

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**CAROLINE BORDIGNON**

**REGULAÇÃO DOS NÍVEIS DE TENSÃO EM MICRO APROVEITAMENTO  
HIDRELÉTRICO SÍNCRONO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

PATO BRANCO

2017

CAROLINE BORDIGNON

**REGULAÇÃO DOS NÍVEIS DE TENSÃO EM MICRO  
APROVEITAMENTO HIDRELÉTRICO SÍNCRONO**

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

Orientador: Prof. Me. César Augusto Portolann

PATO BRANCO

2017

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado “**Regulação dos níveis de tensão em micro aproveitamento hidrelétrico síncrono**”, da aluna “**Caroline Bordignon**” foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N°163 de 2017.

Fizeram parte da banca os professores:

**Prof. Me. César Augusto Portolann**

**Prof. Dr. Edwin Choque Philco**

**Prof. Andrei Bordignon**

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

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por ter me dado força e foco para concluir esse trabalho.

A minha família, pelo incentivo e apoio nos momentos difíceis.

Ao meu orientador César Augusto Portolann, pelo suporte técnico e pela orientação para desenvolver o trabalho.

Aos professores da banca pelas sugestões importantes.

Aos amigos, que sempre me incentivaram durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus colegas de Engenharia Elétrica, por estarem sempre dispostos a fornecer apoio técnico e incentivo para conclusão deste trabalho.

## EPÍGRAFE

“Whatever you do will be insignificant, but it is very important that you do it.” (GANDHI, Mahatma).

“Tudo o que você faz será insignificante, mas é muito importante que você faça isso ” (GANDHI, Mahatma).

## RESUMO

BORDIGNON, Caroline. Regulação dos níveis de tensão em micro aproveitamento hidrelétrico síncrono. 2017. 82p. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

A utilização de recursos hídricos para a micro e mini geração hidrelétrica faz parte do futuro energético brasileiro. Isso porque, próximo aos grandes centros de carga, as bacias hidrográficas já estão saturadas de grandes empreendimentos. Os mini e micro empreendimentos estão recebendo cada vez mais incentivo, tanto financeiro, quanto regulatório. Juntamente com esses incentivos, vem a necessidade de exigência por parte dos reguladores do sistema elétrico para que se mantenha a qualidade na energia elétrica. Dentre os índices que determinam a qualidade de energia elétrica estão os níveis de tensão adequados. Sendo assim, esta pesquisa apresenta o equacionamento de queda de tensão, além de analisar os parâmetros que influenciam na queda. Além disso, determina alguns métodos de regulação de tensão, para evitar que os níveis de tensão que chegam até os consumidores não estejam adequados as exigências dos órgão reguladores brasileiros. Estudos de caso serão aplicados para validar algumas das técnicas de regulação de tensão, pode-se observar ao fim do trabalho um quadro comparativo entre os níveis de tensão e corrente antes e depois de aplicados os métodos de regulação. Além de realizar uma comparação dos efeitos regulatórios nos dois diferentes estudos de caso.

**Palavras-chave:** Qualidade de energia, queda de tensão, regulação.

## ABSTRACT

BORDIGNON, Caroline. Voltage regulation in synchronous hydroelectric micro-use. 2017. 82p. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

The use of water for micro and mini hydroelectric generation is a part of Brazilian energy future. This because, near of large load center, the hydrographic basins are already saturated with major enterprises. The mini and micro enterprises are receiving more and more incentive, both financial and regulatory. Along with these incentives, comes the demand of maintain the quality of electric power by the regulators of the electric system. Among the indices that determine the quality of electricity are the appropriate voltage levels. Therefore, this research presents the equation of voltage drop, besides analyzing the parameters that has influence in this fall. Further that, it determines some methods of voltage regulation, to avoid that the voltage level that reach the consumers are not adequate to the demands of Brazilian regulations agencies. Case studies are applied to validate some of the voltage regulation techniques, we can observe the end of the work a comparative table between the voltage and current levels before and after the control methods. In addition to making a comparison of the regulatory effects in the two different case studies.

**Keywords:** Power quality, voltage drop, regulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do Sistema Elétrico de Potência.....	14
Figura 2 - Esquema elétrica da máquina síncrona.....	24
Figura 3 - Diagrama fasorial para fator de potência (a) unitário (b) indutivo (c) capacitivo.....	26
Figura 4 - Representação do trecho trifásico simétrico com carga equilibrada.....	30
Figura 5 - Circuito $\pi$ .....	31
Figura 6 - Sistema de excitação.....	34
Figura 7 - Sistemas de Excitação (a) CC (b) CA.....	35
Figura 8 - Excitatriz estática.....	37
Figura 9 - Ponte retificadora monofásica.....	38
Figura 10 - Comportamento de tensão e corrente da onda retificada.....	38
Figura 11 - Regulador Automático de Tensão.....	39
Figura 12 - Diagrama fasorial de um circuito em linha de distribuição com capacitor.....	41
Figura 13 - Diagrama unifilar de um circuito em linha de distribuição com capacitor.....	41
Figura 14 - Sistema monofásico com dois condutores.....	44
Figura 15 - Sistema monofásico a três condutores.....	45
Figura 16 - Sistemas trifásicos a três condutores em $\Delta$ e Y.....	45
Figura 17 - Exemplo de queda de tensão em instalação de baixa tensão.....	49
Figura 18 - Modelo de curva de carga.....	51
Figura 19 - Imagem da propriedade e ponto da micro central hidrelétrica.....	53
Figura 20 - Curva de carga com $F_c = 0,32$ .....	56
Figura 21 - Curva de carga com $F_c = 0,42$ .....	57

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação dos resultados do estudo de caso. ....	63
--	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de geração hidrelétrica a partir de potência instalada. ....	15
Tabela 2 - Níveis de tensão em sistemas de baixa tensão. ....	21
Tabela 3 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1kV (220/127). .....	21
Tabela 4 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1kV (380/220). .....	21
Tabela 5 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1kV (254/127). .....	22
Tabela 6 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1kV (440/220). .....	22
Tabela 7 - Métodos de referência.....	46
Tabela 8 - Capacidade de condução de corrente com isolamento PVC. ....	69
Tabela 9 - Capacidade de condução de corrente com isolamento EPR ou XLPE. ....	70
Tabela 10 - Capacidade de condução de corrente com isolamento PVC. ....	71
Tabela 11 - Continuação Tabela 10. ....	72
Tabela 12 - Critério de condução de corrente com isolamento EPR ou XLPE.....	72
Tabela 13 - Continuação Tabela 12. ....	73
Tabela 14 - Coeficientes para cálculo da queda de tensão.....	74

## LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AVR	Regulador Automático de Tensão
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
FP	Fator de Potência
NBR	Norma Brasileira
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PI	Controle Proporcional Integral
PID	Controle Proporcional Integral Derivativo
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PSS	Estabilizador de Sistema de Potência
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TA	Tensão de Atendimento
TL	Tensão de Leitura

## LISTA DE SÍMBOLOS

$S$	Potência aparente
$\varphi$	Ângulo da potência aparente
$P$	Potência ativa
$Q$	Potência reativa
$V_\varphi$	Tensão nos terminais do gerador por fase
$E_A$	Tensão gerada por fase
$I_A$	Corrente de armadura
$Z$	Impedância
$R_A$	Resistência das bobinas do estator
$X$	Reatância
$X_{RA}$	Indutância de armadura
$X_A$	Autoindutância das bobinas do estator
$I_A * R_A$	Queda de tensão no enrolamento de armadura
$I_A(jX_A)$	Queda de tensão na reatância do enrolamento de armadura
$I_A(jX_{RA})$	Efeito da reação de armadura
$X_S$	Soma das reatâncias de armadura
$\bar{y}_e, \bar{y}_s$	Admitâncias do circuito $\pi$
$Z_{série}$	Impedância série
$C_{fT}$	Capacidade entre os cabos fase e terra
$C_{ff}$	Capacidade entre os cabos fase e fase
$r$	Resistência do cabo
$x$	Reatância do cabo
$\bar{y}$	Admitância série de sequência direta
$\dot{V}_e$	Tensão de alimentação do circuito
$\dot{V}_S$	Tensão de saída do circuito
$i_S$	Corrente de saída do circuito
$i_e$	Corrente de entrada do circuito
$\bar{y}_{eq}$	Admitância equivalente
$\varphi$	Ângulo do fator de potência das cargas
$ V_e $	Módulo da tensão de entrada
$ V_s $	Módulo da tensão de saída

$V_m$	Tensão máxima
$V_{ff}$	Tensão entre fase e fase
$V_{o(avg)}$	Tensão média de saída da ponte retificadora
$T$	Período da onda
$\omega t$	Tempo de duração de um ciclo de retificação
$\alpha$	Ângulo de disparo dos tiristores
$R$	Resistência na carga da saída da ponte tiristora
$I_{o(avg)}$	Corrente na carga da saída da ponte tiristora
$\beta$	Ângulo de disparo para cargas indutivas
$N_C$	Número de condutores na fase 0°
$f$	Frequência da onda de alimentação
$\phi$	Fluxo do campo magnético
$r$	Raio do rotor
$l$	Comprimento do rotor
$B$	Densidade do campo magnético
$N$	Número de espiras
$I_f$	Corrente de campo
$\mu_0$	Índice da permeabilidade do vácuo
$\Delta V_C$	Queda de tensão máxima admitida
$I_R$	Corrente devido a potência ativa
$V_R$	Tensão na barra regulada
$V_S$	Tensão na fonte
$I_C$	Corrente no banco de capacitores
$I_X$	Corrente no banco de capacitores
$I$	Corrente no circuito
$R$	Resistência da linha de distribuição
$X$	Reatância da linha de distribuição
$I_X$	Corrente devido a potência reativa
$\varphi$	Ângulo entre a tensão e a corrente na carga
$Q_{banco}$	Potência reativa do banco de capacitores
$Q_{inicial}$	Potência reativa para fator de potência inicial
$Q_{novo}$	Potência reativa para fator de potência desejado
$C$	Valor da capacitância

$I_C$	Corrente na carga
$D_C$	Demanda de carga
$\cos\varphi$	Fator de potência da carga
$S_C$	Seção nominal mínima dos condutores
$\rho$	Resistividade do material condutor
$L_C$	Comprimento do circuito
D	Demanda
$\Delta t$	Período de tempo
$f_{carga}$	Fator de carga
$D_{média}$	Demanda média
$D_{máx}$	Demanda máxima
$\Delta V$	Variação de tensão

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	10
1.1	Objetivo Geral.....	11
1.2	Objetivos específicos.....	11
1.3	Estrutura do trabalho .....	12
2.	SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA.....	13
2.1	Introdução.....	13
2.2	O SISTEMA DE GERAÇÃO .....	14
2.2.1	Usinas hidrelétricas .....	15
2.2.2	Pequenas centrais hidrelétricas .....	16
2.2.3	Centrais hidrelétricas.....	16
2.3	O sistema de transmissão .....	17
2.4	o sistema de distribuição .....	18
2.4.1	Sistema de distribuição primário .....	18
2.4.2	Sistema de distribuição secundário .....	19
2.5	QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA.....	19
3.	DETERMINAÇÃO da QUEDA DE TENSÃO .....	22
3.1	Introdução.....	22
3.2	FUNCIONAMENTO BÁSICO DO GERADOR SÍNCRONO.....	23
3.2.1	Queda de tensão em um gerador síncrono.....	23
3.2.1.1	Cargas com fator de potência unitário.....	26
3.2.1.2	Cargas com fator de potência indutivo.....	27
3.2.1.3	Cargas com fator de potência capacitivo.....	28
3.3	CÁLCULO DA QUEDA DE TENSÃO EM TRECHOS DE REDE.....	29
3.3.1	Determinação das características do trecho.....	29
3.3.2	Equacionamento do modelo $\pi$ .....	30
4	métodos de regulação de tensão.....	34

4.1	Introdução.....	34
4.2	controle da excitatriz .....	34
4.2.1	Excitatriz.....	35
4.2.1.1	Excitatriz CC.....	36
4.2.1.2	Excitatriz CA .....	36
4.2.1.3	Excitatriz estática utilizando tiristores.....	37
4.2.2	Regulador Automático de Tensão .....	39
4.3	Banco de capacitores .....	40
4.3.1	Capacitor em paralelo .....	41
4.4	dimensionamento de condutores .....	43
4.4.1	Sistema de condutores.....	44
4.4.1.1	Sistema monofásico com dois condutores .....	44
4.4.1.2	Sistema monofásico a três condutores.....	44
4.4.1.3	Sistema trifásico a três condutores .....	45
4.4.2	Métodos de referência.....	46
4.4.2.1	Tipos de condutores .....	46
4.4.3	Critério da capacidade de condução de corrente .....	47
4.4.4	Critério da queda de tensão .....	48
4.5	ajustes de carga .....	50
4.5.1	Curva de carga.....	50
4.5.2	Fator de carga .....	51
5.	estudo de caso .....	53
4.2	Introdução.....	53
4.3	caso 01 .....	53
5.2.1	Determinação da seção do condutor mais adequada .....	54
4.3.1.1	Método de referência.....	54
4.3.1.2	Critério da capacidade de condução de corrente .....	54

4.3.1.3 Critério da queda de tensão .....	55
4.3.2 Cálculo da queda de tensão .....	55
4.3.3 Métodos de regulação .....	56
4.3.3.1 Otimização do fator de carga.....	56
4.3.3.2 Correção do Fator de Potência.....	57
5.3 Caso 02 .....	58
5.3.1 Determinação da seção do condutor mais adequada .....	58
5.3.1.1 Método de referência.....	59
5.3.1.2 Critério de capacidade de condução de corrente .....	59
5.3.1.3 Critério da queda de tensão .....	59
5.3.2 Cálculo da queda de tensão.....	60
5.3.3 Método de regulação.....	60
6. Conclusões.....	62
REFERÊNCIAS .....	65
ANEXOS .....	69

## 1 INTRODUÇÃO

A geração distribuída, que é definida por ser uma fonte geradora de energia próxima das cargas, é um conceito de geração de energia elétrica que tem crescido cada vez mais no país nos últimos anos, isso porque a geração próxima das cargas diminui a necessidade de investimentos na transmissão. Esse conceito já era muito utilizado no início do século XX pelas indústrias, porém, a partir da década de 40 o custo da geração em grandes usinas tornou-se mais atrativo, diminuindo os investimentos na geração distribuída (INEE- Instituto Nacional de Eficiência Energética, 2017).

Ações de estímulo à geração distribuída estão sendo lançadas. Em 2015 foi lançado o ProDG, que contou com cerca de R\$100 bilhões em investimentos na área. Com os estímulos à geração distribuída, a ANEEL já registra 7.610 conexões de até janeiro de 2017. Dessas conexões, 5.997 são conexões residenciais e 1.186 são conexões comerciais. Esse tipo de geração busca a utilização de fontes renováveis de energia, dentre as formas de geração de energia mais utilizada está a geração fotovoltaica (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2017).

Porém, uma outra forma de gerar a própria energia de forma sustentável é através das micro e mini centrais hidrelétricas. As centrais geradoras de pequeno porte apresentam vantagens com relação a geração hidrelétrica tradicional, isso porque, ao contrário das grandes usinas, as pequenas centrais geram energia a fio d'água, não necessitando de reservatório, ou seja, não interferem no curso de rios para gerar energia. Além disso, a geração de energia a partir das pequenas centrais hidrelétricas otimiza a utilização do potencial hídrico brasileiro, já que as bacias próximas aos grandes centros de carga encontram-se saturadas dos grandes empreendimentos, porém, com muito potencial para pequenos centros de geração (GUITARRA, 2012)

Para incentivar ainda mais a utilização da geração distribuída, em 2015 a ANEEL publicou a Resolução Normativa nº687/2015, que determina que o excedente de geração distribuída pode ser fornecido a concessionária de energia, compensando o usuário nas faturas de energia posteriores. Essa forma de compensação de energia trouxe, além das vantagens, algumas determinações de qualidade de energia par os usuários da geração distribuída (ANEEL, 2015).

Diversos fatores são determinantes no momento de classificar a energia elétrica como adequada para utilização dos consumidores, níveis de tensão e fator de potência adequado são dois desses fatores. Para regulamentar esses níveis, a ANEEL publicou em 2008 a primeira versão do PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Esse documento é composto por 11 módulos, no qual o módulo 8 determina os índices para a garantia de qualidade da energia elétrica (ANEEL, 2016).

A principal necessidade de determinar e fiscalizar os níveis de tensão adequados é para a proteção do consumidor e de seus equipamentos elétricos. Isso porque os equipamentos elétricos são projetados para trabalhar em determinados níveis de tensão, que quando não são atendidos, podem danificar ou até mesmo queimar aparelhos (FELBER, 2010).

Com o intuito de corrigir os níveis de tensão para os adequados, já que, por diversos fatores, existem quedas de tensão na rede, foram estudados e criados diversos métodos para a regulação de tensão na rede. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é levantar possibilidades para a regulação de tensão. Além de aplicar alguns destes métodos para micro centrais hidrelétricas.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é avaliar os fatores que influenciam na queda de tensão em um micro aproveitamento hidrelétrico síncrono, definindo assim, métodos para regular os níveis de tensão, desde a saída do gerador síncrono até os terminais da carga.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estabelecer uma expressão matemática que demonstre a relação da tensão na carga com parâmetros, tais como tensão na saída do gerador, impedância de rede, carregamento, fator de potência da carga e injeção de reativos;

- Discutir os parâmetros identificados no item anterior, com o intuito de mostrar a influência na tensão da carga em micro aproveitamentos hidráulicos;
- Avaliar e especificar medidas para regular a tensão para níveis definidos de acordo com o item 3.2.1 da seção 3.2 do módulo 3 do PRODIST determinado pela ANEEL, com base nas causas da queda de tensão identificadas e discutidas nos itens anteriores.
- Realizar um estudo de caso aplicando uma ou mais formas de regulação de tensão, para uma micro central hidrelétrica. Esse estudo de caso será realizado através de simulações.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado com o propósito de embasar os estudos e facilitar o entendimento dos conceitos que se fazem necessários, assim a sequência encontra-se disposta da forma seguinte.

No capítulo 2 são apresentados fundamentos e estruturas básicas do sistema de potência, assim a como a importância e necessidade de manter índices de qualidade de energia elétrica.

No capítulo 3 o objetivo é fazer o levantamento da equação de queda de tensão, além de analisar a influência de alguns parâmetros na queda de tensão.

No capítulo 4 são demonstrados alguns métodos de regulação de tensão, dentre os métodos, encontram-se possibilidades de regulação preventiva ou corretiva.

No capítulo 5 aplicam-se dois estudos de caso em cima de dados de possíveis micro centrais hidrelétricas, levantando possibilidades de regulação de tensão para cada caso.

## 2. SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

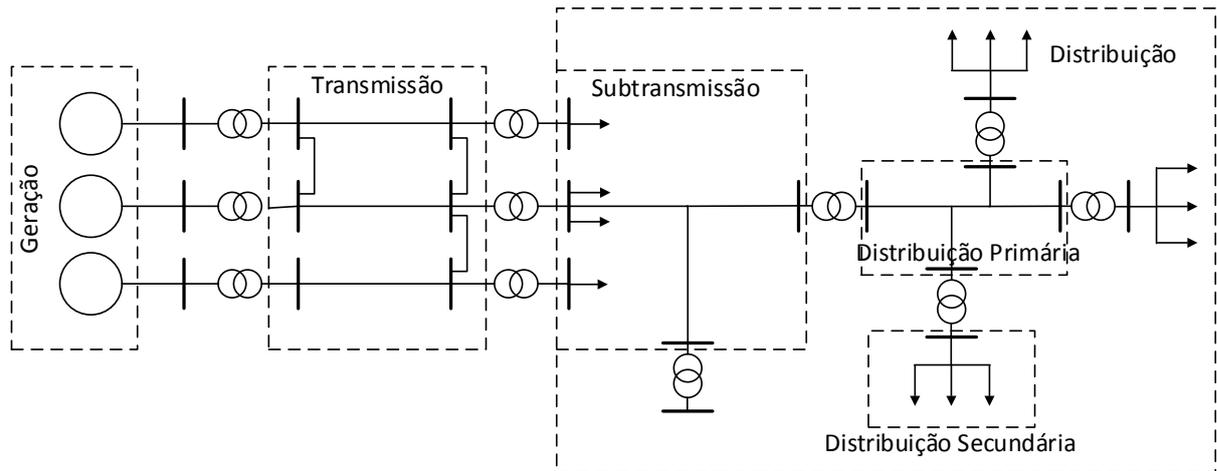
### 2.1 INTRODUÇÃO

Para que a energia elétrica chegue até seus consumidores, é necessário percorrer diversas etapas, desde a sua geração até a chegada aos consumidores. O caminho percorrido pela energia elétrica é caracterizado pelo SEP- Sistema Elétrico de Potência.

Os sistemas elétricos de potência têm como função fornecer energia de qualidade para seus usuários, esse fornecimento deve acontecer da forma mais econômica possível, mantendo padrões pré-definidos de qualidade (SOUZA, *et al.*, 2016).

A geração da energia elétrica, que é dada através da conversão de outro tipo de energia (mecânica e térmica) em elétrica, é o início do sistema elétrico. Após a geração é necessário que a energia chegue até seus consumidores finais, para isso necessitam-se linhas que façam a interligação dos pontos de geração até os pontos de grande demanda de energia elétrica. Em geral, devido a distância entre as unidades geradoras e os centros de carga consumidores, a energia passa pelo sistema de transmissão. Esse sistema faz o transporte de energia elétrica com elevados níveis de tensão. Porém, quando chega até os grandes centros de consumo, a energia demandada percorre curtos caminhos, chegando a diversos pontos de carga com potência relativamente baixa, além de níveis de tensão adequados as necessidades dos consumidores. Para realizar essa distribuição da energia entre pontos relativamente próximos tem-se o sistema de distribuição (KAGAN; DE OLIVEIRA; ROBBA, 2010)

A Figura 1 ilustra o diagrama elétrico do sistema elétrico de potência, desde a geração até os pontos de chegada ao consumidor.



**Figura 1 - Representação do Sistema Elétrico de Potência.**  
 Fonte: Adaptado de (KAGAN; DE OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

## 2.2 O SISTEMA DE GERAÇÃO

Como já foi citado anteriormente, a eletricidade é obtida através da conversão de outro tipo de energia, como a mecânica e a térmica, em energia elétrica. O processo de transformação de energia, em geral, utiliza de turbinas hidráulicas ou a vapor para a obtenção de energia mecânica ou térmica, depois disso a conversão é realizada utilizando de equipamentos como os geradores síncronos, máquinas elétricas rotativas e alternadores (KAGAN; DE OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

Dentre as fontes de energia mais utilizadas no Brasil estão a hídrica, fóssil, biomassa, eólica e nuclear, respectivamente. Além disso, é importante citar que o Brasil importa cerca de 5.11% da energia consumida no país (ANEEL, 2017).

A matriz energética brasileira no ano de 2017, segundo a ANEEL, tem como base a fonte geradora hidráulica, que é responsável por 61,39% da produção de energia elétrica no Brasil (ANEEL, 2017). A geração através de potenciais hidráulicos consiste no aproveitamento dos desníveis no relevo, que possibilitam a criação de barragens para acumular montantes de água e, com o desnível entre barragem e turbina possibilitar o aproveitamento da energia potencial obtida através da queda da água para gerar energia elétrica (FRANCA, 2001).

Usinas hidrelétricas podem ser classificadas em pequeno, médio e grande porte. Essa classificação é realizada a partir da potência instalada de cada empreendimento, como mostra a Tabela 1 (ANEEL, 2015).

**Tabela 1 - Classificação de geração hidrelétrica a partir de potência instalada.**

<b>Classificação</b>	<b>Potência Instalada</b>
Usina Hidrelétrica	Maior que 30 MW
Pequena Central Hidrelétrica	3 MW – 30 MW
Mini Central Hidrelétrica	75kW - 3 MW
Mini Central Hidrelétrica	Até 75 kW

Fonte: Extraída e adaptada de (ANEEL, 2016).

### 2.2.1 Usinas hidrelétricas

As usinas hidrelétricas, classificadas pela ANEEL como sendo empreendimentos com 30MW ou mais de potência instalada representam no Brasil, em 2017, 61,12% da energia elétrica gerada no país. Além disso, 5,73% dos empreendimentos de energia que se encontram em construção são usinas hidrelétricas (ANEEL, 2017).

A usinas hidrelétricas de grande porte possuem em sua estrutura barragens e reservatórios com capacidade de armazenamento de água para gerar energia durante todo o ano. Além da água ser um recurso abundante, já que 2/3 do globo terrestre é coberto por água. As hidrelétricas também são caracterizadas por serem fontes de energia renováveis, já que, a utilização da água, teoricamente, não causa danos ao meio ambiente (JUNIOR, *et al.*, 2013)

Entretanto, a implantação de usinas hidrelétricas de grande porte provocam impactos ambientais e sociais que devem ser considerados no momento da implantação de um grande empreendimento. O primeiro grande impacto é a mudança demográfica no local de sua implantação, que por sua vez causa alterações na estrutura urbana do local para onde serão alocados os moradores que saíram dos locais de alagamento. O principal impacto ambiental a ser citado são as perdas irreversíveis da fauna e flora características do local, devido a inundação para a formação de reservatórios (BORTOLETO, 2001).

### 2.2.2 Pequenas centrais hidrelétricas

Muito semelhantes as usinas hidrelétricas, as pequenas centrais também têm, em sua estrutura, barragens e reservatórios de água. Porém, ao contrário das usinas, as barragens das pequenas centrais hidrelétricas não comportam o armazenamento da água para ser utilizada em períodos de seca. Isso porque essas barragens têm altura suficiente apenas para realizar o desvio do curso da água, sem possibilidade de armazenamento (FRAGMAQ, 2014).

As pequenas centrais hidrelétricas representam no Brasil, em 2017, 3,23% da potência instalada. As PCHs, que são classificadas pela ANEEL como geradoras de energia elétrica com potência instalada entre 3MW e 30 MW, representam 13,66% dos empreendimentos de energia em construção no país em 2017 (ANEEL, 2017).

Além da classificação por potência instalada, as pequenas centrais hidrelétricas tem nível de reservatório máximo, definido pela resolução normativa nº 673 cd 04 de agosto de 2015, de 13km<sup>2</sup> (ANEEL, 2015).

A principal vantagem das PCH's com relação as grandes usinas é a redução no impacto ambiental, isso ocorre principalmente porque as pequenas centrais não possuem reservatórios tão grandes, com o objetivo de armazenar tanto volume de água (JUNIOR, *et al.*, 2013).

### 2.2.3 Centrais hidrelétricas

As centrais hidrelétricas, caracterizadas por possuírem geração de pequeno porte, são classificadas em mini e micro centrais hidrelétricas. Sendo as micro centrais as unidades geradoras de até 75kW e mini centrais as unidades geradoras de 75kW até 3MW (ANEEL, 2016).

Além da produção da própria energia através de micro e mini geração, os consumidores, à partir da Resolução ANEEL nº 482/2012, que foi modificada pela Resolução ANEEL nº 687/2015, podem fornecer o excedente da energia gerada para as concessionárias de energia de sua localidade, recebendo então o crédito referente a esta energia (COPEL, 2017).

As vantagens da utilização de mini e micro centrais geradoras podem ser observadas na sociedade, no meio ambiente e principalmente no setor elétrico brasileiro. Para o setor elétrico, aponta-se a economia na construção de subestações de transformação, atendimento mais rápido ao crescimento de demanda (já que o tempo para implantação é inferior ao de grandes parques geradores), redução nas perdas por transmissão, aumento da estabilidade do sistema elétrico devido a existência de reservas de energia, além de diversas outras vantagens (BARBOSA; AZEVEDO, 2017).

Com tantas vantagens, o número de empreendimentos de mini e micro geração já é de 616 unidades no Brasil, representando 0,36% da potência instalada. Mas esse número tende a crescer, já se encontram em construção 6 unidades de centrais geradoras de energia, além de 37 empreendimentos que ainda não tiveram sua construção iniciada (ANEEL, 2017).

### 2.3 O SISTEMA DE TRANSMISSÃO

Devido a vasta localização de unidades geradoras no Brasil, é necessário realizar o transporte da energia elétrica até diferentes centros de cargas. Esse transporte de energia elétrica é realizado através de linhas de transmissão. As linhas de transmissão são utilizadas para transmitir energia em alta tensão desde as unidades geradoras, até os centros de carga consumidoras (RANGEL; KIENITZ; BRANDÃO, 2009).

No Brasil, o sistema de transmissão de energia opera de forma interligada, isso porque o país conta com diferentes ciclos hidrológicos em seu território. Desta forma, é possível garantir confiabilidade e intercâmbio entre áreas, ou seja, em determinados meses em que as chuvas são mais presentes em uma região, esta transfere energia para uma região menos chuvosa nesta mesma época, e vice e versa.

Para garantir o fornecimento de energia elétrica constante para os brasileiros, o sistema de transmissão de energia elétrica conta com 77.640 km de linhas que fazem o transporte de energia em 5 regiões do país. Essa energia é transmitida utilizando condutores de energia elétrica, isoladores e torres de sustentação (RANGEL; KIENITZ; BRANDÃO, 2009).

## 2.4 O SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

O sistema de distribuição é a parte do sistema elétrico de potência que fornece infraestrutura para realizar o transporte da energia elétrica da alta tensão até os consumidores. O sistema de distribuição é responsável por entregar energia elétrica para os consumidores nos centros urbanos, subúrbios e até mesmo em lugares remotos (SHORT, 2006).

Tipicamente, as subestações de distribuição são alimentadas por linhas de subtransmissão, em alguns casos, quando não existem linha de subtransmissão, são alimentadas diretamente por linhas de transmissão. Depois disso, as subestações servem à alimentadores primários, podendo ser um ou mais deles (KERSTING, 2007).

O sistema de subtransmissão faz parte do sistema de distribuição, cabe a ele transferir a energia das subestações de subtransmissão até as subestações de distribuição. Usualmente, transmitem a energia em tensões de 138 kV, 69 kV e raramente, em 34,5 kV (KAGAN; DE OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

### 2.4.1 Sistema de distribuição primário

Com tensões típicas de 13,8kV a rede de distribuição primária, ou de média tensão se dá desde as subestações de distribuição até os consumidores primários (indústrias de porte médio, *shopping centers*) ou aos transformadores de distribuição (KAGAN; DE OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

Para ser caracterizado como consumidor primário, o consumidor deve possuir uma potência instalada maior ou igual a 50kW e igual ou menor que 2.500kW. Depois de receber o alimentador primário, os consumidores ou transformador realizará a alteração de nível de tensão através de um transformador abaixador (MAMEDE FILHO, 2012).

#### 2.4.2 Sistema de distribuição secundário

Depois de ter a tensão abaixada nas estações transformadoras, a energia elétrica avança até seus consumidores através do sistema de distribuição secundário. Nesse sistema o consumidor, geralmente residencial ou comercial/ industrial com potência instalada até 50kW, recebe a energia em tensões padrão de 220/127V e 380/220V (KAGAN; DE OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

### 2.5 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Em 1978 o Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica editou a portaria nº 047/78 que regulamentava as condições técnicas e de qualidade do serviço de energia elétrica. Isso porque na década de 70 começaram a surgir preocupações com a qualidade da energia elétrica, tanto por parte do governo quanto por parte dos consumidores (FELBER, 2010).

Parte dessa preocupação se deu pelo avanço das tecnologias e dos equipamentos. Inicialmente, os equipamentos alimentados por energia elétrica eram mais robustos, sendo mais resistentes as variações de energia, o que mudou com os avanços, principalmente, da eletrônica de potência. Os eletrodomésticos, por exemplo, podem ser danificados devido a distúrbios na energia, que podem ser ocasionados na rede elétrica (FARIA, *et al.*, 2014).

Devido a essas preocupações e com a necessidade de órgão responsável pela regulação e fiscalização dos serviços relacionados a energia elétrica, surgiu em 1996 a Agência Nacional de Energia Elétrica- ANEEL (FELBER, 2010).

Como mencionado anteriormente, uma das responsabilidades da ANEEL é a fiscalização dos serviços relacionados a eletricidade. Esse serviço é realizado tendo como base a prevenção, com técnicas baseadas em evidências. O serviço de fiscalização da ANEEL é composto por quatro etapas (ANEEL, 2017):

- Monitoramento: a etapa de monitoramento consiste em analisar os índices de qualidade de serviço, monitorar a evolução de indicadores e

emitir alerta em caso de necessidade, divulgar relatórios de desempenho e apontar assuntos relevantes para a agenda de trabalho de fiscalização;

- Análise: em caso de agentes apontados com má prestação dos serviços de energia, são emitidos relatórios de análise para que os prestadores tomem as providências necessárias para solucionar os problemas que indicam má prestação de serviço. É nesta etapa que os agentes devem traçar planos para a regularização dos serviços;
- Acompanhamento: nesta etapa são acompanhadas as medidas para correção que foram apontadas pelos agentes na etapa de análise;
- Ação fiscalizadora: por fim, no caso de as falhas apontadas não terem sido corrigidas, os agentes são notificados e, se necessário, punidos.

O conceito de qualidade de energia elétrica é muito abrangente, já que, para que a energia elétrica seja entregue de forma adequada e sem interrupções, é necessário o sincronismo e bom funcionamento de diferentes setores. Além do conceito de garantia da qualidade de energia ser dificultado pelos diversos setores que atuam na área, outro fator determinante no momento de garantir qualidade na energia elétrica é o custo, já que, para que exista qualidade, é necessário haver investimentos que, conseqüentemente, são revertidos para o consumidor (WHITE PAPEL INSTITUTO ACENDE BRASUL, 2014).

Por isso, com o intuito de padronizar e normatizar as atividades técnicas relacionadas a energia elétrica, a ANEEL publicou em 2008 a primeira versão do PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. O PRODIST é constituído de 11 módulos que, dentre seus objetivos têm: garantir segurança, eficiência, qualidade e confiabilidade no setor elétrico brasileiro (ANEEL, 2016).

Dentre os 11 módulos do PRODIST, o módulo 8, nomeado Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, é o responsável por definir os modelos de qualidade de produto e qualidade do serviço prestado. No que diz respeito a qualidade do produto, que é de interesse deste trabalho, o PRODIST especifica parâmetros e valores de referência que definem o produto como adequado (ANEEL, 2016).

São considerados aspectos relevantes na qualidade do produto os seguintes itens (ANEEL, 2016):

- tensão em regime permanente;

- fator de potência;
- harmônicos;
- desequilíbrio de tensão;
- flutuação de tensão;
- variações de tensão de curta duração;
- variação de frequência.

No presente trabalho, o objetivo é estudar métodos para regular os níveis de tensão para que estes não ultrapassem os níveis de tensão determinados pela ANEEL. Porém, para que isso seja possível, é necessário primeiramente definir quais são os níveis de tensão padronizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica. O módulo 3 do PRODIST determina que, para a baixa tensão, os níveis de tensão adequados são os apresentados na Tabela 2 (ANEEL, 2016):

**Tabela 2 - Níveis de tensão em sistemas de baixa tensão.**

Sistema	Tensão Nominal (V)
Trifásico	220/127
	380/220
Monofásico	254/127
	440/220

Fonte: Extraída de (ANEEL, 2016).

Depois de definidos os níveis de tensão ideais para a baixa tensão, o módulo 8 do PRODIST faz a determinação das variações de tensão que são consideradas adequadas, precárias ou críticas. As Tabelas 3, 4, 5 e 6 apresentam os limites destas três caracterizações para os níveis de tensão apresentados na Tabela 2 (ANEEL, 2016):

**Tabela 3 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1kV (220/127).**

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (V)
Adequada	$(201 \leq TL < 231) / (116 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(189 \leq TL < 201 \text{ ou } 231 < TL \leq 233) /$ $(109 \leq TL < 116 \text{ ou } 133 < TL \leq 140)$
Crítica	$(TL < 189 \text{ ou } TL > 233) / (TL < 109 \text{ ou } TL > 140)$

Fonte: Extraída de (ANEEL, 2016).

**Tabela 4 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1kV (380/220).**

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (V)
Adequada	$(348 \leq TL \leq 396) / (201 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(327 \leq TL < 348 \text{ ou } 396 < TL \leq 403) /$ $(189 \leq TL < 201 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 327 \text{ ou } TL > 403) / (TL < 189 \text{ ou } TL > 233)$

Fonte: Extraída de (ANEEL, 2016).

**Tabela 5 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1kV (254/127).**

<b>Tensão de Atendimento (TA)</b>	<b>Faixa de Variação da Tensão de Leitura (V)</b>
<b>Adequada</b>	$(232 \leq TL \leq 264) / (116 \leq TL \leq 132)$
<b>Precária</b>	$(220 \leq TL < 232$ ou $264 < TL \leq 269) /$ $(109 \leq TL < 116$ ou $132 < TL \leq 140)$
<b>Crítica</b>	$(TL < 220$ ou $TL > 269) / (TL < 109$ ou $TL > 140)$

Fonte: Extraída de (ANEEL, 2016).

**Tabela 6 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1kV (440/220).**

<b>Tensão de Atendimento (TA)</b>	<b>Faixa de Variação da Tensão de Leitura (V)</b>
<b>Adequada</b>	$(402 \leq TL \leq 458) / (201 \leq TL \leq 229)$
<b>Precária</b>	$(380 \leq TL < 402$ ou $458 < TL \leq 466) /$ $(189 \leq TL < 201$ ou $229 < TL \leq 233)$
<b>Crítica</b>	$(TL < 380$ ou $TL > 466) / (TL < 189$ ou $TL > 233)$

Fonte: Extraída de (ANEEL, 2016).

Depois de definidos os níveis de tensão adequados e os aceitáveis, é necessário que se tenham métodos para manter os níveis de tensão nos limites estabelecidos. O levantamento de alguns métodos para a regulação de tensão é o que será feito nos próximos capítulos.

### 3. DETERMINAÇÃO DA QUEDA DE TENSÃO

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, será realizado o levantamento da equação de queda de tensão. Além disso, será realizada uma análise do comportamento da tensão de saída do gerador, conforme o fator de potência das cargas. A determinação destes fatores é fundamental para determinar métodos de regulação de tensão.

## 3.2 FUNCIONAMENTO BÁSICO DO GERADOR SÍNCRONO

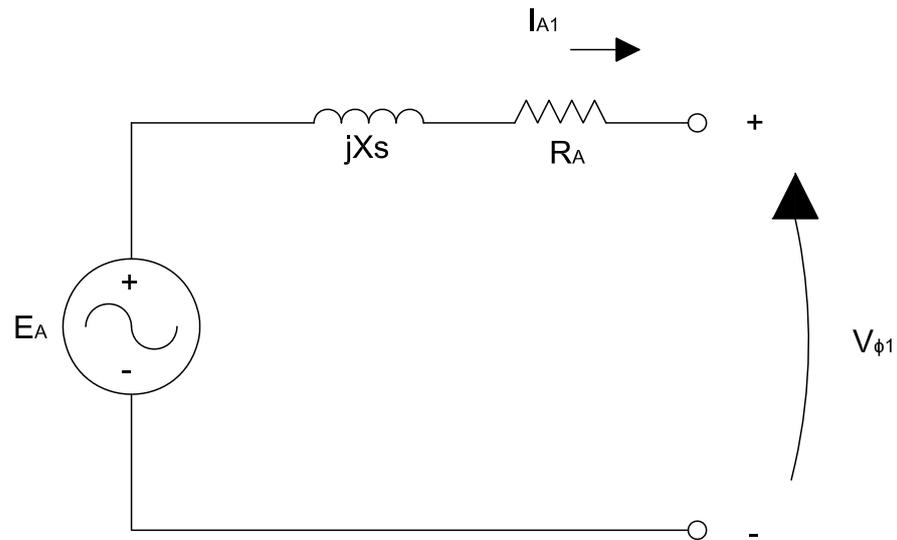
Para que seja possível a análise de métodos reguladores de tensão para geradores síncronos, é necessário entender o funcionamento básico deste tipo de gerador.

Os geradores síncronos, assim como outras máquinas elétricas, são compostos basicamente por um rotor e um estator. No caso do gerador síncrono, é no estator onde ficam alojados os enrolamentos monofásico ou trifásicos da máquina, esses enrolamentos podem também ser chamados de enrolamento de armadura. É no enrolamento de armadura que será induzida a tensão alternada, que por sua vez gera uma corrente alternada que fluirá através dos terminais do gerador, assim podendo alimentar uma carga conectada a ele. Porém, para o estudo da regulação de tensão, é mais interessante que se entenda o funcionamento do rotor, este, por sua vez, irá funcionar com corrente contínua (FITZGERALD; KINGSLEY; KUSKO, 1975).

O rotor tem a função de induzir a tensão que circula pelo enrolamento de armadura, no estator. Para isso, é necessário que o rotor receba uma alimentação em corrente contínua, que irá ocorrer nos enrolamentos do rotor, também chamado de enrolamento de campo. Essa alimentação irá ocorrer através de uma segunda máquina acoplada ao rotor, a essa máquina chamamos de excitatriz (CHAPMAN, 2013).

### 3.2.1 Queda de tensão em um gerador síncrono.

Para que seja possível determinar a tensão por fase de uma máquina síncrona, é necessário analisar o circuito elétrico para então, determinar as variáveis que influenciam na tensão final de saída. A Figura 2 apresenta o esquema elétrico da máquina síncrona



**Figura 2 - Esquema elétrica da máquina síncrona.**  
**Fonte: Extraído e adaptado de (CHAPMAN, 2013).**

Para determinar o circuito equivalente da máquina síncrona é necessário considerar dois efeitos, que causam perdas na máquina. O primeiro é o efeito da reação de armadura. No enrolamento de armadura é induzido um campo magnético, que gera a tensão de armadura, ou seja, a tensão “de entrada” da máquina, que é dada por ( $E_A$ ). Se existe uma carga conectada ao terminais da máquina, essa carga gera um campo magnético atrasado com relação ao campo magnético gerado pelo rotor. A tensão induzida por esse campo atrasado é proporcional a corrente, atrasada em  $90^\circ$ . Desta forma, pode-se aproximar os efeitos por uma reatância indutiva ( $X_{RA}$ ). Considerando o enrolamento de armadura, a tensão de saída da máquina ( $V_\phi$ ) é dada por (FITZGERALD; KINGSLEY; KUSKO, 1975):

$$V_\phi = E_A - j(I_A * X_{RA})$$

(01)

Além do enrolamento de armadura da máquina síncrona, é necessário considerar a autoindutância ( $X_A$ ) e resistência ( $R_A$ ) das bobinas do estator, que com a passagem da corrente também causam uma queda de tensão. Sendo assim, o valor da tensão de saída da máquina síncrona é dado por:

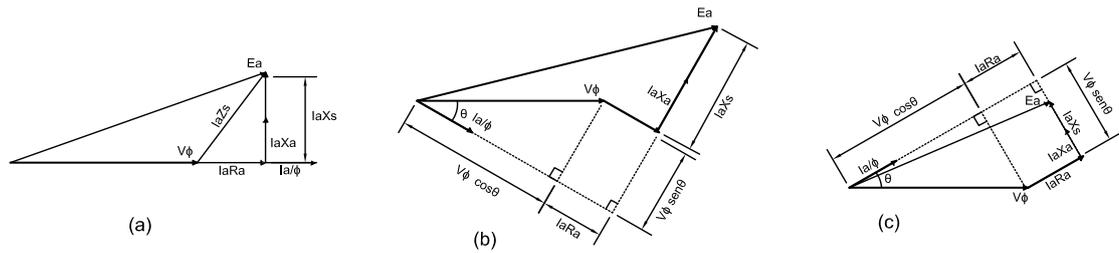
$$V_{\phi} = E_A - I_A * R_A - I_A(jX_A) - I_A(jX) \quad (02)$$

Quando há variação de carga no gerador síncrono, a tensão de saída nos terminais do gerador tende a variar, isso ocorre pois há uma mudança na queda de tensão do enrolamento de armadura, causada pela variação na corrente de carga. Analisando a equação 1 nota-se que a corrente de carga está associada tanto a resistência quanto a reatância do enrolamento de armadura.

A queda de tensão causada pela resistência de armadura,  $I_A * R_A$ , depende somente da quantidade da variação de carga, já a queda relacionada a reatância do enrolamento de armadura,  $I_A(jX_A)$ , depende também do fator de potência do circuito. Sendo assim, a tensão nos terminais do gerador C.A. é dependente tanto da corrente de carga quanto do fator de potência.

Como existe variação na queda de tensão dependendo do fator de potência do circuito, é necessário analisar qual será o efeito causado por cada fator de potência da carga na tensão nos terminais do gerador.

A Figura 3 apresenta as diferentes quedas de tensão, que representa a diferença entre a tensão gerada e a tensão que aparece nos terminais, para cada fator de potência das cargas. A partir da interpretação da figura é possível observar o comportamento da queda de tensão.



**Figura 3 - Diagrama fasorial para fator de potência (a) unitário (b) indutivo (c) capacitivo.**

**Fonte: Adaptado de (CHAPMAN).**

A Figura 3 apresenta as diferentes quedas de tensão, que representa a diferença entre a tensão gerada e a tensão que aparece nos terminais, para cada fator de potência das cargas. A partir da interpretação da figura é possível observar o comportamento da queda de tensão (CHAPMAN, 2013).

### 3.2.1.1 Cargas com fator de potência unitário.

Analisando a figura 3(a) que representa o fator de potência unitário, observamos que a corrente de fase de armadura ( $I_A$ ) está em fase com a tensão nos terminais, por fase ( $V_F$ ). A queda de tensão na resistência de armadura ( $I_A * R_A$ ) também está em fase com a corrente de armadura, enquanto a queda de tensão indutiva, causada devido a reatância de armadura ( $I_A * X_A$ ) encontra-se adiantada em  $90^\circ$ . A queda de tensão devido à reação de armadura ( $I_A * X_{RA}$ ) encontra-se também adiantado em  $90^\circ$  da corrente que de armadura que a produziu, portanto, está em

fase com a queda de tensão indutiva. A partir da análise destes parâmetros é possível reescrever a equação básica do gerador. A Equação 3 representa a equação para fator de potência das cargas igual a 1, na forma complexa:

$$E_A = (V_\phi + I_A * R_A) + j(I_A * X_A + I_A * X_{RA}) \quad (03)$$

Somando as reatâncias de armadura e de reação de armadura, tem-se:

$$E_A = (V_\phi + I_A * R_A) + j(X_S * I_A) \quad (04)$$

Isolando o valor da tensão de saída, tem-se:

$$V_\phi = E_A - I_A * R_A - j(X_S * I_A) \quad (05)$$

Sendo assim, o valor final da tensão de saída do gerador, para uma carga de fator de potência unitário, é determinado pela tensão induzida no enrolamento de armadura, menos as perdas por reação de armadura e pela indutância e a reatância nos enrolamentos de armadura.

### 3.2.1.2 Cargas com fator de potência indutivo.

Para um fator de potência indutivo, a corrente de armadura ( $I_A$ ) está atrasada, com um ângulo de  $\theta^\circ$  em relação a tensão nos terminais ( $V_\phi$ ), isso é resultado de uma carga externa indutiva ligada aos terminais do gerador síncrono. A figura 3(b) representa o diagrama fasorial das tensões. Analisando o diagrama nota-se que a queda de tensão causada pela resistência de armadura ( $R_A$ ) encontra-se em fase com a corrente. Já as quedas de tensão em quadratura, que são provenientes da reatância e da reação de armadura, estão adiantadas em  $90^\circ$  da corrente de armadura. A equação 6 representa o valor da tensão gerada por fase ( $E_A$ ) e função de suas componentes horizontal e vertical.

$$E_A = (V_\emptyset \cos \theta + I_A * R_A) + j(V_\emptyset \sin \theta + I_A * X_S) \quad (06)$$

Com base na análise da equação 2 e 3 e nos diagramas fasoriais da figura 1, nota-se que, para que se possa obter a mesma tensão nominal nos terminais ( $V_\emptyset$ ) por fase, faz-se necessário uma tensão induzida por fase ( $E_A$ ), maior para um fator de potência indutivo, que para um fator de potência unitário.

### 3.2.1.3 Cargas com fator de potência capacitivo.

O diagrama fasorial para cargas com fator de potência capacitivo, representado pela figura 3(c) mostra que, quando a corrente de armadura ( $I_A$ ) está adiantada da tensão nos terminais ( $V_\emptyset$ ), com um ângulo de  $\theta^\circ$ , a queda de tensão causada pela resistência de armadura ( $I_A * R_A$ ) encontra-se em fase com a corrente de armadura, enquanto a queda de tensão em quadratura, na reatância síncrona ( $I_A * X_S$ ), está adiantada em  $90^\circ$  em relação a corrente de armadura. A partir destas informações obtém-se a equação 7 para a relação da tensão de saída em geradores síncronos:

$$E_A = (V_\emptyset \cos \theta + I_A * R_A) + j(V_\emptyset \sin \theta - I_A * X_S) \quad (07)$$

Realizando uma análise e comparação da equação 4 com as anteriores, nota-se que, para uma mesma tensão terminal ( $V_\emptyset$ ), é necessário que seja gerada uma tensão menor para cargas com fatores de potência capacitivo do que para cargas com fatores de potência indutivos.

Com base nas equações apresentadas, é possível analisar o comportamento da tensão de saída do gerador conforme a carga alimentada por ele. Além disso, observa-se que o nível da tensão de alimentação é um dos fatores que influenciam na tensão de saída do gerador. Isso é importante pois a tensão de alimentação é uma das formas de regulação de tensão que serão apresentadas posteriormente.

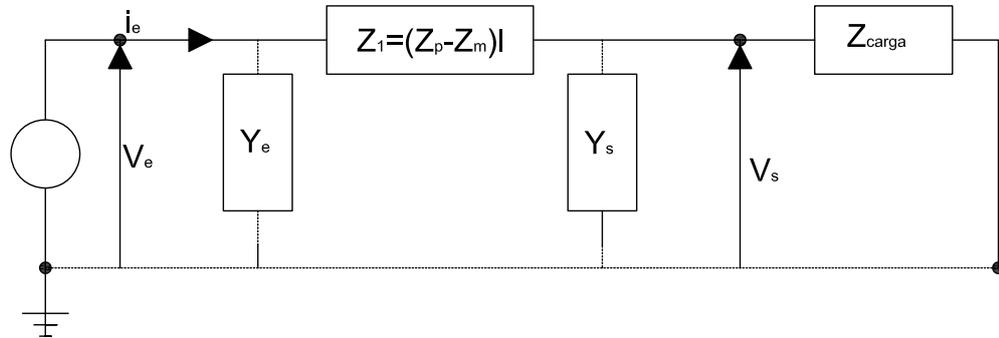
### 3.3 CÁLCULO DA QUEDA DE TENSÃO EM TRECHOS DE REDE

Para determinar um método de cálculo de queda de tensão em um trecho de rede, deve ser estabelecida uma situação para a rede e para as cargas. Sendo possível utilizar três diferentes modelos, um com rede trifásica simétrica e carga trifásica equilibrada. Um com rede trifásica simétrica e carga trifásica desequilibrada, monofásica ou bifásica. Por fim, uma rede trifásica assimétrica, com carga trifásica equilibrada (KAGAN; DE OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

O Comprimento do trecho da linha também é imprescindível para o cálculo da queda de tensão, podendo ser curto ou médio, assim chamado de  $\pi$  nominal, ou longo, sendo assim chamado de  $\pi$  equivalente. Além desses fatores, é necessário determinar, para as cargas equilibradas, qual será o modelo de carga a ser utilizado, podendo ser de potência, corrente ou impedância constante.

#### 3.3.1 Determinação das características do trecho.

Considera-se o trecho de rede representado pela Figura 4, que trata-se de um trecho de rede trifásico simétrico com carga trifásica equilibrada. Para um caso geral, qualquer topologia de rede pode ser modelada por um circuito  $\pi$ , que é caracterizado por conter admitâncias  $\bar{y}_e$  e  $\bar{y}_s$  e impedância série  $\bar{Z}_{série}$  em sua entrada e saída. O trecho de rede representado pela Figura 4 é representado, em componentes simétricas, pelo seu circuito de sequência direta. Esse trecho, posteriormente, será considerado como sendo de linha curta, obtendo-se então, mais algumas simplificações do modelo  $\pi$  (KAGAN; DE OLIVEIRA; ROBBA, 2010):



**Figura 4 - Representação do trecho trifásico simétrico com carga equilibrada.**  
**Fonte: extraída e adaptada de (KAGAN; DE OLIVEIRA; ROBBA, 2010).**

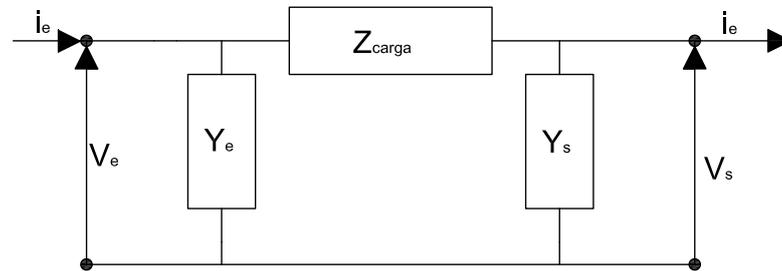
Com base no circuito apresentado na Figura 4, deve-se considerar a impedância série  $\bar{Z}_{série}$  e a admitância série de sequência direta,  $\bar{y}$  como sendo:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{série} &= r + jx = \bar{Z}_{próprio} - \bar{Z}_{mútuo} \\ \bar{y} &= j\omega(C_{fT} + 3C_{ff})\end{aligned}\quad (08)$$

Sendo  $C_{fT}$  a capacidade entre os cabos de fase e terra, e  $C_{ff}$  capacidade entre os cabos de fase,  $r$  a resistência do cabo ( $\Omega$  /km) e  $x$  a reatância do cabo ( $\Omega$  /km).

### 3.3.2 Equacionamento do modelo $\pi$ .

O trecho de rede representado pela Figura 5 representa um circuito equivalente  $\pi$  de um trecho de rede genérico.



**Figura 5 - Circuito  $\pi$ .**

Fonte: Extraída e adaptada de (KAGAN; DE OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

O equacionamento deste circuito é dado por:

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_e &= \dot{V}_s + (\dot{V}_s \bar{y}_s + i_s) \bar{Z}_{série} = (1 + \bar{y}_s \bar{Z}_{série}) \dot{V}_s + \bar{Z}_{série} i_s \\
 i_e &= \dot{V}_e \bar{y}_e + i_s + \dot{V}_s \bar{y}_s = [((1 + \bar{y}_s \bar{Z}_{série}) \dot{V}_s + \bar{Z}_{série} i_s) \bar{y}_e + i_s + \dot{V}_s \bar{y}_s] \quad (09) \\
 i_e &= (\bar{y}_e + \bar{y}_s + \bar{y}_s \bar{y}_e \bar{Z}_{série}) \dot{V}_s + (1 + \bar{y}_e \bar{Z}_{série}) i_s
 \end{aligned}$$

Para o caso de linhas simétricas, pode-se considerar  $\bar{y}_s = \bar{y}_e$ , sendo assim, substitui-se ambos por  $\bar{y}_{eq}$ , resultando então:

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_e &= (1 + \bar{y}_{eq} \bar{Z}_{série}) \dot{V}_s + \bar{Z}_{série} i_s \\
 i_e &= \bar{y}_{eq} (2 + \bar{y}_{eq} \bar{Z}_{série}) \dot{V}_s + (1 + \bar{y}_{eq} \bar{Z}_{série}) i_s \quad (10)
 \end{aligned}$$

Como está sendo considerado para o estudo um modelo de linha curta, as impedâncias shunt são desconsideradas, portanto tem-se:

$$\begin{aligned}\dot{V}_e &= \dot{V}_s + l \bar{Z}_{s\text{éerie}} i_s \\ i_s &= i_e\end{aligned}\quad (11)$$

Sendo  $l$  o comprimento, em km, da linha.

Considera-se também:

$$\begin{aligned}\dot{V}_e &= |\dot{V}_e| \angle \theta \\ \dot{V}_s &= |\dot{V}_s| \angle 0 = V_s \angle 0 \\ i_s &= |i_s| \angle \varphi = i_s \angle \varphi\end{aligned}\quad (12)$$

Sendo  $\varphi < 0$  para cargas indutivas e  $\varphi > 0$  para cargas capacitivas, tem-se a queda de tensão no trecho dada por:

$$\begin{aligned}V_e \cos \theta + j V_e \sin \theta &= V_s + l i_s (\cos \varphi - \sin \varphi)(r + jx) \\ &= V_s + l i_s (r \cos \varphi - x \sin \varphi) + j l i_s (r \sin \varphi + x \cos \varphi) \\ |\dot{V}_e| &= V_e \sqrt{\cos^2 \theta + \sin^2 \theta} \\ &= \sqrt{[V_s + l i_s (r \cos \varphi - x \sin \varphi)]^2 + [l i_s (r \sin \varphi + x \cos \varphi)]^2}\end{aligned}\quad (13)$$

Como

$$\Delta V = |\dot{V}_e| - |\dot{V}_s|$$

Então,

$$\Delta V = \sqrt{[V_s + l i_s (r \cos \varphi - x \sin \varphi)]^2 + [l i_s (r \sin \varphi + x \cos \varphi)]^2} - V_s \quad (14)$$

Nos casos mais utilizados em redes de distribuição, o ângulo de fase entre as tensões de entrada e de saída são praticamente zero, portanto, considera-se  $\theta$  igual a 0. É necessário considerar também que, a parcela da equação  $l i_s (r \sin \varphi +$

$x \cos \varphi$ ) é desprezível quando comparada à  $V_s = li_s(r \cos \varphi - x \sin \varphi)$ . Sendo assim, podemos aproximar a equação da queda de tensão em um trecho de linha por:

$$\Delta V = li_s(r \cos \varphi - x \sin \varphi) \quad (15)$$

O cálculo da queda de tensão através de equação acima pode ser simplificado, essa simplificação é realizada substituindo a parcela da equação  $(r \cos \varphi - x \sin \varphi)$  por um coeficiente equivalente aproximado. Desta forma, multiplica-se o fator, que é estabelecido a partir da seção nominal do cabo e do fator de potência, pela corrente (A) e pela distância do circuito (km). As tabelas dos coeficientes equivalentes podem ser observadas em anexo (VOLTIMUM, 2011).

## 4 MÉTODOS DE REGULAÇÃO DE TENSÃO

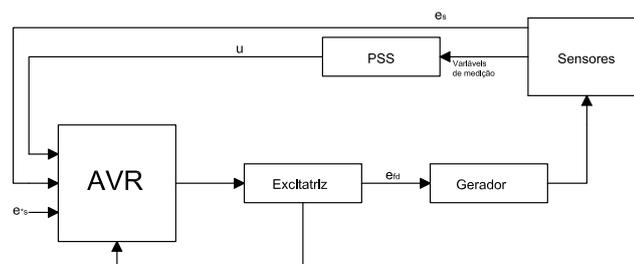
### 4.1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo é apresentar algumas possibilidades de regulação de tensão. Os métodos apresentados a seguir podem ser considerados método de regulação preventiva, como no caso do correto dimensionamento dos cabos, como métodos de regulação corretivos, como os bancos de capacitores.

### 4.2 CONTROLE DA EXCITATRIZ

O sistema de excitação tem como principal função fornecer corrente para o enrolamento de campo do gerador conectado a ele. Além disto, o sistema de excitação também é capaz de exercer funções de controle de tensão de saída do gerador. Esse controle é realizado variando a corrente que alimenta o enrolamento de campo do gerador, de modo que as tensões de saída do gerador fiquem dentro de limites pré-estabelecidos (KUNDUR, 1994).

O sistema de excitação do gerador é formado por várias partes que realizam, entre outras coisas, a medição e controle de tensão. A Figura 6 apresenta um diagrama que representa o sistema de excitação de um gerador síncrono.



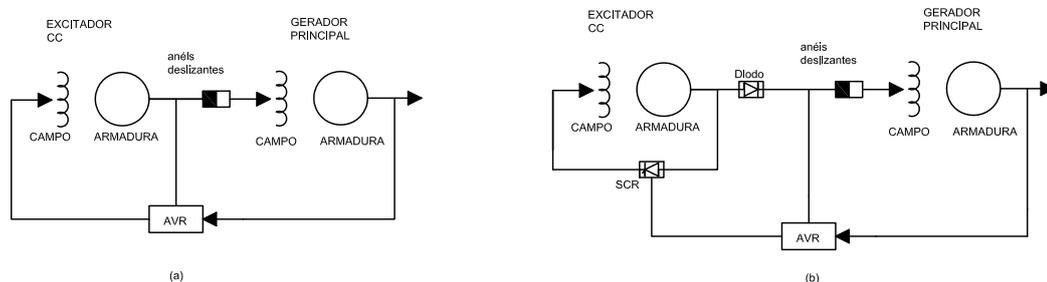
**Figura 6 - Sistema de excitação.**  
 Fonte: Extraída e adaptada de (CAROLINO, 2013).

O sistema de excitação é composto basicamente pela excitatriz, que é responsável por fornecer corrente ao enrolamento de campo do gerador, pelo AVR, que é responsável por fornecer o sinal de controle à excitatriz, o PSS, um estabilizador de sistema de potência que auxilia o AVR, e por sensores, responsáveis pela leitura dos sinais de tensão e corrente na saída do gerador (CAROLINO, 2013).

#### 4.2.1 Excitatriz

A excitatriz é a parcela do sistema de excitação responsável pelo fornecimento de corrente elétrica contínua ao enrolamento de campo do gerador síncrono. Basicamente, a corrente fornecida pela excitatriz interfere na tensão de saída do gerador. Devido a isso, um AVR faz o controle necessário para que a corrente fornecida pela excitatriz para o enrolamento de campo seja suficiente para que o gerador síncrono tenha, em sua saída, a tensão desejada. Essa geração utilizada para fornecer corrente contínua ao gerador síncrono pode se dar através de uma máquina CC, CA ou utilizando tiristores (FERNANDES, 2011).

A Figura 7 apresenta os sistemas de excitação com excitatriz CC e CA.



**Figura 7 - Sistemas de Excitação (a) CC (b) CA.**  
**Fonte: Extraída e adaptada de (FERNANDES, 2011).**

#### 4.2.1.1 Excitatriz CC

Quando se utiliza uma excitatriz CC no sistema de excitação, o regulador de tensão, se necessário, aciona um dispositivo mecânico que controla a resistência de um reostato, buscando regular a tensão na saída do gerador [ARNEIRO SOARES]. Como pode ser observado na Figura 7(a), são necessários anéis deslizantes no rotor do gerador principal, para garantir o funcionamento do sistema de excitação, isso porque, apesar de excitatriz CC ser uma máquina rotativa, a tensão gerada é dada através de escovas estacionárias (GOMES, 2010).

O sistema de excitação com excitatriz CC passou a exibir problemas de funcionamento com o aumento da capacidade dos geradores [ARNEIRO SOARES]. Quando utilizada para excitar geradores de grande porte, os excitadores CC precisam ser utilizados em cascata. Isso porque a máquina CC não consegue entregar uma grande quantidade de potência ao enrolamento de campo da máquina síncrona. Porém, ao utilizar várias máquinas CC em cascata, a constante de tempo desse sistema de excitação aumenta, tornando inviável a utilização de excitatrizes CC para a excitação de geradores síncronos (FERNANDES, 2011).

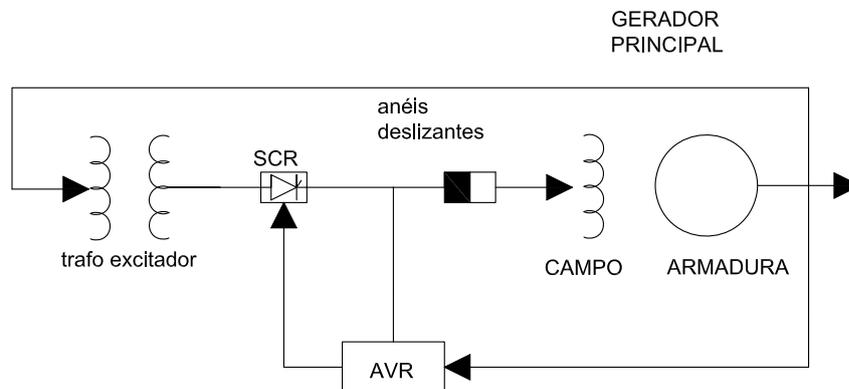
#### 4.2.1.2 Excitatriz CA

Nos sistemas de excitação com excitatriz CA, vistos na Figura 7(b), a máquina CA produz corrente alternada, que, antes de ser fornecido ao enrolamento de campo do gerador síncrono, passa por retificadores de potência, para que a corrente alternada fornecida pela máquina torne-se corrente contínua. Os retificadores de potência utilizados para converter a corrente de alternada para contínua podem ser controlados ou não (SOARES, 2016).

Quando se utiliza retificadores controlados, reguladores de tensão independentes são utilizados para manter os níveis de tensão da saída da excitatriz nos valores desejados (FERNANDES, 2011).

#### 4.2.1.3 Excitatriz estática utilizando tiristores

No sistema de excitação estático, não são utilizados geradores de excitação, o fornecimento de corrente fica a cargo de retificadores estáticos controlados. Neste tipo de excitação, a tensão de campo do gerador depende da tensão de saída do próprio gerador. Isso porque a alimentação dos tiristores é realizada por um transformador que abaixa a tensão do próprio gerador. Depois disso, o AVR comanda os disparos dos tiristores, que alimentam o enrolamento de campo da máquina, para controlar a tensão de saída do gerador. A Figura 8 representa o sistema de excitação com excitatriz estática utilizando tiristores (FERNANDES, 2011).



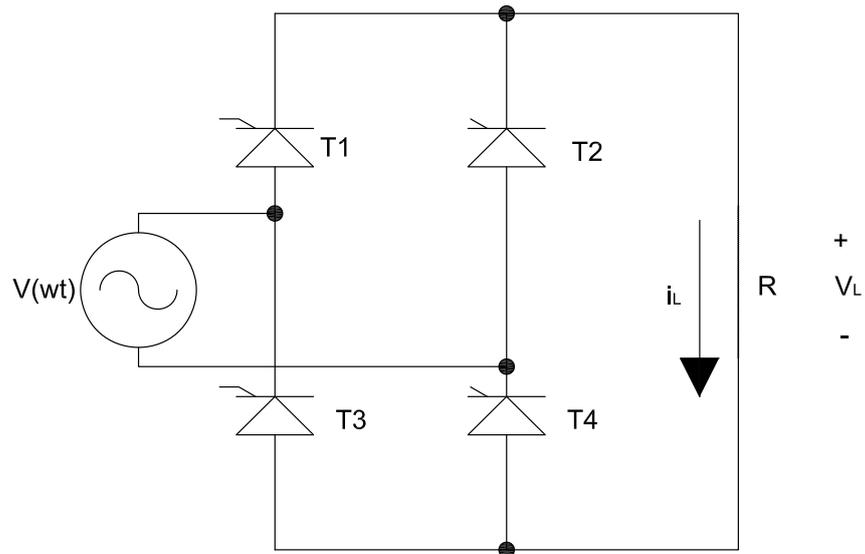
**Figura 8 - Excitatriz estática.**

Fonte: Extraída e adaptada de (FERNANDES, 2011).

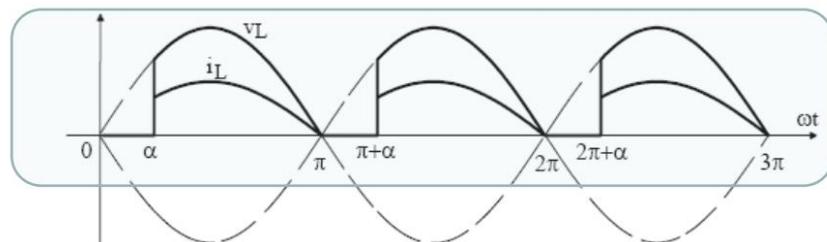
O uso deste tipo de excitatriz diminuiu o tempo de respostas do sistema de excitação, isso porque os únicos elementos que retardam o tempo de resposta são a filtragem do sinal de saída do gerador, e o tempo de disparo dos tiristores. Além disso, com este tipo de excitatriz os conjuntos de geração ficam menores, já que não é mais utilizada uma segunda máquina acoplada ao gerador, para realizar sua excitação (SOARES, 2016).

#### 4.1.2.4 Ponte retificadora monofásica

No retificar monofásico de onda completa, que pode ser visto na Figura 9, cada tiristores é disparado em um semiciclo da onda de alimentação, sendo assim, cada par de tiristores conduz em um intervalo de  $180^\circ$ . O comportamento de tensão e corrente da onda retificada por ser observado na Figura 10 (SIMAS, 2017).



**Figura 9 - Ponte retificadora monofásica.**  
Fonte: Extraída e adaptada de (PETRY, 2013).



**Figura 10 - Comportamento de tensão e corrente da onda retificada.**  
Fonte: Extraída de (PETRY, 2013).

Como visto anteriormente, a excitatriz realiza o controle da tensão de saída do gerador a partir da variação do ângulo de disparo dos tiristores, que conseqüentemente varia a corrente de campo fornecida ao gerador. A relação do ângulo de disparo com a tensão é obtida através da equação 16, assim como a corrente de saída, pela equação 17 (AHMED, 2000).

$$V_{o(avg)} = \frac{V_m}{\pi} [1 + \cos(\alpha)] \quad (16)$$

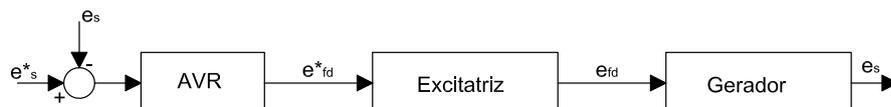
$$I_{o(avg)} = \frac{V_m(1 + \cos \alpha)}{\pi R} \quad (17)$$

#### 4.2.2 Regulador Automático de Tensão

O regulador de tensão é a parte do sistema que realiza o controle da tensão, para que esta seja mantida em valores desejáveis. Antes da existência de reguladores automáticos, o processo era realizado manualmente, ou seja, um operador observava os níveis de tensão na saída do gerador e variava o reostato de campo da máquina (FERNANDES, 2011).

Dentre as características do regulador de tensão, além de controlar a tensão terminal da máquina, que é o objetivo de estudo deste trabalho, estão a de dividir a potência reativa entre máquinas que atuem em paralelo, amortecer oscilações de baixa frequência, controlar corrente de campo para garantir sincronismo da máquina no SEP, além de aumentar a excitação sob condições de curto circuito, também com o objetivo de garantir estabilidade (SOARES, 2016).

A Figura 11 representa a estrutura clássica de um regulador automático de tensão.



**Figura 11 - Regulador Automático de Tensão.**  
 Fonte: Extraída e adaptada de (CAROLINO, 2013).

O sistema funciona basicamente da seguinte forma, a tensão terminal do gerador ( $e_s$ ) é comparada com um sinal de referência ( $e_s^*$ ), o erro gerado por esta comparação é processado pelo AVR (através do controlador que pode ser PI, PID ou avanço e atraso de fase). Depois disso, o AVR envia o sinal de controle para a excitatriz, fazendo com que esta produza a corrente necessária para alimentar o enrolamento de campo do gerador síncrono. A medição de tensão na saída do gerador é realizada através de sensores (CAROLINO, 2013).

### 4.3 BANCO DE CAPACITORES

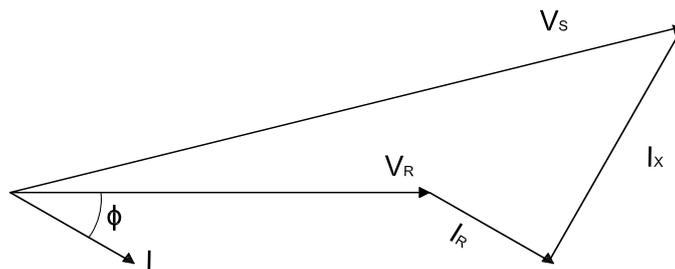
A instalação de banco de capacitores nas linhas de distribuição possibilita o controle de potência reativa na rede. Os capacitores aumentam o fator de potência do sistema, conseqüentemente, aumentando os níveis de tensão. A alocação dos bancos de capacitores pode ser realizada em paralelo com as cargas ou em série com as linhas. No caso de capacitores em paralelo com as cargas, o objetivo é precisamente a correção do fator de potência. Já no caso de capacitores em série com a linha de distribuição, a principal função é a redução da queda de tensão devido às reatâncias indutivas, sem correção de fator de potência (FRAGOAS, 2008).

Além das diferentes formas de conexão dos bancos de capacitores, existem também diferentes tipos de banco de capacitores. Esses bancos podem ser de capacitores fixos, onde o valor da capacitância é fixo (normalmente utilizados para circuitos com apenas uma carga). Bancos com capacitores programáveis, quando um *software* determina o momento em que os capacitores devem trabalhar. E banco de capacitores com capacitores automáticos, quando os valores de capacitância variam de acordo com a variação de potência reativa (REIS; KIKUCHI, 2015).

A localização do banco de capacitores é fundamental para que sejam atingidos os objetivos com seu uso, desta forma, os capacitores devem ser instalados o mais próximo possível das cargas, podendo ser na entrada da energia, no quadro de distribuição e até mesmo junto as cargas (FONSECA, 2000).

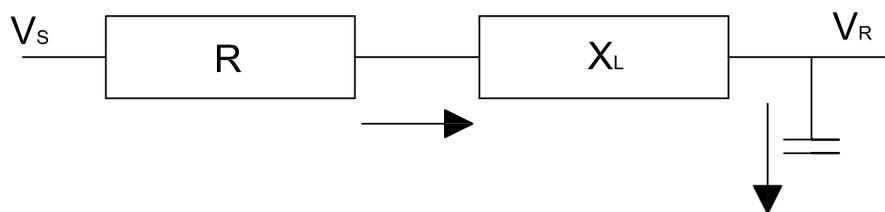
### 4.3.1 Capacitor em paralelo

A regulação de tensão utilizando capacitores em paralelo com a carga pode ser averiguada observando as Figuras 12 e 13:



**Figura 12 - Diagrama fasorial de um circuito em linha de distribuição com capacitor.**

Fonte: Extraída e adaptada de (FELBER, 2010).



**Figura 13 - Diagrama unifilar de um circuito em linha de distribuição com capacitor.**

Fonte: Extraída e adaptada de (FELBER, 2010).

Considerando a queda de tensão  $V_q$  da Figura 18, tem-se:

$$\Delta V = I_R R + I_X X \quad (18)$$

Após instalado o capacitor, conforme a Figura 19, a queda de tensão é dada por:

$$\begin{aligned} \Delta V &= I_R R + I_X X - I_C X \\ \Delta V &= I_R R + (I_X - I_C) X \end{aligned} \quad (19)$$

Desta forma, nota-se que com a inserção do capacitor, a linha de distribuição tem um acréscimo de  $I_C X$  de tensão (FELBER, 2010).

Para dimensionar o banco de capacitores é preciso primeiro determinar a potência reativa entregue para uma determinada carga, da seguinte forma:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (20)$$

Sendo:

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} \quad (21)$$

Onde  $\varphi$  representa o fator de potência da carga.

Com fator de potência desejado, é possível determinar também qual deve ser a potência reativa na carga, com o novo fator de potência. Isso é realizado da mesma forma que a potência reativa inicial, porém, encontrando o valor de potência aparente,  $S$ , com o fator de potência desejado.

Desta forma, tem-se um  $Q_{inicial}$ , referente a potência reativa da carga antes da correção, e um  $Q_{novo}$ , referente à potência reativa da carga após a correção do fator de potência, ou seja, após a inclusão do banco de capacitores.

Sendo assim, a potência reativa que o banco de capacitores deve fornecer ao circuito é:

$$Q_{banco} = Q_{inicial} - Q_{novo} \quad (22)$$

A determinação da capacitância do banco de capacitores desejado para fornecer a potência reativa necessária para regular o fator de potência, é dada por (REIS; KIKUCHI, 2015):

$$C = \frac{10^3 Q_{banco}}{2\pi f (V_{ff})^2} \quad (23)$$

#### 4.4 DIMENSIONAMENTO DE CONDUTORES

O mal dimensionamento de condutores pode acarretar problemas técnicos na operação das cargas, além de apresentar risco de incêndio devido ao superaquecimento. Para instalações de baixa tensão, o problema do mal dimensionamento relaciona-se basicamente com problemas de aquecimento aliados a duração de tempo do sobreaquecimento (COTRIM, 2009).

Para evitar esse tipo de dano, um projeto elétrico deve ser precedido por alguns fatores importantes para projeto. Alguns desses fatores são: tensão nominal, frequência nominal, corrente de carga, fator de potência da carga, distância da carga, corrente de curto circuito, entre outros (MAMEDE FILHO, 2012).

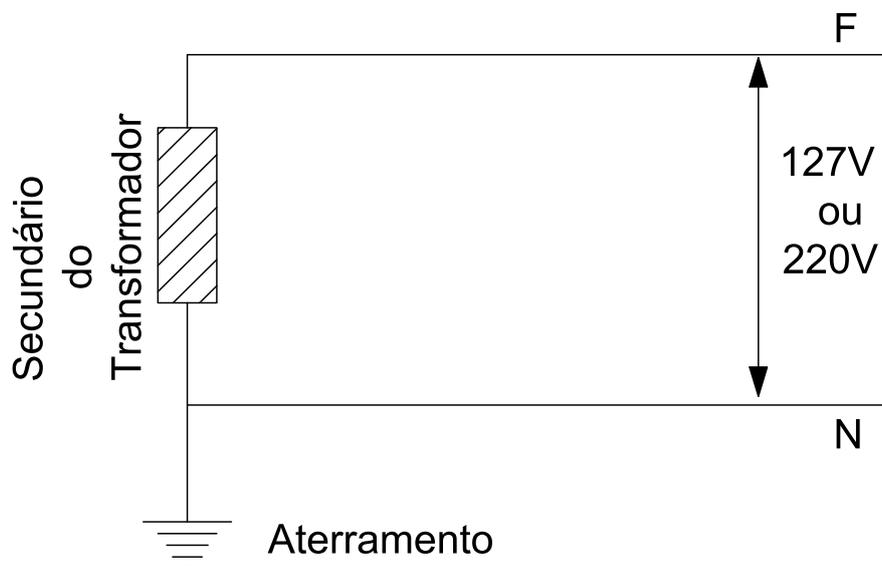
A seguir, apresentam-se alguns fatores que são determinantes para o dimensionamento correto dos condutores. Lembrando que o dimensionamento dos condutores, para esse trabalho, tem o intuito de reduzir a queda de tensão da geração até as cargas.

#### 4.4.1 Sistema de condutores

O sistema de condutores leva em consideração o número de condutores vivos no circuito (fase e neutro). Em geral, são utilizados circuitos com dois ou três condutores. A determinação do tipo de sistema é realizada a partir do tipo de carga e tipo de alimentação da carga do sistema a ser analisado (COTRIM, 2009).

##### 4.4.1.1 Sistema monofásico com dois condutores

Usualmente o sistema monofásico com dois condutores é utilizado em cargas residenciais ou prediais, com um número baixo de unidades consumidoras e uma carga baixa. A Figura 14 apresenta uma ilustração do sistema (MAMEDE FILHO, 2012).

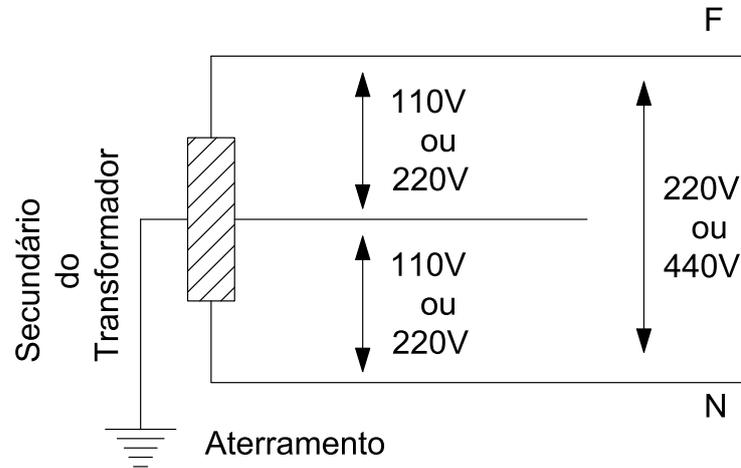


**Figura 14 - Sistema monofásico com dois condutores.**  
 Fonte: Extraída e adaptada de (MAMEDE FILHO, 2012).

##### 4.4.1.2 Sistema monofásico a três condutores

Esse tipo de alimentação é utilizada principalmente em locais que utilizam cargas de iluminação e motores (instalações residenciais e comerciais). O uso deste

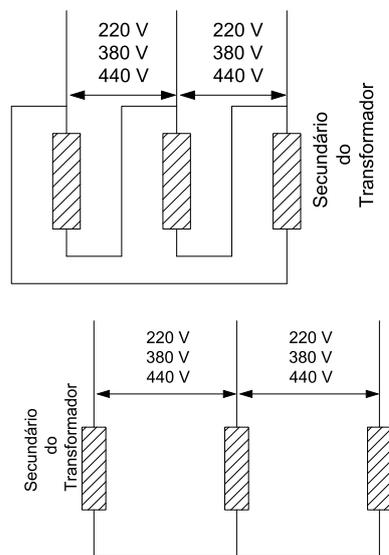
tipo de sistema de alimentação é limitado. A Figura 15 apresenta o sistema monofásico a três condutores (MAMEDE FILHO, 2012).



**Figura 15 - Sistema monofásico a três condutores.**  
Fonte: Extraída e adaptada de (MAMEDE FILHO, 2012).

#### 4.4.1.3 Sistema trifásico a três condutores

Este tipo de sistema é utilizado principalmente em instalações onde o maior tipo de carga utilizada são os motores (instalações industriais). A ligação do secundário do transformador pode ser realizada em triângulo ou estrela com neutro aterrado. A figura 16 apresenta os sistemas trifásicos com três condutores nas duas situações citadas anteriormente (MAMEDE FILHO, 2012).



**Figura 16 - Sistemas trifásicos a três condutores em  $\Delta$  e Y.**  
Fonte: Extraída e adaptada de (MAMEDE FILHO, 2012).

#### 4.4.2 Métodos de referência

Os métodos de referência são utilizados para determinar a forma de instalação dos condutores, desta forma é possível identificar a capacidade máxima de corrente de curto circuito de tal condutor (MAMEDE FILHO, 2012).

A Tabela 7 apresenta os métodos de referência.

**Tabela 7 - Métodos de referência.**

<b>Referência</b>	<b>Descrição</b>
<b>A1</b>	Condutores isolados em eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolante.
<b>A2</b>	Cabo multipolar em eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolante.
<b>B1</b>	Condutores isolados em eletroduto de seção circular sobre parede de madeira.
<b>B2</b>	Cabo multipolar em eletroduto de seção circular sobre parede de madeira.
<b>C</b>	Cabos unipolares ou cabo multipolar sobre parede de madeira.
<b>D</b>	Cabo multipolar em eletroduto enterrado no solo.
<b>E</b>	Cabo multipolar ao ar livre.
<b>F</b>	Cabos unipolares justapostos (na horizontal, vertical ou em trifólio) ao ar livre.
<b>G</b>	Cabos unipolares espaçados ao ar livre.

**Fonte:** Extraído e adaptado de (MAMEDE FILHO, 2012).

##### 4.4.2.1 Tipos de condutores

Para que seja possível escolher o método de referência correto, é necessário conhecer os tipos de cabos e condutores que podem ser utilizados nas instalações descritas na Tabela 7. Os cabos condutores são definidos por (SANTOS).

- Alma condutora, que é o elemento do condutor destinado a condução elétrica. Podem ser das seguintes formas:
  - Condutor unipolar: um único fio;
  - Condutor multipolar: conjunto de fios reunidos e sem isolamento entre si.
- Tipo de isolamento de condutores:

- Isolado: quando a alma condutora é revestido por uma ou mais camadas de isolamento;
- Nu: quando o condutor não possui nenhum tipo de isolamento. Esse tipo de condutor é próprio para linhas aéreas.
- Tipo de cabos:
  - Cabo de condutor isolado: condutor isolado (cabo unipolar) com revestimento exterior;
  - Cabo de condutores isolados: conjunto de condutores isolados, agrupados e com uma isolação externa comum a todos.

#### 4.4.3 Critério da capacidade de condução de corrente

O critério da capacidade de condução de corrente determina o valor máximo de corrente que poderá passar pelos condutores. Esse valor máximo de corrente depende do método de referência, ou seja, da forma que esses cabos chegarão até a instalação (MAMEDE FILHO, 2012).

A determinação da secção nominal dos condutores a partir do critério de capacidade de condução de corrente é realizada a partir de tabelas que relacionam a capacidade de condução com a secção nominal dos condutores. As Tabelas 04 e 05, 06 e 07, em anexo, que são indicadas na NBR 5410, foram montadas a partir de ensaios e cálculos. As tabelas também variam de acordo com o tipo de condutor e isolação a ser utilizado, isso porque, dependendo do tipo, as características de temperatura máxima do condutor também varia (COTRIM, 2009).

Os valores de corrente que devem ser utilizadas para a determinação da secção nominal dos condutores, para circuitos monofásicos e trifásicos são dadas, respectivamente, pelas equações 24 e 25 (MAMEDE FILHO, 2012):

$$I_c = \frac{D_c}{V_{fn} * \cos \varphi} \quad (24)$$

$$I_C = \frac{D_C}{\sqrt{3} * V_{ff} * \cos \varphi} \quad (25)$$

Sendo,

$I_C$  a corrente na carga, em A;

$D_C$  a demanda da carga, em W.

$\cos \varphi$  o fator de potência da carga;

$V_{fn}$  a tensão fase e neutro, em V.

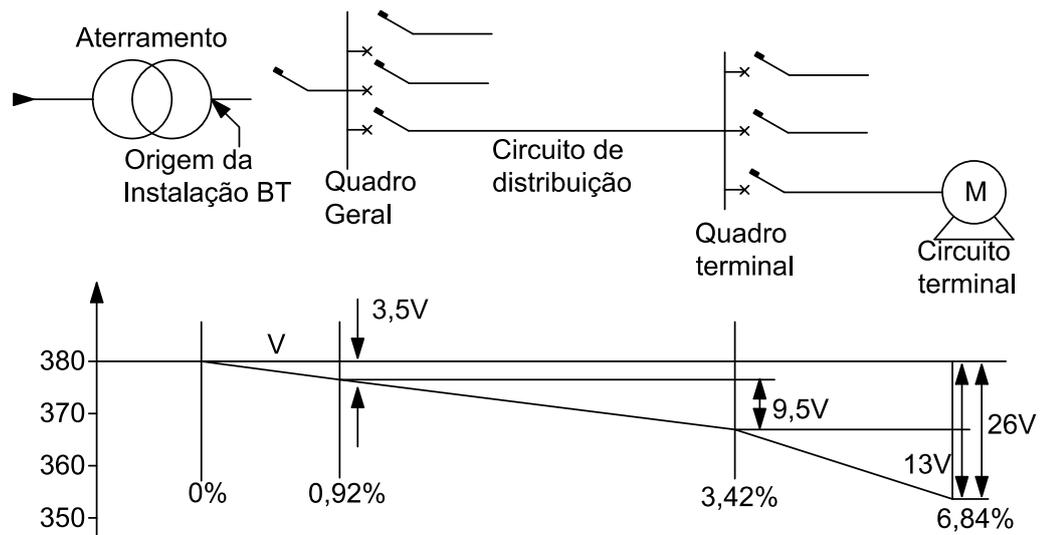
$V_{ff}$  a tensão fase e fase, em V.

No caso de tensões monofásicas entre fases, utilizar  $V_{ff}$  para o cálculo da corrente na carga.

#### 4.4.4 Critério da queda de tensão

Por fim, deve ser analisado o critério da queda de tensão. Nesse critério, é determinada a seção do condutor para que uma queda de tensão máxima, definida pelo projetista, ocorra. A NBR 5410 determina limites de percentual máximo de queda de tensão admitidos. Além dos limites definidos pela NBR 5410, o próprio projetista pode definir seus limites de queda de tensão desejados, desde que esses limites não ultrapassem os definidos pela norma (MAMEDE FILHO, 2012).

A queda de tensão acontece nas várias etapas do circuito, com diferentes percentuais. Ou seja, desde o ponto de alimentação, até a carga final do circuito, o percentual de queda de tensão varia. Uma visualização da situação pode ser observada na figura 17 (COTRIM, 2009).



**Figura 17 - Exemplo de queda de tensão em instalação de baixa tensão.**  
**Fonte: Extraída e adaptada de (COTRIM, 2009).**

Por esses motivos, calcula-se a secção nominal mínima de um condutor, para que a queda de tensão máxima em um determinado trecho seja a definida pelo projetista. Sendo assim, a secção nominal em circuitos monofásicos e trifásicos são determinadas pelas equações 26 e 27, respectivamente (MAMEDE FILHO, 2012).

$$S_C = \frac{200 * \rho * \sum(L_C * I_C)}{\Delta V_C * V_{fn}} \quad (26)$$

$$S_C = \frac{100 * \sqrt{3} * \rho * \sum(L_C * I_C)}{\Delta V_C * V_{ff}} \quad (27)$$

Sendo,

$S_C$  a secção dos condutores, em mm<sup>2</sup>;

$\rho$  a resistividade do material condutor, para o cobre = 1/56  $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ;

$L_C$  o comprimento do circuito, em m;

$I_C$  a corrente total do circuito, em A;

$\Delta V_C$  a queda de tensão máxima admitida, em %;

$V_{fn}$  a tensão entre fase e neutro, em V;

$V_{ff}$  a tensão entre fase e fase, em V.

No caso de tensões monofásicas entre fases, utilizar  $V_{ff}$  para o cálculo da seção mínima do condutor.

Definido isso, a seção nominal dos condutores deve ser igual ou maior que a maior seção definida entre os critérios de condução de corrente e queda de tensão nos condutores.

#### 4.5 AJUSTES DE CARGA

Entende-se por carga uma aplicação que pode estar sendo medida em termos de potência (KAGAN; DE OLIVEIRA; ROBBA, 2010). Isso ocorre porque para fins de projeto de instalações e análise de instalações é mais viável trabalhar com valores médios de potência. Sendo assim, utiliza-se a demanda ( $D$ ), que é a quantidade de potência consumida em um determinado período de tempo, em geral 15 minutos (COTRIM, 2009).

O conceito de demanda possui outras especificações, dentre elas (KAGAN; DE OLIVEIRA; ROBBA, 2010):

- Demanda máxima: é a maior de todas as demandas em um período de tempo definido.
- Demanda média: é a média de todas as demandas de um período de tempo definido.

##### 4.5.1 Curva de carga

As curvas de carga são gráficos que definem a demanda em função do tempo. A demanda é representada em patamares, que indicam a demanda máxima em um pequeno espaço de tempo (geralmente 15 minutos). Um período de tempo maior que 15 min, apresentando vários picos de demanda forma-se um gráfico de demanda (COTRIM, 2009).

Com a curva de cargas é possível observar as características dos consumidores de energia (residencial, comercial, industrial), além de determinar de que forma a energia está sendo utilizada. Curvas de carga sofrem influência de

diversos fenômenos, como: variáveis meteorológicas, temperatura, sazonalidade, eventos televisivos, entre outros (Curvas de Carga, 2002).

A figura 18 apresenta um modelo de curva de carga.

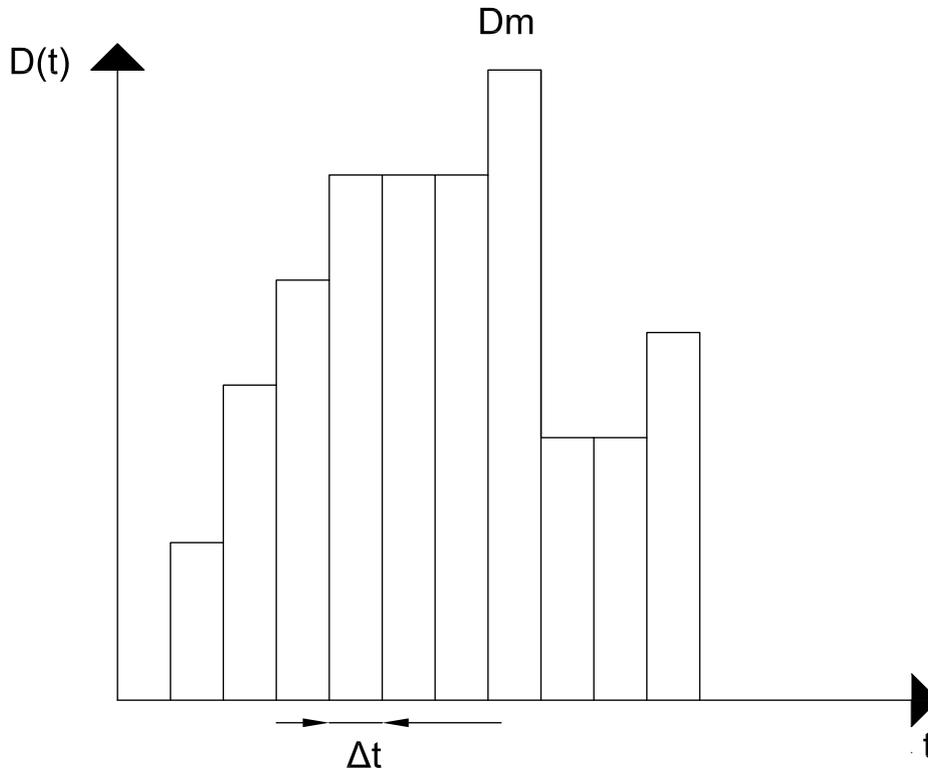


Figura 18 - Modelo de curva de carga.  
Fonte: Extraída e adaptada de (COTRIM, 2009).

#### 4.5.2 Fator de carga

O fator de carga tem sua definição como sendo a relação entre a demanda média e a demanda máxima de um sistema em um determinado período de tempo. Sendo assim, a equação 28 define o fator de carga (KAGAN; DE OLIVEIRA; ROBBIA, 2010).

$$f_{carga} = \frac{D_{média}}{D_{máx}} \quad (28)$$

O fator de carga pode possuir um valor entre 0 e 1. Sendo que, quando maior for o fator de carga, mais benefícios tem-se na instalação, dentre os benefícios de um bom fator de carga tem-se o aproveitamento e aumento de vida útil da instalação elétrica, já que, para um bom fator de carga, é necessário que uso das diversas cargas da instalação seja feito de forma distribuída, sem sobrecarregar a instalação em momentos específicos. Além destes benefícios, um elevado fator de carga auxilia na diminuição da queda de tensão, já que diminuindo-se os picos de demanda, haverá também a diminuição da corrente de carga, que influencia diretamente na queda de tensão (MAMEDE FILHO, 2012).

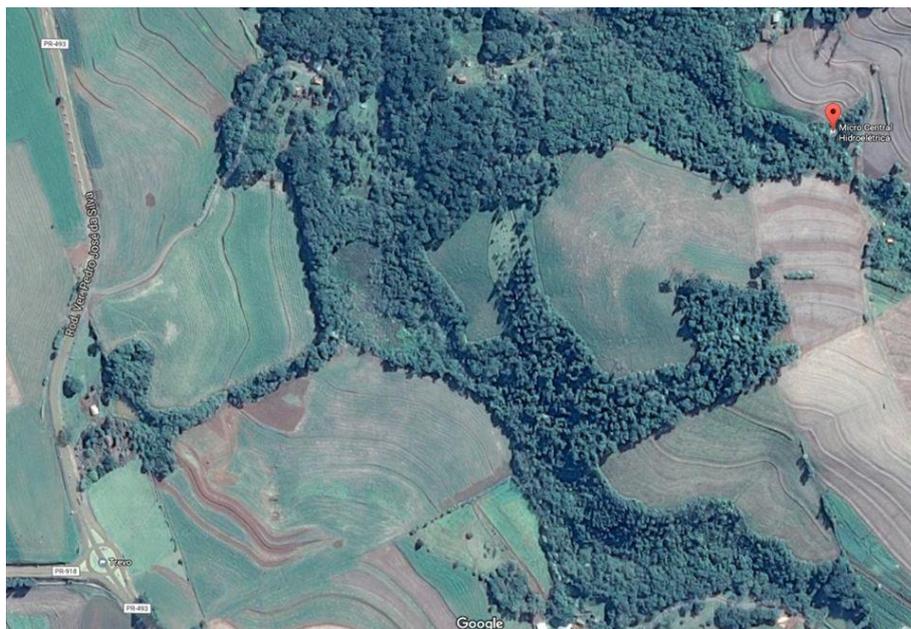
## 5. ESTUDO DE CASO

### 4.2 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão apresentados dois estudos de caso, com dados de duas possíveis micro centrais hidrelétricas. Os estudos de caso serão utilizados para exemplificar alguns dos métodos de regulação de tensão citados no capítulo anterior.

### 4.3 CASO 01

O primeiro estudo de caso é referente ao projeto de uma micro central hidrelétrica, projetada para ser alocada em uma propriedade localizada na zona rural do município de Itapejada D`oeste – PR. O projeto da micro central foi realizado no trabalho de conclusão de curso da acadêmica de engenharia elétrica Alessandra S. Iurckevicz. O projeto da micro central hidrelétrica foi realizado com base nos dados do rio que atravessa a propriedade, na linha Rio Gavião. A Figura 19 apresenta o local destinado a micro central projetada, marcado pelo ponto vermelho, em caso de futura implementação.



**Figura 19 - Imagem da propriedade e ponto da micro central hidrelétrica.**  
Fonte: Extraída de (Google Earth, 2017).

Para realização do estudo de queda de tensão, foram coletados alguns dados de projeto relevantes:

- Potência instalada: 20kW;
- Tipo de alimentação: trifásica;
- Distância da geração até a carga: 350m;
- Tipo de rede: três condutores isolados aéreos;
- Fator de potência: 0.80.

#### 5.2.1 Determinação da seção do condutor mais adequada

Primeiramente, será definida a seção do condutor apropriada para que a queda de tensão máxima na rede seja de 5% (ANEEL, 2017).

A determinação do condutor é dada por três etapas.

##### 4.3.1.1 Método de referência

Conforme descrito nos dados de projeto coletados para o caso 01, o tipo de alimentação é trifásico, com três condutores isolados. Portanto, será utilizado o método de referência G, conforme a Tabela 7, que utilizado cabos unipolares espaçados ao ar livre.

##### 4.3.1.2 Critério da capacidade de condução de corrente

Para determinar a seção nominal do condutor a partir da capacidade de condução de corrente, primeiramente define-se a corrente de carga do circuito através da equação 25. Para este caso, considerou-se a demanda da carga igual a potência total instalada, ou seja, 20kW.

Sendo assim, tem-se uma corrente de carga  $I_C=37,98$  A.

Depois de definida a corrente de carga e o método de referência, com o auxílio da tabela 05 em anexo, determina-se a seção nominal mínima do condutor.

Neste caso, a seção nominal mínima de um condutor de cobre com isolamento de PVC é de 4mm<sup>2</sup>.

#### 4.3.1.3 Critério da queda de tensão

Nota-se que o critério de capacidade de corrente não leva em consideração a distância da geração até a carga. Por isso, utiliza-se o critério da queda de tensão para auxiliar no dimensionamento dos condutores.

Para isto, utilizando a equação 27, tem-se a seção mínima do condutor para uma queda de tensão máxima de 5% é de  $S_C = 21.64\text{mm}^2$ .

Depois de verificados os métodos de dimensionamento de condutores, determina-se os condutores sendo que estes devem possuir seção nominal igual ou maior que a maior seção determinada pelos métodos de dimensionamento. Sendo assim, os condutores para a rede que irá transmitir a energia da geração até as cargas da micro central hidrelétrica são definidos, através da tabela 05 em anexo, como condutores de seção nominal de 25 mm<sup>2</sup>.

#### 4.3.2 Cálculo da queda de tensão

O cálculo da queda de tensão será realizar conforme equação 14 e através do método simplificado. Sendo assim, para os condutores dimensionados anteriormente, com seção nominal de 25mm<sup>2</sup> e o fator de potência inicial de 0.80, tem-se uma variação de tensão  $\Delta V = 17,12\text{V}$ .

Desta forma, considerando que os cálculos foram realizados para a tensão de alimentação trifásica entre fases de 380V, tem-se uma queda de tensão percentual de aproximadamente 4,5%. Desta forma, nota-se que, para os valores de potência instalada e distância entre geração e carga deste caso, juntamente com o correto dimensionamento dos condutores, a queda de tensão apresentada fica dentro dos limites permitidos, considerando o nível de tensão que chega até as cargas adequado.

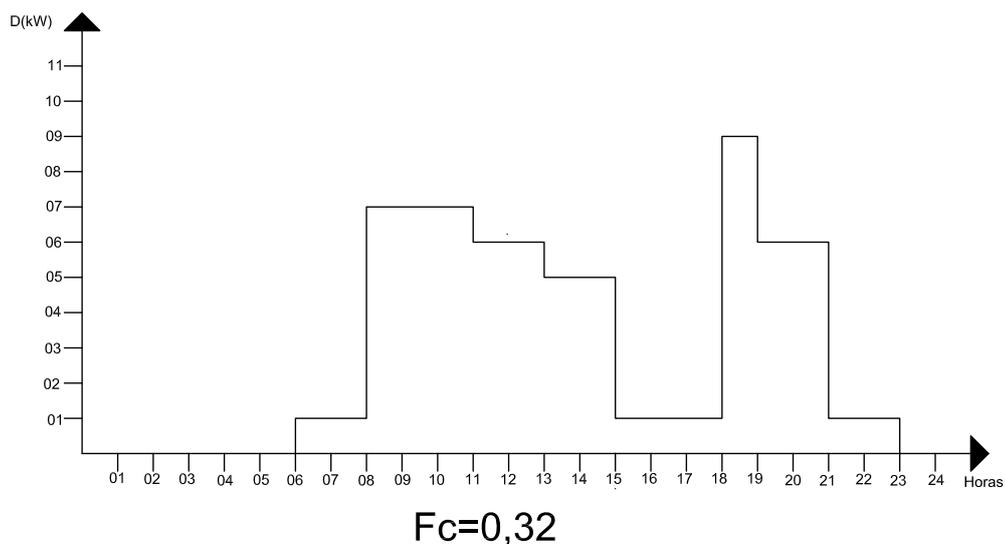
### 4.3.3 Métodos de regulação

Mesmo que os percentuais de queda de tensão estejam dentro dos limites admitidos pela ANEEL, é possível aplicar métodos de regulação de tensão para diminuir os percentuais de queda de tensão. A seguir, serão apresentadas duas formas de regulação de tensão.

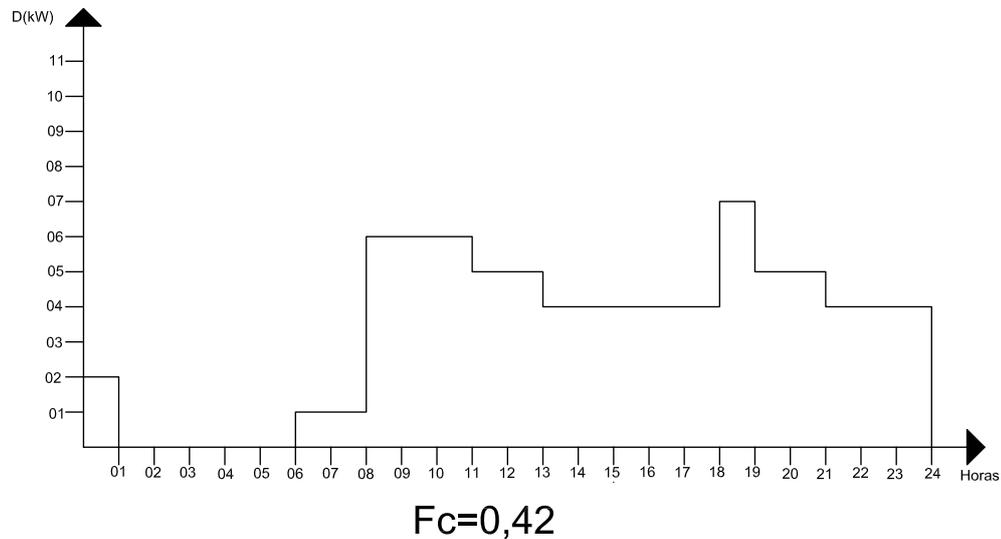
#### 4.3.3.1 Otimização do fator de carga

Como visto anteriormente, fator de carga elevado significa uma melhor distribuição no uso da energia elétrica. Ou seja, as cargas de determinado consumidor estão sendo ligadas em momentos diferentes, evitando uma sobrecarga e queda de tensão no sistema,

Sendo assim, uma forma simples de evitar quedas de tensão elevadas é manter um fator de carga elevado. As curvas apresentadas nas figuras 20 e 21 apresentam exemplos de fator de carga distintos, um baixo e outro um pouco mais elevado, respectivamente.



**Figura 20 - Curva de carga com  $F_c= 0,32$ .**  
**Fonte: Autoria própria.**



**Figura 21 - Curva de carga com  $F_c = 0,42$ .**  
**Fonte: Autoria própria.**

Nota-se que com uma simples distribuição de carga na residência, por exemplo, utilizar a máquina de lavar/ secar roupas no horário em que outros equipamentos estão desligados, pode elevar consideravelmente o fator de carga, diminuindo assim, as possibilidades de sobrecarga e, conseqüentemente, queda de tensão elevada no sistema.

#### 4.3.3.2 Correção do Fator de Potência

Outro método de regulação de tensão que pode ser aplicado para diminuir a queda de tensão é a utilização de banco de capacitores em paralelo com as cargas. Para isso, será aplicado o cálculo de um banco de capacitores para aumentar o fator de potência das cargas de 0,80 para 0,95.

Para realizar o cálculo da capacitância do banco de capacitores, primeiro define-se, com a equação 20, o valor de potência reativa atual, que é de  $Q_{inicial} = 15 \text{ kVAr}$ . Utilizando a mesma equação, determina-se qual será a potência reativa da carga com o novo fator de potência, sendo assim,  $Q_{novo} = 6,57 \text{ kVAr}$ .

Depois disso, determina-se, pela equação 22, qual será a potência reativa fornecida pelo banco de capacitores,  $Q_{banco} = 8,43 \text{ kVAr}$ . Por fim, o valor da

capacitância do banco de capacitores é determinado a partir da equação 23, sendo assim,  $C = 0,154F$ .

Depois de determinado o valor do banco, é possível fazer uma verificação de qual será o valor da queda de tensão para o novo fator de potência, mantendo as seções nominais dos cabos calculados inicialmente. Para isso, determina-se a nova corrente de carga pela equação 25, que será de  $I_C = 31,99A$ .

Com a nova corrente de carga e o valor do coeficiente de queda de tensão para o novo fator de potência, calcula-se a nova queda de tensão, através da equação 14, que será de  $\Delta V = 16,68V$ . O valor da queda de tensão representa um percentual de queda de 4,38%.

### 5.3 CASO 02

O segundo estudo de caso será baseado em dados aproximados coletados para um futuro projeto de micro central hidrelétrica. O projeto deverá ser realizado em uma propriedade que foi visitada pelo Prof. Me. César Augusto Portolann.

Foram obtidos previamente os dados abaixo:

- Potência instalada: 8 kW;
- Fator de potência: 0.80;
- Distância entre geração e carga: 200m.

Para que seja possível realizar o estudo de queda de tensão, foram determinados os seguintes fatores:

- Tipo de alimentação: monofásica;
- Tipo de rede: dois condutores isolados aéreos;

#### 5.3.1 Determinação da seção do condutor mais adequada

Novamente, o primeiro a ser feito é definir a seção do condutor apropriada para que a queda de tensão máxima na rede seja de 5% (ANEEL, 2017).

### 5.3.1.1 Método de referência

Depois de determinados alguns fatores relevantes para o dimensionamento dos condutores, através da Tabela 7, escolhe-se o método de referência E, já que os condutores serão dois, isolados e aéreos.

### 5.3.1.2 Critério de capacidade de condução de corrente

Novamente, deve ser definida a corrente de carga a partir da equação 24. Desta forma, considerando a demanda da carga igual a potência instalada, tem-se uma corrente de carga igual  $I_C = 45,45A$ .

Depois de definida a corrente de carga e o método de referência, determina-se através da tabela II a seção nominal do condutor. Neste caso, a seção nominal adequada para este condutor é de  $6mm^2$ .

### 5.3.1.3 Critério da queda de tensão

Como visto anteriormente, além da corrente máxima de condução e do método de instalação, para que a seção nominal do condutor escolhido seja adequada, é necessário que este seja dimensionada para uma queda de tensão máxima escolhida pelo projetista, evitando que os níveis de tensão que cheguem até o consumidor não estejam adequados.

Desta forma, através da equação 26, determina-se a seção nominal mínima do condutor para que a queda de tensão máxima no circuito seja de 5%.

Sendo assim, a seção do condutor deve ser de no mínimo  $29,51mm^2$ .

Por fim, a seção nominal do condutor deve ser, no mínimo, a seção nominal máxima encontrada nos critérios anteriores. Desta forma, a seção nominal dos condutores de alimentação da micro central hidrelétrica devem ser de no mínimo  $35mm^2$ .

### 5.3.2 Cálculo da queda de tensão

Novamente, o cálculo da queda de tensão será realizado conforme equação 14 e através do método simplificado. Sendo assim, para os condutores dimensionados anteriormente, com seção nominal de 35mm<sup>2</sup> e o fator de potência inicial de 0,80, tem-se uma variação de tensão  $\Delta V = 10,18V$ .

Considerando que os cálculos foram realizados para a tensão de alimentação monofásica entre fases de 220V, tem-se uma queda de tensão percentual de aproximadamente 4,62%. Desta forma, nota-se que, para os valores de potência instalada e distância entre geração e carga deste caso, juntamente com o correto dimensionamento dos condutores, a queda de tensão apresentada fica dentro dos limites permitidos, considerando o nível de tensão que chega até as cargas adequado.

### 5.3.3 Método de regulação

Mesmo que os níveis de tensão que chegam até a carga da propriedade se encontrem dentro das normas brasileiras, é possível incluir métodos de regulação de tensão, tanto para corrigir fator de potência, quanto para reduzir a queda de tensão nos terminais das cargas. A seguir, serão apresentados dois possíveis métodos para a regulação da tensão na carga. Nesse caso, será aplicado o cálculo de um banco de capacitores para corrigir o fator de potência de 0,80 para 0,95 nas cargas da propriedade.

Para o cálculo do banco de capacitores, é necessário primeiramente determinar o valor de potência reativa para o fator de potência atual nas cargas. Conforme a equação 20, o valor da potência reativa é de  $Q_{inicial} = 6kVAr$ . Com a mesma equação, será determinado qual o valor de potência reativa para o fator de potência desejado, que é de  $Q_{novo} = 2,63kVAr$ .

Depois de determinadas as potências reativas inicial e nova, determina-se qual deve ser a potência reativa do banco de capacitores, através da equação 22. Desta forma,  $Q_{banco} = 3,37kVAr$ . Depois disso, com a equação 23 é possível determinar qual a capacitância do banco que será inserido em paralelo com a carga. Para o caso das cargas do caso 02, deve-se instalar um banco de capacitores de  $C = 0,184F$ .

Depois de determinado o valor do banco, novamente é possível fazer uma verificação de qual será o valor da queda de tensão para o novo fator de potência. Utilizando a equação 25, a nova corrente de carga será  $I_C=38,27A$ .

Com a nova corrente de carga e o valor do coeficiente de queda de tensão para o novo fator de potência, calcula-se a nova queda de tensão, através da equação 14, que será de  $\Delta V= 9,57V$ . O valor da queda de tensão representa um percentual de queda de 4,35%.

## 6. CONCLUSÕES

A importância e necessidade de regular os níveis de tensão que chegam até as cargas dos consumidores, juntamente com o crescimento do número de unidades de micro geração no Brasil, foram os fatores que levaram a determinação dos intuítos deste trabalho. Objetivou-se fazer um levantamento da equação da queda de tensão, entender a influência dos parâmetros que a determinam e levantar possibilidades para a regulação dos níveis de tensão.

O levantamento do equacionamento da queda de tensão foi realizado, com ele, é possível além de determinar o valor da queda de tensão em determinados trechos de rede, avaliar de que forma algumas grandezas influenciam na queda de tensão. Como visto na equação 14, a variação de tensão na carga é proporcional à distância (entre geração e carga) e a corrente de carga. O fator de potência das cargas e as características do cabo de alimentação também são determinantes para a variação de tensão. Desta forma, foi possível observar nos estudos de caso que, quanto menor a distância e a corrente de carga, menor a queda de tensão no trecho de rede em questão.

A influência do fator de potência da carga pode ser observada na tensão de saída do gerador, como mostra a equação 02. Para cargas com fator de potência capacitivo, a tensão de armadura pode ser menor que as cargas com fator de potência indutivo, para uma mesma tensão de saída.

A partir do conhecimento a respeito da queda de tensão e as variáveis que a influenciam, foi possível levantar alguns métodos para a regulação dos níveis de tensão. Os métodos apresentados tratam-se tanto de regulação preventiva quanto regulação corretiva. No caso do correto dimensionamento dos cabos, que é utilizado para que a queda de tensão nas cargas seja menor que valores pré-determinados, a regulação de tensão é realizada antes mesmo que ocorra a queda dos níveis de tensão, ou seja, já se dimensiona os cabos para que não ocorram quedas de tensão elevadas. A otimização do fator de carga também é um método utilizado para

minimizar os picos de demanda, fazendo com que não ocorram picos de carga e, conseqüentemente, não existam quedas bruscas nos níveis de tensão.

Além destes, os métodos de regulação corretivas também podem ser utilizados. O controle de tensão através da excitatriz é utilizado para regular a tensão de saída do gerador, sem que a tensão de saída do gerador seja a desejada, não é possível garantir que os métodos preventivos funcionem. No método de regulação pela excitatriz, varia-se a corrente de campo, que através de campo magnético induz a tensão de armadura, para que o nível de tensão na saída do gerador seja o determinado pelo usuário.

Por fim, a utilização de bancos de capacitores em paralelo com a carga é também um método de regulação de tensão corretiva. Com os bancos de capacitores é possível aumentar a fator de potência, a partir da injeção de reativos. Desta forma, diminui-se a corrente de carga, fazendo então com que a queda de tensão em determinados trechos de rede seja menor.

Aplicando os conhecimentos adquiridos a estudos de caso de micro centrais hidrelétricas síncronas, foi possível visualizar alguns dos métodos de regulação abordados, a aplicação e a eficácias desses métodos. Nota-se que para os casos abordados, com potência instalada baixa, de até 20kW, e distâncias entre geração e cargas inferiores a 500m, somente o correto dimensionamento dos cabos já evita que a queda de tensão seja superior as determinadas pela ANEEL. O Quadro 01 apresenta uma comparação dos resultados obtidos através dos estudos de caso.

Comparação de Estudos de Caso				
Dados / Casos	Caso 01		Caso 02	
	Inicial	Corrigido	Inicial	Corrigido
Potência Instalada (kW)	20		8	
Tipo de Alimentação	Trifásica		Monofásica	
Distância da geração à carga (m)	350		200	
Tipo de rede	Isolados aéreos		Isolados aéreos	
Fator de potência	0,8	0,95	0,8	0,95
Parâmetros Calculados				
Método de referência	G		E	
Corrente de Carga (A)	37,98	31,99	45,45	38,27
Seção nominal do condutor (Corrente de carga)(mm <sup>2</sup> )	4	-	6	-
Seção mínima do condutor (Queda de tensão)(mm <sup>2</sup> )	21,64	-	29,51	-
Seção do condutor (mm <sup>2</sup> )	25	25	35	35
$\Delta V(V)$	17,12	16,68	10,18	9,57
% $\Delta V(V)$	4,5	4,38	4,62	4,35
Potência do banco de capacitores (kVAr)	-	8,43	-	3,37
Capacitância do banco de capacitores (F)	-	0,154	-	0,184

**Quadro 1 - Comparação dos resultados do estudo de caso.**

Fonte: Autoria própria.

Através da análise do quadro, nota-se também que a utilização do dimensionamento de cabos através do método da corrente de carga torna-se desnecessário, já que para distâncias próximas as apresentadas nos estudos, o critério da queda de tensão é consideravelmente maior. Desta forma, quando se tratam de linhas de distribuição para uma micro central hidrelétrica, pode-se utilizar somente o critério da queda de tensão para o dimensionamento dos condutores de alimentação.

Sendo assim, a partir das análises realizadas, pode-se dizer que foram cumpridos os objetivos gerais do trabalho, que eram de conhecer os fatores determinantes para a queda de tensão e levantar possibilidades para a regulação dos níveis de tensão. Além de aplicar os métodos estudados em estudos de caso, verificando o comportamento dos níveis de tensão para esses exemplos.

## REFERÊNCIAS

AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de Potência**. 1. ed. [S.l.]: Perason Prentice Hall, v. 1, 2000.

ANEEL. **ANEEL**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 15 Setembro 2017.

ANEEL. **ANEEL**, 2015. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-/asset\\_publisher/CegkWaVJWF5E/content/geracao-distribuida-introducao-1/656827?inheritRedirect=false](http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-/asset_publisher/CegkWaVJWF5E/content/geracao-distribuida-introducao-1/656827?inheritRedirect=false)>. Acesso em: 21 Junho 2017.

ANEEL. **ANEEL**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015673.pdf>>. Acesso em: 02 Julho 2017.

ANEEL. **ANEEL**, 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/prodist>>. Acesso em: 2017 Setembro 2017.

ANEEL. **ANEEL**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/caderno-tematico-microeminigeracao.pdf>>. Acesso em: 02 Julho 2017.

ANEEL. **Capacidade de Geração do Brasil**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 21 Junho 2017.

ANEEL. **Entenda a fiscalização dos Serviços de Enetricidade**, 2017. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/fiscalizacao-dos-servicos-de-eletricidade/-/asset\\_publisher/agghF8WsCRNq/content/entenda-a-fiscalizacao-dos-servicos-de-eletricidade/656808?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Ffiscalizacao-dos-servicos-de](http://www.aneel.gov.br/fiscalizacao-dos-servicos-de-eletricidade/-/asset_publisher/agghF8WsCRNq/content/entenda-a-fiscalizacao-dos-servicos-de-eletricidade/656808?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Ffiscalizacao-dos-servicos-de)>. Acesso em: Julho 2017.

ANEEL. **ANEEL**, 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 21 Junho 2017.

ARAÚJO, Gernylano G. **Desenvolvimento de um programa em excel para dimensionamento de condutores elétricos em baixa e média tensão**. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza: [s.n.], 2011. 139p. Disponível em:<<http://www.dee.ufc.br/anexos/TCCs/2011.2/GERNYLANO%20GAR%C3%87%C3%8AZ%20ARA%C3%9AJO.pdf>>

ASSEF, Amauri. **paginapessoal.utfpr.edu.br**. Disponível em: <[http://paginapessoal.utfpr.edu.br/amauriassef/disciplinas/eletronica-de-potencia/apresentacoes/Eletr\\_Pot1\\_15.pdf/view](http://paginapessoal.utfpr.edu.br/amauriassef/disciplinas/eletronica-de-potencia/apresentacoes/Eletr_Pot1_15.pdf/view)>. Acesso em: Outubro 2017.

- BARBOSA, Wilson P.; AZEVEDO, Abílio C. S. **GERAÇÃO DISTRIBUÍDA; Vantagens e Desvantagens**. Fundação Estadual do meio Ambiente. [S.l.]: [s.n.], 2017. 11p. Disponível em: <[http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mudnacacimatica/2014/artigo\\_gd.pdf](http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mudnacacimatica/2014/artigo_gd.pdf)>. Acesso em: 20 Outubro 2017.
- BORTOLETO, Elaine M. **A Implantação de Grandes Hidrelétricas; desenvolvimento, discurso e impactos**. Universidade Estadual Paulista. Vitória: [s.n.], 2001. 10p. Disponível em: <<http://www.publicacoes.ufes.br/geografares/article/viewFile/1140/853>>. Acesso em: 20 Setembro 2017.
- BORTOLOTTI, Fernando. **Estudo térmico da excitatriz estática do gerador da usina hidrelétrica derivação do Rio Jordão usando sensores a fibra ótica**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco: [s.n.], 2013. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/870>>. Acesso em: 29 Setembro 2017.
- CAROLINO, Suélio F. **Regulador Automático de Tensão Robusto Utilizando Técnicas de Controle Adaptativo**. UFRN. [S.l.]: [s.n.], 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/15466>>. Acesso: 29 Setembro 2017.
- CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. [S.l.]: McGrawHill, v. 1, 2013.
- COPEL. copel.com. **COPEL**, 2017. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2FB57635122BA32D4B03257B630044F656>>. Acesso em: 12 Agosto 2017.
- COTRIM, Ademaro A. M. B. **Instalações Elétricas**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, v. 1, 2009.
- CURVAS de Carga Curvas de Carga. Disponível em: <[https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/3525/3525\\_5.PDF](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/3525/3525_5.PDF)>. Acesso em: 13 Agosto 2017. maxwell.vrac.puc-rio.br.
- FARIA, Gabriel H. et al. **Suportabilidade de eletrodomésticos frente a distúrbios de qualidade de energia elétrica**. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá: [s.n.], 2014. Disponível em: <[https://www.gqee.unifei.edu.br/arquivos\\_upload/disciplinas/36/09-Artigo\\_Suportabilidade.pdf](https://www.gqee.unifei.edu.br/arquivos_upload/disciplinas/36/09-Artigo_Suportabilidade.pdf)>. Acesso em: 25 Julho 2017.
- FELBER, Luis A. **Regulação de tensão em subestações de distribuição de energia elétrica**. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá: [s.n.], 2010. 141p. Disponível em: <<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp140949.pdf>>. Acesso em: 13 Agosto 2017.
- FERNANDES, Pablo C. **Reguladr Automático de Tensão; influência do ganho no sistema elétrico de potência**. Universidade Federal de Itajubá. [S.l.]: [s.n.], 2011. 100p. Disponível em:<<https://saturno.unifei.edu.br/bim/0038599.pdf>>. Acesso em: 30 Agosto 2017.
- FITZGERALD, A. E; KINGSLEY, Charles; KUSKO, Alexander. **Máquinas elétricas**. 1. ed. São Paulo: McGraw-Hill, v. 1, 1975.
- FONSECA, Celso S. **Capacitores; Instalação e correção de Fator de Potência**. Centro Federal de Educação Tecnológica. [S.l.]: [s.n.], 2000. 36p. Disponível em:<<http://www.uff.br/lev/downloads/apostilas/Capacitores.pdf>>. Acesso: 15 Setembro 2017.

FRAGMAQ. Pensamentoverde.com. **Pensamento Verde**, 2014. Disponível em: <<http://www.pensamentoverde.com.br/sustentabilidade/entenda-como-funciona-uma-pequena-central-hidreletrica-pch/>>. Acesso em: 2 Julho 2017.

FRAGOAS, Alexandre G. **Estudo de caso do uso de bancos de capacitores em uma rede de distribuição primária- indicativos da sua viabilidade econômica**. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos: [s.n.], 2008. Disponível em:< [www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce.../Fragoas\\_Alexandre\\_Gracioli.pdf](http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce.../Fragoas_Alexandre_Gracioli.pdf)>. Acesso em: 15 Setembro 2017.

FRANCA, Morelato. **FENG**. Disponível em: <<http://www.feng.pucrs.br/~fdosreis/ftp/elobasicem/Aulas%202006%20II/cap3.pdf>>. Acesso em: 21 Junho 2017.

GOMES, Daniel R. **Estudos de solicitações elétricas em pontes retificadoras rotativas para excitatrizes "brushless"**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: [s.n.], 2010. Disponível em:< [www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-30112011.../TextoFinalRevisado.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-30112011.../TextoFinalRevisado.pdf)>. Acesso em: 25 Setembro 2017.

GUITARRA, GABRIEL B. **Estimativa de vazão para a implantação de micr-centrais hidrelétricas com utilização do SIG**. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos: [s.n.], 2012. Disponível em:< [www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce.../Guitarra\\_Gabriel\\_Bozzola.pdf](http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce.../Guitarra_Gabriel_Bozzola.pdf) >. Acesso em: 25 Março 2017.

INEE- Instituto Nacional de Eficiência Energética O QUE É GERAÇÃO DISTRIBUÍDA. Disponível em: <[http://www.inee.org.br/forum\\_ger\\_distrib.asp](http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp)>. Acesso em: 15 Setembro 2017.

JUNIOR, Alvaro M. et al. **Vantagens e desvantagens da energia hidráulica**. Unioeste. Cascavel: [s.n.], 2013. 9p. Disponível em: < <http://e-revista.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/view/8941>>. Acesso em: 15 Abril 2017.

KAGAN, Nelson; DE OLIVEIRA, Carlos C. B.; ROBBIA, Ernesto J. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 2. ed. [S.l.]: Blucher, v. 1, 2010.

KERSTING, William H. **Distribution system modeling and analysis**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, v. 1, 2007.

KUNDUR, Pracha. **Power System Stability and Control**. 1. ed. Nova York: McGraw-Hill, Inc., v. 1, 1994.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas industriais**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 1, 2012.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA Geração distribuída mantém crescimento com quase mil conexões. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset\\_publisher/32hLrOzMKwWb/content/geracao-distribuida-mantem-crescimento-com-quase-8mil-conexoes](http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/geracao-distribuida-mantem-crescimento-com-quase-8mil-conexoes)>. Acesso em: 15 Setembro 2017.

- PETRY, Clóvis A. **professorpetry.com.br**. Disponível em:  
<[http://professorpetry.com.br/Ensino/Repositorio/Docencia\\_CEFET/Eletronica\\_Potencia/2013\\_1/Apresentacao\\_Aula\\_07.pdf](http://professorpetry.com.br/Ensino/Repositorio/Docencia_CEFET/Eletronica_Potencia/2013_1/Apresentacao_Aula_07.pdf)>. Acesso em: 12Outubro 2017.
- PRUSMIAN Cables & Systems Baixa Tensão Uso Geral. Disponível em:  
<[http://br.prysmiangroup.com/br/files/dimensionamento\\_bt.pdf](http://br.prysmiangroup.com/br/files/dimensionamento_bt.pdf)>. Acesso em: 12 Outubro 2017.  
br.prysmiangroup.com.
- RANGEL, Rodrigo K.; KIENITZ, Karl H.; BRANDÃO, Mauricio P. **Sistema de inspeção de linhas de transmissão de energia elétrica utilizando vaículos aéreos não-tripulados**. ITA. S. José dos Campos: [s.n.], 2009. 9p. Disponível em:< <http://www.cta-dlr2009.ita.br/Proceedings/PDF/59018.pdf>>. Acesso em: 20 Julho 2017.
- REIS, Julio C. S.; KIKUCHI, George T. **Banco de capacitores para correção de fator de potência em indústria**. FEAU. São José dos Campos: [s.n.], 2015. 36p. Disponível em:<  
<http://www.uff.br/lev/downloads/apostilas/Capacitores.pdf>>. Acesso em: 02 Setembro 2017.
- SANTOS, J. N. D. **Cabos de Energia**. FEUP. [S.l.]: [s.n.]. Acesso em: 15 Setembro 2017.
- SHORT, T. A. **Electric power distribution equipment and systems**. 1. ed. Boca Raton: Taylor&Francis, v. 1, 2006.
- SIMAS, Eduardo. **dee.eng.ufba.br**. Disponível em: <<http://www.dee.eng.ufba.br/home/simas/05-EletPot-convAC-DC-mono-contr.pdf>>. Acesso em: 06 Outubro 2017.
- SOARES, Caio C. A. **Análise de sistemas de excitação de uma máquina síncrona**. Universidade de Brasília. Brasília: [s.n.], 2016. Acesso em: 15 Outubro 2017.
- SOUZA, S.A. et al. **Estimação de Parâmetros de um Sistema Elétrico de Potência Utilizando Algoritmos Genéricos**. [S.l.]: [s.n.], 2016. 8p. Disponível em:<  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1642449> >. Acesso em: 12 Julho 2017.
- VOLTIMUM. **VOLTIMUM**. Tabelas para cálculo rápido de quedas de tensão em BT.. Disponível em:  
<<https://www.voltimum.pt/artigos/artigos-tecnicos/tabelas-para-calculo>>. Acesso em: 03 Agosto 2017.
- WHITE PAPEL INSTITUTO ACENDE BRASUL Qualidade do fornecimnto de energia elétrica; confiabilidade, conformidade e presteza. Disponível em:  
<[http://www.acendebrasil.com.br/media/estudos/2014\\_WhitePaperAcendeBrasil\\_14\\_Qualidade\\_Fornecimento\\_Energia\\_Rev\\_0.pdf](http://www.acendebrasil.com.br/media/estudos/2014_WhitePaperAcendeBrasil_14_Qualidade_Fornecimento_Energia_Rev_0.pdf)>. Acesso em: 05Agosto 2017.  
<http://www.acendebrasil.com.br/estudos>.

## ANEXOS

Tabela 8 - Capacidade de condução de corrente com isolamento PVC.

Seções nominais mm <sup>2</sup>	Métodos de referência indicados na tabela 33											
	A1		A2		B1		B2		C		D	
	Número de condutores carregados											
	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Cobre												
0,5	7	7	7	7	9	8	9	8	10	9	12	10
0,75	9	9	9	9	11	10	11	10	13	11	15	12
1	11	10	11	10	14	12	13	12	15	14	18	15
1,5	14,5	13,5	14	13	17,5	15,5	16,5	15	19,5	17,5	22	18
2,5	19,5	18	18,5	17,5	24	21	23	20	27	24	29	24
4	26	24	25	23	32	28	30	27	36	32	38	31
6	34	31	32	29	41	36	38	34	46	41	47	39
10	46	42	43	39	57	50	52	46	63	57	63	52
16	61	56	57	52	76	68	69	62	85	76	81	67
25	80	73	75	68	101	89	90	80	112	96	104	86
35	99	89	92	83	125	110	111	99	138	119	125	103
50	119	108	110	99	151	134	133	118	168	144	148	122
70	151	136	139	125	192	171	168	149	213	184	183	151
95	182	164	167	150	232	207	201	179	258	223	216	179
120	210	188	192	172	269	239	232	206	299	259	246	203
150	240	216	219	196	309	275	265	236	344	299	278	230
185	273	245	248	223	353	314	300	268	392	341	312	258
240	321	286	291	261	415	370	351	313	461	403	361	297
300	367	328	334	298	477	426	401	358	530	464	408	336
400	438	390	398	355	571	510	477	425	634	557	478	394
500	502	447	456	406	656	587	545	486	729	642	540	445
630	578	514	526	467	758	678	626	559	843	743	614	506
800	669	593	609	540	881	788	723	645	978	865	700	577
1 000	767	679	698	618	1 012	906	827	738	1 125	996	792	652
Alumínio												
16	48	43	44	41	60	53	54	48	66	59	62	52
25	63	57	58	53	79	70	71	62	83	73	80	66
35	77	70	71	65	97	86	86	77	103	90	96	80
50	93	84	86	78	118	104	104	92	125	110	113	94
70	118	107	108	98	150	133	131	116	160	140	140	117
95	142	129	130	118	181	161	157	139	195	170	166	138
120	164	149	150	135	210	186	181	160	226	197	189	157
150	189	170	172	155	241	214	206	183	261	227	213	178
185	215	194	195	176	275	245	234	208	298	259	240	200
240	252	227	229	207	324	288	274	243	352	305	277	230
300	289	261	263	237	372	331	313	278	406	351	313	260
400	345	311	314	283	446	397	372	331	488	422	366	305
500	396	356	360	324	512	456	425	378	563	486	414	345
630	456	410	416	373	592	527	488	435	653	562	471	391
800	529	475	482	432	687	612	563	502	761	654	537	446
1 000	607	544	552	495	790	704	643	574	878	753	607	505

Fonte: Extraída de (ARAÚJO, 2011).

Tabela 9 - Capacidade de condução de corrente com isolamento EPR ou XLPE.

Seções nominais mm <sup>2</sup>	Métodos de referência indicados na tabela 33											
	A1		A2		B1		B2		C		D	
	Número de condutores carregados											
	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Cobre												
0,5	10	9	10	9	12	10	11	10	12	11	14	12
0,75	12	11	12	11	15	13	15	13	16	14	18	15
1	15	13	14	13	18	16	17	15	19	17	21	17
1,5	19	17	18,5	16,5	23	20	22	19,5	24	22	26	22
2,5	26	23	25	22	31	28	30	26	33	30	34	29
4	35	31	33	30	42	37	40	35	45	40	44	37
6	45	40	42	38	54	48	51	44	58	52	56	46
10	61	54	57	51	75	66	69	60	80	71	73	61
16	81	73	76	68	100	88	91	80	107	96	95	79
25	106	95	99	89	133	117	119	105	138	119	121	101
35	131	117	121	109	164	144	146	128	171	147	146	122
50	158	141	145	130	198	175	175	154	209	179	173	144
70	200	179	183	164	253	222	221	194	269	229	213	178
95	241	216	220	197	306	269	265	233	328	278	252	211
120	278	249	253	227	354	312	305	268	382	322	287	240
150	318	285	290	259	407	358	349	307	441	371	324	271
185	362	324	329	295	464	408	395	348	506	424	363	304
240	424	380	386	346	546	481	462	407	599	500	419	351
300	486	435	442	396	628	553	529	465	693	576	474	396
400	579	519	527	472	751	661	628	552	835	692	555	464
500	664	595	604	541	864	760	718	631	966	797	627	525
630	765	685	696	623	998	879	825	725	1 122	923	711	596
800	885	792	805	721	1 158	1020	952	837	1 311	1 074	811	679
1 000	1014	908	923	826	1332	1 173	1 088	957	1 515	1 237	916	767
Alumínio												
16	64	58	60	55	79	71	72	64	84	76	73	61
25	84	76	78	71	105	93	94	84	101	90	93	78
35	103	94	96	87	130	116	115	103	126	112	112	94
50	125	113	115	104	157	140	138	124	154	136	132	112
70	158	142	145	131	200	179	175	156	198	174	163	138
95	191	171	175	157	242	217	210	188	241	211	193	164
120	220	197	201	180	281	251	242	216	280	245	220	186
150	253	226	230	206	323	289	277	248	324	283	249	210
185	288	256	262	233	368	330	314	281	371	323	279	236
240	338	300	307	273	433	389	368	329	439	382	322	272
300	387	344	352	313	499	447	421	377	508	440	364	308
400	462	409	421	372	597	536	500	448	612	529	426	361
500	530	468	483	426	687	617	573	513	707	610	482	408
630	611	538	556	490	794	714	658	590	821	707	547	464
800	708	622	644	566	922	830	760	682	958	824	624	529
1 000	812	712	739	648	1061	955	870	780	1108	950	706	598

Fonte: Extraída de (ARAÚJO, 2011).

Tabela 10 - Capacidade de condução de corrente com isolamento PVC.

Seções nominais dos condutores mm <sup>2</sup>	Métodos de referência indicados na tabela 33						
	Cabos multipolares		Cabos unipolares <sup>1)</sup>				
	Dois condutores carregados	Três condutores carregados	Dois condutores carregados, justapostos	Três condutores carregados, em trifólio	Três condutores carregados, no mesmo plano		
					Justapostos	Espaçados	
	Método E	Método E	Método F	Método F		Método F	Horizontal Método G
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Cobre							
0,5	11	9	11	8	9	12	10
0,75	14	12	14	11	11	16	13
1	17	14	17	13	14	19	16
1,5	22	18,5	22	17	18	24	21
2,5	30	25	31	24	25	34	29
4	40	34	41	33	34	45	39
6	51	43	53	43	45	59	51
10	70	60	73	60	63	81	71
16	94	80	99	82	85	110	97
25	119	101	131	110	114	146	130
35	140	120	162	137	143	181	162
50	180	153	196	167	174	219	197
70	232	196	251	216	225	281	254
95	282	238	304	264	275	341	311
120	328	276	352	308	321	396	362
150	379	319	406	356	372	456	419
185	434	364	463	409	427	521	480
240	514	430	546	485	507	615	569
300	593	497	629	561	587	709	659
400	715	597	754	656	689	852	795
500	826	689	868	749	789	982	920
630	958	798	1005	855	905	1138	1070
800	1118	930	1169	971	1119	1325	1251
1 000	1 292	1 073	1 346	1 079	1 296	1 528	1 448
Alumínio							
16	73	61	73	62	65	84	73
25	89	78	98	84	87	112	99
35	111	96	122	105	109	139	124
50	135	117	149	128	133	169	152
70	173	150	192	166	173	217	196
95	210	183	235	203	212	265	241
120	244	212	273	237	247	308	282
150	282	245	316	274	287	356	327
185	322	280	363	315	330	407	376
240	380	330	430	375	392	482	447

Fonte: Extraída de (ARAÚJO, 2011).

**Tabela 11 - Continuação Tabela 10.**

Seções nominais dos condutores mm <sup>2</sup>	Métodos de referência indicados na tabela 33						
	Cabos multipolares		Cabos unipolares <sup>1)</sup>				
	Dois condutores carregados	Três condutores carregados	Dois condutores carregados, justapostos	Três condutores carregados, em trifólio	Três condutores carregados, no mesmo plano		
					Justapostos	Espaçados	
	Método E	Método E	Método F	Método F		Método F	Horizontal Método G
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Alumínio							
300	439	381	497	434	455	557	519
400	528	458	600	526	552	671	629
500	608	528	694	610	640	775	730
630	705	613	808	711	640	775	730
800	822	714	944	832	875	1050	1000
1 000	948	823	1 092	965	1 015	1 213	1 161

<sup>1)</sup> Ou, ainda, condutores isolados, quando o método de instalação permitir.

Fonte: Extraída de (ARAÚJO, 2011).

**Tabela 12 - Critério de condução de corrente com isolamento EPR ou XLPE.**

Seções nominais dos condutores mm <sup>2</sup>	Métodos de referência indicados na tabela 33						
	Cabos multipolares		Cabos unipolares <sup>1)</sup>				
	Dois condutores carregados	Três condutores carregados	Dois condutores carregados, justapostos	Três condutores carregados, em trifólio	Três condutores carregados, no mesmo plano		
					Justapostos	Espaçados	
	Método E	Método E	Método F	Método F		Método F	Horizontal Método G
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Cobre							
0,5	13	12	13	10	10	15	12
0,75	17	15	17	13	14	19	16
1	21	18	21	16	17	23	19
1,5	26	23	27	21	22	30	25
2,5	36	32	37	29	30	41	35
4	49	42	50	40	42	56	48
6	63	54	65	53	55	73	63
10	86	75	90	74	77	101	88
16	115	100	121	101	105	137	120
25	149	127	161	135	141	182	161

Fonte: Extraída de (ARAÚJO, 2011).

Tabela 13 - Continuação Tabela 12.

Seções nominiais dos condutores mm <sup>2</sup>	Métodos de referência indicados na tabela 33						
	Cabos multipolares		Cabos unipolares <sup>1)</sup>				
	Dois condutores carregados	Três condutores carregados	Dois condutores carregados, justapostos	Três condutores carregados, em trifólio	Três condutores carregados, no mesmo plano		
					Justapostos	Espaçados	
	Método E	Método E	Método F	Método F		Método F	Horizontal Método G
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Cobre							
35	185	158	200	169	176	226	201
50	225	192	242	207	216	275	246
70	289	246	310	268	279	353	318
95	352	298	377	328	342	430	389
120	410	346	437	383	400	500	454
150	473	399	504	444	464	577	527
185	542	456	575	510	533	661	605
240	641	538	679	607	634	781	719
300	741	621	783	703	736	902	833
400	892	745	940	823	868	1 085	1 008
500	1 030	859	1 083	946	998	1 253	1 169
630	1 196	995	1 254	1 088	1 151	1 454	1 362
800	1 396	1 159	1 460	1 252	1 328	1 696	1 595
1 000	1 613	1 336	1 683	1 420	1 511	1 958	1 849
Alumínio							
16	91	77	90	76	79	103	90
25	108	97	121	103	107	138	122
35	135	120	150	129	135	172	153
50	164	146	184	159	165	210	188
70	211	187	237	206	215	271	244
95	257	227	289	253	264	332	300
120	300	263	337	296	308	387	351
150	346	304	389	343	358	448	408
185	397	347	447	395	413	515	470
240	470	409	530	471	492	611	561
300	543	471	613	547	571	708	652
400	654	566	740	663	694	856	792
500	756	652	856	770	806	991	921
630	879	755	996	899	942	1 154	1 077
800	1 026	879	1 164	1 056	1 106	1 351	1 266
1 000	1 186	1 012	1 347	1 226	1 285	1 565	1 472

<sup>1)</sup> Ou, ainda, condutores isolados, quando o método de instalação permitir.

Fonte: Extraída de (ARAÚJO, 2011).

**Tabela 14 - Coeficientes para cálculo da queda de tensão.**

Seções Nominais (mm <sup>2</sup> )	Eletroduto e eletrocalha (A) (material não-magnético)			
	Circuito monofásico		Circuito trifásico	
	FP=0,8	FP=0,95	FP=0,8	FP=0,95
1,5	23,3	27,6	20,2	23,9
2,5	14,3	16,9	12,4	14,7
4	8,96	10,6	7,79	9,15
6	6,03	7,07	5,25	6,14
10	3,63	4,23	3,17	3,67
16	2,32	2,68	2,03	2,33
25	1,51	1,71	1,33	1,49
35	1,12	1,25	0,98	1,09
50	0,85	0,94	0,76	0,82
70	0,62	0,67	0,55	0,59
95	0,48	0,5	0,43	0,44
120	0,4	0,41	0,36	0,36
150	0,335	0,34	0,31	0,3
185	0,3	0,29	0,27	0,25
240	0,26	0,24	0,23	0,21
300	0,23	0,2	0,21	0,18
400	0,21	0,17	0,19	0,15
500	0,19	0,16	0,17	0,14

**Fonte: Extraída e adaptada de (PRUSMIAN Cables & Systems, 2017).**