência são baseadas na primeira lei de Kirchoff, que define que a soma das correntes que chegam em um nó é igual as correntes que saem dele, que se relaciona à conservação das potências ativa e reativa em cada barramento do sistema, ou seja, o somatório das potências injetadas no barramento é igual as potências que fluem nos componentes conectados a este (FILHO, 2000).

Figura 10 - Fluxo de potência entre barramentos.



Fonte: (PUC).

A Figura 10 mostra barramentos de SEP, numerados de 1 a 4, com cargas (1, 2 e 3) e geradores (1, 2 e 4) conectados. Além disso, notam-se os fluxos de potências ativas e reativas, ou seja, uma potência aparente complexa que flui de uma barra i para uma barra j é dada por $S_{ij} = P_{ij} + Q_{ij}$.

Um dos métodos que é bastante utilizado para os cálculos de fluxo de potência é o método de Newton Raphson. Este método é caracterizado pela sua convergência quadrática, adequado para a aplicação de sistemas de grande porte, onde dispositivos de controle são representados. Além disso a matriz jacobiana é altamente esparsa, com soluções rápidas e diretas das equações iterativas (FILHO, 2000).

Devido as características radiais do sistema de distribuição, o método utilizado no trabalho para os cálculos de fluxo de potência é o método iterativo de progressão modificada, que será detalhado posteriormente.

2.4.1. Método iterativo de progressão modificada

Quando a tensão da fonte é especificada e a carga é conhecida em alguns dos modelos ZIP de carga descritos anteriormente, o sistema se torna não linear, necessitando de um método iterativo para os cálculos dos valores de correntes e tensões nos barramentos do sistema (KERSTING, 2012).

O método iterativo de progressão modificada é composto por duas partes: varredura para frente e varredura para trás. A varredura para frente calcula as tensões a jusante partindo da fonte até a carga, conforme indicado pela Equação (2.11). Na primeira iteração, normalmente é assumido um valor nulo das correntes da carga $[I_{abc}]_m$ para calcular as tensões (KERSTING, 2012). Como consequência, o primeiro valor de tensão de carga é numericamente igual à tensão na fonte na primeira iteração.

$$[VLG_{abc}]_m = [A] \cdot [VLG_{abc}]_n - [B][I_{abc}]_m \quad (2.15)$$

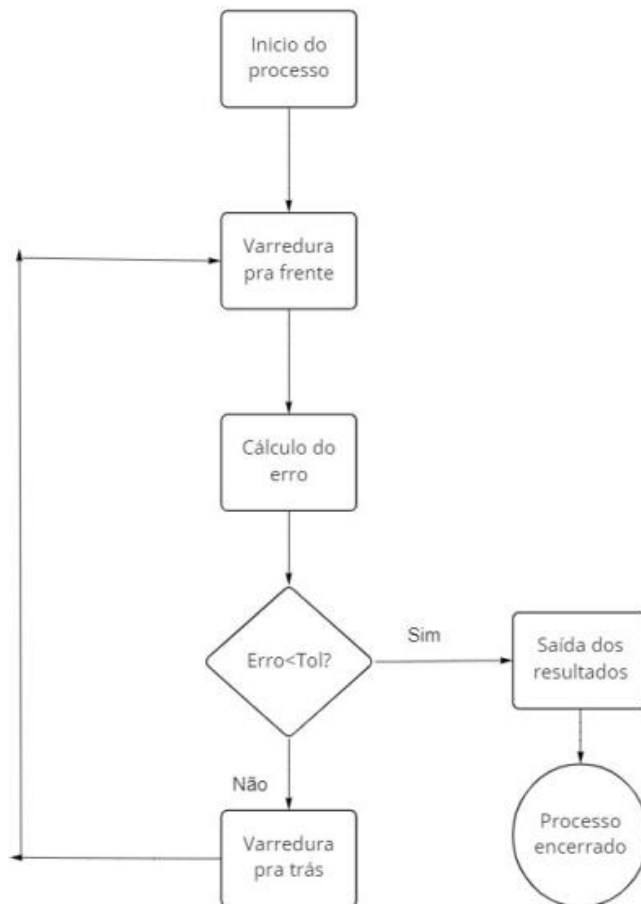
A varredura para trás calcula as correntes de trás da carga para a fonte, com os valores de tensão mais recentes obtidos na varredura para frente. A Equação (2.12) é utilizada na varredura para trás:

$$[I_{abc}]_n = [C] \cdot [VLG_{abc}]_m + [D] \cdot [I_{abc}]_m \quad (2.16)$$

Depois da primeira varredura, os novos valores de tensão das cargas são calculados utilizando as correntes mais recentes. O processo continua até que o erro, entre os novos valores de tensões de carga e os anteriores, esteja abaixo da tolerância especificada.

Na Figura 11, é apresentado um fluxograma que descreve os passos do método iterativo. Caso o processo tenha estabelecido um número máximo de iterações possíveis e o erro estabelecido estiver acima da tolerância, o cálculo do fluxo de potência diverge.

Figura 11 – Fluxograma do método iterativo.



Fonte: Adaptado de (KERSTING, 2012).

2.5. Estabilidade do Sistemas Elétricos de Potência

A estabilidade do SEP é definida como a capacidade do sistema permanecer em equilíbrio, em condições normais de operação de acordo com os parâmetros previamente

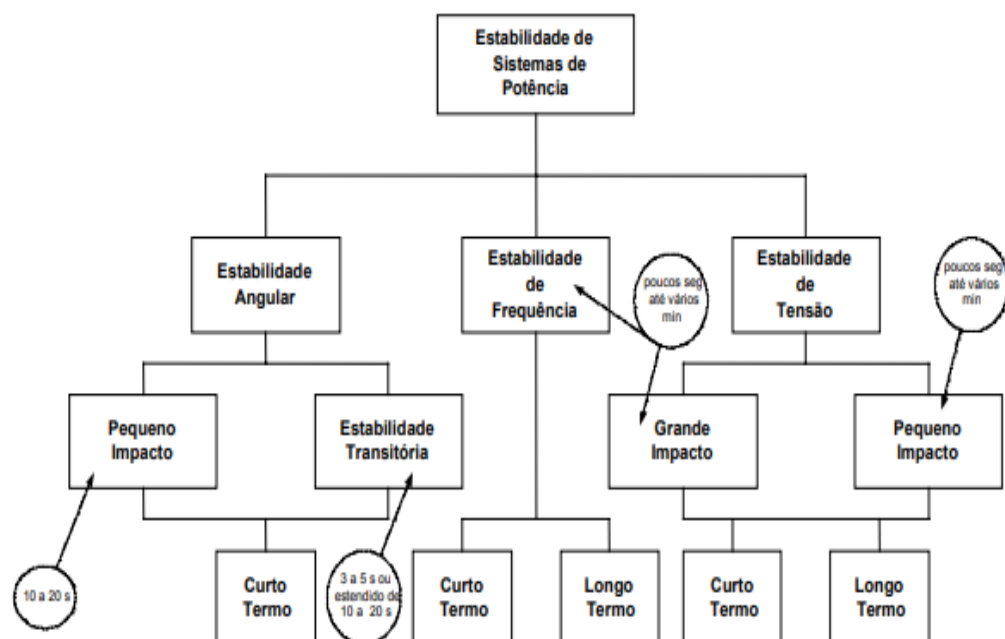
determinados, e retomar essas condições de equilíbrio após a ocorrência de distúrbios (KUNDUR et al., 2004).

O sistema elétrico deve suportar a ocorrência de distúrbios, tais como: variações de carga, curto em linhas de transmissão, retirada repentina de elementos do sistema, desligamento de centrais geradoras, entre outros. Na incapacidade de operação satisfatória, com a ocorrência de algum dos eventos citados, o sistema fica sobre a condição de instabilidade (KUNDUR, 1994).

Devido a toda complexidade do sistema elétrico, se faz necessário a diferenciação das características, como os impactos de pequeno e grande porte, a instabilidade envolvida, as influências dos elementos e o período de ocorrência do distúrbio, permitindo a divisão dos estudos de estabilidade. A Figura 12 fornece uma visão geral dos problemas de estabilidade em SEP, identificando as categorias e subcategorias (KUNDUR et al., 2004).

Os estudos de estabilidade são divididos em três tipos: angular, frequência e de tensão. O primeiro está relacionado a capacidade das unidades de geração se manterem em sincronismo; o segundo está relacionado com a capacidade do sistema se manter com os níveis permissíveis de frequência, após sofrer um forte desequilíbrio entre geração e carga; e por fim o terceiro está relacionado com os fenômenos não lineares na evolução do processo dinâmico. Como o foco deste trabalho é no estudo de estabilidade de tensão, este será detalhado a seguir (KUNDUR et al., 2004).

Figura 12 - Classificação da Estabilidade de Sistemas de Potência.



Fonte: (KUNDUR et al., 2004).

2.4.1 Estabilidade de tensão

Os estudos de estabilidade de tensão são de grande importância para o SEP, devido ao constante aumento de demanda energética ao longo dos anos, as restrições econômicas e ambientais, e o aumento da inserção de fontes geração de energia renováveis nos sistemas de distribuição (SILVA, 2015).

A estabilidade de tensão de um SEP pode ser definida como a capacidade deste sistema permanecer com valores de tensão aceitáveis em todos os barramentos da rede durante as condições normais de operação, e retorno a estas condições após a ocorrência de distúrbios. Depende da capacidade do sistema de manter e restaurar o equilíbrio entre a demanda e fornecimento da carga. A instabilidade pode resultar em quedas ou aumentos progressivos de tensão em alguns barramentos, levando a possível perda de carga em uma região do sistema, ou provocando interrupções em cascata devido a acionamentos dos dispositivos de proteção de linhas de transmissão ou outros elementos do sistema (KUNDUR et al., 2004).

A dinâmica das cargas são um fator de ocorrência de eventos de instabilidade de tensão. Em resposta a um distúrbio, o sistema tenta estabilizar e retornar o fornecimento das cargas que foram desligadas. A dinâmica de restauração das cargas do sistema pode provocar instabilidade na rede de alta tensão, caso o aumento da potência reativa consumida for além da capacidade da rede de transmissão e geração conectadas, e assim levando a redução de tensão (KUNDUR et al., 2004).

Um fator importante que contribui para a instabilidade de tensão é a queda de tensão ocorrida devido ao fluxo de potência ativa e reativa ao longo de reatâncias indutivas das linhas de transmissão; e assim limitando o fornecimento de potência e suporte de tensão do sistema. A transmissão de energia e o suporte de tensão são fortemente limitados quando a corrente de excitação de campo de alguns geradores atinge os seus limites de sobrecarga (KUNDUR et al., 2004).

Embora a forma mais comum de instabilidade de tensão seja a queda progressiva das tensões dos barramentos, a instabilidade com aumento de tensão também pode ocorrer. Sendo causada por um comportamento capacitivo das linhas de transmissão, quando a operação se dá abaixo da impedância de surto, ou quando limitadores de subexcitação impedem que geradores e/ou compensadores síncronos absorvam o excesso de potência reativa, que não foi consumida pelas cargas do sistema. (KUNDUR et al., 2004).

Um termo muito utilizado nos estudos é o colapso de tensão. Sendo gerado a partir de eventos de instabilidade de tensão que levam o sistema a blecautes, ou tensões a níveis absurdamente baixos em partes significativas do sistema. A operação em baixos níveis de tensão pode continuar depois que os taps dos transformadores do sistema atingirem o seu limite de aumento (KUNDUR et al., 2004).

Como visualizado na Figura 12, o estudo de estabilidade de tensão pode ser dividido em algumas subcategorias, que são:

➤ Estabilidade de tensão de grandes impactos: É a capacidade do sistema se manter com tensões estáveis, após a ocorrência de grandes distúrbios, como curto-circuito, perda de geração, ou contingências da rede. Essa capacidade é determinada a partir de características do sistema e da carga, e das iterações contínuas e discretas de controle e de proteção. Este tipo de estudo solicita o exame de respostas não lineares do sistema durante um período suficiente para capturar o desempenho e as interações de dispositivos como motores, comutadores de transformador de sub carga e limitadores de corrente de campo do gerador. O período de estudo pode ser estendido de alguns segundos até vários minutos;

➤ Estabilidade de tensão de pequenos impactos: É a capacidade do sistema em manter as tensões estáveis quando submetido a pequenos distúrbios, como incrementos na carga do sistema. Esta forma de estabilidade é influenciada pelas características de cargas, controles contínuos e discretos em um determinado instante de tempo. Este conceito é útil para determinar, a qualquer instante, como as tensões do sistema responderão a pequenas alterações do sistema. Com suposições apropriadas, os sistemas de equações podem ser linearizados para análise, permitindo assim o importante cálculo de sensibilidade, útil em identificar fatores que influenciam a estabilidade. Essa linearização, no entanto, não pode levar em conta efeitos não lineares, como controles de mudança de tap (bandas mortas, etapas de derivação discretas e atrasos). Dessa forma, uma combinação linear e análises não lineares são usadas de maneira complementar;

➤ Estabilidade de tensão a curto prazo: envolve dinâmicas de componentes de carga atuantes, como motores de indução, cargas controladas eletronicamente e conversores HVDC. O período de estudo de interesse é da ordem de vários segundos, e a análise requer solução de equações diferenciais do sistema, sendo semelhante à análise da estabilidade angular. A modelagem dinâmica de cargas e os curtos-circuitos perto de cargas são importantes;

➤ Estabilidade de tensão a longo prazo: Engloba equipamentos de ação mais lenta, como transformadores com mudanças de tap, cargas controladas com termostatos e limitadores de corrente do gerador. O período de interesse do estudo pode estender-se a vários ou muitos

minutos, e simulações de longo prazo são necessárias para a análise de desempenho dinâmico do sistema. É geralmente determinado pela interrupção resultante do equipamento, em vez da gravidade do distúrbio inicial. A instabilidade é devido à perda do equilíbrio de longo prazo, ponto de operação de estado estacionário pós distúrbio ser instável em pequenas perturbações ou falta de atração em direção ao equilíbrio pós distúrbio estável. A perturbação também pode ser um acúmulo de carga sustentado (por exemplo, aumento da carga matinal). Em muitos casos, a análise estática pode ser usada para estimar as margens de estabilidade, identificar fatores que influenciam a estabilidade e uma ampla gama de condições do sistema. Quando o tempo das ações de controle for importante, isso deve ser complementado pelas simulações quase dinâmicas no domínio do tempo.

Como visto nessa seção, os estudos de estabilidade de tensão são de grande importância para o funcionamento adequado do SEP, auxiliam nas análises e propostas de melhorias dele. Este TCC focará na Estabilidade de Tensão de pequenos impactos e utilizará as curvas QV e PV, ferramentas de grande valia nesses estudos.

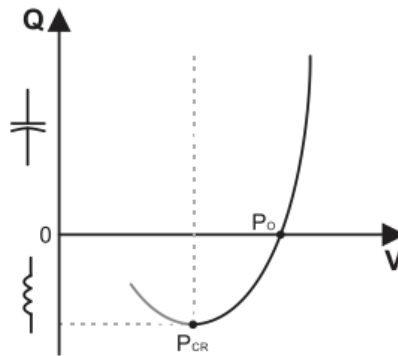
2.6.Ferramentas de análise de estabilidade de tensão

2.6.1. Curva QV

Uma característica muito útil que se busca analisar em estudos de estabilidade de tensão é a relação entre potência reativa(Q) e tensão(V), que apresenta certa sensibilidade entre si devido às injeções ou absorções de potência reativa no sistema (KUNDUR., 1994).

A Figura 13 apresenta uma curva QV típica. O ponto P_{CR} apresenta a derivada de dQ/dV igual a zero e representa o limite de estabilidade de operação do sistema. Os pontos a direita de P_{CR} fazem parte da região estável, enquanto a esquerda tem-se a região de instabilidade. Além disso, tem-se regiões de injeção de potência reativa capacitiva e indutiva na Figura 13 (SILVA, 2015).

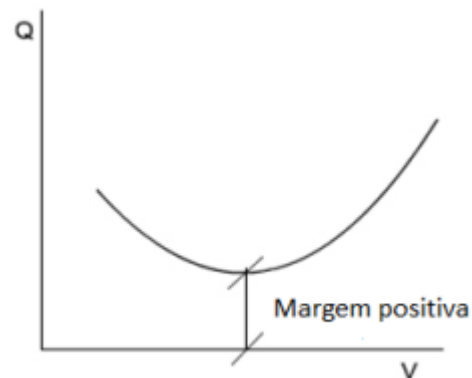
Figura 13 - Curva QV típica.



Fonte: (SILVA, 2015).

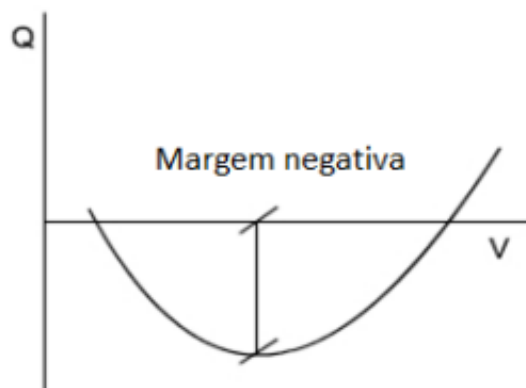
Na análise das curvas QV, a distância entre o ponto crítico P_{CR} e o eixo horizontal representa a margem de potência reativa do sistema, podendo ser do tipo positiva ou negativa, como visualizado nas Figuras 14 e 15 (MOURA., 2016).

Figura 14 - Curva QV com margem positiva de potência reativa.



Fonte: (MOURA., 2016).

Figura 15 - Curva QV com margem negativa de potência reativa.



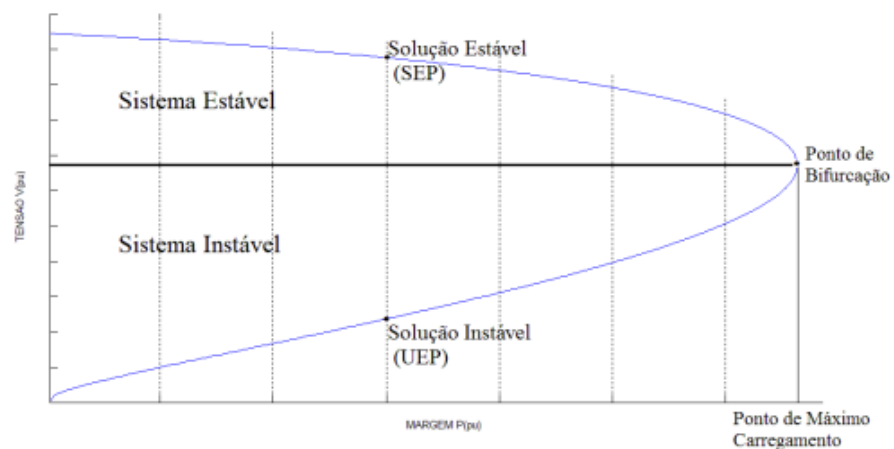
Fonte: (MOURA, 2016).

2.6.2. Curva PV

A Curva PV descreve o comportamento da tensão em função do aumento do nível de carga em determinado barramento. Para traçar a curva PV, primeiramente é calculado o fluxo de potência para o ponto inicial de carga do sistema analisado, considerando a potência igual a 1 pu. Posteriormente, para o cálculo dos demais pontos da curva, aumenta-se o carregamento, mantendo o fator de potência, e obtém-se o correspondente ponto operativo.

A análise da curva PV permite a identificação do ponto de máximo carregamento do sistema. A distância entre ponto operacional atual até o máximo carregamento é chamada de margem de carga. Na Curva PV existem duas soluções de valores de tensão para a mesma potência, uma na parte estável da curva e outra na parte instável, exceto no ponto de bifurcação que representa a máxima carga, conforme ilustrado na Figura 16 (PINTO, 2013).

Figura 16 - Curva PV típica.



Fonte: (PINTO, 2013).

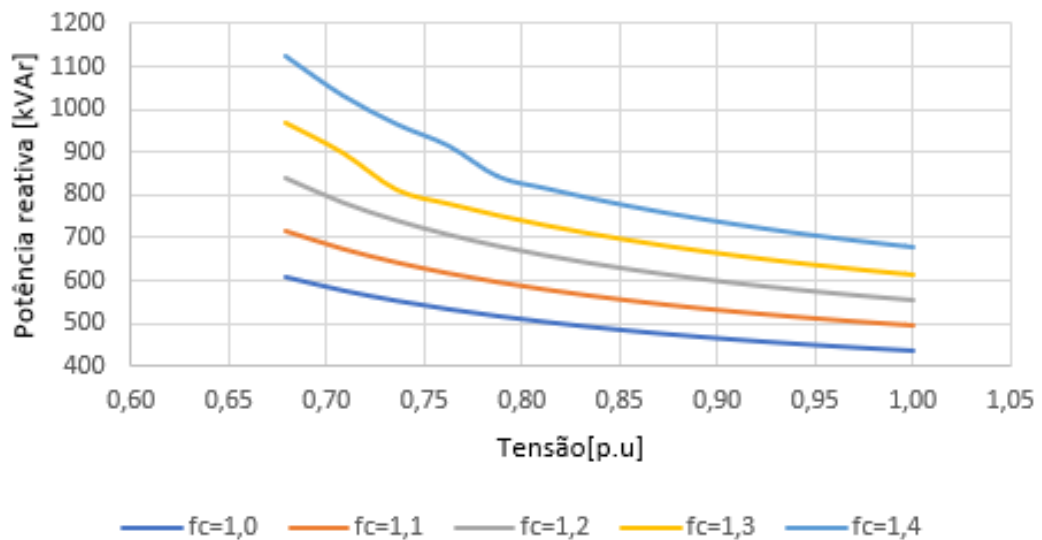
2.7. Necessidade de previsão de equação matemática

Nos estudos do comportamento físico de sistemas elétricos são utilizados diferentes tipos de técnicas. A utilização de equações matemáticas, que descrevem determinados fenômenos, permite análises e construções de tabelas e gráficos de grandezas físicas relacionadas. De tal modo que são importantes ferramentas para quantificação do fenômeno e previsões de possíveis ocorrências, dentro dos seus limites de aplicação. Modelos de

programação matemática são muito utilizados na resolução de problemas de otimização, relacionados à operação e planejamento de sistemas de distribuição (SILVA,2021).

A curva QV, importante ferramenta nas análises de estabilidade de tensão nos sistemas, descreve a injeção de potência reativa em função da tensão em determinado sistema. Para determinação do equacionamento da curva QV são utilizadas funções de polinômios de primeira, segunda e terceira ordem. A forma da curva e, conseqüentemente, os coeficientes das equações obtidas estão relacionados às características do sistema e ao nível de carga suprida. Por exemplo, na Figura 17 é mostrado diferentes curvas obtidas com a variação do fator de carga (f_c) em um sistema.

Figura 17- Curvas QV de um sistema com variação de carga.



Fonte: Autor.

O presente trabalho visa analisar o comportamento do carregamento do sistema de distribuição através dos coeficientes da curva QV. A metodologia empregada para o estudo é apresentada no próximo capítulo.

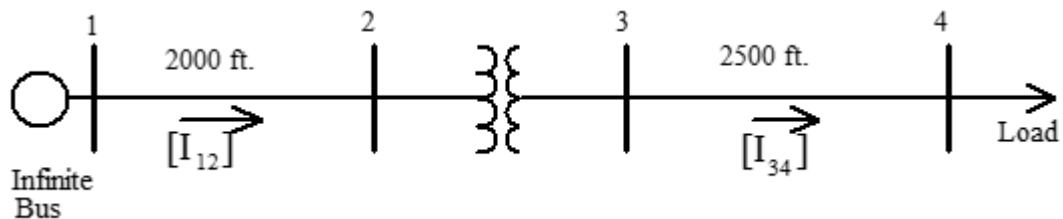
3. METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentado o sistema teste utilizado e a metodologia empregada para a determinação dos equacionamentos das curvas QV em sistemas de distribuição. Para o estudo foi utilizado um sistema teste de distribuição. Todas as simulações do sistema teste foram realizadas utilizando o *software* MATLAB.

3.1. Sistema IEEE 4 Node test feeder.

O sistema teste utilizado no trabalho é mostrado na Figura 18. Esse sistema teste da IEEE é conhecido nos estudos de sistemas de distribuição. Ele é formado por quatro barramentos, contendo dois trechos de linhas conectados por um banco de transformadores monofásicos, com tensão de 12,47/2,4kV ligado em delta/estrela aterrado. Neste sistema as duas extremidades são compostas por fonte (barramento 1) e carga (barramento 4). Os demais dados do sistema estão disponíveis na Tabela 2.

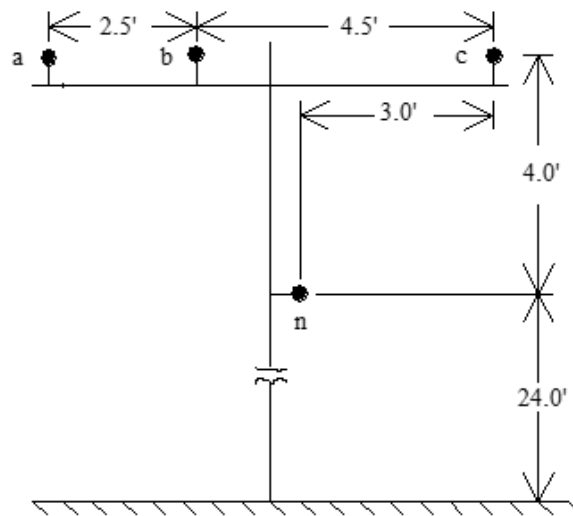
Figura 18 – Sistema teste IEEE.



Fonte: (XENDEE,2021).

Os dois trechos de linha têm as configurações dos polos, como mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Configuração dos polos do sistema teste.



Fonte: (XENDEE,2021).

Tabela 2- Dados do sistema teste.

Dados do sistema teste IEEE 4 node	
Carga potência constante - Fase A	750kVA $f_p=0,85$
Carga potência constante - Fase B	1000kVA $f_p=0,90$
Carga potência constante - Fase C	1230kVA $f_p=0,95$
Impedância transformador monofásico	$(1.0+j6)$ pu
Potência transformador monofásico	2000kVA
Condutores de fase seguimentos 1-2 e 3-4	336,4 26/7 ACSR
Condutor de neutro	4/0 6/1 ACSR

Fonte: (KERSTING, 2012).

3.2. Curva PV do sistema teste.

Como visto no capítulo anterior, a curva PV é uma importante ferramenta nos estudos de estabilidade de tensão. Deste modo, ela será utilizada para identificação do máximo carregamento do sistema teste da IEEE.

A curva PV é obtida a partir do incremento do fator de carga e cálculo da tensão pelo fluxo de potência.

Para os cálculos de fluxo de potência e plotagem da curva PV, foi utilizado o método iterativo de progressão modificada. Com base nos dados do sistema teste, foi desenvolvido um algoritmo no MATLAB, seguindo os seguintes passos:

- Cálculo das matrizes de impedâncias dos seguimentos de linha 1-2 e 3-4 do sistema teste apresentado, conforme o método de Carson do uso de imagens dos condutores.
- Definição das cargas conectadas ao sistema, o ponto operacional inicial das cargas é definido como 1 pu.
- Cálculo da matriz de impedância do transformador.
- Cálculo das matrizes generalizadas de varredura para frente e para trás dos elementos séries do sistema.
- Especificações das tensões trifásicas da fonte no barramento 1.
- Para início do processo, as correntes da fonte e da carga são definidas como zero, o que resulta na tensão da carga ser igual a da tensão da fonte.
- A tolerância do processo é 0.001. E o número de interações máximas do sistema é 100.
- O processo de varredura para frente e para trás é feito até a convergência do fluxo de potência, ou seja, quando os valores de tensões das cargas entre duas iterações consecutivas estiverem abaixo da tolerância especificada.
- Após o cálculo e convergência fluxo de potência, o valor da tensão trifásica da carga é armazenado.
- Posteriormente, é acrescido 0,1 pu no fator de carga inicial, e repetido o processo no cálculo do fluxo de potência.
- A etapa anterior é repetida até que não haja convergência no cálculo de fluxo de potência. O último valor de fator de carga encontrado é o máximo carregamento do sistema.
- Com os respectivos valores de tensão e potência encontrados nos cálculos de fluxo de potência, são plotados as curvas PV de cada fase.

3.3. Curva QV do sistema teste.

A plotagem da curva QV se dá a partir da variação da tensão de um determinado gerador, desconsiderando limites de fornecimento de potência reativa do mesmo. A curva representa a

relação entre a potência reativa gerada em função do nível de tensão. Para traçar a curva QV é necessário que a carga alimentada seja constante.

Para a obtenção da curva QV do sistema teste IEEE 4 *node*, foi realizado o procedimento de variação de tensão do barramento 1 de geração e cálculos de fluxo de potência, obtendo o valores de geração de reativos no barramento necessários para o suprimento das cargas. O desenvolvimento do algoritmo no MATLAB se deu a partir dos seguintes passos:

- Cálculo das matrizes de impedâncias dos segmentos de linha 1-2 e 3-4 do sistema teste apresentado, conforme o método de Carson do uso de imagens dos condutores.
- Definição das cargas conectadas ao sistema.
- Cálculo da matriz de impedância do transformador.
- Cálculo das matrizes generalizadas de varredura para frente e para trás dos elementos séries do sistema.
- A tensão inicial do gerador é a descrita no sistema "*IEEE 4 Node Test Feeder*".
- Para início do processo, as correntes da fonte e da carga são definidas como zero. Isto resulta na tensão da carga ser igual ao da fonte.
- A tolerância do processo é 0.001. E o número de interações máximas do sistema é 100.
- O processo de varredura para frente e para trás é feito até a convergência do fluxo de potência, ou seja, quando os valores de tensões das cargas entre duas iterações consecutivas estiverem abaixo da tolerância especificada.
- Após o cálculo e convergência do fluxo de potência, os valores de potência reativa geradas no barramento 1 são computados para cada uma das fases.
- Após esse procedimento, o módulo da tensão do gerador foi diminuído de 10 V, sendo esse valor escolhido arbitrariamente, e o processo de fluxo de potência foi repetido.
- A variação da tensão foi realizada até o valor de tensão ser igual a 60% do valor inicial, valor escolhido arbitrariamente.
- Com os respectivos valores de tensão e potência reativa do barramento 1 encontrados nos cálculos de fluxo de potência, são plotados as curvas QV de cada fase.
- O valor do carregamento é alterado e uma nova curva QV é calculada, conforme as instruções anteriores.

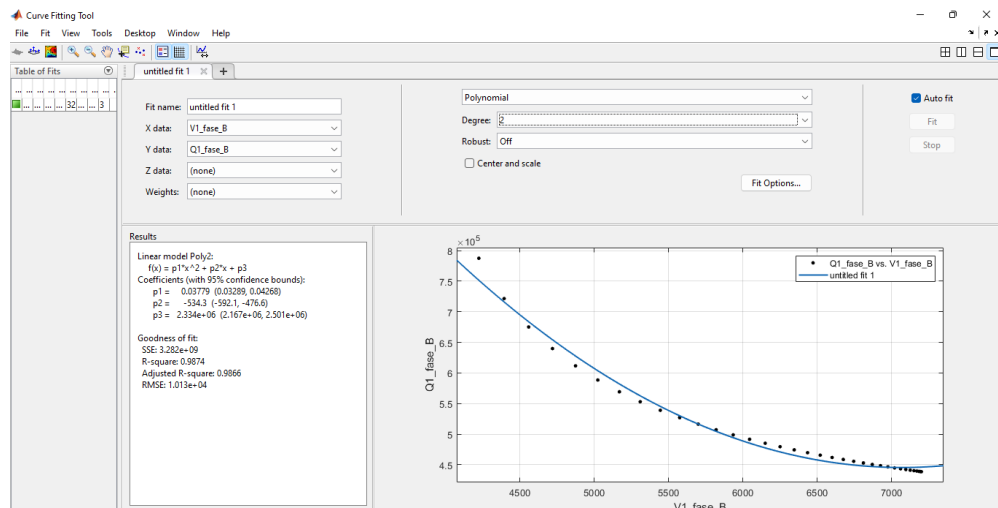
- O aumento do carregamento é repetido até a carga máxima indicada pela curva PV.

3.4. Equacionamento das curvas QV.

Os pontos das curvas QV de potência reativa e tensão das fases de cada valor de carga foram exportados para aplicação *Curve Fitting* do Matlab. Os dados foram tratados e obtidos as aproximações dos equacionamentos das curvas para cada uma das cargas. As funções utilizadas para aproximação foram as polinomiais de primeira, segunda e terceira ordem.

Na Figura 20 é mostrado um exemplo de obtenção dos equacionamentos de uma curva através do *Curve Fitting*.

Figura 20- Exemplo de equacionamento no *Curve Fitting*.

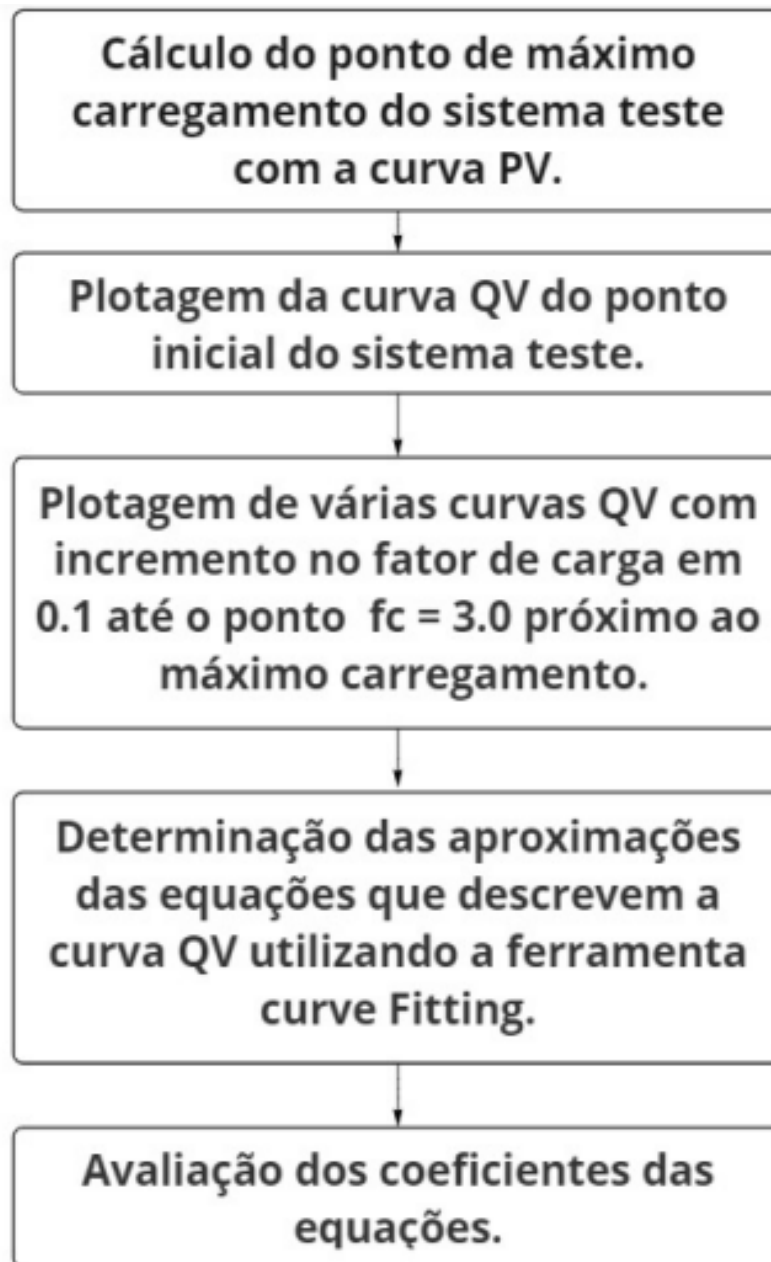


Fonte: Autor.

3.5. Fluxograma.

O Fluxograma que representa as etapas da metodologia do trabalho é mostrado na Figura 21. Os resultados obtidos e as discussões a respeito estão apresentados no próximo capítulo.

Figura 21- Fluxograma da metodologia.



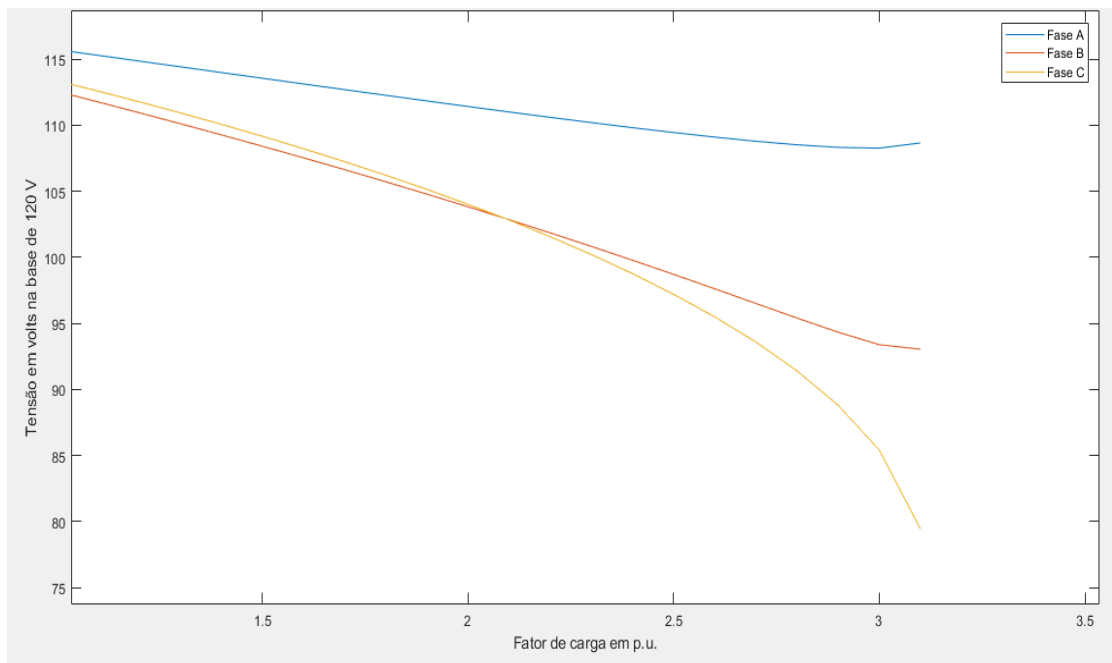
Fonte: Autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Curva PV sistema teste de distribuição.

A curva PV fornece os valores de máximo carregamento do sistema IEEE 4 *Node test feeder*. A Figura 22 é mostrado as curvas obtidas, e através delas é identificado o ponto de máximo carregamento sendo de 3,1 p.u. Na Tabela 3 é apresentado os valores de carga das fases do sistema no nível de máximo carregamento.

Figura 22 - Curvas PV sistema teste.



Fonte: Autor.

Tabela 3- Carga máxima sistema teste.

Nível de máximo carregamento no sistema	
Carga potência constante - Fase A	2325kVA fp=0,85
Carga potência constante - Fase B	3300kVA fp=0,90
Carga potência constante - Fase C	3813kVA fp=0,95

Fonte: Autor.

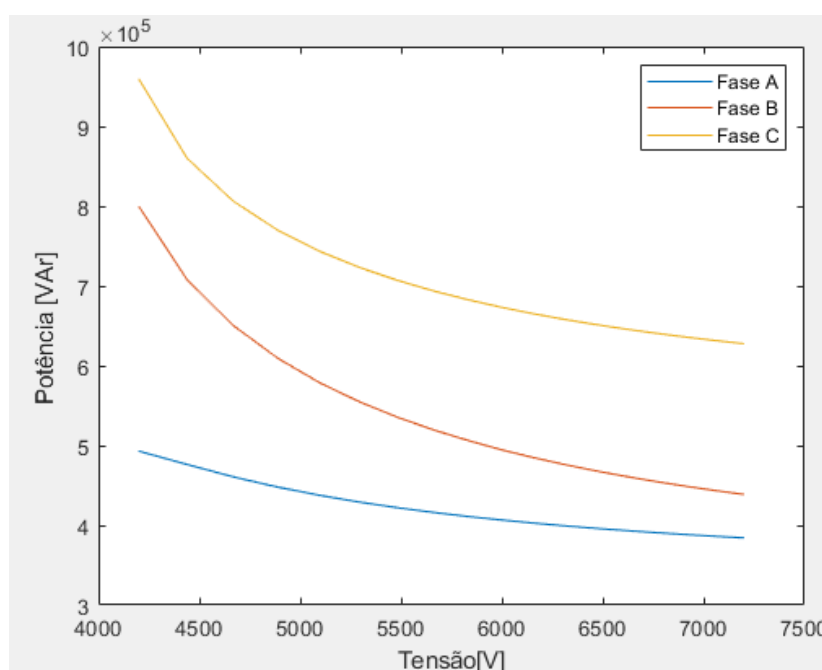
Os sistemas de distribuição são caracterizados por alimentar cargas desbalanceadas. Como visto na Figura 22 a fase C possui a maior queda de tensão, pois tem o maior nível de carga dentre as fases.

Na Figura 22, analisando as curvas PV das fases A e B é notado um aumento de tensão no último ponto de $fc=3,1$ em relação ao ponto de $fc=3,0$. Apesar disso o máximo carregamento é considerado em $fc=3,1$, devido a curva PV da fase C ainda apresentar queda de tensão com a convergência do fluxo de potência.

4.2. Curva QV sistema teste de distribuição.

As Curvas QV das fases do sistema teste da IEEE, obtidas com os cálculos de fluxo de potência no Matlab, para a carga nominal, estão apresentadas na Figura 23.

Figura 23 - Curvas QV



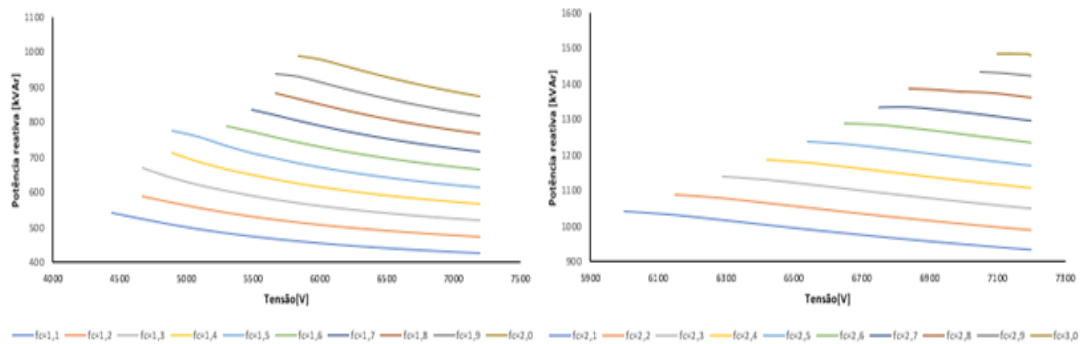
Fonte: Autor.

As margens de potência reativa das fases A, B e C das curvas QVs do sistema são, respectivamente, 384,36[kVAr]; 438,71[kVAr]; 627,63[kVAr], conforme ilustrado na Figura 23. As margens de potência reativa encontrados nas curvas são aproximadamente os mesmos valores que os encontrados nas curvas QV traçadas no trabalho de SILVA (2018).

4.3. Curvas QV com variação do fator de carga do sistema teste de distribuição.

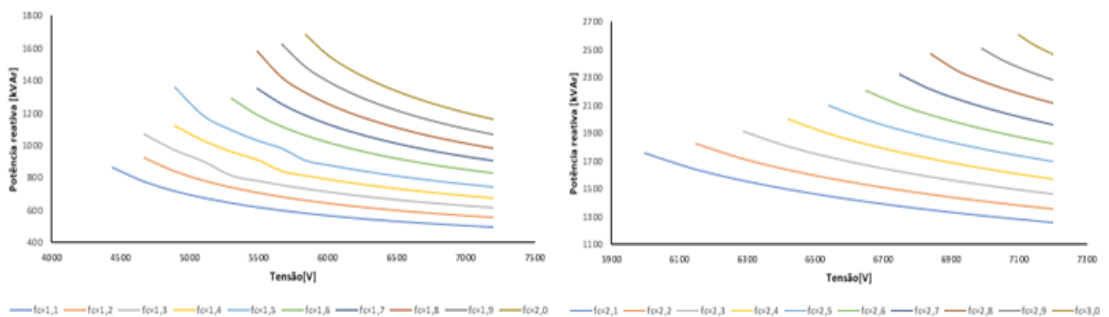
A execução de vários fluxos de potência no software Matlab com incremento no fator de carga do sistema teste, onde cada execução gerou as curvas QV das três fases, possibilitou a criação das Figuras 24, 25 e 26.

Figura 24 - Curvas QV Fase A.



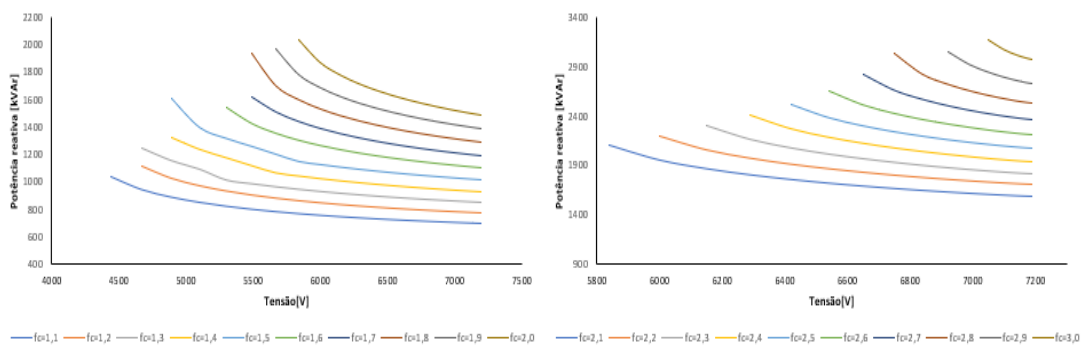
Fonte: Autor.

Figura 25 - Curvas QV Fase B.



Fonte: Autor.

Figura 26 - Curvas QV Fase C.



Fonte: Autor.

As curvas QV traçadas apresentadas nas Figuras 24, 25 e 26 não possuem o mesmo número de pontos. Isso ocorreu porque a medida que se aumenta o carregamento, mais estressado o sistema se encontra e menos alterações das suas variáveis de estado são permitidas.

Tabela 4 - Margens de potência reativa das curvas QV.

Fator de carga [p.u]	Fase A [kVAr]	Fase B [kVAr]	Fase C [kVAr]
1,0	384,36	439,71	628,63
1,1	428,08	495,90	701,17
1,2	473,02	555,84	776,98
1,3	519,04	618,87	855,37
1,4	566,18	679,77	931,66
1,5	614,63	754,39	1020,00
1,6	664,26	827,34	1106,64
1,7	767,29	984,53	1289,92
1,8	767,29	984,53	1289,92
1,9	820,79	1069,37	1386,97
2,0	875,66	1158,79	1488,08
2,1	931,93	1253,15	1593,68
2,2	989,41	1353,35	1704,95
2,3	1048,44	1459,26	1821,54
2,4	1108,88	1571,81	1944,73
2,5	1170,46	1692,19	2076,35
2,6	1233,41	1820,99	2217,09
2,7	1297,39	1959,84	2369,67
2,8	1361,50	2111,53	2539,67
2,9	1424,99	2279,31	2733,82
3,0	1481,00	2471,84	2972,29
3,1	1519,89	2729,04	3352,35

Fonte: Autor.

A Tabela 4 apresenta as margens de potência reativa das curvas QV das fases, para cada valor de carregamento do sistema. Através da Tabela 4 é visto que a margem da curva QV aumenta com incremento de carga. Isso é justificado porque durante a obtenção da curva QV os limites de potência reativa do ponto de geração não foram considerados.

4.4. Equacionamento das curvas QV

Os equacionamentos das curvas QV da fase A, utilizando a ferramenta *Curve fitting* do Matlab, estão dispostos nas Tabelas 5, 6 e 7. O *R-square* é uma medida estatística de quão próximos os pontos estão da função obtida, sendo o valor mínimo igual a 0, indicando que a função não explica nenhuma variabilidade dos dados de resposta em torno de sua média, e 1 indicando que o modelo explica toda a variabilidade dos dados de resposta em torno de sua média.

Tabela 5- Equações lineares das curvas QV da Fase A.

Fator de carga [p.u]	Equação Linear	R-square
1,0	$Q = -31,50v + 6,041 \times 10^5$	0,94
1,1	$Q = -35,88v + 6,797 \times 10^5$	0,95
1,2	$Q = -40,42v + 7,577 \times 10^5$	0,96
1,3	$Q = -46,73v + 8,488 \times 10^5$	0,97
1,4	$Q = -52,25v + 9,361 \times 10^5$	0,97
1,5	$Q = -57,63v + 1,024 \times 10^6$	0,98
1,6	$Q = -63,08v + 1,113 \times 10^6$	0,98
1,7	$Q = -68,63v + 1,205 \times 10^6$	0,98
1,8	$Q = -73,57v + 1,293 \times 10^6$	0,99
1,9	$Q = -80,17v + 1,395 \times 10^6$	0,99
2	$Q = -86,17v + 1,493 \times 10^6$	0,99
2,1	$Q = -91,98v + 1,592 \times 10^6$	0,99
2,2	$Q = -97,44v + 1,690 \times 10^6$	0,99
2,3	$Q = -102,2v + 1,784 \times 10^6$	0,99
2,4	$Q = -105,8v + 1,871 \times 10^6$	0,99
2,5	$Q = -107,5v + 1,945 \times 10^6$	0,99
2,6	$Q = -104,7v + 1,990 \times 10^6$	0,99
2,7	$Q = -93,64v + 1,973 \times 10^6$	0,96
2,8	$Q = -93,06v + 2,032 \times 10^6$	0,98
2,9	$Q = -74,35v + 1,960 \times 10^6$	0,97
3,0	$Q = 39,01v + 1,204 \times 10^6$	0,59

Fonte: Autor.

Tabela 5 - Equações do 2º grau das curvas QV da Fase A.

Fator de carga [p.u]	Equação do 2º grau	R-square
1,0	$Q = 0,0100v^2 - 148,8v + 9,38 \times 10^5$	0,99
1,1	$Q = 0,0112v^2 - 169,7v + 1,07 \times 10^6$	0,99
1,2	$Q = 0,0124v^2 - 190,9v + 1,20 \times 10^6$	0,99
1,3	$Q = 0,0118v^2 - 190,4v + 1,27 \times 10^6$	0,99
1,4	$Q = 0,0138v^2 - 222,8v + 1,45 \times 10^6$	0,99
1,5	$Q = 0,0153v^2 - 248,6v + 1,61 \times 10^6$	0,99
1,6	$Q = 0,0164v^2 - 271,6v + 1,76 \times 10^6$	0,99
1,7	$Q = 0,0174v^2 - 292,1v + 1,91 \times 10^6$	0,99
1,8	$Q = 0,00922v^2 - 192,1v + 1,67 \times 10^6$	0,99
1,9	$Q = 0,0110v^2 - 224,4v + 1,86 \times 10^6$	0,99
2	$Q = 0,0111v^2 - 232,3v + 1,97 \times 10^6$	0,99
2,1	$Q = 0,00966v^2 - 220,6v + 2,02 \times 10^6$	0,99
2,2	$Q = 0,00597v^2 - 177,8v + 1,96 \times 10^6$	0,99
2,3	$Q = 0,000483v^2 - 95,64v + 1,76 \times 10^6$	0,99
2,4	$Q = -0,01073v^2 - 40,99v + 1,37 \times 10^6$	0,99
2,5	$Q = -0,03032v^2 + 310,6v + 5,05 \times 10^5$	0,99
2,6	$Q = -0,06742v^2 + 831,4v - 1,26 \times 10^6$	0,99
2,7	$Q = -0,1464v^2 + 1953v - 5,17 \times 10^6$	0,99
2,8	$Q = -0,1697v^2 + 2305v - 6,44 \times 10^6$	0,99
2,9	$Q = -0,2853v^2 + 3992v - 1,25 \times 10^7$	1
3,0	$Q = -1,131v^2 + 1,62 \times 10^4v - 5,65 \times 10^7$	0,98

Fonte: Autor.

Tabela 6 - Equações do 3º grau das curvas QV da Fase A.

Fator de carga [p.u]	Equação do 3º grau	R-square
1,0	$Q = -2,407 \times 10^{-6}v^3 + 0,05179v^2 - 386,8v + 1,382 \times 10^6$	1
1,1	$Q = -2,649 \times 10^{-6}v^3 + 0,05808v^2 - 442,5v + 1,592 \times 10^6$	1
1,2	$Q = -2,823 \times 10^{-6}v^3 + 0,06326v^2 - 493v + 1,797 \times 10^6$	1

1,3	$Q = 8,879 \times 10^{-7}v^3 - 0,004158v^2 - 95,4v + 1,091 \times 10^6$	0,99
1,4	$Q = -1,167 \times 10^{-7}v^3 - 0,01597v^2 - 235,8v + 1,48 \times 10^6$	0,99
1,5	$Q = -4,136 \times 10^{-7}v^3 - 0,02295v^2 - 296v + 1,711 \times 10^6$	0,99
1,6	$Q = -3,117 \times 10^{-7}v^3 - 0,02232v^2 - 308,5v + 1,845 \times 10^6$	0,99
1,7	$Q = -2,107 \times 10^{-7}v^3 - 0,01334v^2 - 266,4v + 1,863 \times 10^6$	0,99
1,8	$Q = 1,855 \times 10^{-5}v^3 - 0,3461v^2 + 2067v - 3,096 \times 10^6$	0,99
1,9	$Q = 1,804 \times 10^{-5}v^3 - 0,3392v^2 + 2034v - 2,976 \times 10^6$	0,99
2	$Q = 2,12 \times 10^{-5}v^3 - 0,4055v^2 + 2489v - 3,938 \times 10^6$	0,99
2,1	$Q = 2,757 \times 10^{-5}v^3 - 0,5382v^2 + 3401v - 5,948 \times 10^6$	0,99
2,2	$Q = 3,72 \times 10^{-5}v^3 - 0,7412v^2 + 4817v - 9,155 \times 10^6$	0,99
2,3	$Q = 5,403 \times 10^{-5}v^3 - 1,096v^2 + 7306v - 1,488 \times 10^7$	0,99
2,4	$Q = 8,537 \times 10^{-5}v^3 - 1,758v^2 + 1,195 \times 10^4v - 2,567 \times 10^7$	0,99
2,5	$Q = 0,1297 \times 10^{-3}v^3 - 2,707v^2 + 1,871 \times 10^4v - 4,164 \times 10^7$	0,99
2,6	$Q = 0,2454 \times 10^{-3}v^3 - 5,171v^2 + 3,619 \times 10^4v - 8,289 \times 10^7$	0,99
2,7	$Q = 0,5163 \times 10^{-3}v^3 - 10,96v^2 + 7,739 \times 10^4v - 1,806 \times 10^8$	0,99
2,8	$Q = 0,5861 \times 10^{-3}v^3 - 12,58v^2 + 8,996 \times 10^4v - 2,127 \times 10^8$	1
2,9	$Q = 0,001039v^3 - 22,49v^2 + 1,622 \times 10^5v - 3,883 \times 10^8$	1
3,0	$Q = 0,008956v^3 - 193,2v^2 + 1,39 \times 10^6v - 3,33 \times 10^9$	0,99

Fonte: Autor.

Comparando as Tabelas 5, 6 e 7, é verificado as funções de segundo e terceiro grau possuem melhores aproximações para a curva QV, pois os valores de R-square são mais próximos de 1 nas primeiras variações do fator de carga. Porém as equações lineares também possuem boa aproximação para a representação da curva QV.

As Tabelas 8, 9, 10 e 11 apresentam os coeficientes das equações lineares, polinomiais de segundo e terceiro grau das curvas QV das fases B e C.

Tabela 7 – Coeficientes das equações lineares das curvas QV fases B e C.

Fator de carga [p.u]	Coeficientes fase B			Coeficientes fase C		
	a	b	R-square	a	b	R-square
1,0	-92,67	$1,081 \times 10^6$	0,881	-80,71	$1,186 \times 10^6$	0,851
1,1	-105,7	$1,233 \times 10^6$	0,901	-91,92	$1,34 \times 10^6$	0,877
1,2	-119,7	$1,394 \times 10^6$	0,918	-104,1	$1,504 \times 10^6$	0,897

1,3	-157,5	1,719×10 ⁶	0,887	-146,8	1,876×10 ⁶	0,826
1,4	-172,4	1,895×10 ⁶	0,912	-157,8	2,04×10 ⁶	0,871
1,5	-189,6	2,09×10 ⁶	0,929	-172,5	2,232×10 ⁶	0,898
1,6	-208,6	2,302×10 ⁶	0,942	-189,6	2,444×10 ⁶	0,917
1,7	-229,6	2,533×10 ⁶	0,953	-209,1	2,677×10 ⁶	0,932
1,8	-290	3,038×10 ⁶	0,929	-286,4	3,31×10 ⁶	0,87
1,9	-314	3,299×10 ⁶	0,946	-306,9	3,56×10 ⁶	0,903
2,0	-342,8	3,599×10 ⁶	0,957	-335,6	3,872×10 ⁶	0,923
2,1	-375,8	3,935×10 ⁶	0,965	-370,8	4,233×10 ⁶	0,936
2,2	-414	4,313×10 ⁶	0,971	-413,7	4,656×10 ⁶	0,946
2,3	-458,7	4,743×10 ⁶	0,976	-466,9	5,158×10 ⁶	0,953
2,4	-511,6	5,238×10 ⁶	0,98	-534	5,765×10 ⁶	0,959
2,5	-575,5	5,82×10 ⁶	0,983	-621,2	6,526×10 ⁶	0,959
2,6	-656,5	6,534×10 ⁶	0,984	-742,2	7,538×10 ⁶	0,964
2,7	-766,9	7,468×10 ⁶	0,984	-926,4	9,016×10 ⁶	0,961
2,8	-876	8,409×10 ⁶	0,988	-1116	1,056×10 ⁷	0,969
2,9	-1072	9,989×10 ⁶	0,988	-1504	1,355×10 ⁷	0,97
3,0	-1353	1,221×10 ⁷	0,993	-2107	1,814×10 ⁷	0,986

Fonte: Autor.

Tabela 8 – Coeficientes das equações do 2º das curvas QV fases B e C.

Fator de carga [p.u]	Coeficientes fase B				Coeficientes fase C			
	a	b	c	R-square	a	b	c	R-square
1,0	0,0401	-563	2,422×10 ⁶	0,985	0,03879	-535,6	2,842×10 ⁶	0,97
1,1	0,0453	-646,5	2,81×10 ⁶	0,990	0,04368	-613,4	2,861×10 ⁶	0,98
1,2	0,0509	738,1	3,236×10 ⁶	0,993	0,04922	-701,5	3,284×10 ⁶	0,98
1,3	0,0773	-1095	4,512×10 ⁶	0,984	0,08776	-1212	5,049×10 ⁶	0,96
1,4	0,0823	-1187	4,975×10 ⁶	0,990	0,8993	-1267	5,408×10 ⁶	0,978
1,5	0,0896	-1310	5,555×10 ⁶	0,994	0,09664	-1382	5,971×10 ⁶	0,986
1,6	0,0984	-1458	6,227×10 ⁶	0,996	0,106	-1534	6,67×10 ⁶	0,99

1,7	0,1087	-1628	$6,994 \times 10^6$	0,997	0,118	-1727	$7,519 \times 10^6$	0,99
1,8	0,1647	-2408	$9,796 \times 10^6$	0,992	0,2159	-3063	$1,217 \times 10^7$	0,97
1,9	0,1756	-2600	$1,069 \times 10^7$	0,995	0,2254	-3240	$1,305 \times 10^7$	0,985
2,0	0,193	-2884	$1,193 \times 10^7$	0,997	0,2486	-3609	$1,46 \times 10^7$	0,99
2,1	0,216	-3251	$1,347 \times 10^7$	0,998	0,2829	-4136	$1,672 \times 10^7$	0,993
2,2	0,2466	-3728	$1,542 \times 10^7$	0,999	0,3326	-4885	$1,964 \times 10^7$	0,995
2,3	0,2865	-4345	$1,79 \times 10^7$	0,999	0,4023	-5925	$2,363 \times 10^7$	0,996
2,4	0,3394	-5156	$2,11 \times 10^7$	0,999	0,5009	-7387	$2,917 \times 10^7$	0,997
2,5	0,4176	-6334	$2,565 \times 10^7$	0,999	0,6569	-9680	$3,772 \times 10^7$	0,998
2,6	0,5419	-8183	$3,265 \times 10^7$	0,999	0,9244	-13580	$5,208 \times 10^7$	0,998
2,7	0,7742	-11590	$4,526 \times 10^7$	0,999	1,456	-21270	$8,008 \times 10^7$	0,997
2,8	1,07	-15950	$6,151 \times 10^7$	0,999	2,149	-31410	$1,173 \times 10^8$	0,998
2,9	1,893	-27930	$1,053 \times 10^8$	0,999	4,137	-60210	$2,217 \times 10^8$	0,998
3,0	3,731	-54690	$2,029 \times 10^8$	1,000	8,603	-12510	$4,578 \times 10^8$	1

Fonte: Autor.

Tabela 9 – Coeficientes das equações do 3º das curvas QV fases B.

Fator de carga [p.u]	Coeficientes fase B				
	a	b	c	d	R-square
1,0	$-1,79 \times 10^{-5}$	0,3513	-2335	$5,73 \times 10^6$	0,99
1,1	$-2,02 \times 10^{-5}$	0,402	-2723	$6,78 \times 10^6$	0,99
1,2	$-2,27 \times 10^{-5}$	0,4603	-3170	$8,00 \times 10^6$	0,99
1,3	$-4,33 \times 10^{-5}$	0,8577	-5732	$1,36 \times 10^7$	0,99
1,4	$-4,44 \times 10^{-5}$	0,8962	-6114	$1,48 \times 10^7$	0,99
1,5	$-4,77 \times 10^{-5}$	0,9771	-6779	$1,67 \times 10^7$	0,99
1,6	$-5,23 \times 10^{-5}$	1,087	-7648	$1,91 \times 10^7$	1,00
1,7	$-5,84 \times 10^{-5}$	1,231	-8765	$2,21 \times 10^7$	1,00
1,8	$-1,21 \times 10^{-4}$	2,484	$-1,715 \times 10^4$	$4,09 \times 10^7$	0,99
1,9	$-1,25 \times 10^{-4}$	2,615	$-1,833 \times 10^4$	$4,44 \times 10^7$	0,99
2,0	$-1,4 \times 10^{-4}$	2,952	$-2,091 \times 10^4$	$5,11 \times 10^7$	1,00
2,1	$-1,64 \times 10^{-4}$	3,469	$-2,476 \times 10^4$	$6,08 \times 10^7$	1,00
2,2	$-1,96 \times 10^{-4}$	4,187	$-3,007 \times 10^4$	$7,40 \times 10^7$	1,00
2,3	$-2,47 \times 10^{-4}$	5,291	$-3,814 \times 10^4$	$9,39 \times 10^7$	1,00

2,4	$-3,31 \times 10^{-4}$	7,115	$-5,14 \times 10^4$	$1,26 \times 10^8$	1,00
2,5	$-4,58 \times 10^{-4}$	9,187	$-7,13 \times 10^4$	$1,75 \times 10^8$	1,00
2,6	$-7,45 \times 10^{-4}$	16,04	$-1,16 \times 10^5$	$2,81 \times 10^8$	1,00
2,7	$-1,43 \times 10^{-3}$	30,78	$-2,21 \times 10^5$	$5,32 \times 10^8$	0,99
2,8	$-2,65 \times 10^{-3}$	57,08	$-4,10 \times 10^5$	$9,86 \times 10^8$	1,00
2,9	$-7,35 \times 10^{-3}$	158,2	$-1,14 \times 10^5$	$2,72 \times 10^9$	1,00
3,0	-0,0228	494,4	$-3,56 \times 10^6$	$8,56 \times 10^9$	1,00

Fonte: Autor.

Tabela 10 – Coeficientes das equações do 3º das curvas QV fases C.

Fator de carga [p.u]	Coeficientes fase C				
	a	b	c	d	R-square
1,0	$-2,00 \times 10^{-5}$	0,3874	-2521	$6,815 \times 10^6$	0,99
1,1	$-2,25 \times 10^{-5}$	0,4419	-2931	$7,295 \times 10^6$	0,99
1,2	$-2,54 \times 10^{-5}$	0,5078	-3426	$8,618 \times 10^6$	0,99
1,3	$-6,27 \times 10^{-5}$	1,218	-7929	$1,82 \times 10^7$	0,98
1,4	$-6,1 \times 10^{-5}$	1,207	-8033	$1,894 \times 10^7$	0,99
1,5	$-6,44 \times 10^{-5}$	1,295	-8769	$2,103 \times 10^7$	0,99
1,6	$-7,073 \times 10^{-5}$	1,442	-9904	$2,404 \times 10^7$	0,99
1,7	$-7,998 \times 10^{-5}$	1,65	$-1,147 \times 10^4$	$2,808 \times 10^7$	0,99
1,8	$-2,131 \times 10^{-4}$	4,299	$-2,902 \times 10^4$	$6,695 \times 10^7$	0,99
1,9	$-2,163 \times 10^{-4}$	4,425	$-3,032 \times 10^4$	$7,105 \times 10^7$	0,99
2,0	$-2,431 \times 10^{-4}$	5,026	$-3,842 \times 10^4$	$8,237 \times 10^7$	0,99
2,1	$-2,894 \times 10^{-4}$	6,035	$-4,216 \times 10^4$	$1,003 \times 10^8$	0,99
2,2	$-3,596 \times 10^{-4}$	7,556	$-5,317 \times 10^4$	$1,271 \times 10^8$	0,99
2,3	$-4,726 \times 10^{-4}$	9,989	$-7,067 \times 10^4$	$1,692 \times 10^8$	1,00
2,4	$-6,67 \times 10^{-4}$	14,15	$-1,004 \times 10^5$	$2,404 \times 10^8$	1,00
2,5	$-9,686 \times 10^{-4}$	20,65	$-1,471 \times 10^5$	$3,525 \times 10^8$	1,00
2,6	$-1,672 \times 10^{-3}$	35,7	$-2,545 \times 10^5$	$6,083 \times 10^8$	1,00
2,7	$-3,367 \times 10^{-3}$	71,96	$-5,132 \times 10^5$	$1,224 \times 10^9$	1,00
2,8	$-6,375 \times 10^{-3}$	136,8	$-9,79 \times 10^5$	$2,34 \times 10^9$	1,00
2,9	-0,01786	384	$-2,753 \times 10^6$	$6,585 \times 10^9$	1,00
3,0	-0,055	1198	$-8,629 \times 10^6$	$2,072 \times 10^{10}$	1,00

Fonte: Autor.

Comparando o *R-square* das funções obtidas dos diferentes fatores de carga nas Tabelas 8, 9, 10, e 11, é observado que as funções de segundo e terceiro grau são melhores aproximações para as curvas QV em comparação com a equação polinomial de primeiro grau. Também é visto que os coeficientes das funções se alteram a medida que é aumentado o fator de carga.

Tabela 11 – Variação dos coeficientes lineares das curvas QV das fases.

Fator de carga [p.u]	Variação coeficientes fase A		Variação coeficientes fase B		Variação coeficientes fase C	
	a	b	a	b	a	b
1,0	-31,5	$6,04 \times 10^5$	-92,67	$1,081 \times 10^6$	-80,71	$1,186 \times 10^6$
1,5	83%	70%	105%	93%	114%	88%
2,0	174%	147%	270%	233%	316%	226%
2,5	241%	222%	521%	438%	670%	450%
3,0	-224%	99%	1360%	1030%	2511%	1430%

Fonte: Autor.

Tabela 12- Variação dos coeficientes das equações do segundo grau das curvas QV das fases.

Fator de carga [p.u]	Variação coeficientes fase A			Variação coeficientes fase B			Variação coeficientes fase C		
	a	b	c	A	b	c	a	b	c
1,0	0,01	-148,8	$9,38 \times 10^5$	0,0401	-563	$2,42 \times 10^6$	0,039	-535,6	$2,84 \times 10^6$
1,5	53%	91%	72%	123%	132%	129%	149%	158%	110%
2,0	11%	56%	110%	381%	412%	392%	541%	574%	414%
2,5	-432%	-309%	-46%	941%	1025%	959%	1593%	1707%	1227%
3,0	-11410%	-10987%	-6123%	9204%	9614%	8277%	22078%	23257%	16008%

Fonte: Autor.

Tabela 13 - Variação dos coeficientes das equações do terceiro grau das curvas QV das fases.

Fator de carga [p.u]	Variação coeficientes fase A				Variação coeficientes fase B			
	a	b	C	d	a	b	c	d
1,0	$-2,40 \times 10^{-6}$	0,051	386,8	$1,38 \times 10^6$	$-1,79 \times 10^{-5}$	0,351	-2335	$5,73 \times 10^6$
1,5	-83%	-144%	-23%	24%	166%	178%	190%	192%
2,0	-981%	-883%	-743%	185%	681%	740%	796%	792%
2,5	-5488%	-5327%	-4937%	-3113%	2454%	2515%	2954%	2947%
3,0	-373080%	-373660%	-360360%	-24196%	127507%	140634%	152405%	149315%

Fonte: Autor.

Tabela 14 - Variação dos coeficientes das equações do segundo grau das curvas QV da fase C.

Fator de carga [p.u]	Variação coeficientes fase C			
	a	b	c	d
1,0	-2×10^{-5}	0,3874	-2521	$6,815 \times 10^6$
1,5	222%	234%	248%	209%
2,0	1116%	1197%	1424%	1109%
2,5	4743%	5230%	5735%	5072%
3,0	274900%	309141%	342185%	303935%

Fonte: Autor.

Observando as Tabelas 12, 13, 14 e 15 é visto que os coeficientes das curvas QV variam abruptamente ao atingir o ponto próximo ao máximo carregamento do sistema indicado pela curva PV. É possível verificar que os coeficientes de ambas funções polinomiais das curvas QV variam consideravelmente a medida que o sistema tem o aumento das cargas. Os coeficientes das equações de terceiro grau foram os que tiveram a maior variação para ambas as fases.

Com base nos resultados, é possível constatar que a análise dos coeficientes de curvas QV para diferentes níveis de carga pode ser utilizada para indicar o máximo carregamento de sistemas de distribuição, pois mesmo que esses sistemas tem características de desbalanceamento de cargas entre as fases e diferentes curvas QV, em ambas as fases foram verificadas mudanças abruptas dos coeficientes próximos ao máximo carregamento do sistema estudado.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Trabalho de Conclusão de Curso é realizado um estudo através de simulações computacionais no qual a proposta é fundamentada na análise de um sistema teste de distribuição. O estudo foi realizado a partir de simulações computacionais no Matlab para a plotagem de curvas QV e determinação dos seus equacionamentos para diferentes níveis de carga.

O máximo carregamento dos sistemas de potência podem ser obtidos através da curva PV. No entanto, o foco do estudo foi analisar indícios de máximo carregamento do sistema teste de distribuição através da variação dos coeficientes das curvas QV com o incremento de cargas. A metodologia foi validada, pois os coeficientes sofrem mudanças abruptas próximos ao máximo carregamento do sistema.

O modelo de estudo das curvas QV em sistemas de distribuição empregado neste trabalho se mostra como uma interessante alternativa nos estudos de estabilidade de tensão.

5.1. Trabalhos Futuros

A metodologia de análise dos coeficientes das curvas QV pode ser empregada em sistemas maiores. Além disso, pode-se incluir a curva de capacidade de geração neste estudo e verificar a sua influência nos coeficientes que descrevem as curvas QVs.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AILSON P. M, ADRIANO A. F. M, EDNARDO P. R. **Análise de Fluxo de Carga em Sistemas de Potência**: Engenharia de Sistemas de Potência/ – 1.ed. – São Paulo: Artliber Editora, 2018.

ANEEL. **Regulação dos Serviços de Distribuição**. Disponível em:<<https://www.aneel.gov.br/regulacao-dos-servicos-de-distribuicao>>. Acesso em: 29 de janeiro. 2022.

CARVALHO, Rodrigo Mendonça de. **Reguladores de Tensão e Geração Distribuída em Uma Implementação de Fluxo de Potência a Três e a Quatro Fios**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012.

CORTEZ, Anderson Neves. **Proposta de Critério e Procedimentos Para Avaliação de Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

FELBER, Luis Antônio. **Regulação de Tensão em Subestações de Distribuição de Energia Elétrica**. 2010 Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

FILHO, J. A. P. **Modelagem e incorporação de dispositivos de controle no problema de fluxo de potência**. 2000. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2000.

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

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

KAGAN, Nelson; OLIVEIRA, Carlos César Barioni; ROBBA, Ernesto João. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 2ª Edição, Blucher, 1 de janeiro de 2010.

KERSTING, Willian H. **Distribution System Modeling and Analysis**. 3a Edição, CRC Press, 2012

KRAUER, Tito Ronald Ocariz. **UMA METODOLOGIA DE ANÁLISE DE SISTEMAS DE POTÊNCIA APLICANDO O CONTINUADO QV E PV NO**

AMBIENTE DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS. 2007. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

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

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

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control.** McGraw-Hill Education, 1994.

MOURA, A P; MOURA, Adriano A F; ROCHA, E P. **Análise de Fluxo de Carga em Sistemas de Potência: Engenharia de Sistemas de Potência.** São Paulo: Artliber Editora, 2018.

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

ONS. **PREVISÃO DE CARGA PARA O PLANEJAMENTO ANUAL DA OPERAÇÃO ENERGÉTICA CICLO 2022 (2022-2026)** . [S. l.], 30 nov. 2021. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/energia-no-futuro/suprimento-energetico>> . Acesso em: 10 jan. 2022.

PAIVA, Isabella de Freitas Borges. **COMPORTAMENTO DA CURVA QV NAS BARRAS DA REGIÃO CRÍTICA DE UM SISTEMA ELÉTRICO.** 2007. 133 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

PAULA, Gustavo Ramos. **MODELAGEM E ANÁLISE ESTÁTICA DE UM ALIMENTADOR REAL DA CPFL PAULISTA.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo – USP. Escola de Engenharia Elétrica de São Carlos. São Carlos, 2016.

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

PUC. **Estudos de Fluxo de Potência.** Disponível em:<[http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/18795/material/04\)SistEltricosCap04-FluxPot.pdf](http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/18795/material/04)SistEltricosCap04-FluxPot.pdf)>. Acesso em: 10 de outubro. 2021.

SILVA, João Vitor da. **Estudo da Estabilidade de Tensão em Redes de Distribuição com Geração Distribuída.** 2015. 86 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2015

SILVA, Mariana Simões Noel da. **Planejamento da Operação de Sistemas de Distribuição Desequilibrados com Geração Distribuída considerando Incerteza na Modelagem de Carga**. Rio de Janeiro, 2020. 107p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

SILVA, Thauany Oliveira. **Relação entre a margem de potência reativa de curva qv para barramento de carga em função do nível de carregamento do sistema**. 2018. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Minas Gerais, Formiga, 2018.

XENDEE. **IEEE 4 Node Feeder XENDEE Test Cases**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://xendee.com/ieee-4-node-test-case/>. Acesso em: 17 mar. 2022.

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