

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

**MATHEUS FELIPE TOCCOLINI**

**FUNDAMENTOS DE ALOCAÇÃO ÓTIMA DE CAPACITORES EM REDES  
DE DISTRIBUIÇÃO PARA A REGULAÇÃO DE TENSÃO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**  
**2021**

**MATHEUS FELIPE TOCCOLINI**

**FUNDAMENTOS DE ALOCAÇÃO ÓTIMA DE CAPACITORES EM REDES DE  
DISTRIBUIÇÃO PARA A REGULAÇÃO DE TENSÃO**

**Fundamentals of optimal capacitors allocation in distribution networks for  
voltage regulation**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador: Prof. Me. César Augusto Portolann.

**PATO BRANCO**

**2021**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho,  
para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s)  
autor(es).

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra  
não são cobertos pela licença.

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado **“FUNDAMENTOS DE ALOCAÇÃO ÓTIMA DE CAPACITORES EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO PARA A REGULAÇÃO DE TENSÃO”**, do aluno **“MATHEUS FELIPE TOCCOLINI”** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **278** de 2021.

Fizeram parte da banca os professores:

**César Augusto Portolann**

**Geremi Gilson Dranka**

**Ricardo Vasques de Oliveira**

**A Ata de Defesa assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica**

## DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a Deus por ser essencial em minha vida. Aos meus pais Josmar e Carmen, e aos meus irmãos Michel e Luis por existirem em minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por me dar forças e estar sempre comigo.

Aos meus pais Josmar e Carmen pela educação, apoio, incentivo aos estudos e pela confiança que sempre depositam em mim.

A minha noiva Adriana por estar ao meu lado nos bons e maus momentos, me incentivando e apoiando.

Ao meu orientador professor César Augusto Portolann pela orientação, disponibilidade e preocupação com meu trabalho.

Aos professores do DAELE pelo conhecimento compartilhado durante o período em que estive na universidade, que me proporcionaram um grande desenvolvimento pessoal e profissional.

Aos meus amigos que me acompanharam durante todo esse período de graduação.

## RESUMO

TOCCOLINI, Matheus Felipe. **Fundamentos de alocação ótima de capacitores em redes de distribuição para a regulação de tensão**. 2021. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

A instalação de sistemas de distribuição promoveu o crescimento da disponibilidade de energia elétrica trazendo mais qualidade de vida para o dia a dia das pessoas. Mesmo com os avanços tecnológicos voltados a melhorar o aproveitamento da energia, ainda nos deparamos com alterações excessivas de tensão na rede fazendo com que interfiram no funcionamento de alguns equipamentos. A fim de evitar essas perdas e subtensões, ao longo dos anos foram apresentadas diversas ferramentas e equipamentos que minimizam esses problemas. Essa pesquisa buscou apresentar um método alternativo para alocação ótima de bancos de capacitores em redes de distribuição elétrica, com objetivo de otimizar os reativos com melhor custo benefício, buscando diminuir as perdas na rede e, principalmente, ajustar o perfil de tensão no sistema para que fique em um nível aceitável. Para isso, foi elaborado um algoritmo baseado no método de soma de correntes e outro com base no método do gradiente. Os resultados obtidos a partir desses algoritmos foram comparados para validar a metodologia proposta. Verificou-se que mesmo sendo algoritmos diferentes, ambos solucionaram o problema proposto. Sendo que a soma de correntes procura resolver um problema de imediato, ou seja, apenas elevando a tensão até um nível aceitável, e o método do gradiente oferece uma resposta indireta, inicialmente propondo um montante de reativos em cada barra, mas permitindo conclusões sobre a barra mais indicada para receber banco de capacitores. Diante disso, os dois métodos foram validados como solução para o problema citado.

**Palavras-chave:** Qualidade de Energia, Regulação de Tensão, Fluxo de Potência.

## ABSTRACT

TOCCOLINI, Matheus Felipe. Fundamentals of optimal allocation of capacitors in distribution networks for voltage regulation. 2021. 53 f. Course Conclusion Paper – Electrical Engineering Course, Federal Technological University of Paraná. Pato Branco, 2021.

The installation of distribution systems promoted the growth of electricity availability, bringing more quality of life to people's daily lives. Even with technological advances aimed at improving the use of energy, we are still faced with excessive changes in network voltage causing them to interfere in the operation of some equipment. In order to avoid these losses and under voltages, over the years, several tools and equipment that minimize these problems have been presented. This research sought to present an alternative method for optimal allocation of capacitor banks in electrical distribution networks, with the objective of optimizing reactives with the best cost-benefit, seeking to reduce network losses and, mainly, adjust the voltage profile in the system so that stay at an acceptable level. For this, an algorithm based on the current sum method and another based on the gradient method was developed. The results obtained from these algorithms were compared to validate the proposed methodology. It was found that even being different algorithms, both managed to solve the proposed problem. Since the sum of currents seeks to solve a problem immediately, that is, just raising the voltage to an acceptable level, and the gradient method offers an indirect answer, initially proposing an amount of reactives in each bar, but allowing for conclusions on the most suitable bar to receive a capacitor bank. Therefore, the two methods were validated as a solution to the mentioned problem.

**Keywords:** Power Quality, Voltage Regulation, Power Flow.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Triângulo das potências.....	15
Figura 2 - Otimização de níveis de tensão nas redes de distribuição.....	21
Figura 3: Efeito do regulador de tensão no perfil de tensão.....	23
Figura 4 - Reativos inseridos pelo banco de capacitores.....	26
Figura 5 - Esquema de operação dos bancos de capacitores fixos e chaveados segundo a curva de demanda diária de potência reativa.....	27
Figura 6 - Rede de distribuição a ser estudado.....	35
Figura 7 - Perfil de Tensão sem Banco de Capacitores.....	38
Figura 8 - Perfil de Tensão com Banco de Capacitores de 300 Kvar.....	38
Figura 9 - Perfil de tensão com banco de capacitores de 300kVar na barra 9.....	40
Figura 10 - Perfil de tensão com banco de capacitores de 600 kVar.....	40
Figura 11 - Perfil de tensão com banco de capacitores de 600kVar na barra 9.....	41
Figura 12 - Perfil de tensão com banco de capacitores de 900kVar.....	42
Figura 13 - Perfil de tensão com banco de capacitores de 900kVar na barra 9.....	43
Figura 14 - Perfil de tensão com banco de capacitores de 900kVar na barra 9 operando com 50% da carga.....	44
Figura 15 - Perfil de tensão com banco de capacitores de 900kVar na barra 9 operando com 115% da carga.....	45
Figura 16 - Perfil de Tensão Método do Gradiente.....	47



**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1- Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV. .....	20
Tabela 2 - Distância entre as barras .....	36
Tabela 3 - Resultado da inserção de banco de capacitores de 300kVar .....	39
Tabela 4 - Resultado da inserção de banco de capacitores de 600 kVar. ....	41
Tabela 5 - Resultado da inserção de banco de capacitores de 900 kVar. ....	43
Tabela 6 - Resultado da inserção de banco de capacitores de 900 kVar com 50% de carga. ....	44
Tabela 7 - Resultado da inserção de banco de capacitores de 900 kVar com 115% de carga. ....	45
Tabela 8 - Resultado da inserção de banco de capacitores pelo método de gradiente .....	47
Tabela 9 - Diagonal principal das derivadas .....	48

**LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS**

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
P.U.	Por unidade
PRODIST	Procedimentos de Distribuio de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
TA	Tensão de Atendimento
TC	Teso Contratada
TL	Tensão de Leitura
TN	Tensão Nominal
VNS	<i>Variable Neighborhood Search</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\cos(\varphi)$	Fator de potência
$Z_{base}$	Impedância de base
$V_{base}$	Tensão de base
$S_{base}$	Potência aparente nominal
$S_{total}$	Potência aparente total
$S_{carga}$	Potência aparente da carga
$S_{cap}$	Potência aparente do banco de capacitores
$P_{carga}$	Potência ativa da carga
$Q_{carga}$	Potência reativa da carga
$V^n$	Tensão da barra na iteração n
$V^{n-1}$	Tensão da barra na iteração anterior à n
$\varepsilon$	Critério de parada para as iterações
$I^n$	Corrente do trecho na iteração n
$S^n$	Potência aparente na iteração n
$V_{jusante}$	Tensão na barra posterior ao sentido da carga
$V_{montante}$	Tensão na barra anterior ao sentido da carga
$I_{trecho}$	Corrente do trecho
$Z_{trecho}$	Impedância do condutor no trecho

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	JUSTIFICATIVA .....	14
1.2	OBJETIVOS .....	16
1.2.1	Objetivos Geral.....	16
1.2.2	Objetivos Específicos .....	17
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	17
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1	ESTADO DA ARTE SOBRE O ASSUNTO.....	18
2.2	QUALIDADE DE ENERGIA.....	19
2.3	MÉTODOS PARA REGULAÇÃO DE TENSÃO .....	21
2.3.1	Transformadores de TAP Variável .....	22
2.3.2	Regulador de Tensão .....	22
2.3.3	Reforço de Rede .....	24
2.3.4	Bancos de Capacitores .....	24
2.4	DESVIO PADRÃO.....	28
3	METODOLOGIA.....	29
3.1	FLUXO DE POTÊNCIA .....	29
3.1.1	MÉTODO DA SOMA DE CORRENTES.....	29
3.1.2	MÉTODO DO GRADIENTE .....	32
4	DESENVOLVIMENTO .....	34
4.1	SOMA DE CORRENTES .....	35
4.2	MÉTODO DO GRADIENTE .....	46
4.2.1	Montante de reativos em cada barra.....	46
4.2.2	Determinação da barra a ser alocado banco de capacitores de maneira ótima	
	48	
5	CONCLUSÕES .....	49

6 REFERÊNCIAS.....	51
APÊNDICE A – MÉTODO DE SOMA DE CORRENTES .....	55
APÊNDICE B – MÉTODO DO GRADIENTE.....	56

## 1 INTRODUÇÃO

Durante a primeira exposição internacional dedicada à eletricidade em 1881, Marcel Deprez (1843 – 1918) trouxe a ideia de um sistema de distribuição em Corrente Contínua (CC) para longas distâncias. Posteriormente, mostrou-se mais adequada para a distribuição de curta distância, passando a ser inserida em diversos lugares por Thomas Edison (1847 - 1931), com grande sucesso (GUARNIERI, 2013).

A partir de 1884, inicia a “guerra das correntes”, onde Edison defendia seu sistema CC, enquanto Nicola Tesla (1856 - 1943) trouxe o sistema baseado em Corrente Alternada (CA). O fim da guerra chegou com George Westinghouse (1846 - 1914) comprando os direitos das patentes de Tesla e, trabalhando com Willian Stanley (1858 – 1916), instalaram o primeiro sistema de distribuição em CA com múltiplos níveis de tensão (COWDREY, 2006).

No Brasil, a primeira cidade a receber energia elétrica, no caso como iluminação pública, foi Campos no Rio de Janeiro em 1883. A distribuição elétrica propriamente dita teve maior crescimento em São Paulo em 1899 e, logo após no Rio de Janeiro em 1905 (PUERTAS; NOGUEIRA, 1986).

A crescente disponibilidade de energia elétrica por meio de instalação de sistemas de distribuição proporcionou um aumento do conforto na vida das pessoas, contribuindo para uma melhor qualidade de vida, que de certa forma realimenta a cultura do aumento na exigência por parte do consumidor, no sentido de qualidade de energia fornecida (MEHL, 2004).

Para atender essas exigências, tornou-se necessário entender melhor onde se concentram os problemas na qualidade de energia fornecida ao consumidor e para isso, é essencial entender primeiro como é formado nosso sistema elétrico. De acordo com Zanetta JR (2006), ele é composto basicamente por sistemas de geração, transmissão e distribuição.

O sistema de geração é formado pelas usinas geradoras que ficam dispostas de acordo com suas fontes naturais, procurando obter o melhor aproveitamento dessa determinada fonte (ZANETTA JR, 2006). Dentre diversos meios para a produção de energia elétrica, podemos citar as usinas hidrelétricas, que procuram aproveitar o desnível e o armazenamento da água por meio de barragens.

O sistema de transmissão, segundo Zanetta JR (2006), em um aspecto geral, é composto pelas próprias linhas, que são conectadas por subestações, principalmente as de elevação e abaixamento de tensão.

O sistema de distribuição é caracterizado por uma rede que inicia na subestação de distribuição que é alimentada por uma ou mais linhas de transmissão ou subtransmissão. Via de regra, utiliza-se o sistema de distribuição radial, onde existe apenas um caminho para a energia fluir desde a subestação até as cargas (KERSTING, 2006). O sistema de distribuição elétrica, como qualquer outro, é passível de falhas (ou anormalidades), sendo a principal delas a variação de tensão no sistema, que pode levar ao mal funcionamento de equipamentos, máquinas e até mesmo à queima de aparelhos.

Com o objetivo de reduzir esse problema presente na rede de distribuição, existem diversas ferramentas que trabalham, com exemplo, com o propósito de diminuir as subtensões, tais como o banco de capacitores, que será apresentado com maiores detalhes no decorrer deste trabalho.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

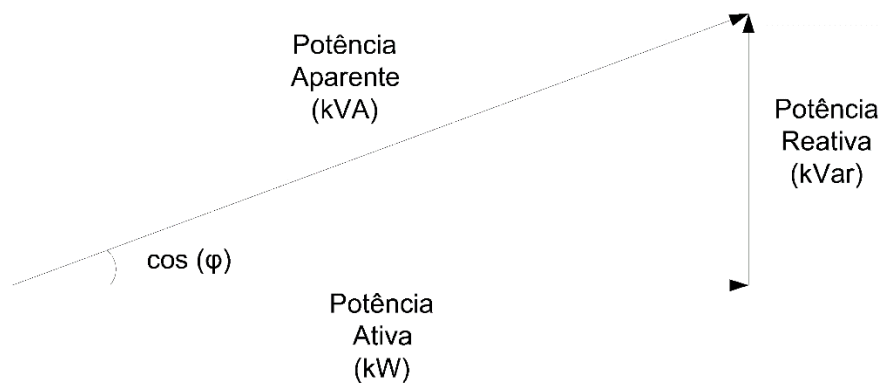
Com a adaptação ao longo dos anos para a produção, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica, podemos perceber que mesmo presenciando o frequente avanço de tecnologia com o intuito de melhor aproveitamento da energia, ainda nos deparamos com questões a serem resolvidas. Particularmente, um dos principais motivos das excursões excessivas de tensão na rede está presente nas cargas (parte indutiva).

Ao se referir às cargas presentes no sistema de distribuição, deve-se lembrar que elas são variáveis, por exemplo, quando ligamos ou desligamos uma lâmpada, ou algum eletrodoméstico presente em uma residência ou na própria indústria onde as mudanças são mais explícitas em alguns casos (KERSTING, 2006), devido à presença de motores elétricos (carga indutiva).

A energia elétrica se divide em duas componentes principais: ativa (medida em kWh) e reativa (medida em kVarh), que lembrando, juntas formam a energia elétrica aparente (kVAh). A energia ativa é aquela que realmente realiza trabalho,

por exemplo, a rotação de eixo de motores, enquanto a reativa não realiza trabalho, porém, é consumida pelos equipamentos com a finalidade de gerar campos eletromagnéticos, que são essenciais para o funcionamento do equipamento (ELEKTRO, 2019).

A razão entre a potência ativa e a potência aparente se chama fator de potência, representado por  $\cos(\varphi)$ , o qual pode ser visto na Figura 1 que representa o triângulo de potências, sendo que ele influi diretamente no perfil de tensão.



**Figura 1 - Triângulo das potências.**  
**Fonte: Adaptado de Marcelo e Duarte (2019).**

Quando temos um consumo alto de reativos pelas cargas indutivas, proporciona à rede queda de tensão, em contraponto, quando é injetado reativos na rede em excesso, por meio de banco de capacitores, por exemplo, resulta em sobretensão. No Brasil, o valor do fator de potência deve-se manter acima de 0,92, tanto indutivo quanto capacitivo, para manter um sistema elétrico de eficiência aceitável (MARCELLO; DUARTE, 2019).

Em geral, os responsáveis pelo consumo de reativos na rede são os transformadores e as próprias linhas de transmissão, enquanto pelos consumidores, são por meio de motores elétricos e dos aparelhos eletroeletrônicos (MOHSIN et al., 2016). Esses reativos consumidos da rede acabam gerando efeitos adversos, fazendo com que ocorram as quedas de tensão. Essas quedas de tensão também podem acontecer pela distância presente nas linhas de distribuição, pois as mesmas possuem impedâncias que tomam proporções consideráveis, interferindo no perfil de tensão (FLORES, 2015).

As quedas de tensão presentes na rede interferem no desempenho das cargas dos consumidores que atualmente possuem diversos equipamentos



eletroeletrônicos em suas residências. À medida que a tensão varia muito, impede o funcionamento normal de alguns aparelhos, pois não alcançando sua tensão nominal, pode levar à queima de componentes presentes em seus circuitos (LEBORGNE, 2003), ou desligamentos por subtensão.

Outra questão inerente às subtensões são as perdas elétricas na rede, que variam com o quadrado da corrente aplicada na mesma. Elas podem ser classificadas em perdas técnicas e comerciais. As perdas comerciais estão relacionadas ao consumidor, à energia que chega até ele e não é faturada, ou em alguns casos faturada incorretamente, enquanto as técnicas provêm do processo de distribuição da energia pela rede e seus equipamentos (BERNARDON *et al.*, 2007).

Afim de evitar essas perdas e subtensões, ao longo dos anos foram apresentados diversos recursos (ferramentas e equipamentos) que possam minimizar perdas elétricas e variações de tensão. Nesse contexto, o presente trabalho propõe o estudo de um método para alocação ótima ou ideal de capacitores nas barras de redes de distribuição, melhorando o nível de tensão para que se situe entre limites estabelecidos por norma, e de forma que contribua o melhor custo/benefício geral. Para tal resultado serão discutidos dois métodos, um baseado no estudo de fluxo de potência chamado Soma de Correntes, e outro tendo por referência o método do Gradiente de otimização.

## 1.2 OBJETIVOS

A seguir são apresentados os objetivos deste trabalho.

### 1.2.1 Objetivos Geral

Este trabalho tem como objetivo principal apresentar uma metodologia que possa ser usada para a alocação ótima de bancos de capacitores em redes de distribuição elétrica, para melhoria de níveis de tensão ou redução de perdas de potência elétrica, que se caracterize como uma ferramenta prática, simples, porém confiável.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos definidos para a pesquisa são:

- a) Formular um algoritmo baseado no conhecido método de soma de correntes (usualmente utilizado em estudo de fluxo de potência em redes de distribuição), para a alocação ótima de capacitores em barras de redes de distribuição;
- b) Formular um algoritmo baseado no método de minimização conhecido como Gradiente, para a alocação ótima de capacitores em barras de redes de distribuição;
- c) Comparar resultados obtidos dos dois algoritmos, no sentido de validar a metodologia proposta.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 2 apresenta-se a fundamentação teórica necessária para adquirir conhecimento em relação aos temas tratados. Na sessão 2.2 é apresentado o estudo da arte com alguns trabalhos que já foram realizados com temas similares. Nas sessões seguintes são mencionados os métodos para regulação de tensão, como: transformadores de TAP variável, regulador de tensão, reforços de rede e banco de capacitores, além de explicar sobre o desvio padrão utilizado nos cálculos. O capítulo 3 mostra os métodos de fluxo de potência que foram usados para a pesquisa. No capítulo 4 encontram-se o desenvolvimento e os resultados da pesquisa. Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões finais do estudo.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Com o objetivo de contextualizar o problema, neste capítulo serão apresentados alguns conceitos relacionados à qualidade de energia e aos métodos para regulação de tensão, sendo eles: transformadores de TAP variável, reguladores de tensão, reforços de rede e a estrutura e modelagem de capacitores. Para complementar, é definido o fluxo de potência e o cálculo de desvio padrão utilizado na pesquisa. Para iniciar o capítulo, serão apresentados alguns trabalhos realizados com temática semelhante a proposta desse estudo.

### 2.1 ESTADO DA ARTE SOBRE O ASSUNTO

O problema de alocação de bancos de capacitores é comum no estudo de sistemas elétricos de potência, e pode ser modelado de diversas maneiras. Na literatura é possível encontrar diversos trabalhos que apresentam abordagens para resolver a compensação de reativos por alocação de bancos de capacitores

Um estudo realizado por Neto e Pacheco (2018) desenvolveu um algoritmo genético para resolver o problema de alocação de banco de capacitores em redes de distribuição radiais e implementou um fluxo de carga para redes de distribuição, também conhecido como soma de potências. Esse algoritmo foi aplicado e avaliado em dois cenários, sendo um deles sem a instalação do banco de capacitores e outro após a alocação ótima de capacitores.

O trabalho realizado por Costa (2016) avaliou os efeitos da alocação de bancos de capacitores em redes de distribuição primária. Foi proposta uma função de custos que representam os custos de investimentos reais em capacitores e os custos associados as perdas de potência ativa na rede. O estudo foi aplicado nas redes de distribuição primária e foi realizada a comparação do desempenho estratégico *Particle Swarm Optimization* (PSO) e *Variable Neighborhood Search* (VNS) ao lidar com o problema da alocação de bancos.

O estudo realizado por Gasperin (2008) apresentou modelos linearizados para determinação das tensões nodais de redes de distribuição de energia elétrica

levando em consideração a influência da utilização de bancos de capacitores para regular a tensão, além de desenvolver um algoritmo capaz de representar o problema de alocação ótima de banco de capacitores empregando tanto a função objetivo quanto as restrições como funções lineares. O autor associou esses modelos a algoritmos computacionais para conseguir avaliar os custos de aquisição e manutenção de banco de capacitores, além de determinar as melhores alternativas de investimento. Esses modelos foram validados com o algoritmo criado.

Uma proposta para alocação de banco de capacitores para alimentadores radiais, foi apresentada por Petinelli (2002), considerando os benefícios técnico-econômicos da redução das perdas de potência e energia, os custos de instalação de capacitores comerciais existentes no mercado e mantendo-se as condições operacionais do sistema dentro de limites definidos. Para esse trabalho foi considerado: a utilização de estratégias evolutivas; A aplicação de mutação híbrida assim como a utilização de limites dinâmicos para ajustar valores dos desvios padrão; O fluxo de carga do tipo soma de potência para validação dos bancos de capacitores; A função *fitness* levou em consideração a discretização de banco de capacitores levando em conta os valores comerciais do mercado. Por fim, foi realizada a comparação dos resultados obtidos.

## 2.2 QUALIDADE DE ENERGIA

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é responsável, dentre outras atividades, por assegurar os direitos do consumidor, regulando, fiscalizando e implementando políticas relativas à exploração da energia elétrica. Pensando nisso, a ANEEL passou a elaborar os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), que é composto por documentos que normatizam e padronizam as atividades relacionadas ao sistema de distribuição em âmbito nacional (ANEEL, 2019).

A resolução Nº 505/2001 da ANEEL e o PRODIST utiliza as seguintes definições quanto à classificação da tensão:

- a) Tensão de Atendimento (TA): valor eficaz de tensão no ponto de entrega ou de conexão, obtido por meio de medição, podendo ser classificada

em adequada, precária ou crítica, de acordo com a leitura efetuada, expresso em volts ou quilovolts;

b) Tensão Contratada (TC): valor eficaz de tensão que deverá ser informado ao consumidor por escrito, ou estabelecido em contrato, expresso em volts ou quilovolts;

c) Tensão de Leitura (TL): valor eficaz de tensão, integralizado a cada 10 (dez) minutos, obtido de medição por meio de equipamentos apropriados, expresso em volts ou quilovolts;

d) Tensão Nominal (TN): valor eficaz de tensão pelo qual o sistema é projetado, expresso em volts ou quilovolts;

De acordo com o módulo 8 do PRODIST (2018), as tensões contratadas devem respeitar o intervalo de 95% a 105% da tensão de operação nominal no ponto de conexão, sendo essa tensão nominal superior a 1 kV. O módulo 8 também apresenta a tensão de atendimento, que para as tensões contratadas devem ser classificadas de acordo com as faixas de variação da tensão de leitura.

A Tabela 1 apresenta as informações de tensões de distribuição no primário do transformador conforme módulo 8 do PRODIST.

**Tabela 1- Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV.**

<b>Classificação da Tensão de Atendimento (TA)</b>	<b>Faixa de variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão Contratada (TC)</b>
<b>Adequada</b>	$0,93 TC \leq TL \leq 1,05 TC$
<b>Precária</b>	$0,90 TC \leq TL < 0,93 TC$
<b>Crítica</b>	$TL < 0,90 TC$ ou $TL > 1,05 TC$

**Fonte: Adaptado de Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica (PRODIST, 2019)**

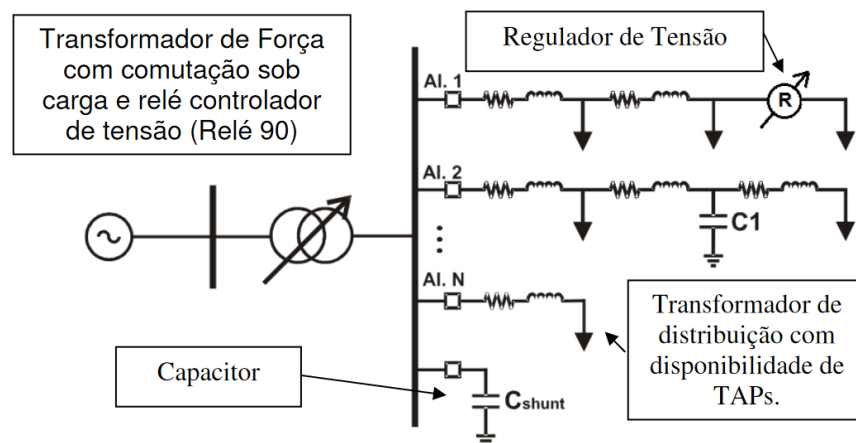
Devido à legislação e supervisão por parte da ANEEL, as distribuidoras de energia passam a ter como tarefa rotineira os cuidados referentes ao controle dos níveis de tensão, que sofrem alterações principalmente devido à variação de carga na rede. No momento que a tensão passa dos níveis aceitáveis pela ANEEL, os consumidores recebem compensações financeiras, lesando as concessionárias, porém contribuindo com incentivo à melhoria da qualidade no perfil de tensão (MADRUGA, 2011).

Para manter uma qualidade mínima da energia elétrica gerada, traduzida em bom nível de tensão, as empresas distribuidoras de energia elétrica cedem recursos disponíveis, tais como transformadores de TAP variável, reforço de rede (troca de condutores, transformadores, etc.), mudança de nível de tensão, capacitores, além de medidas indiretas como incentivo ao uso de cargas mais eficientes. Dessa forma, do ponto de vista da ANEEL, torna-se possível manter o perfil de tensão dentro de limites aceitáveis, o que melhora a qualidade da energia fornecida ao consumidor, aumentando a confiabilidade do sistema da concessionária (MADRUGA, 2011).

### 2.3 MÉTODOS PARA REGULAÇÃO DE TENSÃO

Afim de atender às condições estabelecidas no PRODIST, faz-se necessário utilizar algumas ferramentas para manter um equilíbrio de reativos na rede, implicando em limites de tensão aceitáveis na rede. Tais ferramentas fazem com que a tensão seja regulada automaticamente, as quais serão tratadas nesse capítulo.

A Figura 2 apresenta a otimização de níveis de tensão nas redes de distribuição considerando a alocação de bancos de capacitores reguladores de tensão.



**Figura 2 - Otimização de níveis de tensão nas redes de distribuição.**  
**Fonte: Madruga (2011).**

A seguir, serão apresentados alguns métodos de regulação de tensão.

### 2.3.1 Transformadores de TAP Variável

Tapes ou TAPs, como também são conhecidos, de transformadores são recursos amplamente utilizados na operação do sistema elétrico. Eles podem ser de transmissão, subtransmissão e distribuição; Possuem como função básica, alterar a relação de transformação dos equipamentos, possibilitando que seja controlado o fluxo de energia reativa, controlando desta forma a tensão dos barramentos. Dessa forma, pode-se afirmar que são recursos de otimização do fluxo de potência reativa, não absorvendo ou gerando esse tipo de potência (PONTES, 2008).

Os transformadores presentes nas redes de distribuição em geral são fabricados com três TAPs, também chamados de derivações. Esses TAPs variam entre o valor nominal da rede e 5% para os outros TAPs, ou seja, o primeiro de 1,0 pu, o segundo com valor de 0,95 pu e o terceiro de 0,90 pu e etc. Outros transformadores podem ser fabricados com até sete TAPs, afim de obter uma precisão maior para a tensão necessária no secundário do transformador (MADRUGA, 2011).

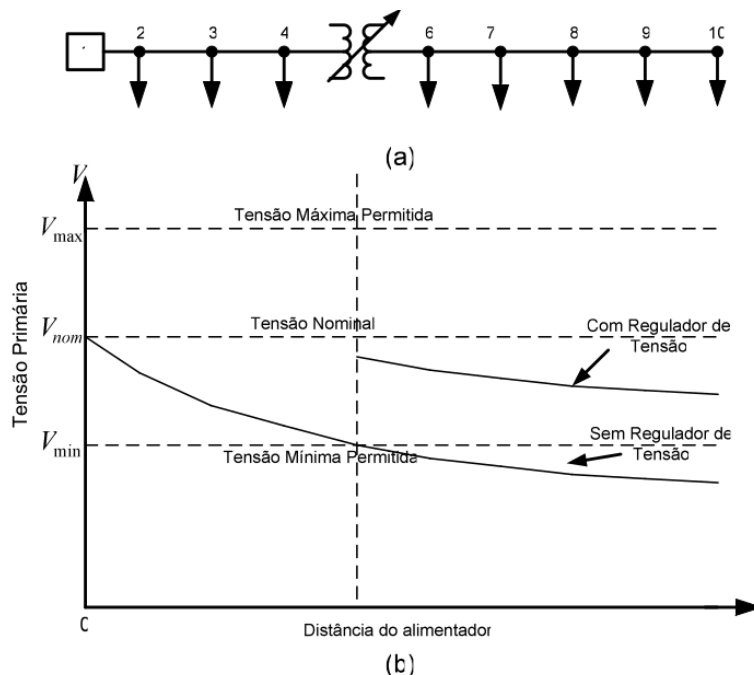
Para realizar essa troca de TAP, não é possível realiza-la sob carga, sendo necessário o desligamento da rede para realizar tal ajuste (PONTES, 2008), o que implica em custos relacionados às equipes que serão necessárias para realizar o desligamento, tempo necessário para marcar a atividade frente à concessionária, sem contar a descontinuidade do serviço oferecido aos clientes pela concessionária (MADRUGA, 2011).

### 2.3.2 Regulador de Tensão

Um dos equipamentos mais utilizados na rede de distribuição para ajuste de tensão é o regulador de tensão, que é programado para chegar à um valor determinado de tensão na rede. Diferente do transformador de TAP variável, o regulador de tensão pode ser operado sob carga, desde que a regulação não tenha seus limites excedidos (MEDEIROS; PIMENTEL, 2002).

Um regulador de tensão é composto por um autotransformador, um comutador automático de derivação sob carga e um sistema de controle. Seu funcionamento se dá através da comutação de derivações, ou seja, mudando-se a relação de transformação do autotransformador tendo como referência a tensão no secundário do mesmo (GASPERIN, 2008).

O sistema trifásico de regulação de tensão é formado substancialmente por um banco de reguladores monofásico. O regulador de tensão é formado basicamente por um autotransformador que controla automaticamente a comutação de seus TAPs de acordo com o sinal de tensão da rede recebido pelo equipamento. Essas comutações do TAP acontecem quando os níveis mínimos e máximos estabelecidos pelo sistema de controle são violados, quando isso acontece, o nível de tensão passa a se aproximar da tensão nominal da rede (MEDEIROS; PIMENTEL, 2002). A Figura 3 apresenta o efeito da presença do regulador de tensão no sistema elétrico.



**Figura 3: Efeito do regulador de tensão no perfil de tensão**  
**Fonte: Gasperin (2008).**

A Figura 3a apresenta um alimentador da rede de distribuição com a presença de um regulador, enquanto na Figura 3b mostra o efeito provocado ao inserir o mesmo na rede conforme a distância do regulador instalado até a subestação.



### 2.3.3 Reforço de Rede

Outra forma de regular a tensão é por meio de reforços de rede. Os projetos de reforço de rede têm como objetivo modificar as características elétricas de um determinado trecho de rede existente para que seja possível novas ligações ou aumento de carga (COPEL, 2013) de modo a assegurar os padrões de desempenho estabelecidos nos procedimentos de rede (ONS, 2021).

Essas modificações podem ser através da implantação ou substituição de equipamentos como: transformadores, equipamentos de compensação reativa, disjuntores, dentre outros, em um elemento funcional (linha de transmissão ou subestação) existente na Rede Básica (NOS, 2021).

Um exemplo de quando é necessário realizar um reforço de rede é quando ocorre a sobrecarga do alimentador na rede, uma das medidas adotadas pelas concessionárias se baseia na troca de seus condutores afim de amenizar as quedas de tensões. Esse método implica em uma capacidade maior de condução que, por sua vez, reduz as perdas na rede que levam às quedas de tensão. As melhorias no perfil de tensão podem ser melhor visualizada em alimentadores de trechos extensos e de alta carga (COPEL, 2013).

### 2.3.4 Bancos de Capacitores

De acordo com Gasperin (2009), os bancos de capacitores são utilizados para reparo de reativos indutivos da rede de distribuição, porém, dependendo de onde o capacitor foi instalado e de sua capacidade, os efeitos desses reparos podem ser percebidos de diversas maneiras no sistema.

De modo geral os reparos são (GÖNEN et al, 1986):

- a liberação da capacidade de geração;
- b liberação da capacidade de transmissão;
- c liberação da capacidade das subestações;
- d redução das perdas de energia;
- e redução da queda de tensão ao longo do alimentador;

- f liberação da capacidade do alimentador;
- g postergação de investimentos;
- h acréscimo no faturamento com o aumento da tensão.

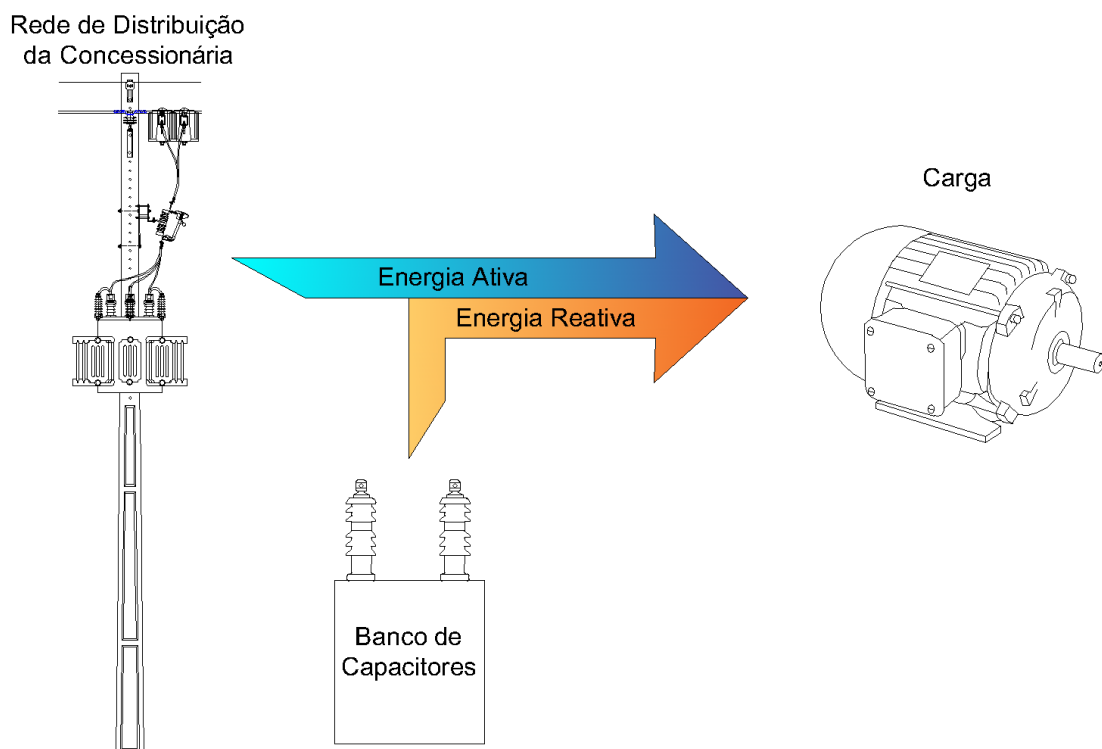
Os Capacitores de Potência são elementos estáticos que são introduzidos nos circuitos de transmissão e distribuição, tanto primária e secundária, do sistema elétrico com o objetivo de reduzir o consumo de potência reativa (GODOI, 2009). Os principais parâmetros que definem o volume do capacitor são a Tensão de Utilização e a Potência de Serviço. A tensão de utilização define a grossura do material isolante (dielétrico) entre as placas do capacitor, uma das dimensões construtivas desse componente; e a potência de serviço define a área das placas condutoras e do dielétrico que formam o componente (COSTA, 2016).

Dentre as vantagens da utilização de capacitores, pode ser citado que quando conectados em série compensam a reatância indutiva da linha viabilizando uma elevação da tensão imediata com o aumento da carga, e pode ser comparado com um regulador de tensão que é correlata proporcionalmente com as variações de corrente. As principais desvantagens da utilização de capacitores são a dificuldade de proteção do capacitor, controle e problemas de ferro-ressonância. Essas desvantagem faz com que os capacitores em série sejam pouco utilizados em redes de distribuição (GASPERIN, 2008).

Um dos dispositivos mais utilizados são os bancos de capacitores *shunt*, tanto pelo fato de serem mais viáveis economicamente em relação ao custo de aquisição e manutenção, quanto à facilidade de instalação, de projeto e de sua manutenção, além de possuírem um tempo de construção reduzido. Suas aplicações variam entre correção de fator de potência em indústrias e correção de perfil de tensão na rede, sendo que, em ambos, o princípio de funcionamento do equipamento está em usá-lo como fonte de reativos, o que busca compensar os reativos consumidos por grandes cargas (DE ALBUQUERQUE, 2002).

De acordo com De Albuquerque (2002), existem também os bancos de capacitores em série, que são usados principalmente em redes curtas com o intuito de diminuir as quedas de tensão, tendo em mente que a potência reativa é proporcional ao quadrado da corrente, enquanto o *shunt* é proporcional ao quadrado da tensão, devido justamente à configuração distinta na rede.

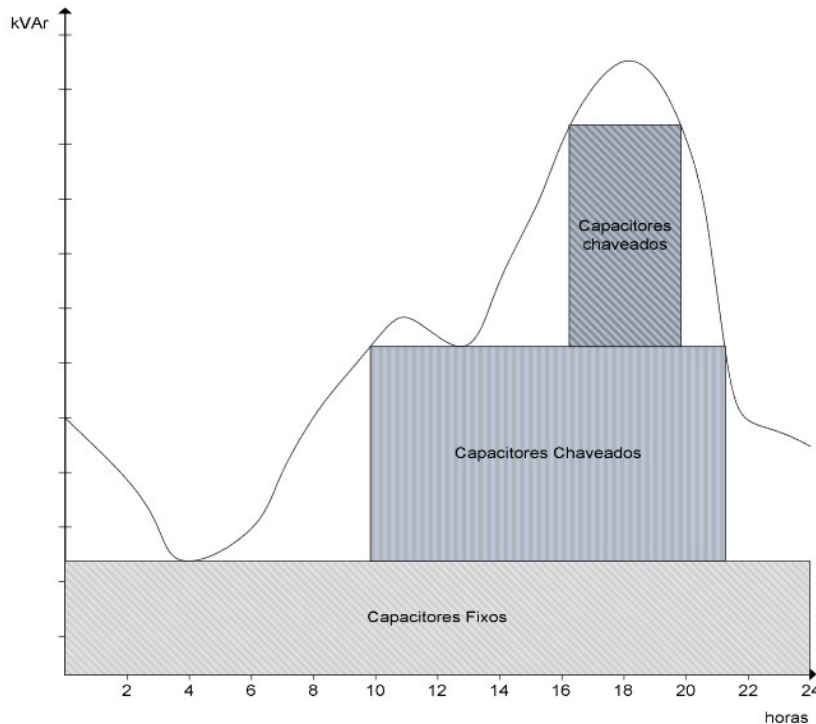
Para o dimensionamento do banco de capacitores deve ser feito o devido desligamento de cargas indutivas ociosas, e sua instalação deve ser realizada próximo aos equipamentos que consomem mais carga reativa, conforme é apresentado na Figura 4. Sendo assim, a circulação de reativos fica restrito aos pontos realmente necessários, liberando a capacidade dos transformadores e reduzindo as perdas (ELEKTRO, 2019).



**Figura 4 - Reativos inseridos pelo banco de capacitores**  
Fonte: Adaptação da NTC 855115 e IFSC (2019).

Realizando o devido levantamento de carga, podem ser inseridos bancos de capacitores que tragam rendimento maior ao sistema, tais como os capacitores chaveados, que atendem com reativos nos períodos de pico de uma determinada carga. A Figura 5 mostra o exemplo de uma demanda diária de reativos que são supridos por bancos de capacitores fixos e chaveados. Observa-se que a demanda de reativos na rede é variável durante o dia, com isso, é possível notar que a inserção de capacitores chaveados pode favorecer o sistema no sentido de utilizar

os reativos somente no horário necessário, quando a demanda por reativos afeta significativamente no afundamento de tensão, não comprometendo o perfil de tensão fora desses intervalos (PEREIRA JR, 2009).



**Figura 5 - Esquema de operação dos bancos de capacitores fixos e chaveados segundo a curva de demanda diária de potência reativa.**  
**Fonte: PEREIRA JR (2009).**

Em relação ao uso de capacitores, fonte de potência reativa, para melhorar os níveis de tensão, sempre retorna na questão da alocação dos bancos de capacitores na rede, com intuito de melhor eficiência. O estudo de um melhor posicionamento dos bancos de capacitores na rede de distribuição é de grande relevância, já que uma otimização nessa finalidade, significaria reduzir o custo de implementação de capacitores, de maneira que os mesmos sejam inseridos em menor quantidade na rede, porém sendo mais eficazes. Levando em consideração que os bancos de capacitores são inseridos próximos às cargas que consomem grande parte desse reativo injetado, por meio de um melhor posicionamento, um banco poderia contribuir fornecendo reativos para mais de um barramento ou, possivelmente, diminuir as dimensões do próprio banco de capacitores, contribuindo financeiramente para a concessionária.

## 2.4 DESVIO PADRÃO

O desvio padrão neste estudo será um indicador fundamental para a especificação da barra ideal para receber banco de capacitores; será experimentada a conexão de um banco em todas as barras e extraído o desvio padrão dos módulos das tensões, e aquela barra que tiver o menor deles será a barra ótima para alocação de banco de capacitores. Na prática, verifica-se que a alocação de capacitores na barra cujo desvio padrão das tensões foi menor, conduz a um perfil de tensão mais horizontalizado, que é algo desejável.

Desvio padrão de uma amostragem é uma medida de dispersão dos dados relativos à média, que se consegue tomando a raiz quadrada da variância amostral. Uma vez que a variância amostral se refere nas unidades dos dados elevados ao quadrado, toma-se como medida de dispersão a sua raiz quadrada. Se representarmos os dados por  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , e por  $\bar{X}$  a sua média, o desvio padrão é representado a partir da equação (1) (MARTINS, 2013):

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1)$$

O desvio padrão é uma medida que só pode ser atribuídos valores positivos e quanto maior for o seu valor, maior será a dispersão dos dados.

### 3 METODOLOGIA

Nesta seção são apresentados os métodos científicos que serão utilizados para solução do problema.

#### 3.1 FLUXO DE POTÊNCIA

Tanto para o método baseado na soma de correntes, como para aquele que utiliza o gradiente, será necessário realizar estudo de fluxo de potência na rede elétrica considerada, e será utilizado, por conveniência um método do tipo “varredura”.

Um método de Varredura é simples, de fácil execução e muito eficiente para determinar o fluxo de potência em redes radiais de distribuição. É conhecido por esse nome por realizar um processo iterativo fazendo o caminho das barras extremas em direção à subestação e vice-versa (COSTA, 2016). Dentre os métodos de varredura, adotou-se para estes estudos o método da soma das correntes, que será resumido a seguir.

##### 3.1.1 MÉTODO DA SOMA DE CORRENTES

O método da soma das correntes consiste no estudo das correntes à jusante da barra em estudo, e em seguida a corrente à montante da mesma, atualizando as tensões das barras do sistema elétrico. Basicamente, o método parte das barras das extremidades do sistema, que contém as cargas, voltando à cada barra até chegar à barra fonte, que é composta pela subestação (CHENG; SHIRMOHAMMADI, 1995).

Como as cargas que mais afetam o perfil de tensão no sistema são as de origem indutiva, para suprir esse consumo, podem ser alocados bancos de capacitores no sistema, que quando na posição correta, permitem reduzir as quedas de tensão na rede elétrica.

O método proposto trata de um algoritmo iterativo, que em cada iteração analisa a resposta do sistema quando aloca certa potência em determinado barramento, a fim de encontrar uma barra que contribua de maneira efetiva com o sistema.

Para início do estudo, pelo método de soma de correntes, define-se valores para a tensão e potência de base, que permitirão calcular correntes e impedâncias base, para obter-se as grandezas resultantes do estudo nas suas formas reais (kV, ampéres, etc), visto que tipicamente os estudos são efetuados na forma “por unidade” (p.u.). As variáveis de potência e tensão são definidas de forma arbitrária, enquanto a impedância de base é obtida a partir das mesmas variáveis de base para tensão e potência conforme a equação (2).

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \quad (2)$$

Em (2),  $V_{base}^2$  corresponde a tensão nominal do sistema que é utilizado como a tensão de referência.  $S_{base}$  corresponde à potência adotada de referência do sistema proposto. A  $Z_{base}$  corresponde a impedância de referência do sistema que é obtida a partir da expressão (1).

Após isso, deve ser preenchida a matriz de impedâncias  $Z$ , apresentada em (3), a qual possui todas as resistências e reatâncias já convertidas em p.u. presentes em cada trecho pelas barras adjacentes.

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Em (3) o índice de cada elemento da matriz  $Z$  representa a barra adjacente ao trecho  $Z$ , por exemplo, o termo  $Z_{12}$  representa a impedância presente no trecho entre as barras 1 e 2. Antes de iniciar as iterações do algoritmo, devem ainda serem inicializadas as variáveis, tais como o fator de potência, os valores de capacitores a serem instalados e o erro a ser considerado. Lembrando que a variável de erro estipula o critério de parada do sistema, ajustando a precisão da resposta. Quanto menor esse valor de erro, maior a precisão de resposta para o sistema.

Para o estudo, é adicionado um banco de capacitores por iteração do laço de repetição do código, então é calculado para cada barra a potência total considerando a carga e o banco de capacitores

$$S_{total} = S_{carga} - S_{cap} = P_{carga} + i(Q_{carga} - Q_{cap}) \quad (4)$$

Em (4),  $S_{total}$  corresponde à potência total, obtida a partir de  $S_{carga}$  e  $S_{cap}$  que representam a potência aparente da carga e dos capacitores, respectivamente. O  $P_{carga}$  é a potência ativa, enquanto  $Q_{carga}$  equivale a potência reativa consumida e  $Q_{cap}$  representa a potência reativa injetada por meio de capacitores.

Como critério de parada para cada iteração desse algoritmo, foi verificado a cada etapa se todas as tensões atendem a condição do erro do sistema, ou seja, a iteração é interrompida quando (5) é atendido para todas as barras, sendo que  $V^n$  é a tensão correspondente a barra da iteração atual, enquanto  $V^{n-1}$  é a tensão da mesma barra, porém na iteração anterior e  $\varepsilon$  o erro.

$$|V^n - V^{n-1}| < \varepsilon \quad (5)$$

No caso de ainda não atender ao critério de parada, o primeiro passo é atualizar as correntes nos trechos a partir do conjugado da potência aparente da barra que se encontra à jusante do trecho e o respectivo conjugado de tensão da barra.

$$I^n = \frac{\bar{S}^n}{\bar{V}^n} \quad (6)$$

Em (6),  $n$  é a barra que se encontra à jusante do trecho que está sendo calculado.  $\bar{S}$  corresponde ao conjugado da potência na barra  $n$  e  $\bar{V}$  é o conjugado da tensão na barra.

O próximo passo é atualizar as tensões de acordo com as que foram obtidas na barra a montante em uma iteração anterior em conjunto com as correntes obtidas nessa iteração junto da impedância presente no trecho que se encontra à montante de cada barra.



$$V_{jusante} = V_{montante} - I_{trecho} * Z_{trecho} \quad (7)$$

Em (7), temos a  $V_{jusante}$  que equivale a tensão da barra posterior.  $V_{montante}$ ,  $I_{trecho}$  e  $Z_{trecho}$  que correspondem a tensão da barra anterior, a corrente entre as barras anterior e posterior e a impedância desse mesmo trecho, respectivamente.

Assim o vetor de tensões é atualizado no decorrer das iterações realizadas pelo algoritmo com o auxílio de estruturas de repetição. Quanto mais iterações realizadas pelo algoritmo, a tendência é de se aproximar da resposta com uma precisão cada vez maior.

Ao final da iteração, será verificado se a condição de erro é atendida pelo sistema para sair do laço de repetição. Quando esse critério é atendido, a tensão final de resposta de cada barramento é obtida, e em seguida é atualizado também os valores de corrente dos trechos. Caso o critério de parada não seja atendido, retorna ao cálculo de corrente com os novos dados.

O Apêndice A apresenta o fluxograma que descreve os passos necessários para executar o algoritmo de Soma de Correntes.

### 3.1.2 MÉTODO DO GRADIENTE

O problema de otimização do perfil de tensão em redes de distribuição, usando o método do Gradiente, permite determinar o montante de potência injetado em cada barra, porém, para este método, o objetivo principal é aproveitar o desenvolvimento (ou aplicação) do método no presente estudo para identificar um ou mais indicadores de qual barra é a mais apropriada para a alocação ótima de banco de capacitor para a melhoria do perfil de tensão. Uma formulação do problema através do método do Gradiente, é apresentado a seguir (PIMENTEL FILHO, 2005).

Função objetivo:

$$F(Q) = \sum (|V_i| - |V_{ref}|)^2 \quad (8)$$

Sujeito à

$$\begin{cases} V < V_{m\acute{a}x} \\ V > V_{m\acute{i}n} \end{cases} \quad (9)$$

e o vetor de equação de fluxo de potência na rede elétrica  $G(Q, V)$ .

Onde

$Q$  é a variável de controle,

$i$  é o índice da iteração e

$V_{ref}$  é a tensão de referência em cada barra.

Derivada de função objetivo

$$\nabla F(Q) = 2 * \sum \left[ (|V_i| - |V_{ref}|) * \frac{\partial Q}{\partial |V_i|} \right] \quad (10)$$

$\nabla F(Q)$  = vetor gradiente

Equação de busca:

$$Q^{(k+1)} = Q^{(k)} - \nabla F(Q) \quad (11)$$

$$Q = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

Algoritmo:

- 1 Dados de entrada;
- 2 Executar uma iteração do fluxo de potência;
- 3 Calcular a matriz de derivadas  $\frac{\partial Q}{\partial V}$ ;
- 4 Calcular o vetor gradiente  $\nabla F(Q) = \frac{\partial Q}{\partial V_i} [\Delta V]$ ;
- 5 Através da equação de busca, encontrar valores de  $Q$ ;
- 6 Volta ao passo 2 utilizando os novos valores de  $Q$  até que atinja a convergência.

Teste de convergência:

$$\begin{cases} V < V_{m\acute{a}x} \\ V > V_{m\acute{i}n} \end{cases} \quad (13)$$

Vetor gradiente expandido para a rede el\u00e9trica em estudo:

$$\nabla F(Q) = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_{12}}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^k - V_{1ref} \\ V_2^k - V_{2ref} \\ \vdots \\ V_{12}^k - V_{12ref} \end{bmatrix} \quad (14)$$

C\u00e1lculo de Q:

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_{12} \end{bmatrix}^{(k+1)} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_{12} \end{bmatrix}^{(k)} - \alpha * \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_{12}}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^k - V_{1ref} \\ V_2^k - V_{2ref} \\ \vdots \\ V_{12}^k - V_{12ref} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Onde  $\alpha$  \u00e9 o passo de incremento (no caso igual a 1,0).

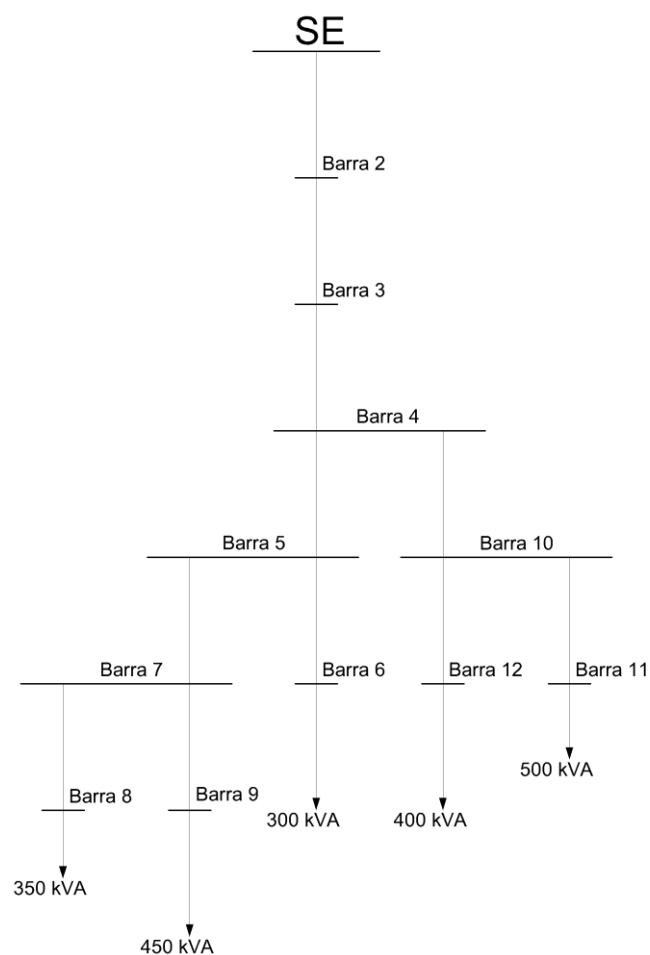
Os passos para executar o algoritmo do m\u00e9todo do Gradiente \u00e9 apresentado no Ap\u00eandice B.

## 4 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo será apresentado o desenvolvimento e os resultados obtidos por meio dos dois métodos de resolução.

### 4.1 MÉTODO DA SOMA DE CORRENTES

Para a análise do método proposto, foi realizado um estudo baseado no sistema fictício de rede de distribuição de 12 barras que é representado pelo diagrama unifilar na Figura 6.



**Figura 6 - Rede de distribuição a ser estudado.**  
**Fonte: autoria própria.**

Esse sistema é composto pela subestação (SE) que alimenta o sistema, que atende ao sistema pela tensão de 13,8kV, que afim de cálculo assumirá o valor em por unidade (p.u.) de 1,0. As outras barras compõe o alimentador e seus ramos a partir das derivações. Ao final de algumas barras do sistema, são considerados o consumo de potência nas cargas presentes.

Para o estudo do sistema devemos considerar os valores de fator de potência que influencia diretamente no consumo de reativos que está presente nas barras, além de mostrar a potência ativa para uma dada potência aparente. Também apresentamos o critério de parada do algoritmo sendo fundamental para uma resposta mais otimizada, que quanto menor o erro apresentado, mais preciso será a resposta. Para este caso será admitido os valores  $fp = 0,8$  e  $\varepsilon = 0,001$ .

É possível fazer a analogia desse sistema com um sistema de distribuição comum, onde as barras podem ser consideradas postes presentes na rede que, por exemplo, possuem a estrutura de derivação ramificando para atender à outros consumidores. Os consumidores podem ser representados por seus respectivos transformadores de atendimento, sendo particular ou da concessionária.

A Tabela 2 mostra as informações pertinentes a respeito das distâncias entre as barras dadas em quilômetros (km), a resistência e reatância do condutor, que são apresentados em ohms/km.

**Tabela 2 - Distância entre as barras**

Trecho		Seção do condutor (AWG)	Impedância ( $\Omega$ /km)		Distância (km)	Impedância Total ( $\Omega$ )	
Barra Montante	Barra Jusante		Resistência	Reatância		Resistência	Reatância
SE	1				3	1,2735	1,2990
1	2				3	1,2735	1,2990
2	3	2/0	0,4245	0,4330	3	1,2735	1,2990
3	4				4	1,6980	1,7320
4	5				2	0,8490	0,8660
4	6				6	3,2106	2,6400
6	7				3	1,6053	1,3200
6	8				7	3,7457	3,0800
3	9	1/0	0,5351	0,4400	5	2,6755	2,2000
9	10				2	1,0702	0,8800
9	11				3	1,6053	1,3200

Fonte: autoria própria.

A impedância presente na tabela corresponde à característica do condutor, que varia conforme a seção transversal do mesmo em conjunto à composição do material deste condutor. Neste caso, é utilizado rede convencional aérea de cabos

de alumínio com alma de aço, tanto para o alimentador principal quanto para suas ramificações.

Para realizar o estudo do caso da rede de distribuição apresentada, foi considerado para os condutores do alimentador principal, que vai desde a subestação até a barra de número 5, cabos de alumínio com alma de aço com seção de 2/0, enquanto para os demais ramos do sistema foi considerado condutor de alumínio com alma de aço de seção 1/0.

Previamente deve-se estabelecer as variáveis de referência, tais como a tensão e potência:

$$V_{base} = 13,8kV$$

$$S_{base} = 1000kVA$$

Tendo as duas variáveis definidas podemos obter a impedância de base que é dada por:

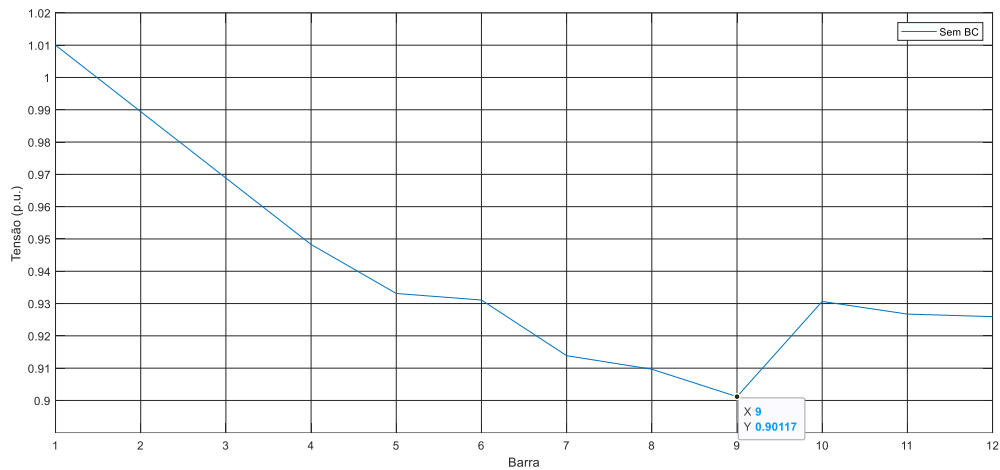
$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{13,8kV^2}{1000kVA}$$

$$Z_{base} = 190,44\Omega$$

Com os dados apresentados na Tabela 2 é possível montar a matriz de impedâncias  $Z$  já com sua unidade em p.u. Foi estipulado também as potências reativas nominais para os capacitores à serem aplicados ao sistema com os valores de 300 kVar, 600 kVar e 900 kVar para analisar o quanto cada um deles vai influenciar no perfil de tensão. Esses capacitores foram previamente estipulados para avaliar a resposta do sistema quando submetido a diferentes cenários.

Em seguida serão apresentados os resultados dos algoritmos de soma de correntes e do método do gradiente, os quais foram aplicados ao Sistema Elétrico proposto. Para esta etapa do problema foi optado pela utilização do software Matlab para compilar o algoritmo que realiza o cálculo do fluxo de potência, pois, por se tratar de um método iterativo se tornaria muito custoso, além de exigir muito tempo para resolve-lo manualmente.

Em um primeiro momento foi executado o fluxo de potência, sem injeção de reativos, com suas barras e respectivas tensões de trabalho, que pode ser observado na Figura 7.

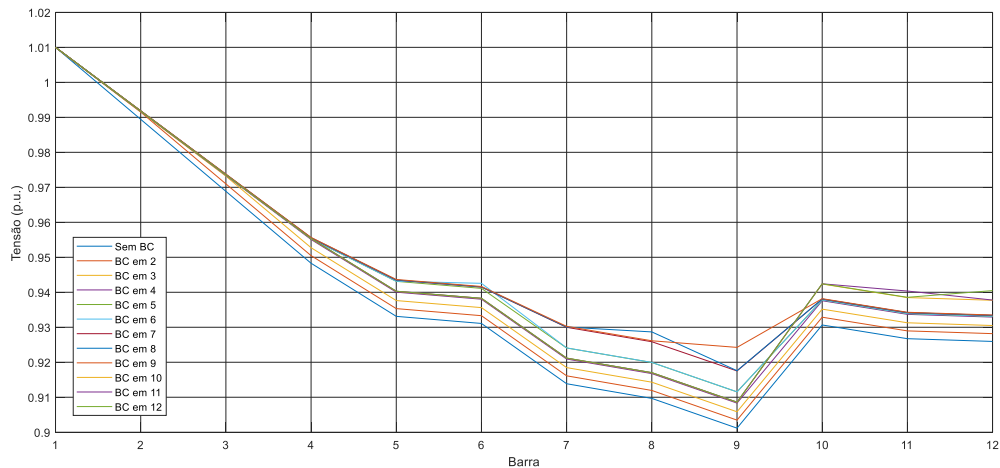


**Figura 7 - Perfil de Tensão sem Banco de Capacitores.**  
**Fonte: autoria própria.**

Na Figura 7 é possível observar que no perfil de tensão original do sistema as barras 7, 8, 9, 11 e 12 apresentam tensões muito baixas e, de acordo com o PRODIST, são consideradas em um nível precário de atendimento com tensão a baixo de 0,93 p.u. e acima de 0,90.

Para elevar o perfil de tensão até um valor aceitável, utilizando o método baseado na soma de correntes, foi incluído um banco de capacitores em uma barra apenas por iteração. Para encontrar um perfil de tensão aceitável foi proposta a resolução com 3 valores de bancos com potências: 300, 600 e 900 kVAr.

Inicialmente utilizou-se o banco de capacitor de 300 kVAr, esperando que atendesse o requisito de correção das tensões. Para este caso, a resposta é apresentada na Figura 8.



**Figura 8 - Perfil de Tensão com Banco de Capacitores de 300 Kvar.**  
**Fonte: autoria própria.**

Na Figura 8 não ocorre a correção requerida no perfil de tensão do sistema como pode ser observado. O método de soma de correntes permite relacionar os valores na Tabela 3, a qual possibilita a análise com maior clareza das variações de tensão causadas pela alocação do banco de capacitores.

O menor desvio padrão dos módulos de tensão (0,0264) foi verificado para a barra 9, o que permite afirmar que ela é a barra ideal para se alocar banco de capacitores; a experimentação de bancos maiores poderá corroborar esta afirmação.

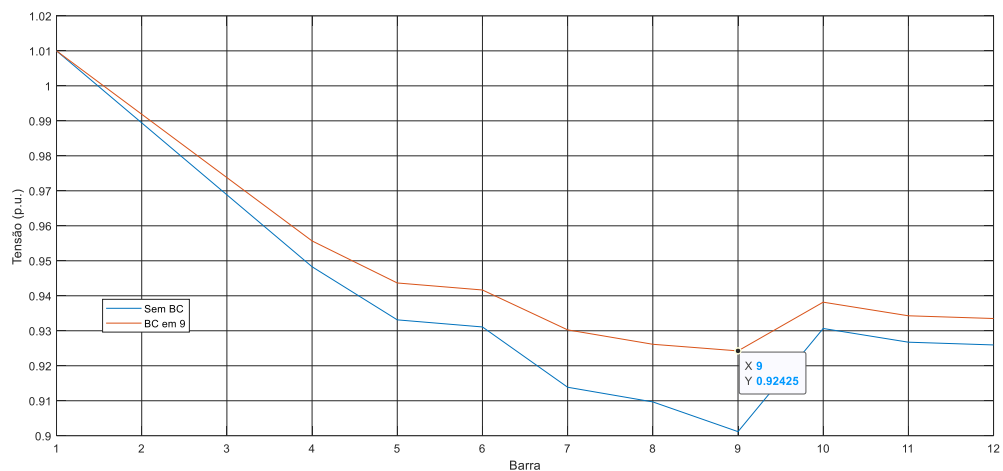
**Tabela 3 - Resultado da inserção de banco de capacitores de 300kVar**

<b>Barra com BC</b>	<b>Vmedia (p.u.)</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Vmax (p.u.)</b>	<b>Barra Vmax</b>	<b>Vmin (p.u.)</b>	<b>Barra Vmin</b>
1	0,9407	0,0315	1,0100	1	0,9012	9
2	0,9428	0,0311	1,0100	1	0,9035	9
3	0,9447	0,0304	1,0100	1	0,9059	9
4	0,9465	0,0295	1,0100	1	0,9083	9
5	0,9479	0,0285	1,0100	1	0,9115	9
6	0,9481	0,0285	1,0100	1	0,9116	9
7	0,9496	0,0270	1,0100	1	0,9175	9
8	0,9499	0,0268	1,0100	1	0,9176	9
9	0,9503	0,0264	1,0100	1	0,9243	9
10	0,9479	0,0290	1,0100	1	0,9086	9
11	0,9481	0,0289	1,0100	1	0,9086	9
12	0,9481	0,0289	1,0100	1	0,9086	9

Fonte: autoria própria.

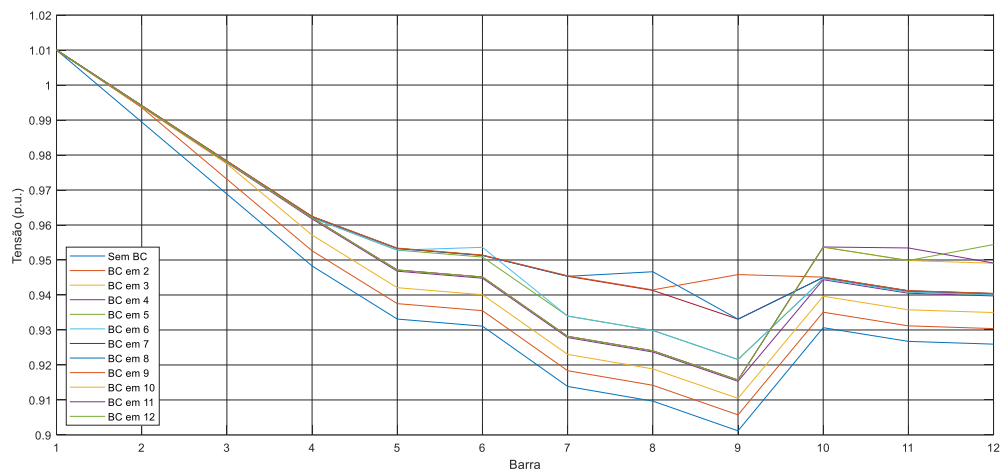
Cada uma das linhas da tabela representa uma situação para todo o sistema, sendo que essa situação é a inserção do banco na respectiva barra que está presente na primeira coluna. O valor do desvio padrão mostrado na Tabela 3 reflete a resposta aos reativos que possui uma curva de perfil de tensão mais estável, ou seja, que se aproxima mais de uma função linear se comparado às outras situações. Apesar de ajudar na resposta, esse valor de desvio padrão não valida a barra como resposta, apenas ajuda a refiná-la. Para a resposta ser validada, a condição é que todos os valores de tensão nas barras deverá ser maior que 0,93 p.u. que é imposto pelo PRODIST, sendo que neste caso chegou apenas ao valor de 0,9243 p.u.. A Figura 9 ilustra o perfil de tensão para o banco alocado na barra 9.





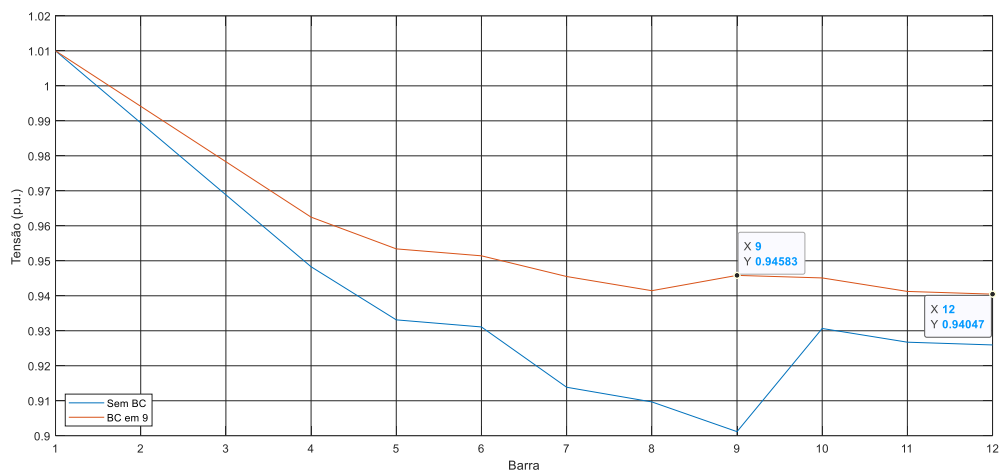
**Figura 9 - Perfil de tensão com banco de capacitores de 300kVar na barra 9.**  
**Fonte: autoria própria**

Verifica-se agora a resposta para banco de 600kVAR; os perfis traduzidos nas curvas estudadas para cada valor de capacitores estão contidos na Figuras 10.



**Figura 10 - Perfil de tensão com banco de capacitores de 600 kVar.**  
**Fonte: Autoria Própria**

Pode-se observar que o perfil de tensão no sistema se torna horizontal no momento que o banco de capacitores é instalado na barra 9. Nesse ponto fica evidente que através deste método, a barra 9 é a melhor para receber bancos de capacitores, ratificado pelas curvas mostradas na Figura 11. Novamente o menor desvio padrão (0,0220) foi verificado na barra 9.



**Figura 11 - Perfil de tensão com banco de capacitores de 600kVar na barra 9.**  
**Fonte: autoria própria.**

Na Tabela 4 fica evidente a situação do sistema. A segunda coluna apresenta as médias de tensão em cada curva do perfil de tensão obtido. Também são mostrados a barra onde contém a menor tensão no sistema e também onde está a de maior tensão, além do valor de desvio padrão.

**Tabela 4 - Resultado da inserção de banco de capacitores de 600 kVar.**

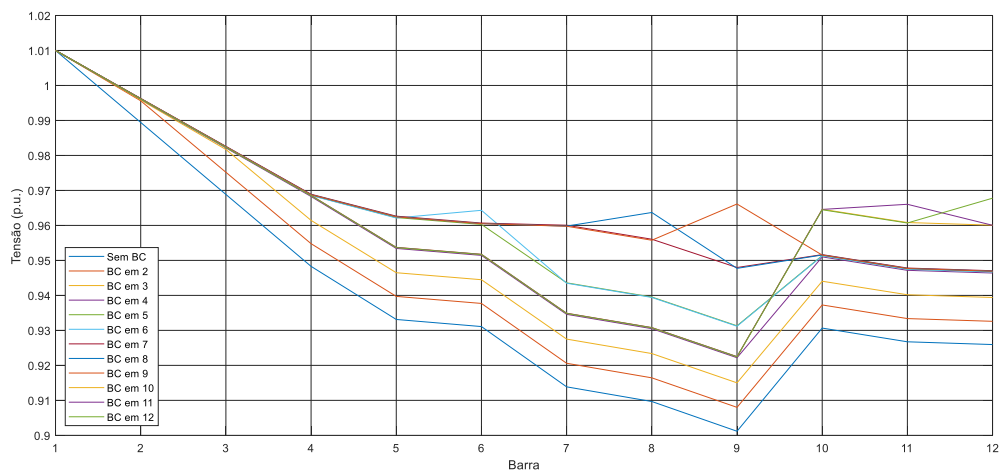
Barra com BC	Vmedia (p.u.)	Desvio Padrão	Vmax (p.u.)	Barra Vmax	Vmin (p.u.)	Barra Vmin
1	0,9407	0,0315	1,0100	1	0,9012	9
2	0,9448	0,0307	1,0100	1	0,9057	9
3	0,9486	0,0292	1,0100	1	0,9105	9
4	0,9522	0,0274	1,0100	1	0,9153	9
5	0,9549	0,0256	1,0100	1	0,9216	9
6	0,9551	0,0256	1,0100	1	0,9216	9
7	0,9580	0,0230	1,0100	1	0,9331	9
8	0,9584	0,0227	1,0100	1	0,9331	9
9	0,9591	0,0220	1,0100	1	0,9405	12
10	0,9547	0,0267	1,0100	1	0,9157	9
11	0,9551	0,0267	1,0100	1	0,9157	9
12	0,9552	0,0267	1,0100	1	0,9157	9

**Fonte: autoria própria.**

Após comparar os valores de máximo e mínimo dos níveis de tensão do sistema, pode-se observar que o objetivo do algoritmo é atingido, sendo ele encontrar uma barra para alocar um valor nominal de banco de capacitores que possa atender o sistema. Temos então o valor mínimo da curva de 0,9405 que está presente na barra 9, a mesma que foi adicionado o banco de capacitores. Para

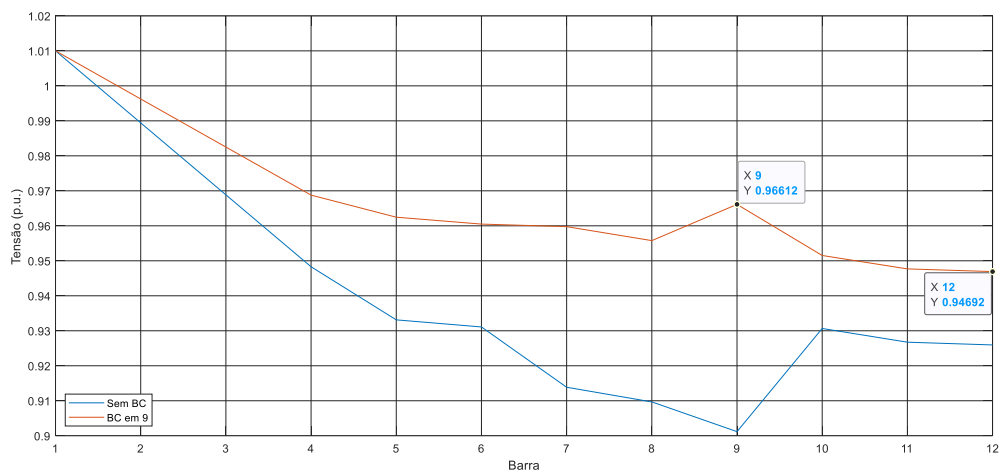
saber que é o melhor local para instalar o banco, podemos observar que além de atender ao requisito de tensão mínima, ainda possui o menor valor de desvio padrão, que implica em uma curva que se aproxima mais de uma curva linear, sem ter grandes quedas de tensão no sistema. Todos esses dados se encontram na Tabela 4.

Apesar de já obter uma resposta que atende ao problema, procura-se aumentar esse perfil de tensão para que possa ter uma margem de reativos injetados que futuramente permita utilizar esse mesmo banco para situações de operação em carga pesada, mas que não cause sobretensões em carga leve. Assim, foi simulada a conexão de banco de 900kVar. A resposta que contém todas as curvas estudadas para cada valor de capacitores está contida na Figura 12.



**Figura 12 - Perfil de tensão com banco de capacitores de 900kVar.**  
**Fonte: autoria própria.**

É possível notar a variação para o perfil de tensão ao injetar reativos em todas as barras com o banco de capacitores de 900kVar, porém, novamente é observado que a o banco alocado na barra 9 se destaca conforme a Figura 13.



**Figura 13 - Perfil de tensão com banco de capacitores de 900kVar na barra 9.**  
**Fonte: autoria própria.**

Fica clara a reação do sistema ao instalar o banco na barra 9, mostrando a melhor correção possível do perfil de tensão, e também pode ser observado com mais detalhes a resposta do sistema ao banco de capacitores pela Tabela 5.

**Tabela 5 - Resultado da inserção de banco de capacitores de 900 kVar.**

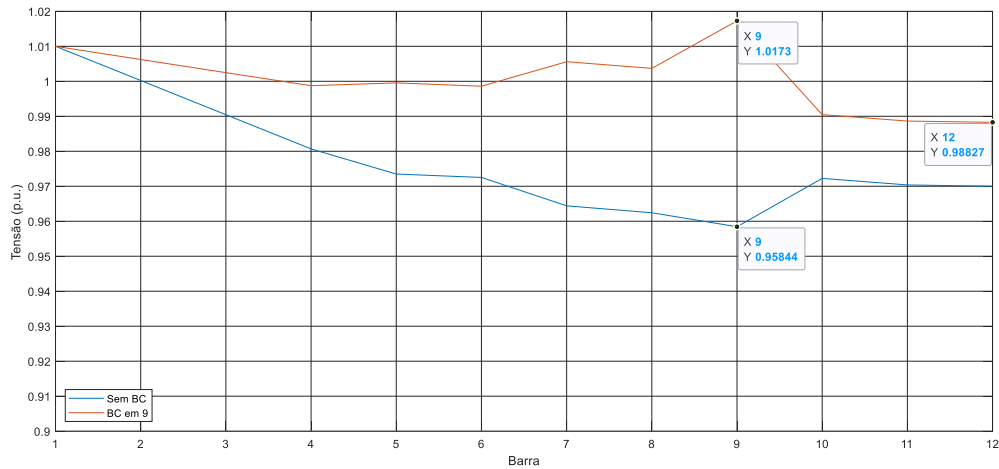
Barra com BC	Vmedia (p.u.)	Desvio Padrão	Vmax (p.u.)	Barra Vmax	Vmin (p.u.)	Barra Vmin
1	0,9407	0,0315	1,0100	1	0,9012	9
2	0,9468	0,0302	1,0100	1	0,9080	9
3	0,9525	0,0281	1,0100	1	0,9150	9
4	0,9578	0,0255	1,0100	1	0,9222	9
5	0,9617	0,0229	1,0100	1	0,9313	9
6	0,9619	0,0229	1,0100	1	0,9312	9
7	0,9660	0,0194	1,0100	1	0,9471	12
8	0,9665	0,0193	1,0100	1	0,9469	12
9	0,9674	0,0187	1,0100	1	0,9469	12
10	0,9614	0,0248	1,0100	1	0,9225	9
11	0,9618	0,0248	1,0100	1	0,9225	9
12	0,9619	0,0249	1,0100	1	0,9224	9

**Fonte: autoria própria.**

De acordo com a Tabela 5, ao instalar o banco de capacitores na barra 9, será obtido uma curva para o perfil de tensão ainda mais próxima da tensão nominal se comparado à curva com capacitores de 600kVar. Os dados demonstram um aumento considerável nos limites mínimos além de uma aproximação maior de uma curva linear como mostra o desvio padrão.

Em seguida, foi realizado o estudo do banco de capacitores de 900kVar sendo aplicado à barra 9, dessa vez com o sistema trabalhando sob carga leve. A

resposta obtida é mostrada na Figura 14.



**Figura 14 - Perfil de tensão com banco de capacitores de 900kVar na barra 9 operando com 50% da carga.**

Fonte: autoria própria.

Fica explícita a variação causada pela redução de carga no sistema, mesmo tendo um perfil de tensão maior que os outros casos estudados, apesar disso o sistema continua operando normalmente, pois mesmo com o aumento no perfil de tensão, os limites máximos de tensão permitidos (segundo o PRODIST a tensão não pode ser maior à 1,05 p.u.) não são excedidos. São apresentados na Tabela 6 os valores do perfil de tensão obtido, junto dos demais dados.

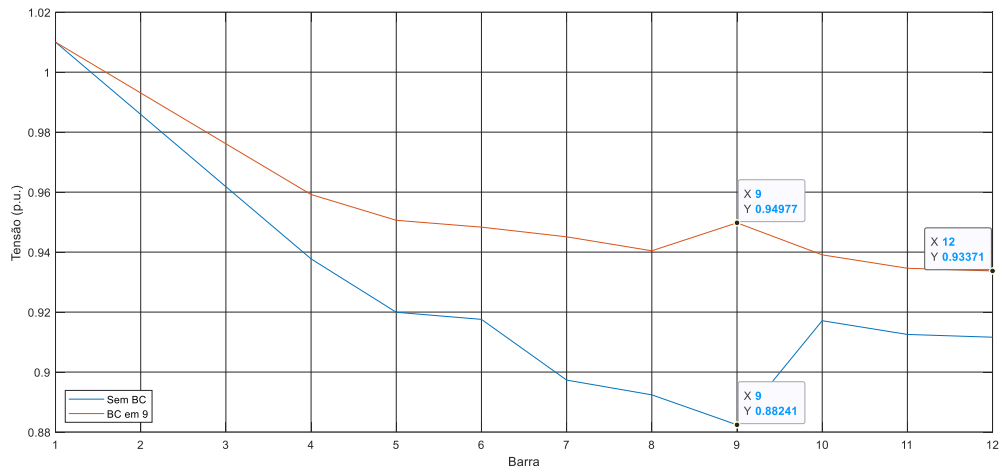
**Tabela 6 - Resultado da inserção de banco de capacitores de 900 kVar com 50% de carga.**

Barra com BC	V (p.u.)	Vmedia (p.u.)	Desvio Padrão	Vmax (p.u.)	Barra Vmax	Vmin (p.u.)	Barra Vmin
1	1,0100						
2	1,0062						
3	1,0025						
4	0,9987						
5	0,9995						
6	0,9986	1.0008	0.0084	1.0173	9	0.9883	12
7	1,0056						
8	1,0037						
9	1,0173						
10	0,9905						
11	0,9886						
12	0,9883						

Fonte: autoria própria.

Mesmo com o incremento de carga, o sistema se comportou de forma adequada, uma vez que a tensão mínima ficou em 0,9883 p.u. na barra enquanto a máxima com 1,0173 p.u..

Além dessa situação, também foi adotado um caso em que a carga é excedida chegando à 115% da carga nominal conforme a Figura 15.



**Figura 15 - Perfil de tensão com banco de capacitores de 900kVar na barra 9 operando com 115% da carga.**

Fonte: autoria própria.

Com essa curva, podemos verificar que o limite de sobrecarga permitida pelo sistema se encontra próximo à 115% da carga nominal, sendo que nesse caso ainda não interfere nos limites de tensão estabelecidos. Os valores são apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7 - Resultado da inserção de banco de capacitores de 900 kVar com 115% de carga.**

Barra com BC	V (p.u.)	Vmedia (p.u.)	Desvio Padrão	Vmax (p.u.)	Barra Vmax	Vmin (p.u.)	Barra Vmin
1	1,0100						
2	0,9931						
3	0,9761						
4	0,9592						
5	0,9506						
6	0,9483						
7	0,9451	0,95667	0,023144	1,01	1	0,93371	12
8	0,9404						
9	0,9498						
10	0,9391						
11	0,9346						
12	0,9337						

Fonte: autoria própria.

Por meio desses resultados, podemos confirmar que com a instalação do banco de capacitores de 900kVar na barra 9 anula grande parte do efeito causado pela demanda de reativos. Esse estudo permite especificar a barra 9 como sendo aquela ótima para receber banco de capacitores.

O algoritmo soma de correntes foi executado com um total de 108 iterações que buscam minimizar o erro de tensão determinado por  $\epsilon = 0,001$ .

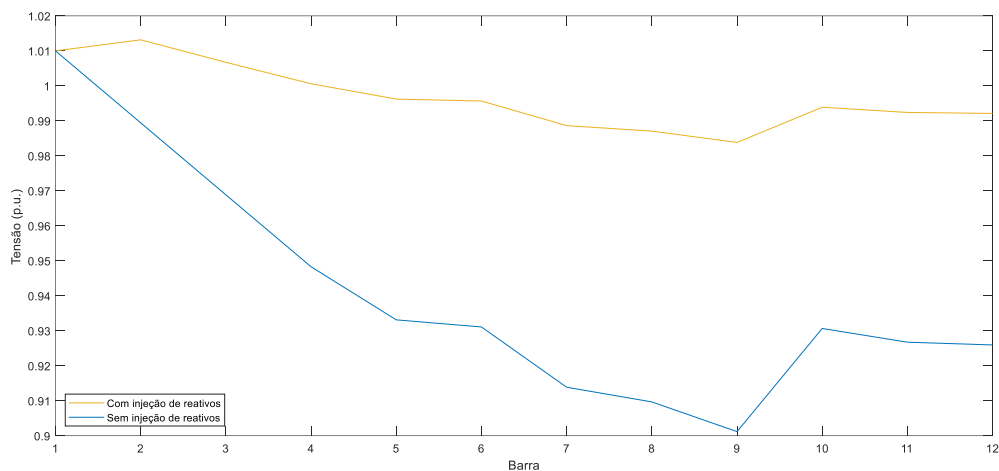
## 4.2 MÉTODO DO GRADIENTE

### 4.2.1 Montante de reativos em cada barra

Após obter os resultados da execução do algoritmo de soma de correntes, realizou-se novamente o estudo, com base no método do Gradiente, com a expectativa de corroborar com o resultado obtido pelo método de Soma de Correntes.

O método permite quantificar o montante de reativos capacitivos necessários em cada barra, para melhorar o perfil de tensão quanto requerido. Obviamente se torna economicamente inviável instalar banco de capacitores em todas as barras da rede de distribuição, e com capacidades diferentes; então o principal objetivo deste método é deduzir um ou mais indicadores de qual barra é a mais apropriada para a instalação de banco de capacitores, que resulta no investimento ótimo, ou seja, o menor montante de reativos capacitivos injetados, que melhore o perfil de tensão conforme requerido.

Antes de tratar propriamente da especificação da barra mais promissora, utilizando o método do Gradiente, são mostrados alguns resultados secundários obtidos com ele. A Figura 16 mostra uma comparação entre os perfis de tensão para os casos sem adição de capacitores, e com injeção de reativos em todas as barras, com exceção da barra 1 (subestação); obviamente o perfil com capacitores se aproxima do idealizado com tensão nominal em todas as barras.



**Figura 16 - Perfil de Tensão Método do Gradiente**  
**Fonte: Autoria própria.**

A Tabela 8 mostra detalhes do resultado de simulação para o caso ilustrado na Figura 16, onde na primeira coluna tem-se a numeração das barras da rede de distribuição considerada; a segunda e terceira colunas mostram respectivamente o módulo das tensões (p.u.) e ângulos (radianos); na sequência verifica-se o vetor variação de tensão (com relação à tensão de referência 1,0 p.u.); a coluna  $Q_{inicial}$  apresenta a carga reativa (indutiva) presente na situação inicial da rede elétrica; na coluna  $\Delta Q$  estão os montantes de reativos capacitivos (p.u.) requeridos em cada barra o sistema para melhorar o perfil de tensão e finalmente o balanço final de reativos em cada barra.

**Tabela 8 - Resultado da inserção de banco de capacitores pelo método de gradiente**

Barra com BC	Tensão	Ângulo	$\Delta V$	$Q_{inicial}$	$\Delta Q$	$Q_{final}$
2	1,0132	-0,0254	0,0138	0,0000	1,4953	-1,4953
3	1,0068	-0,0410	0,0068	0,0000	-0,0087	0,0087
4	1,0007	-0,0568	0,0007	0,0000	0,0374	-0,0374
5	0,9963	-0,0686	-0,0037	0,0000	0,0435	-0,0435
6	0,9958	-0,0702	-0,0042	-0,1800	-0,0626	-0,1174
7	0,9887	-0,0820	-0,0113	0,0000	-0,0082	0,0082
8	0,9872	-0,0850	-0,0128	-0,2100	-0,0945	-0,1155
9	0,9839	-0,0909	-0,0161	-0,2700	-0,1238	-0,1462
10	0,9940	-0,0695	-0,0060	0,0000	0,0017	-0,0017
11	0,9925	-0,0723	-0,0075	-0,3000	-0,1319	-0,1681
12	0,9922	-0,0729	-0,0078	-0,2400	-0,1048	-0,1352

**Fonte: autoria própria.**



#### 4.2.2 Determinação da barra a ser alocado banco de capacitores de maneira ótima

Visto que o método do Gradiente não dá uma indicação direta da barra mais promissora para a instalação de capacitores, foi considerada a matriz de derivadas de potência reativa com relação ao módulo de tensão, e na sequência a sua inversa, no sentido de identificar a barra com maior sensibilidade do módulo de tensão com relação ao reativo. Em anexo são apresentadas respectivamente essas matrizes.

O vetor formado pela diagonal principal mostra as derivadas  $\frac{\partial |V|}{\partial Q}$  para cada barra, na rede elétrica sem adição de capacitores, de acordo com a Tabela 9.

**Tabela 9 - Diagonal principal das derivadas**

Barra	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\frac{\partial  V }{\partial Q}(i,i)$	0.0137	0.0281	0.0435	0.0636	0.0736	0.1025	0.1216	<b>0.1506</b>	0.0766	0.0897	0.0960

Fonte: autoria própria.

O maior valor de  $\frac{\partial |V|}{\partial Q}$  (0,1506) ocorre na barra 9, onde deduz-se que a tensão tem a maior sensibilidade à potência reativa injetada, o que permite concluir que a barra 9 deve ser inicialmente escolhida para a instalação de banco de capacitores; e que a barra 8 é segunda mais promissora.

## 5 CONCLUSÕES

A instalação de sistemas de distribuição proporcionou uma crescente disponibilidade de energia elétrica que acarretou em mais conforto e comodidade para o dia a dia da população. Mesmo com os avanços tecnológicos, ainda existem falhas provocadas por esses sistemas, fazendo com que as variações de cargas e perdas de potências elétricas interfiram no funcionamento de alguns equipamentos.

Essa pesquisa objetivou apresentar uma metodologia alternativa para alocação ótima de bancos de capacitores em redes de distribuição elétrica, com propósito de melhorar os níveis de tensão que se retrate como uma ferramenta prática, simples, porém confiável.

Para isso, foi elaborado um algoritmo baseado no método de soma de correntes e um outro método de minimização já estabelecido pelo método do gradiente. Os resultados obtidos a partir desses algoritmos foram comparados e para validar a metodologia proposta.

A diferença entre os algoritmos apresentados é de larga escala, porém ambas chegam a solucionar um problema, que é aumentar as tensões presentes no sistema por meio de injeção de reativos na rede com o uso de bancos de capacitores. O problema em questão é que de um lado a soma de correntes procura resolver um problema de imediato, ou seja, apenas pensando em elevar a tensão até um nível aceitável, por outro, o método do gradiente busca por uma resposta mais próxima possível da tensão nominal para todas as barras. O método do gradiente exige um número menor de iterações já que, ao contrário da soma de correntes, não parte de um valor específico de banco de capacitores.

Os resultados obtidos a partir do método da soma de correntes foi comparado ao coeficiente de sensibilidade obtido na diagonal principal da matriz das derivadas do método do gradiente. Os dois métodos indicaram a barra de número 9 para a alocação ótima de capacitores da rede elétrica. No primeiro método, a barra foi identificada por meio do menor desvio padrão do módulo de tensão quando o banco de capacitores foi conectado nas barras, e o segundo método identificou a barra através da maior “sensibilidade” do módulo de tensão em relação a potência reativa.

Para a rede apresentada, os dois métodos foram validados, cada um com sua resposta particular que possibilitam sua aplicação no sistema. Cabe a quem for

implementar os bancos de capacitores analisar qual a real prioridade de reativos na rede, ou seja, quanto será aumentado ou não a demanda de carga para a rede de estudo.

Como sugestão para continuidade do trabalho, indica-se a procura da potência ótima para os bancos de capacitores, por meio de iterações, acrescentando potências reativas para chegar a um valor comercial aproximado para a resposta.

## 6 REFERÊNCIAS

BERNARDON, D. P. et al. Perdas técnicas e comerciais de energia elétrica em sistemas de distribuição. **VII Conferência Brasileira de Qualidade de Energia Elétrica. Santa Maria: AGEPOC. 2007.**

CARVALHO, M. R. Estudo Comparativo de Fluxo de Potência para Sistemas de Distribuição Radial. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2006. 13, 35, 38, 39

CHENG, Carol S.; SHIRMOHAMMADI, Dariush. A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis. **IEEE Transactions on Power systems**, v. 10, n. 2, p. 671-679, 1995.

COSTA, Miguel Monteiro. **Alocação ótima de bancos de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica: abordagem para redes monofásicas e trifásicas.** 2016. 102f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Ouro Preto. 2016.

COPEL, NTC 841100 - Projeto de Redes de Distribuição Compacta Protegida. Paraná, 2013.

COWDREY, John. The war of the currents. **Home Power**, v. 111, p. 88-92, 2006.

DE ALBUQUERQUE, Valério Oscar. **Controle coordenado de tensão e potência reativa.** 2002. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2002.

ELEKTRO – DISTRIBUIDORA DE ENERGIA. **Energia Ativa e Reativa.** 2019. Disponível em: <<https://www.elektro.com.br/seu-negocio/energia-ativa-e-reativa>>. Acesso em: 20 de abril de 2019.

FEIJOO, AMLC. Medidas de dispersão. In: A pesquisa e a estatística na psicologia e na educação [online]. Rio de Janeiro: Centro Edelstein de Pesquisas Sociais, 2010, pp. 23-27. ISBN: 978-85-7982- 048-9.

PIMENTEL FILHO, Max Chianca. **Uso de técnicas de otimização baseadas em derivadas como suporte do planejamento operacional de redes de distribuição de energia elétrica.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2005.

FLORES, Luis Ivan Ruiz. Voltage drop?: Concept, causes and effects in an industrial power system. **2015 IEEE Thirty Fifth Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXV)**, p. 1-6, 2015.

GASPERIN, L. V. **Alocação Ótima de Banco de Capacitores em Redes de Distribuição de Energia Elétrica utilizando modelos simplificados**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2008. 5.

GODOI, A. A. **Alocação de Bancos de Capacitores em Redes Primária e Secundária de Energia Elétrica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, 2009. 6, 7, 8, 19.

Gönen, T., (1986). *Electric Power Distribution System Engineering*. McGraw-Hill, 739 p.

GUARNIERI, Massimo. The beginning of electric energy transmission: part one [Historical]. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 7, n. 1, p. 50-52, 2013.

IFSC – Instituto Federal Santa Catarina, **AULA 12 - Circuitos 2 – Engenharia**, 2019. Disponível em: <[https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA\\_12\\_-\\_Circuitos\\_2\\_-\\_Engenharia](https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA_12_-_Circuitos_2_-_Engenharia)>. Acesso em: 20 de abril de 2019.

KERSTING, William H. **Distribution system modeling and analysis**. 3<sup>a</sup>. ed. Las Cruces: CRC press, 2006.

LEBORGNE, Roberto C. **Uma contribuição à caracterização da sensibilidade de processos industriais frente a afundamentos de tensão**. 2003. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.

MARCELLO, Liz Menichetti; DUARTE, Silvio Xavier. **Projeto de um banco de capacitores de potência reativa fixa com filtro notch**. In: IX Simpósio de Iniciação Científica, Didática e de Ações Sociais da FEI, 2019.

MARTINS, Maria Eugénia Graça. Desvio padrão amostral. **Revista de ciência elementar**, v. 1, n. 1, 2013.

MADRUGA, Ederson P. et al. **Otimização de níveis de tensão nas redes de distribuição considerando a alocação de bancos de capacitores e reguladores de tensão**. 2011. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

MEDEIROS, M. F.; PIMENTEL, M. C. Localização Ótima de bancos trifásicos de reguladores de tensão em alimentadores radiais de distribuição. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA-CBA**. 2002.

MEHL, Ewaldo LM. **Qualidade da energia elétrica**, 2004. Disponível em: <<http://www.cricte2004.eletrica.ufpr.br/mehl/posgrad/qualidade-energia.pdf>>. Acesso em: 09 de Abril de 2019.

MOHSIN, Q. K. et al. Optimal placement and capacity of capacitor bank in radial distribution system. **2016 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability, ICEETS 2016**, p. 416–423, 2016.

NETO, A.C; PACHECO, Marco Aurélio C. Alocação Ótima de Banco de Capacitores em Redes de Distribuição Radiais para Minimização das Perdas Elétricas. **REVISTA DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL APLICADA**, [S. l.], p. 1-10, 6 mar. 2018.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Ampliações e reforços na rede básica - Introdução**. ONS, 2000. Disponível em: [http://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%204%2FSubm%C3%B3dulo%204.1%2FSubm%C3%B3dulo%204.1\\_Rev\\_0.1.pdf](http://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%204%2FSubm%C3%B3dulo%204.1%2FSubm%C3%B3dulo%204.1_Rev_0.1.pdf). Acesso em: 30/07/2021.

PEREIRA JR, B. R. **Alocação otimizada de bancos de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica através de metaheurísticas multiobjetivo**. 2009. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

PETINELLI, Airton Egydio. **EXCELLENT ALLOCATION OF CAPACITORS IN SYSTEMS OF RADIAL DISTRIBUTION, USING EVOLUTION STRATEGIES**. 2002. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Maranhão, São Luis, 2002.

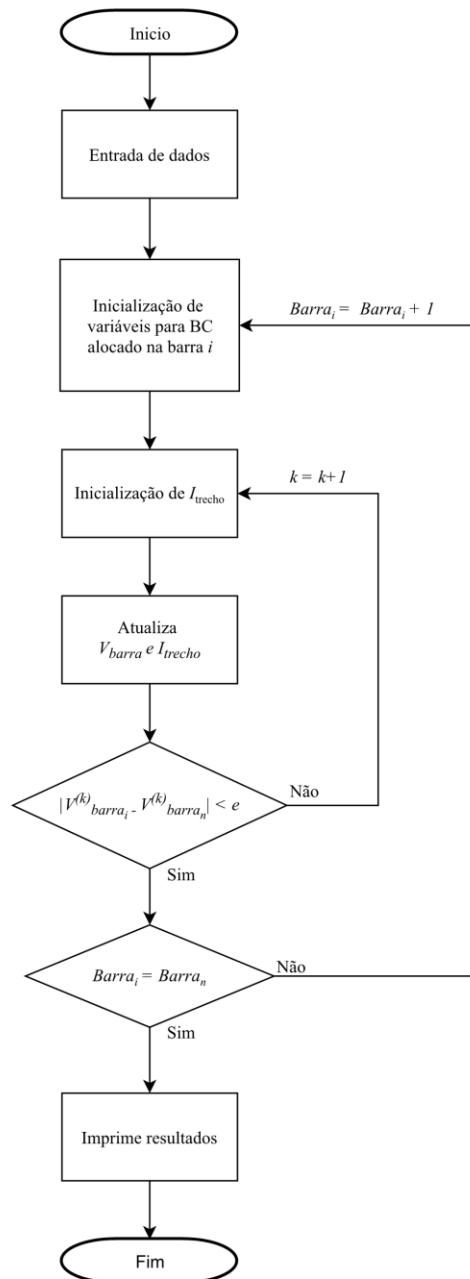
PONTES, Bruno do Carmo. **Simulação Estática e Dinâmica do Controle de Tensão por LTC e Compensador Estático**. 2008. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. **Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica**. Resolução Normativa nº 794/2017, de 1 de janeiro de 2018. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em 14 de abril de 2019.

PUERTAS, Hilton; NOGUEIRA, Carlos A. M.. Sistemas de distribuição de energia elétrica. **Revista do Serviço Público**, v.114, n. especial, p. 49-53, 1986.

ZANETTA JR, Luiz Cera. **Fundamentos de sistemas elétricos de potência**. 1<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006.

## APÊNDICE A – MÉTODO DE SOMA DE CORRENTES





## APÊNDICE B – MÉTODO DO GRADIENTE

