

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CAÁ MARCINIAK FONSECA

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO

DIMENSIONAMENTO DE BARRAMENTOS EM SUBESTAÇÕES

Porto Alegre

2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DIMENSIONAMENTO DE BARRAMENTOS EM SUBESTAÇÕES

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Luiz Tiarajú Loureiro

Porto Alegre

2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CAÁ MARCINIAC FONSECA

DIMENSIONAMENTO DE BARRAMENTOS EM SUBESTAÇÕES

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Campinas – Campinas, Brasil

Eng. Roberto Ricardo Simões de Freire

Graduado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Porto Alegre, Dezembro de 2009.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus avós, exemplos de estudo e dedicação.

Á minha esposa pela paciência e apoio durante o projeto.

AGRADECIMENTOS

À minha avó Ely Marciniak pelo altruísmo na luta pela educação no Brasil e pelo incentivo à busca de conhecimento.

Ao meu avô Ignácio Marciniak pelo exemplo de racionalidade e amor a ciência, o que me ajudou a escolher a engenharia.

A minha esposa Márcia pelo amor, amizade, apoio e por acreditar na realização deste sonho.

A minha mãe, irmãos e restante da família pelo carinho e incentivo ao longo desses anos de curso, mesmo estando longe.

Aos colegas de prefeitura, em especial a Maria Conceição Goulart, pela compreensão e apoio nessa etapa final.

Aos colegas de engenharia elétrica pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso e apoio na busca por bibliografia e pesquisas relacionadas ao trabalho.

Ao Eng. Roberto Ricardo Simões de Freire pela oportunidade de aprendizado e auxílio no começo do trabalho.

Ao professor Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro pela orientação no trabalho.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul por oferecer um ensino público, gratuito e de qualidade.

RESUMO

Este trabalho visa conceituar barramentos em subestações e apresentar uma sistemática para escolha e dimensionamento desses condutores. Para atingir esse objetivo, foram estudados os métodos comumente utilizados de dimensionamento. Este dimensionamento é dividido segundo os critérios elétrico, térmico, mecânico e de efeito corona. Este documento é fruto de pesquisas sobre barramentos e subestações. Como a disponibilidade de bibliografia teórica específica é pequena, talvez inexistente no Brasil, muito deste trabalho se deve ao estudo de cabeamento aéreo em linhas de transmissão. Também são apresentadas conclusões e considerações finais a respeito dos métodos encontrados, roteiro de dimensionamento e parâmetros climáticos adotados no Brasil

Palavras-chaves: Engenharia Elétrica. Sistemas de Potência. Subestações. Barramentos. Ampacidade. Dimensionamento. Condutores.

ABSTRACT

This paper aims to conceptualize buses in substations and present a systematic for selecting and sizing these conductors. To achieve this goal, the most used methods of sizing of conductors was studied. That sizing is is divided according to the criteria electrical, thermal, mechanical and corona. This document is the result of research on buses and substations. As the availability of specific theoretical bibliography is small, maybe nonexistent in Brazil, much of this work is due to the study of wiring in air lines. We also present conclusions and final considerations about the methods found, script design and climatic parameters adopted in Brazil

Keywords: Electrical Engineering. Power Systems. Substations. Buses. Ampacity. Sizing. Conductors.

Sumário

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 11 |
| 1.1 Motivação..... | 11 |
| 1.2 Apresentação do Problema e Objetivos..... | 12 |
| 1.3 Organização do Trabalho..... | 12 |
| 2 BARRAMENTOS..... | 14 |
| 2.1 Barramentos Condutores Em Subestações..... | 14 |
| 2.2 Barramentos Rígidos e Flexíveis..... | 16 |
| 2.2.1 Barramentos Rígidos..... | 17 |
| 2.2.2 Barramentos Flexíveis..... | 19 |
| 3 DIMENSIONAMENTO DE BARRAMENTOS..... | 26 |
| 3.1 Critério Elétrico – Capacidade de Condução de Corrente em Regime Permanentemente | 26 |
| 3.1.1 Método IEEE..... | 27 |
| 3.1.1.1 Balanço Térmico..... | 28 |
| 3.1.1.2 Transmissão de calor por convecção..... | 29 |
| 3.1.1.2.1 Convecção forçada..... | 29 |
| 3.1.1.2.2 Convecção natural..... | 31 |
| 3.1.1.3 Perdas por radiação..... | 32 |
| 3.1.1.4 Aquecimento solar..... | 33 |
| 3.1.1.5 Resistência Elétrica do condutor..... | 37 |
| 3.1.2 Método CIGRÉ..... | 41 |
| 3.1.2.1 Transferência de calor por convecção..... | 43 |
| 3.1.2.1.1 Resfriamento por convecção forçada..... | 45 |
| 3.1.2.1.2 Resfriamento por convecção natural..... | 46 |
| 3.1.2.1.3 Resfriamento por convecção a baixas velocidades de vento..... | 47 |
| 3.1.2.2 Resfriamento por radiação..... | 47 |
| 3.1.2.3 Aquecimento por radiação solar..... | 48 |
| 3.1.2.4 Aquecimento por efeito joule..... | 50 |
| 3.1.2.5 Resistência elétrica do condutor..... | 51 |
| 3.1.2.6 Distribuição radial de temperatura..... | 52 |
| 3.2 Critério Térmico – Capacidade de Condução de Corrente em Regime de Curto-Circuito | 53 |
| 3.3 Critério Mecânico – Dimensionamento quanto a Esforços e Vibrações..... | 62 |
| 3.3.1 Dimensionamento mecânico ao curto-circuito..... | 62 |
| | 66 |
| 3.3.2 Dimensionamento estático dos barramentos..... | 67 |
| 3.3.3. Dimensionamento estático dos barramentos..... | 70 |
| 3.4 Dimensionamento Sob Efeito Corona..... | 73 |
| 4 METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO..... | 76 |
| 4.1 Roteiro de Dimensionamento..... | 76 |
| 4.2 Diferenças Entre Métodos IEEE e CIGRÉ para Cálculo da Capacidade de Condução de Corrente em Condutores Aéreos..... | 79 |
| 4.3 Condições Climatológicas no Brasil..... | 82 |
| 4.4 Perfil Normalmente Escolhido para Barramentos Rígidos..... | 85 |
| 4.5 O Uso de Programas Computacionais..... | 85 |
| 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS..... | 87 |
| 6 REFERÊNCIAS..... | 90 |

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Fig. 2.1 – Perfis de barramentos mais encontrados no mercado..... | 18 |
| Fig. 2.2 – Cabo AAC..... | 19 |
| Fig. 2.3 – Cabo ACSR..... | 20 |
| Fig. 2.4 – Cabo ACAR..... | 21 |
| Fig. 2.5 – Cabo TW x cabo standard..... | 23 |
| Fig. 2.6 – Cabo VR..... | 24 |
| Fig. 2.7 – Cabo OVAL ACSR..... | 25 |
| Fig. 2.8 – Cabo SDC..... | 25 |
| Fig. 2.9 – Cabo LNC..... | 25 |
| Fig. 3.1 – Relação entre o Diâmetro e a Capacidade de Condução de Corrente do Condutor..... | 27 |
| Fig. 3.2 – Relação entre a velocidade do vento e a corrente alternada no condutor..... | 32 |
| Fig. 3.3 – Relação entre resistência e diâmetro do condutor..... | 41 |
| Fig. 3.4 – Rugosidade do cabo..... | 45 |
| Fig. 3.5 – Passo de corrente..... | 54 |
| Fig. 3.6 – Diagrama esquemático do curto-circuito..... | 55 |
| Fig. 3.7 – Decomposição da corrente de curto-circuito..... | 56 |
| Fig. 3.8 – Fatores m e n..... | 58 |
| Fig. 3.9 – Fator de assimetria..... | 59 |
| Fig. 3.10 – Módulo de Resistência e Momento de Inércia..... | 66 |
| Fig. 3.11 – Catenária..... | 68 |
| Fig. 3.12 – Comprimentos Críticos segundo a frequência própria..... | 72 |
| Fig. 4.1 – Fluxograma simplificado – dimensionamento de barramentos..... | 78 |
| Fig. 4.2 – Mapa de irradiação solar global no Brasil – solstício de verão..... | 83 |

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

ONS: Operador Nacional do Sistema

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABAL: Associação Brasileira do Alumínio

NBR: Norma Brasileira

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

IACS: International Annealed Copper Standards

IEC: International Electrotechnical Commission

ASTM: American Society for Testing and Materials

ALCAN: Aluminum Company of Canada

AT: Alta Tensão

MT: Média Tensão

SE: Subestação

AAC: All Aluminum Conductor

ACSR: Aluminum Conductor, Steel Reinforced

AAAC: All Aluminum Conductor, Alloy Reinforced

TW: Trapezoidal Wire

VR: Vibration Resistance

SDC: Self-Damping Conductor

LNC: Low Noise Conductor

ACSS: Aluminum Conductor, Steel-Supported

CAA: Condutor de Alumínio de Alma de Aço

CA: Condutor de Alumínio

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Subestações são instalações elétricas de alta potência que funcionam como ponto de controle e transferência em um sistema de transmissão elétrica, direcionando e controlando fluxo energético, transformando os níveis de tensão e funcionando como pontos de entrega para consumidores industriais.

O desenvolvimento socio-econômico que o Brasil vem sofrendo nos últimos anos, faz com que seja necessária uma maior oferta de energia no país. Isso só será possível com investimentos em geração e transmissão. Conseqüentemente, novas subestações são também incluídas nesse processo na medida que são parte integrante do sistema energético, no auxílio ao controle e distribuição da energia aos centros consumidores.

Neste cenário, o projeto de subestações é de grande relevância. E o dimensionamento de condutores é um fator importante ao projeto. O correto dimensionamento dos condutores, além de obviamente ser vital para a segurança das instalações, equipamentos e operadores, também tem influência no custo final do projeto, tornando assim de grande valor e interesse para a viabilidade do projeto.

O dimensionamento de barramentos condutores para subestações é um procedimento trabalhoso, além ser de uma certa complexidade. É um processo que implica a execução de numerosos cálculos e a consulta de vários quadros e tabelas, no sentido de dimensionar corretamente o barramento e adequá-lo para a subestação em questão. Muitos desses cálculos devem ser executados de maneira iterativa.

Denota-se então a importância de um roteiro que agregue toda a informação necessária ao dimensionamento de barramentos e capaz de usar essa informação em conjunto com os dados relativos à subestação, para executar os cálculos de dimensionamento necessários. Este documento

apresenta as principais características dos condutores utilizados em subestações, bem como os métodos mais comumente usados para o seu dimensionamento.

A falta de bibliografia específica para dimensionamento de barramentos em subestações no Brasil também é um fator de motivação, pois faz-se necessária maior documentação em língua portuguesa.

1.2 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVOS

O trabalho objetiva primeiramente conceituar barramentos rígidos e flexíveis utilizados em subestações a fim de embasar a proposta de sistemática para o dimensionamento.

Na memória descritiva referente ao projeto de uma subestação, é necessário a apresentação da justificação e cálculos relativos aos elementos utilizados na mesma. Sendo assim, mesmo tendo um programa computacional que dimensione o barramento ou tabelas de utilização de condutores para uma determinada região, os cálculos que justifiquem a escolha desse barramento devem ser apresentados. Portanto, é necessária base teórica que guie este processo. Este é o objetivo principal deste trabalho.

Em se tratando de dimensionamento de cabos aéreos, os métodos apresentados pelo CIGRE e pela IEEE são os mais conhecidos e aceitos internacionalmente, mas diferem em alguns aspectos. É também objetivo deste trabalho apresentar os dois métodos e procurar elucidar pontos de discordância.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para alcançar todos os objetivos propostos, este documento está dividido em cinco capítulos. O presente capítulo, destina-se a fazer uma introdução aos problemas que serão discutidos e explicar o porquê deste projeto.

O capítulo 2 destina-se a conceituar barramento rígidos e flexíveis usados em subestações, embasamento necessário ao capítulo subsequente.

O capítulo 3 trata do dimensionamento de barramentos propriamente dito. Neste capítulo são apresentados os métodos mais utilizados de dimensionamento. O capítulo é subdividido segundo os critérios elétrico, térmico, mecânico e efeito corona. O dimensionamento elétrico recebe maior ênfase por acreditar o autor que tem maior relevância em projetos de subestações, visto que é fator determinante para o cálculo de barramentos flexíveis que são mais usados em subestações no Brasil devido a seu menor custo em relação aos barramentos rígidos.

O capítulo 4 faz uma análise dos métodos apresentados no capítulo 3, apresenta uma metodologia de cálculo agregando todos os critérios e considerações finais a respeito do dimensionamento.

Os resultados e conclusões do trabalho são apresentados no Capítulo 5.

2 BARRAMENTOS

2.1 BARRAMENTOS CONDUTORES EM SUBESTAÇÕES

A energia elétrica é transportada em Alta Tensão (AT) até às subestações através de linhas aéreas de condutores nus, sendo a sua ligação feita diretamente através de um pórtico de recepção presente na subestação ou alternativamente através de cabos isolados. A partir deste ponto, a função de uma subestação é a grosso modo, converter a energia com níveis de tensão altos em energia com níveis de tensão mais baixos, por exemplo, em Média Tensão (MT).

O elemento da subestação que desempenha esta função, e que pode ser entendido como o coração da subestação, é o transformador de potência, que recebe no seu primário a energia em AT, por exemplo, e no secundário entrega a mesma energia mas com níveis de tensão mais baixos (MT).

Porém, para que este processo ocorra em segurança, a rede de AT não pode ser diretamente ligada ao transformador de potência. Deve primeiro passar por um conjunto de outros equipamentos, como chaves seccionadoras, disjuntores, transformadores de corrente, transformadores de tensão, para-raios, que garantem a proteção da instalação no caso de ocorrer algum defeito que possa colocar em risco a integridade da mesma e ajudam no controle de fluxo de potência da subestação.

Sendo assim, entre a chegada da energia à subestação e a sua chegada até o transformador de potência, passando por toda a aparelhagem de proteção e medida, o meio de conexão entre as diversas partes é o barramento.

Entende-se por barramento, um grupo de condutores que serve de conexão comum para dois ou mais circuitos. Os condutores de um barramento, tem normalmente a forma de uma barra.

Já no âmbito das instalações elétricas industriais, no qual se incluem as subestações, conceitua-se os barramentos como sendo um grupo de condutores elétricos, normalmente nus, pintados ou não, eventualmente encapsulados, destinados a permitir o transporte de altas correntes entre dois pontos, ou a proporcionar uma distribuição de correntes com varias alimentações e

múltiplas saídas. Em ambos os casos esse fim deve ser atingido de maneira funcional, segura, estética e econômica [12].

Os barramentos podem ser:

- Rígidos;
- Flexíveis;

No que diz respeito a ligações feitas com barramentos flexíveis, utiliza-se normalmente o cabo nu e são encontrados principalmente nas subestações de grandes dimensões. Possuem no entanto alguns pontos negativos. Sendo constituídos por material maleável, estão mais sujeitos a esforços eletrodinâmicos e oscilações provenientes do vento ou chuva o que fará com que seja necessário aumentar a distância entre fases de modo a garantir a segurança. Isto pode ser um problema complicado em situações onde o espaço destinado à subestação é limitado, situação que ocorre frequentemente em subestações particulares, como em indústrias por exemplo. A distância ao solo é outro ponto de diferenciação quando se utilizam barramentos flexíveis, devido às flechas.

Em contrapartida, tratando-se de subestações de grandes dimensões, estes condutores são mais vantajosos, pois para situações em que são necessárias ligações que cubram “grandes” distâncias, a utilização de barramentos flexíveis irá proporcionar o uso de um menor número de estruturas metálicas. Além disso os cabos condutores são relativamente mais baratos que os perfis rígidos.

Os condutores rígidos são basicamente perfis fabricados em material condutor, podendo tomar várias formas, mas sendo o perfil tubular o utilizado nas subestações.

Em suma os condutores rígidos são utilizados quando a otimização do espaço ou fatores estéticos são os principais parâmetros e condutores flexíveis são preferidos quando o fator econômico é o mais importante na escolha do barramento.

2.2 BARRAMENTOS RÍGIDOS E FLEXÍVEIS

Os metais mais usados como condutores em cabos elétricos e barramentos são o cobre e o alumínio.

O cobre é obtido impuro por tratamento dos metais sulforosos que o contêm e posteriormente purificado por processos eletrolíticos. A sua elevada ductividade permite obter fios muito finos, embora o endurecimento causado pelo processo limite a sua flexibilidade, obrigando ao recozimento dos mesmos.

A operação de estiramento é chamada trefilagem e a reunião de vários fios ou grupos de fios forma um condutor para isolamento, que será tanto mais flexível quanto mais finos forem os fios e cuja seção corresponde à soma das secções dos fios individuais.

O cobre, apesar das suas múltiplas qualidades, tem inconvenientes como densidade alta e custo elevado, o que muitas vezes leva à sua substituição por outro metal mais leve e econômico.

O alumínio é a alternativa mais viável. O alumínio, em contato com o ar, cobre-se de uma película de óxido (Alumina) que o protege de futuras oxidações, embora tenha o inconveniente de ser isolante e dificultar a execução de conexões elétricas. Um outro problema é que o alumínio em contato com metais mais nobres (ferro, cobre, etc.) e em presença de umidade constitui um par galvânico que o corrói lentamente até à desagregação. Mas estes inconvenientes são controláveis e o alumínio tem ampla aplicação principalmente em linhas aéreas e cabos de grande seção para alta e baixa tensão. Devido à sua baixa densidade (cerca de 1/3 da do Cobre) e considerando a relação entre as resistividades, o cobre pode ser substituído por metade do seu peso em alumínio, para a mesma resistência eléctrica. Além disto o alumínio tem um custo menor do que o cobre.

Um outro fator em favor ao alumínio é que quando ocorre um arco de curto-circuito, nos barramentos se formam resíduos apenas sob a forma de poeiras não condutoras de óxido de alumínio, de forma que não é depositado metal sobre os isoladores e aparelhagem vizinha.

As propriedades mecânicas do Alumínio são bastante inferiores às do cobre e, devido à baixa

resistência à tração é usado na forma de ligas ou reforçado com fios de aço no caso das linhas aéreas.

A resistividade padrão do Alumínio a 20°C é:

$$\frac{1}{35,38} = 0,028264 \Omega \cdot mm^2/m \quad 2.1$$

2.2.1 BARRAMENTOS RÍGIDOS

Para barramentos rígidos em subestações podem ser usados os seguintes tipos de perfis:

- Vergalhões: seções circulares maciças (fig 2.1). Usados para baixas correntes em pequenas subestações. Eram usados em pequenas subestações e cubículos de baixa tensão.
- Tubos: possuem melhor refrigeração do que os vergalhões devido ao maior perímetro, portanto são melhores para transportar mais altas correntes. Além disso, a forma tubular apresenta melhor comportamento mecânico do que a forma maciça. São frequentemente usados para subestações de até 138kV.
- Barras chatas: podem ter seções retangulares ou possuem formas em U, em V ou em C. Possuem a vantagem de ter uma grande superfície de resfriamento, por isso são usadas para altas ampacidades, como por exemplo em subestações com baixa tensão e alta corrente.

A fig 2.1 mostra os perfis mencionados que são também os mais encontrados no mercado.



Fig. 2.1 – Perfis de barramentos mais encontrados no mercado

Embora sejam encontrados diversos tipos de perfis de alumínio, na prática os perfis aplicados em subestações são essencialmente de seção tubular. Os perfis tubulares são normalmente designados pelo seu diâmetro externo (D) e diâmetro interno (d). Algumas normas preferem utilizar a nomenclatura $D \times e$, onde e é a espessura da parede do tubo.

Outra questão a respeito dos barramentos rígidos é se este é pintado ou não. A principal diferença entre uma e outra versão é que um barramento pintado pode transportar uma maior corrente em regime permanente, e é obviamente mais caro. Porém, no projeto de subestações expostas ao tempo são utilizados barramento nus, devido ao fato de que, os barramentos irão estar, assim como os demais equipamentos, sujeitos à atuação de intempéries como chuva, vento, granizo, poluição. Estes fatores acabam por deteriorar o tratamento dado ao barramento. Com essa deterioração o barramento irá perder parte de suas propriedades e poderá deixar de ser adequado à instalação em questão, visto que os cálculos de dimensionamento foram feitos considerando os condutores pintados.

2.2.2 BARRAMENTOS FLEXÍVEIS

Em barramentos flexíveis são usados normalmente cabos de cobre e alumínio. São tipos de cabos usados em sistemas de potência:

- AAC (All Aluminum Conductor): todos os condutores de alumínio (fig. 2.2). Tem uma alta relação peso-condutividade. Utiliza fios de alumínio do tipo 1350-H19 e possui uma condutividade de 61,2% IACS (International Annealed Copper Standards), a mais alta entre todos os condutores utilizados em linhas aéreas. Devido a isso, é recomendado [29] para o uso em áreas urbanas com limitações de espaço onde vãos curtos e alta

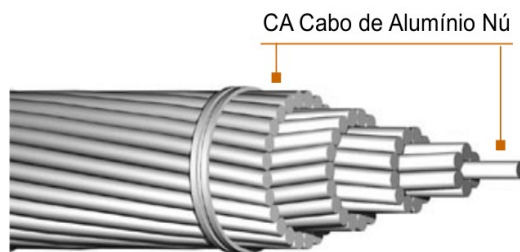


Fig. 2.2 – Cabo AAC

condutividade são necessários. É o cabo mais utilizado em subestações.

- ACSR (Aluminum Conductor, Steel Reinforced): condutores de alumínio com alma de aço (CAA). Devido a sua alta resistência mecânica, tem mais alta ampacidade para a mesma seção de condutor (medida em área de seção transversal de alumínio, o aço é desconsiderado). Possui fios de alumínio do tipo 1350-H19 na periferia e fios de aço no núcleo. É recomendado para o uso em linhas de transmissão em áreas rurais onde os vãos são maiores. O aço faz com que o condutor fique mais pesado, tendo normalmente de 11 a 18% do peso do condutor [26]. Valores típicos para a proporção entre fios de alumínio e aço são 18/1, 45/7, 72/7 e 84/19 mas podem ocorrer variações a fim de se obter maior resistência a tração. A figura 2.3 mostra exemplos de diversos cabos ACSR.

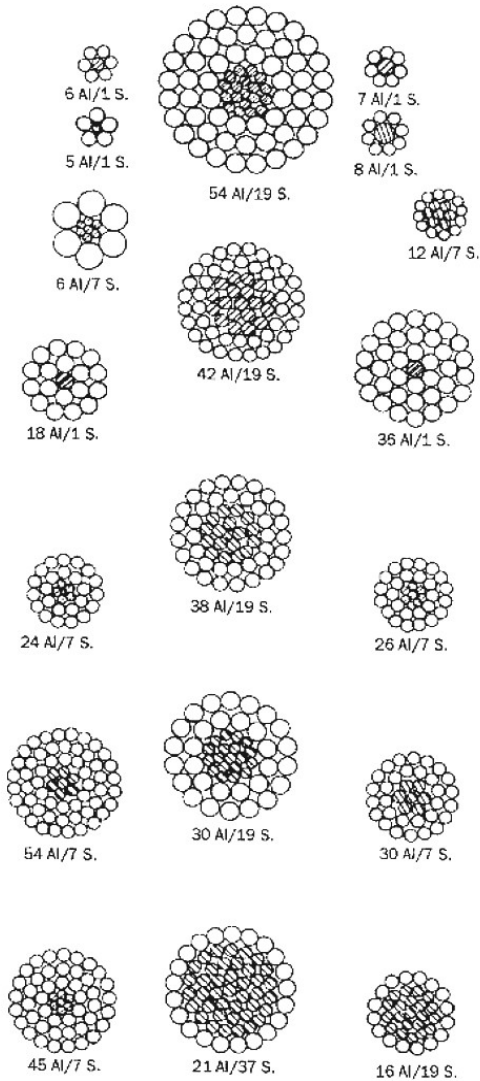


Fig. 2.3 – Cabo ACSR

Devido à presença do núcleo de aço, linhas desenhadas com ACSR se deformam menos do que as que usam outros condutores, produzindo menos flecha para uma mesma dada tensão nos cabos. Portanto, a temperatura máxima do condutor pode ser aumentada de forma a permitir um nível térmico mais alto ao substituir um outro condutor padrão pelo ACSR.

A alta resistência térmica do ACSR permite ser instalado em regiões sujeitas a grandes rajadas de vento. O cabo ACSR também tem menos probabilidade de romper ao ser atingido por objetos.

- AAAC (All Aluminum Alloy Conductor): todos os condutores de liga de alumínio. É feito de fios de alumínio do tipo 6201-T81. Tem alta resistência mecânica e ampacidade semelhante aos dois primeiros. Em comparação com um cabo ACSR de mesmo diâmetro, o cabo AAAC tem um nível térmico semelhante, relação peso-resistência mecânica maior, menores perdas elétricas e resistência a corrosão superior. É usado em áreas costeiras e demais áreas onde o cabo ACSR é proibido por causa do excesso de corrosão.

- ACAR (Aluminum Conductor, Alloy Reinforced): condutor de alumínio, reforçado com fios de liga de alumínio. Consiste de uma mistura de fios de alumínio 6201-T81 e 1350-H19 de mesmo diâmetro. Devido a terem o mesmo diâmetro, os fios podem ser intercambiáveis com o objetivo de otimizar as propriedades do cabo ACAR para cada aplicação em particular. Por exemplo, aumentando-se o número de fios 6201 pode-se atingir uma relação peso-resistência igual ao do cabo ACSR. Este condutor apresenta também uma excelente resistência à corrosão. A fig. 2.4 mostra alguns dos padrões de fios do cabo ACAR.

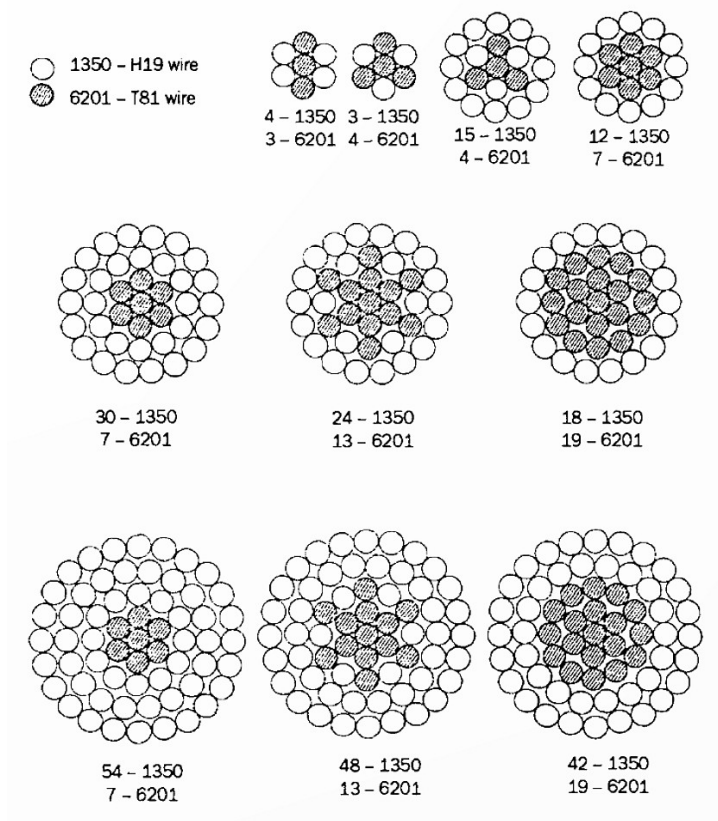


Fig. 2.4 – Cabo ACAR

As subestações, em geral possuem vãos curtos, o que reduz a necessidade de cabos com alta resistência mecânica. Por este motivo, os cabos AAC são os mais utilizados.

Existem ainda os condutores modificados. Esses condutores são adaptações na construção do condutor com o objetivo de melhorar sua performance sob certas condições. Essas modificações podem ser feitas a fim de se aumentar o nível térmico do condutor mantendo o mesmo diâmetro,

aumento do auto-amortecimento do condutor ajudando na diminuição das vibrações eólicas e até mesmo aumento na tração mecânica da linha produzindo diminuição na flecha. As modificações podem vir na forma de alterações do formato dos fios, mudança dos graus de têmpera do alumínio dos fios, utilização de direntes tipos de revestimento para proteção à corrosão do núcleo de aço em cabos compostos ou também na alteração da configuração geométrica do condutor a fim de produzir variação no perfil do vento. Todas estas modificações podem ser usadas separadamente ou em combinação atingindo-se assim as propriedades desejadas e otimizando a performance.

Os cabos chamados TW (Trapezoidal Wire, ou Trapwire), são derivados da construção convencional tendo apenas os seus fios em forma de trapézio. Nesse tipo de construção, os cabos de metal homogêneo (AAC e AAAC) podem ter todos os fios em forma de trapézio, exceto o centro. Já nos cabos não homogêneos (ACSR e ACAR), os múltiplos fios podem ser arranjados de forma a permanecer um material sobre o outro formando camadas (ver fig. 2.5). Isto se deve a diferença nos coeficientes de dilatação dos dois materiais.

O TW é uma construção compacta tendo uma redução no diâmetro de aproximadamente 10% em comparação com o mesmo tipo e com a mesma área. Devido a grande compactação do TW, mais alumínio pode ser adicionado mantendo o mesmo diâmetro do condutor padrão. O alumínio adicional de aproximadamente 20% a 25% reduz a resistência elétrica do condutor, aumentando assim a capacidade de condução de corrente do mesmo diâmetro de condutor de 8% a 10%.

O condutor de fio trapezoidal também têm outras características desejáveis. O desenho compacto resulta numa melhora nas características de corrosão. Além disso, testes indicam que o cabo TW apresenta menor número de fios quebrados ao longo do tempo em relação ao cabo tradicional.

A fig 2.5 mostra a comparação entre os cabos TW e os cabos tradicionais no que diz respeito a área e ao diâmetro.

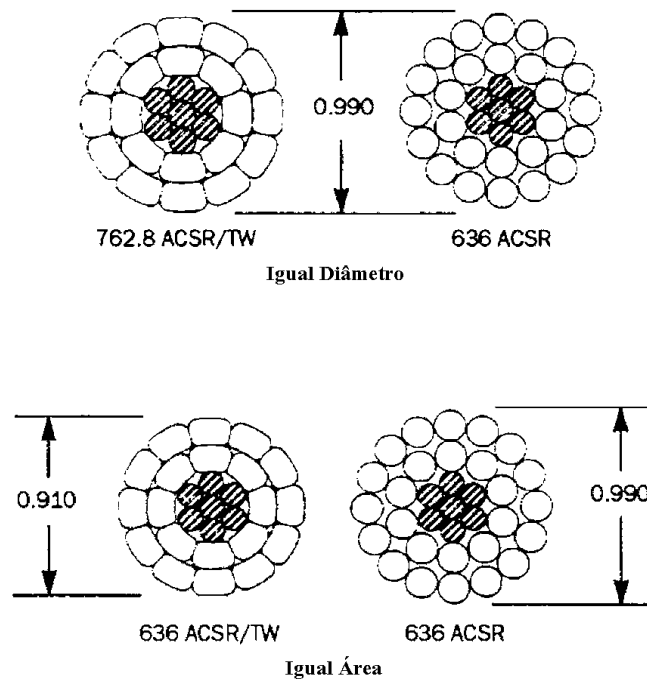


Fig. 2.5 – Cabo TW x cabo standard

Os cabos ACSS (Aluminum Conductor, Steel-Supported) são cabos com construção similar aos ACSR mas usando fios de alumínio integralmente recozidos (têmpera zero). Sob condições típicas de operação, o ACSS basicamente permite que toda a carga mecânica seja carregada pelo núcleo de aço. O cabo ACSS tem condutividade de 63% IACS devido a sua alta maleabilidade. Por ser recozido, o condutor pode operar sob temperaturas acima de 200°C sem perda no sua resistência mecânica. Além disso, o condutor apresenta uma baixa tensão nos fios de alumínio, o que aumenta a característica de auto-amortecimento sob condições climáticas desfavoráveis.

Esses cabos são frequentemente preferidos para aplicações onde altas correntes são requeridas em situações de emergência.

Existem ainda os cabos VR (Vibration Resistant) que são resistentes às vibrações causadas pelo vento. O cabo consiste de dois condutores espiralados um sobre o outro. O alinhamento vertical dos dois condutores, ou seja 180° de rotação ocorre aproximadamente a cada 3 metros. Se observarmos a seção do cabo em intervalos pequenos, conforme a figura 2.6, podemos notar que é

formada uma figura rotativa com os dois condutores no sentido anti-horário.

Nos cabos VR a amplitude e frequência de vibração devido a interferências climáticas são reduzidas ou eliminadas, devido a sua seção transversal conjugada não circular. A frequência e amplitude das vibrações causadas pelo vento e consequente fadiga do material são também reduzidas devido a variação do perfil ao longo do comprimento do condutor. Como resultado, os condutores VR podem ser instalados em locais onde haja altas cargas de tensão sendo menor a necessidade de amortecedores.

A fig 2.6 mostra a geometria do cabo VR.

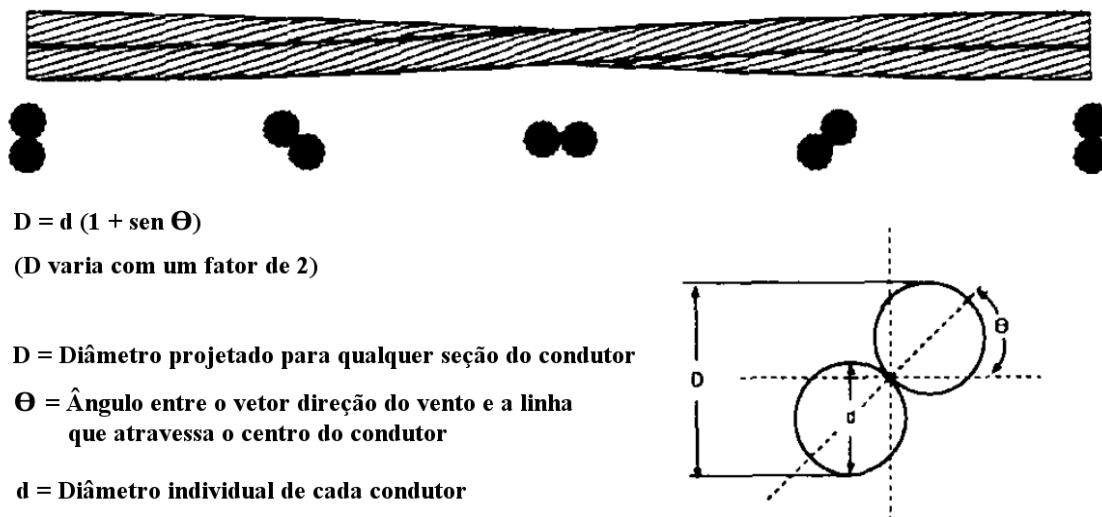


Fig. 2.6 – Cabo VR

Existem ainda outras novas tecnologias usadas em cabos como o OVAL ACSR (fig. 2.7) que possui uma geometria de seção transversal oval diminuindo os efeitos do vento, o cabo SDC (Self-Damping Conductor) (fig. 2.8) que possui auto amortecimento, absorvendo parte das forças sobre o cabo e o cabo LNC (Low Noise Conductor) (fig 2.9) que tem sua geometria adaptada a reduzir o ruído causado pelo vento (não pelo efeito corona).

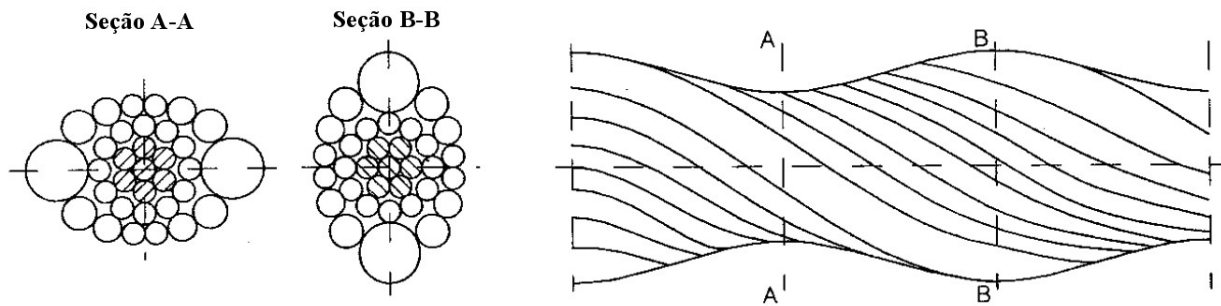


Fig. 2.7 – Cabo OVAL ACSR

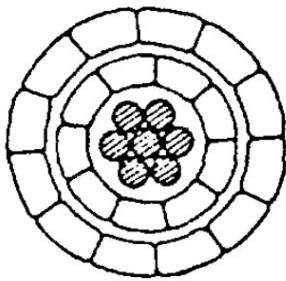


Fig. 2.8 – Cabo SDC

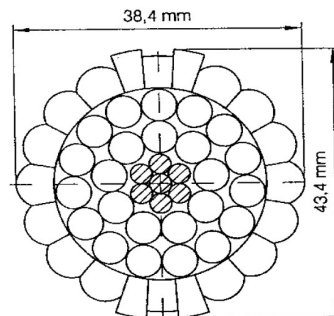


Fig. 2.9 – Cabo LNC

As normas brasileiras NBR07270 – Cabos de Alumínio com Alma de Aço para Linhas Aéreas [27] e NB07271 – Cabos de Alumínio para Linhas Aéreas [28] trazem tabelas com as características dos cabos ACSR e AAC, respectivamente.

São fatores que influenciam na escolha da configuração dos barramentos:

- Utilização: pode ser destinado a transporte de energia elétrica entre dois pontos ou a distribuição de energia, seja em subestações abrigadas ou expostas ao tempo.
- Ambiente: pode, por exemplo, ser usado nas zonas costeiras onde há problemas de oxidação nos condutores ou em ambientes expostos a muita poluição. Neste caso, ligas de alumínio devem ser utilizadas.
- Corrente: a corrente nominal e de curto-circuito que poderá ser conduzida são os principais índices para a escolha da forma das barras e para o dimensionamento do barramento.

3 DIMENSIONAMENTO DE BARRAMENTOS

3.1 CRITÉRIO ELÉTRICO – CAPACIDADE DE CONDUÇÃO DE CORRENTE EM REGIME PERMANENTEMENTE

O dimensionamento da capacidade de condução de corrente em regime permanente, chamada também de ampacidade, é calculado levando em consideração propriedades químicas dos elementos que compõem o sistema. O cálculo utiliza como parâmetros os valores de condutividade, permissividade, emissividade e calor específico do metal que compõe o condutor e também propriedades físicas, como o diâmetro, geometria e comprimento do condutor. Além disso, condições climáticas são fundamentais para o dimensionamento uma vez que fazem parte da equação de balanço térmico do condutor.

A figura 3.1 apresenta a variação de capacidade de condução de corrente do condutor em função do seu diâmetro para diferentes condições de conservação do condutor.

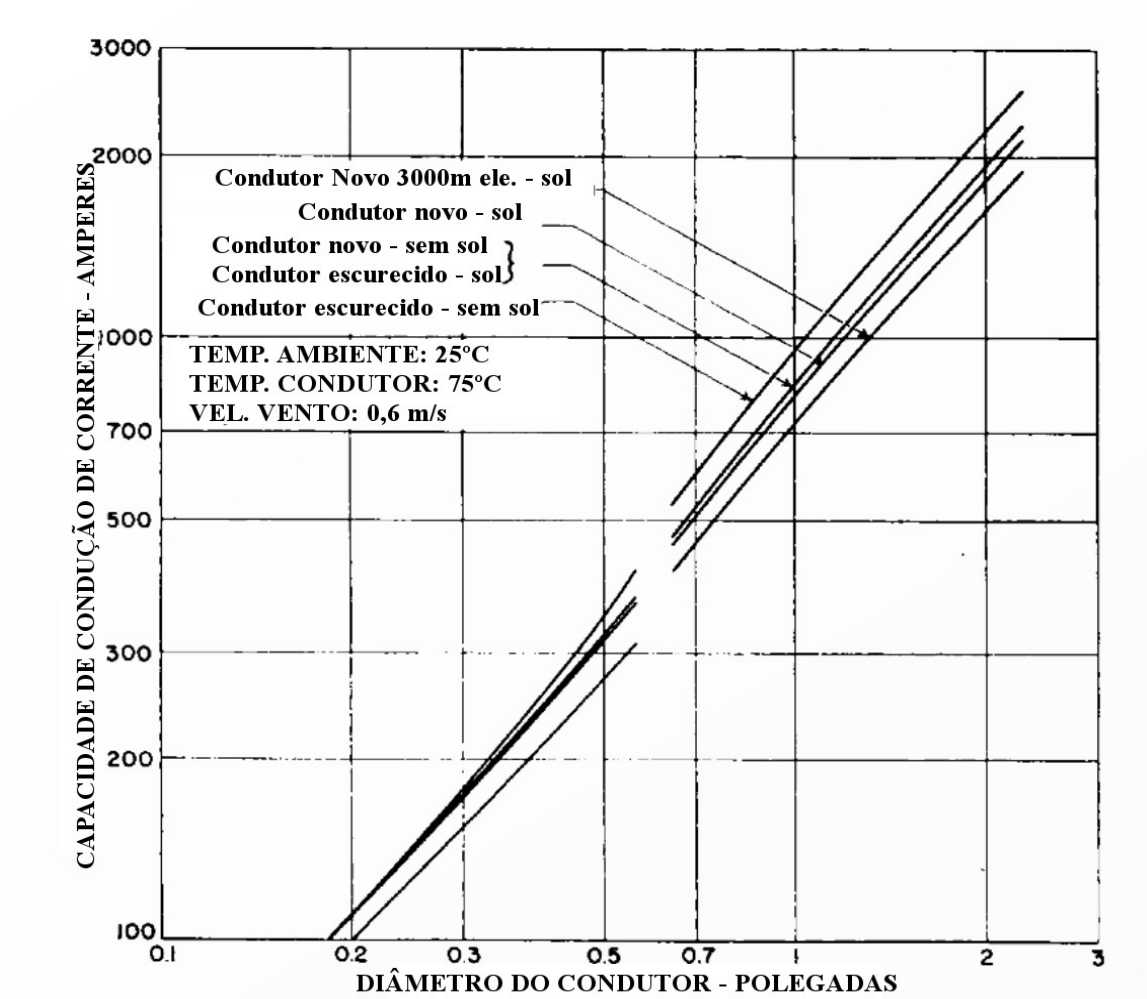


Fig. 3.1 – Relação entre o Diâmetro e a Capacidade de Condução de Corrente do Condutor

3.1.1 MÉTODO IEEE

O método apresentado pelo IEEE [2] consiste em determinar, através dos fatores citados, as perdas e ganhos de calor no condutor. De posse desses dados, juntamente com o valor da resistência elétrica do condutor, determina-se a corrente que poderá fluir num determinado condutor a uma determinada temperatura. A corrente calculada é então comparada com a corrente dada para a potência fornecida.

3.1.1.1 BALANÇO TÉRMICO

Em condições de equilíbrio de velocidade do vento, temperatura, radiação solar e corrente elétrica é válida a seguinte equação de balanço térmico do condutor:

$$q_c + q_r = q_s + I^2 \cdot R(T_c) \quad 3.1$$

ou

$$I = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R(T_c)}} \quad 3.2$$

Onde:

q_c é a quantidade de calor dissipada por convecção em W/m;

q_r é a quantidade de calor dissipada por radiação;

I é valor eficaz da corrente em amperes;

$R(T_c)$ é a resistência elétrica em corrente alternada em ohms/m como sendo função da temperatura do condutor;

q_s é a quantidade de calor recebida por aquecimento solar.

No caso de não haver equilíbrio, uma outra parcela deve ser acrescentada, ficando a equação:

$$q_c + q_r + mC_p \frac{dT_c}{dt} = q_s + I^2 \cdot R(T_c) \quad 3.3$$

Onde:

mC_p é capacidade de calor total do condutor;

T_c é a temperatura do condutor em °C.

Um condutor sob condições transitórias de carga pode ser classificado como um sistema de fluxo de calor com resistência térmica interna desprezível. A resistência térmica entre a superfície do sistema e o ar ao seu redor é muito maior do que a resistência térmica interna do sistema de forma que esta acaba por definir o processo de transferência de calor [3].

3.1.1.2 TRANSMISSÃO DE CALOR POR CONVECÇÃO

Segundo ensaios feitos em laboratório [4], a velocidade vertical do ar situa-se entre 0,12 m/s e 0,18 m/s devido ao efeito chaminé causado pelo condutor aquecido. A temperatura máxima permitida para o condutor varia de 75°C a 150°C. Condições climáticas conservativas para o verão de 0,6 m/s a 1,2 m/s para velocidade do vento e temperatura ambiente no verão de 30°C a 45°C são comumente usadas para os cálculos.

3.1.1.2.1 CONVECÇÃO FORÇADA

A relação fundamental para transmissão de calor por convecção de barramentos horizontais quando o número de Reynolds estiver entre 0,1 e 1000, ou seja ventos fracos é dada por:

$$q_c = \left[1,01 + 0,0372 \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0,52} \right] \kappa_f \cdot K_\theta (T_c - T_a) \quad 3.4$$

Quando o número de Reynolds estiver entre 1000 e 18000, ou seja ventos fortes, a expressão é:

$$q_c = \left[0,0119 \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0,6} k_f K_\theta (T_c - T_a) \right] \quad 3.5$$

Onde:

D é o diâmetro do condutor em mm;

V_w é a velocidade de vento;

T_a é a temperatura ambiente;

κ_f é a condutividade térmica do ar na temperatura T_f ;

ρ_f é densidade do ar;

μ_f é a viscosidade absoluta do ar;

K_θ é o fator de direção do vento.

O número de Reynolds é dado por:

$$Re = D \cdot \rho_f \cdot V_w \mu_f \quad 3.6$$

O fator de direção do vento pode ser calculado por:

$$K_\theta = 1,194 - \cos(\Phi) + 0,194 \cos(2\Phi) + 0,368 \operatorname{sen}(2\Phi) \quad 3.7$$

onde Φ é o ângulo entre a direção do vento e o eixo do condutor.

Exemplos de valores gerados a partir dessa definição:

| Φ | K_θ |
|--------|------------|
| 90° | 1 |
| 45° | 0,855 |
| 30° | 0,744 |
| 20° | 0,639 |
| 0° | 0,388 |

Os valores de viscosidade, densidade e condutividade térmica do ar podem ser obtidos em função da temperatura T_f dada por:

$$T_f = (T_a + T_c)^2 \quad 3.8$$

e da elevação do condutor acima do nível do mar H_e , dada em m.

Viscosidade do ar:

$$\mu_f = \frac{1,458 \times 10^{-6} (T_f + 273)^{1,5}}{T_f + 383,4} \quad 3.9$$

Densidade do ar:

$$\rho_f = \frac{1,293 - 1,525 \times 10^{-4} H_e + 6,379 \times 10^{-9} H_e^2}{1 + 0,00367 T_f} \quad 3.10$$

Condutividade térmica do ar:

$$\kappa_f = 2,424 \times 10^{-2} + 7,477 \times 10^{-5} T_f - 4,407 \times 10^{-9} T_f^2 \quad 3.11$$

O quadro [2] a seguir apresenta valores típicos de viscosidade, densidade do ar e condutividade:

| emperatura T_{film} | Viscosidade dinâmica μ_r | Densidade do Ar $\rho_r (kg/m^3)$ | | | | Condutividade térmica do ar k_f |
|--------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|-------|-------|-------|---|
| | | 0m | 1000m | 2000m | 4000m | |
| °C | (Pa . s) | | | | | W/(m.°C) |
| 10 | 0,0000176 | 1,247 | 1,106 | 0,978 | 0,757 | 0,0250 |
| 20 | 0,0000181 | 1,205 | 1,068 | 0,944 | 0,731 | 0,0257 |
| 30 | 0,0000176 | 1,165 | 1,033 | 0,913 | 0,707 | 0,0265 |
| 40 | 0,0000191 | 1,127 | 1,000 | 0,884 | 0,685 | 0,0275 |
| 50 | 0,0000195 | 1,093 | 0,969 | 0,856 | 0,663 | 0,0280 |
| 60 | 0,0000200 | 1,060 | 0,940 | 0,831 | 0,643 | 0,0287 |
| 70 | 0,0000204 | 1,029 | 0,912 | 0,806 | 0,625 | 0,0295 |
| 80 | 0,0000209 | 1,000 | 0,887 | 0,783 | 0,607 | 0,0302 |
| 90 | 0,0000213 | 0,972 | 0,862 | 0,762 | 0,590 | 0,0309 |
| 100 | 0,0000217 | 0,946 | 0,839 | 0,741 | 0,574 | 0,0317 |

Valores intermediários podem ser obtidos com pouca margem de erro por interpolação.

3.1.1.2.2 CONVECÇÃO NATURAL

Com velocidade do vento igual a zero, ocorre a convecção natural. Na verdade, numericamente o valor da convecção natural é aproximadamente igual a da convecção forçada para valores de velocidade do vento de 0,9 m/s e direção do vento de zero graus. A equação para o cálculo da perda de calor por convecção natural é dada por:

$$q_{cn} = 0,0205 \rho_f^{0,5} D^{0,75} (T_c - T_a)^{1,25} \quad 3.12$$

É recomendado o uso do maior valor entre os dois valores de q_c para um dado diâmetro do condutor. Recomenda-se também usar o maior valor entre a convecção natural e forçada para o caso de ventos muito fracos [2].

A figura 3.2 mostra a relação entre a velocidade do vento (em milhas/hora) e a corrente alternada (em ampères).

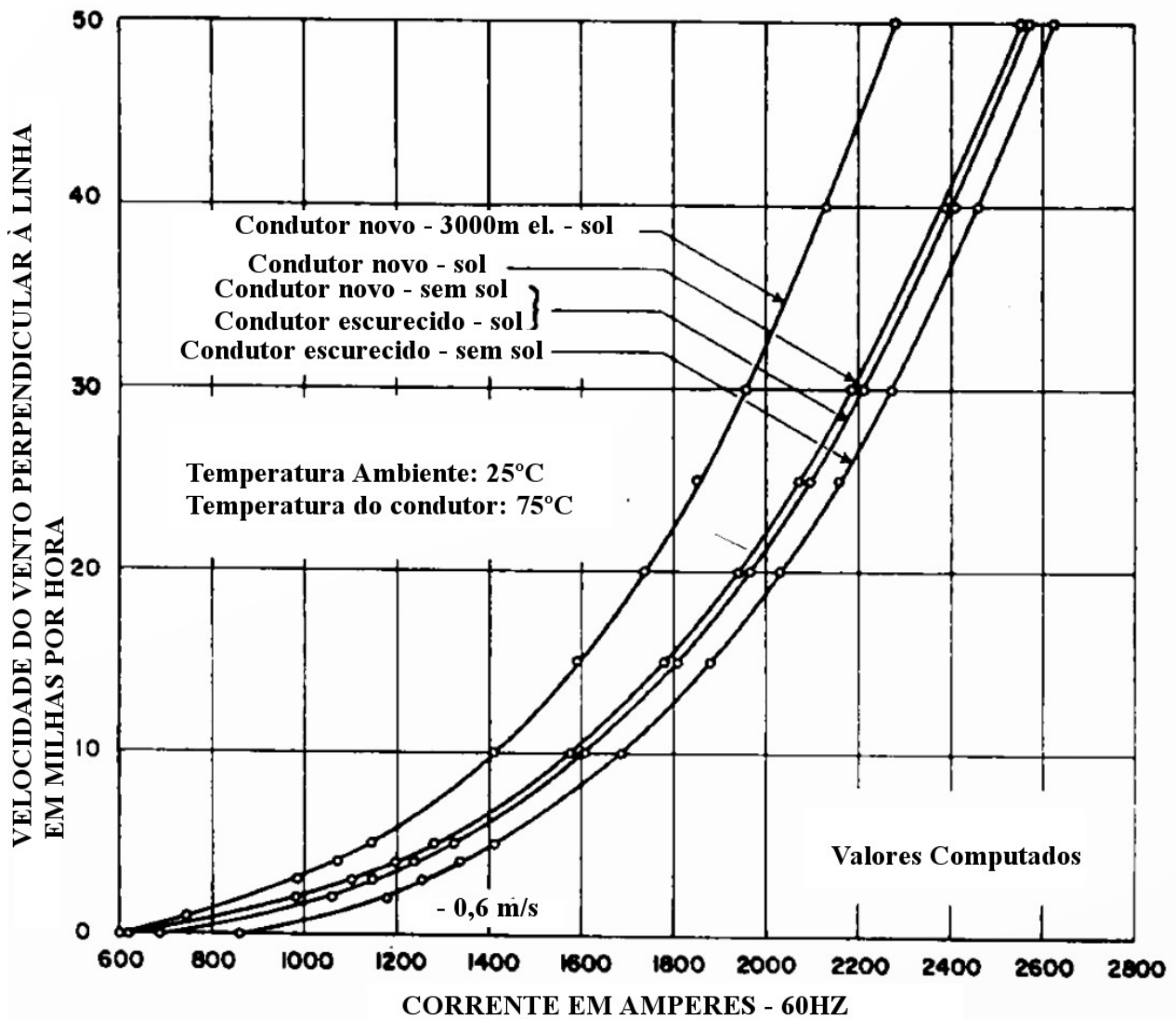


Fig. 3.2 – Relação entre a velocidade do vento e a corrente alternada no condutor
Fonte: HOUSE, H. E.; TUTTLE, P. D.. *Current-Carrying Capacity of ACSR* [1]

3.1.1.3 PERDAS POR RADIAÇÃO

A perda por radiação de um condutor é dada por:

$$q_r = \sigma \varepsilon A' (K_c^4 - K_a^4) \quad 3.13$$

Onde σ é a constante de Stefan-Boltzman, ε é a emissividade, $A' = \pi D / 12$ é a área do cilindro circunscrito e K é a temperatura em graus Kelvin.

Substituindo a constante, convertendo a área em termos do diâmetro do condutor e convertendo a temperatura para graus Celsius chegamos à:

$$q_r = 0,0178 D\varepsilon \left[\left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad 3.14$$

A emissividade do condutor de alumínio novo é aproximadamente igual a 0,2. Já um condutor escurecido pelos anos pode chegar a 0,9 ou mais. Normalmente é utilizado um valor médio de 0,5 [7].

3.1.1.4 AQUECIMENTO SOLAR

As condições da superfície do condutor determinarão a quantidade de energia solar que esse condutor absorverá. Corpos negros tem 100% de absorção, enquanto que corpos brilhantes podem absorver somente uma pequena porção do total da energia recebida, sendo o restante refletido de volta ao ambiente.

A importância do efeito de radiação solar na temperatura do condutor torna-se evidente na medida em que tem-se anualmente valores de máxima intensidade nos meses de verão, especialmente dezembro e janeiro que são também os meses de maior carga no Brasil.

A forma do cálculo da absorção de energia solar, caso haja luz solar incidente é:

$$q_s = \alpha Q_{se} \text{sen}(\theta) A' \quad 3.15$$

Onde:

α = coeficiente de absorção solar;

Q_{se} = fluxo total de calor irradiado pelo sol e pelo céu corrigido [W/cm²];

θ = ângulo efetivo de incidência dos raios solares (graus).

Sendo:

$$\theta = \arccos[\cos(H_c) \cdot \cos(Z_c - Z_l)] \quad 3.16$$

Onde:

H_c = altitude do sol em graus;

Z_c = azimute do sol em graus;

Z_l = azimute da linha em graus.

Observação: o valor de α varia de 0,23 para condutores novos a 0,95 para condutores escurecidos com o tempo. Utiliza-se normalmente o valor intermediário de 0,5.

Os valores da altitude e dos azimutes podem ser calculados a partir de equações encontradas nas referências [2].

O valor da altitude do sol é expresso por:

$$H_c = \arcsen[\cos(lat)\cos(\delta)\cos(\omega) + \sin(lat)\sin(\delta)] \quad 3.17$$

Onde:

ω é o ângulo da hora do dia.

Utilizando-se um dia de 12 horas e uma trajetória solar de 180° , podemos aproximar ω por $(hora\ do\ dia - 12) \cdot 15^\circ$. Por exemplo, as 11h teremos $\omega = -15^\circ$ e as 15h teremos $\omega = 45^\circ$.

δ é a inclinação solar que é dada por:

$$\delta = 23,4583 \operatorname{sen}\left[\frac{284 + N}{365} + 360\right] \quad 3.18$$

Onde N é o dia do ano. N varia de 1 para 1° de janeiro a 365 para 31 de dezembro.

O valor do azimute do sol é expresso por:

$$Z_c = C + \arctan(X) \quad 3.19$$

Onde:

X é uma variável do azimute solar dada por:

$$X = \sin(\omega)\sin(lat)\cos(\omega) - \cos(lat)\tan(\delta) \quad 3.20$$

C = constante de azimute solar que é dada em função do ângulo da hora do dia e da variável X e vale:

| Ângulo da hora do dia ω | C (graus) |
|--------------------------------|---------------|
| | se $X \geq 0$ |
| $-180 \leq \omega < 0$ | 0 |
| $0 \leq \omega < 180$ | 180 |

O valor do fluxo total de calor Q_s recebido pela superfície ao nível do mar é dependente da altitude do sol e da claridade da atmosfera. Esse valor pode ser obtido pela seguinte equação regressiva:

$$Q_s = A + BH_c + CH_c^2 + DH_c^3 + EH_c^4 + FH_c^5 + GH_c^6 \quad 3.21$$

Os coeficientes de 3.21 estão apresentados no quadro:

| | Atmosfera limpa | Atmosfera industrial |
|----------|------------------------|-----------------------------|
| <i>A</i> | -42,2391 | 53,1821 |
| <i>B</i> | 63,8044 | 14,2110 |
| <i>C</i> | -1,9220 | 6,6138 x 10-1 |
| <i>D</i> | 3,46921 x 10-2 | -3,1658 x 10-2 |
| <i>E</i> | -3,61118 x 10-4 | 5,4654 x 10-4 |
| <i>F</i> | 1,94318 x 10-6 | -4,3446 x 10-6 |
| <i>G</i> | -4,07608 x 10-9 | 1,3236 x 10-8 |

O quadro [2] a seguir mostra valores da altitude do sol e da quantidade de calor recebida por radiação calculados a partir desse método:

| H_c (graus) | Q_s (W/m ²) | |
|---------------|---------------------------|----------------------|
| | Atmosfera limpa | Atmosfera industrial |
| 5 | 234 | 136 |
| 10 | 433 | 240 |
| 15 | 583 | 328 |
| 20 | 693 | 422 |
| 25 | 770 | 502 |
| 30 | 829 | 571 |
| 35 | 877 | 619 |
| 40 | 913 | 662 |
| 45 | 941 | 694 |
| 50 | 969 | 727 |
| 60 | 1000 | 771 |
| 70 | 1020 | 809 |
| 80 | 1030 | 833 |
| 90 | 1040 | 849 |

A quantidade de calor recebida por uma superfície plana perpendicular aos raios do sol e localizada fora da atmosfera da terra é de aproximadamente 1324 W/m². Entretanto, parte dessa energia é absorvida pela atmosfera antes de atingir a terra. Pontos mais altos recebem mais energia do que áreas ao nível do mar. Estima-se que lugares situados a 3000 metros de altitude, por exemplo, recebam 25% mais energia solar em relação a altitude zero [1].

Para corrigir esta diferença, introduz-se o fator de correção de elevação K_{solar} obtendo-se o valor corrigido da quantidade total de calor recebida por radiação solar:

$$Q_{se} = K_{solar} Q_s \quad 3.22$$

O fator de correção é definido como:

$$K_{solar} = A + BH_e + CH_e^2 \quad 3.23$$

Onde:

$$A = 1$$

$$B = 1,148 \cdot 10^{-4}$$

$$C = -1,108 \cdot 10^{-8}$$

H_e é a elevação acima do nível do mar em metros

O quadro abaixo [2] fornece alguns valores para o fator de correção:

| Elevação acima do nível do mar H_e | Fator de correção de elevação K_{solar} |
|--------------------------------------|---|
| 0 | 1,00 |
| 1000 | 1,10 |
| 2000 | 1,19 |
| 4000 | 1,28 |

3.1.1.5 RESISTÊNCIA ELÉTRICA DO CONDUTOR

Designa-se por resistência elétrica a maior ou menor dificuldade a passagem de elétrons oferecida por um condutor percorrido por uma corrente elétrica. Teoricamente a corrente elétrica consiste no deslocamento de elétrons de um potencial para outro através do condutor. Estas partículas ao se deslocarem pelo condutor colidem com os núcleos dos átomos do material condutor causando assim resistência a passagem desses elétrons. Este raciocínio explica por que razão os condutores apresentam resistências distintas, dadas as suas diferentes constituições atômicas.

A resistência elétrica do condutor varia com a frequência, densidade média de corrente e temperatura. Para 60 Hz AC, a uma temperatura de 25 °C e de 75 °C, o *Aluminum Electrical Conductor Handbook* [5] fornece esses valores calculados de resistência elétrica para os condutores de alumínio mais usados.

Estes valores calculados incluem o efeito pelicular que é um fenômeno que ocorre em corrente alternada. As cargas elétricas em movimento tendem a se concentrar pela periferia do condutor, deixando assim a parte mais interna com uma densidade de corrente menor. À medida que essa frequência é aumentada, este efeito é mais significativo, ao ponto de não passar mais cargas pelo centro do condutor, apenas na região periférica, daí o nome efeito pelicular. Esses valores, fornecidos para todos os principais tipos de condutores, não incluem a correção devido ao efeito magnético no centro do condutor dependente da densidade de corrente. Esse efeito é mais significativo em condutores com alma de aço com número ímpar de camadas de alumínio.

Condutores com alma de aço de uma única camada tem sua resistência aumentada de 20% devido ao efeito pelicular. O aumento de resistência em condutores com 3 camadas é aproximadamente 3% em relação aos condutores com com camada única. Para condutores com alma de aço deve-se ter um estudo de engenharia específico para determinação de sua resistência.

De maneira aproximada, pode-se determinar qualquer valor de resistência elétrica de um condutor por interpolação linear, sabendo-se dois dos valores tabelados:

$$R(T_c) = \left[\frac{R(T_{superior}) - R(T_{inferior})}{T_{superior} - T_{inferior}} \right] (T_c - T_{inferior}) + R(T_{inferior}) \quad 3.24$$

Os valores de resistividade da maioria dos metais comumente usados como condutores aumentam um pouco mais rapidamente do que o modelo linear proposto (portando o cálculo é mais conservativo). Segundo o IEEE Std 738 [2] o uso de valores tabelados de $T_{inferior} = 25\text{ °C}$ e $T_{superior} = 75\text{ °C}$ produz valores de resistência elétrica do a uma temperatura T_c do condutor que vai de 20 °C a 500 °C com erros da ordem de no máximo 3% e podendo ser desconsiderado na maior parte dos casos.

Um outro método, mais comumente usado, sugere a utilização da resistência elétrica em corrente contínua. Essa resistência elétrica para uma dada temperatura pode ser calculada através de:

$$R = \frac{4\rho}{n\pi d^2} K \quad 3.25$$

Onde:

ρ = resistividade elétrica do alumínio, em uma dada temperatura (normalmente, na temperatura de 20 °C , conforme a NBR 07270)

n = numero de fios de alumínio

d = diâmetro dos fios de alumínio

K = fator de acréscimo da resistência elétrica devido a torção dos fios. Normas internacionais trazem esses valores para os cabos CAA e CA.

Essa resistência será determinada para a temperatura da resistividade, normalmente 20 °C .

As normas brasileiras NBR07270 – Cabos de Alumínio com Alma de Aço para Linhas Aéreas [8] e NBR07271 – Cabos de Alumínio para Linhas Aéreas [9] fornecem valores de resistência elétrica a 20 °C para CAAs e CAs respectivamente. Para a determinação do valor da resistência elétrica de um condutor é necessário que o condutor permaneça um mínimo de 12 horas a uma temperatura ambiente entre 10 e 30 °C . Utiliza-se uma ponte de Wheatstone ou uma ponte de Thompson. O valor da leitura na ponte, em Ohms, dividido pelo comprimento do condutor, em km,

permite calcular a resistência em Ohm/km.

Para o cálculo da resistência equivalente R_T a uma outra temperatura, utiliza-se a seguinte equação:

$$R_T = R_{20} [1 + \alpha_{20} (T - 20)] \quad 3.26$$

Sendo, α_{20} o coeficiente de temperatura a 20°C do alumínio.

O quadro a seguir apresenta valores de α_{20} e de ρ_{20} para o alumínio com varias condutividades.

| Condutividade Mínima | $\alpha_{20} (^{\circ}C^{-1})$ | $\rho_{20} (\Omega mm^2/km)$ |
|----------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 61,0 | 0,004030 | 28,264 |
| 61,3 | 0,004050 | 28,126 |
| 61,4 | 0,004055 | 28,080 |
| 61,5 | 0,004060 | 28,034 |
| 61,8 | 0,004080 | 28,898 |
| 61,9 | 0,004086 | 27,853 |
| 62,0 | 0,004093 | 27,808 |
| 62,2 | 0,004106 | 27,719 |
| 62,3 | 0,004112 | 27,674 |
| 62,4 | 0,004119 | 27,630 |
| 62,5 | 0,004125 | 27,586 |

O cálculo da resistência elétrica em corrente alternada, leva em consideração o efeito pelicular e o efeito de proximidade [6]. Mas como o efeito de proximidade é, em geral, muito pequeno no caso de cabos nus, utilizamos somente o efeito pelicular no cálculo. A resistência elétrica em CA será:

$$R = R_T (1 + y_s + y_p) \quad 3.27$$

Onde o fator devido ao efeito pelicular é dado por:

$$y_s = \frac{X_s^2}{192 + 0,8 \cdot X_s^2} \quad 3.28$$

e o fator devido ao efeito de proximidade (aproximadamente zero) por:

$$y_p = F(X_p) \times \left(\frac{d}{S}\right)^2 \times \left[\frac{1,18}{0,27 + F(X_p)} + 0,312 \left(\frac{d}{S}\right)^2 \right] \quad 3.29$$

sendo:

$$X_s = X_p = \frac{8 \cdot \pi \cdot f \cdot 10^{-4}}{R_T} \quad 3.30$$

$$F(X_p) = \frac{X_p^2}{192 - 0,8 X_p^2} \quad 3.31$$

d = diâmetro do condutor em polegadas

S = espaçamento entre as linhas

A figura 3.3 mostra a relação entre a resistência elétrica do condutor e o seu diâmetro para diferentes temperaturas.

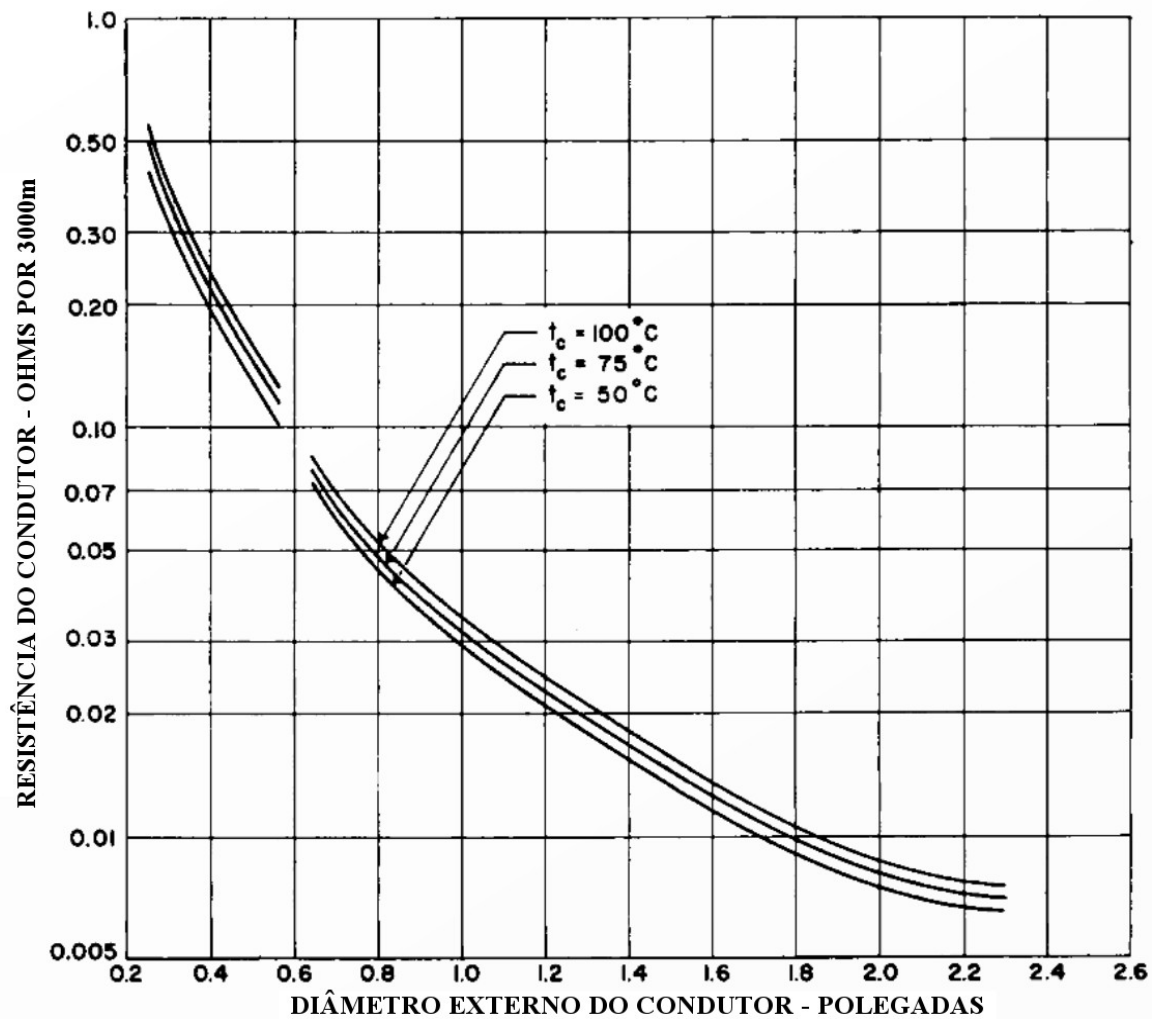


Fig. 3.3 – Relação entre resistência e diâmetro do condutor

Fonte: HOUSE, H. E; TUTTLE, P. D.. *Current-Carrying Capacity of ACSR* [1]

3.1.2 MÉTODO CIGRÉ

Assim como o método proposto pelo IEEE, o método do CIGRÉ SC22 WG22-12 [8] também propõem o dimensionamento do condutor utilizando o balanço térmico do condutor com o objetivo de manter o condutor, em condições de operação, a uma temperatura que não atinja a máxima flecha admissível e tampouco atinja valores próximos a temperatura de recozimento do alumínio o que acarretaria perda na força de tração do condutor ou apenas diminuição da vida útil do condutor.

Como no método anterior, a temperatura do condutor dependerá da corrente de carga, das

características elétricas do condutor e dos parâmetros atmosféricos tais como o vento e a radiação solar.

A condição de estabilidade térmica é dada quando nenhuma energia térmica é armazenada no condutor, ou seja, todo o aquecimento provocado no condutor é dissipado na atmosfera. Dessa forma a equação de equilíbrio térmico é dado por:

$$P_J + P_M + P_S + P_i = P_c + P_r + P_w \quad 3.32$$

Onde:

P_J = aquecimento por efeito Joule;

P_M = aquecimento por magnetização;

P_S = aquecimento por radiação solar;

P_i = aquecimento por efeito Corona;

P_c = resfriamento por convecção;

P_r = resfriamento por radiação;

P_w = resfriamento por evaporação.

O resfriamento por evaporação não altera significativamente o balanço térmico do condutor. Apenas seria relevante quando o condutor estivesse úmido ou molhado e mesmo assim em um curto espaço de tempo. Este método, assim como o anterior considera que os efeitos relacionados a evaporação podem ser ignorados.

Também é ignorado o aquecimento por efeito Corona por ser de ordem de grandeza desprezível em comparação com os demais parâmetros. O aquecimento por efeito Corona apenas seria significativa com altos gradientes de tensão na superfície que somente se apresentam durante precipitações e com altas velocidades de vento onde ocorre grande convecção e evaporação. Devido ao fato de que é necessário calcular o máximo nível de corrente baseado em valores médios ou máximos das condições meteorológicas estáveis, não seria o caso de incluir esse efeito, devido a sua natureza esporádica.

Os efeitos de magnetização referem-se ao aquecimento do condutor devido ao fluxo magnético cíclico que causa o aparecimento de correntes parasitas, histerese e viscosidade magnética [9]. Este fenômeno ocorre somente em corrente alternada e é normalmente desprezado para condutores de metal não ferroso. Podem somente ser significativos para condutores com núcleo de aço. Isto ocorre porque, em cabos com alma de aço, um fluxo magnético longitudinal é produzido nos fios de aço pela corrente nos fios de alumínio enrolados ao redor do núcleo. O método apresentado pelo CIGRÉ não leva em consideração este efeito. Além disso, este fator não é de grande importância em subestações pois, na maioria dos casos, cabos de alumínio AAC são usados.

A seguir são detalhados os cálculos de cada uma das transferências de calor contidas nesta equação de equilíbrio. Ao final, é possível isolar a corrente I em função dos demais parâmetros. Num processo iterativo semelhante ao utilizado pelo método anterior, determina-se a seção cuja corrente encontrada se aproxima mais da corrente ideal de carga da subestação.

3.1.2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO

A superfície quente do condutor aquece o ar adjacente e a densidade do ar aquecido diminui. Então o ar tende a subir, no caso da convecção natural onde a velocidade do vento é considerada zero ($V=0$) ou é carregado para longe do condutor no caso da convecção forçada ($V \neq 0$). O ar frio flui substituindo o ar quente e assim resfriando o condutor.

Alguns parâmetros são úteis para os cálculos subsequentes. São eles:

- O número de Nusselt, dado por:

$$Nu = h_c \frac{D}{\lambda_f} \quad 3.33$$

Onde:

h_c = coeficiente de transferência de calor por convecção em W/m^2K ;

λ_c = condutividade térmica do ar dada em W/mK ;

D = diâmetro externo do condutor.

- O número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho_r V D}{\nu_f} \quad 3.34$$

Onde:

V = velocidade do vento em m/s;

ν_f = viscosidade dinâmica em m²/s;

ρ_r = densidade relativa do ar, dada por $\rho_r = \rho / \rho_0$;

sendo:

ρ = densidade do ar na altitude em questão;

ρ_0 = densidade do ar ao nível do mar;

- O número de Grashof:

$$Gr = \frac{D^3 (T_s - T_a) g}{(T_f + 273) \nu_f^2} \quad 3.35$$

Onde:

T_s = temperatura da superfície do condutor;

T_a = temperatura ambiente;

- O número de Prandtl:

$$Pr = \frac{c \mu}{\lambda_f} \quad 3.36$$

Onde:

c = calor específico do ar à pressão constante em J / kg K;

μ = viscosidade dinâmica do ar em kg/ms.

Equações empíricas podem ser empregadas para o cálculo das variáveis acima [8]. São elas:

$$\nu_f = 1,32 \times 10^{-5} + 9,5 \times 10^{-8} T_f \quad 3.37$$

$$\lambda_f = 2,42 \times 10^{-2} + 7,2 \times 10^{-5} T_f \quad 3.38$$

$$P_r = 0,715 - 2,5 \times 10^{-4} T_f \quad 3.39$$

$$g = 9,807 (m/s^2) \quad 3.40$$

$$T_f = 0,5(T_s + T_a) \quad 3.41$$

$$\rho_r = e^{-1,16 \times 10^{-4} y} \quad 3.42$$

onde y é a altura acima do nível do mar

A transferência de calor por convecção é dada por:

$$P_c = \pi \lambda_f (T_s - T_a) Nu \quad 3.43$$

Onde o número de Nusselt é calculado independentemente para o caso da convecção ser forçada ou natural.

3.1.2.1.1 RESFRIAMENTO POR CONVECÇÃO FORÇADA

Em operação normal, onde a temperatura da película (filme) de ar sobre o condutor vale

$T_f = 0,5(T_a + T_s)$, o número de Nusselt pode ser representado por:

$$Nu = B_1 (Re)^n \quad 3.44$$

Onde B_1 e n são constantes que dependem do número de Reynolds e da rugosidade R_f da superfície do condutor. Essa rugosidade pode ser calculada de acordo com a equação 3.45:

$$R_f = \frac{d}{2(D-d)} \quad 3.45$$

Onde d é o diâmetro da camada mais externa do condutor e D é o diâmetro total.

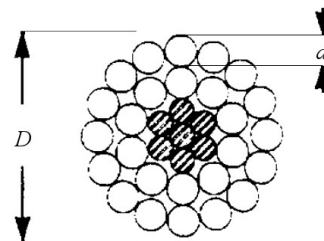


Fig. 3.4 – Rugosidade do cabo

Condutores lisos apresentam área 40 a 45% maior do que condutores trançados. O aumento, considerando o resfriamento por convecção forçada, entre condutores lisos e trançados é a chamada função rugosidade.

O quadro a seguir mostra os valores de B_1 e n em função do número de Reynolds e da rugosidade.

| Faixa de Rugosidade | Faixa de Re | | B_1 | n |
|----------------------|----------------------|--------------------|-------|-------|
| | de | até | | |
| $0,05 < R_f < 0,718$ | 10^2 | $2,65 \times 10^3$ | 0,641 | 0,471 |
| $R_f \leq 0,05$ | $> 2,65 \times 10^3$ | 5×10^4 | 0,178 | 0,633 |
| $0,05 < R_f < 0,718$ | $> 2,65 \times 10^3$ | 5×10^4 | 0,048 | 0,800 |

A direção do vento também tem papel importante no cálculo efetivo do resfriamento por convecção forçada. O número de Nusselt varia com o seno do ângulo de incidência do vento em relação ao eixo do condutor como mostrado na equação 3.46:

$$Nu_{\delta} = Nu_{90} [A_1 + B_2 (\text{sen } \delta)^{m_1}] \quad 3.46$$

Onde:

$$A_1 = 0,42 \quad , \quad B_2 = 0,68 \quad \text{e} \quad m_1 = 1,08 \quad \text{para} \quad 0^\circ < \delta < 24^\circ$$

$$A_1 = 0,42 \quad , \quad B_2 = 0,48 \quad \text{e} \quad m_1 = 0,90 \quad \text{para} \quad 24^\circ < \delta < 90^\circ$$

Quando o vento sopra paralelo ao condutor, ou seja ângulo incidência 0° , nota-se que o valor do número de Nusselt vale $0,42 Nu_{90}$.

Com velocidades de vento muito baixa ($V < 0,5$ m/s), não há direção preferencial de vento e para tal caso utiliza-se uma correção baseada em testes para o número de Nusselt:

$$Nu_{cor} = 0,55 Nu_{90} \quad 3.47$$

3.1.2.1.2 RESFRIAMENTO POR CONVECÇÃO NATURAL

Para o cálculo da transferência de calor por convecção natural, o número de Nusselt depende do produto dos números de Grashof e Prandtl, calculados a partir das equações 3.35 e 3.36 respectivamente, também chamado de número de Rayleigh.

$$Nu = A_2 (Gr \cdot Pr)^{m_2} \quad 3.48$$

Os valores das constantes A_2 e m_2 são dependentes do número de Rayleigh. O quadro a seguir mostra os valores para essas constantes:

| $Gr \cdot Pr$ | | A_2 | m_2 |
|---------------|--------|-------|-------|
| de | até | | |
| 10_2 | 10_4 | 0,850 | 0,188 |
| 10_4 | 10_6 | 0,480 | 0,250 |

3.1.2.1.3 RESFRIAMENTO POR CONVECÇÃO A BAIXAS VELOCIDADES DE VENTO

Quando ocorre em uma região, velocidades muito baixas de vento, o cálculo do resfriamento por convecção pode ser baseado em uma mistura de ambos os cálculos – convecção forçada e convecção natural. Entretanto o CIGRÉ WG22-12 sugere um outro método que consiste no cálculo das três classificações de resfriamento por convecção apresentados e então usar o maior valor encontrado:

- Já que não há direção preferencial do vento, um ângulo de 45° é assumido e a convecção forçada é calculada conforme equações 3.43 e 3.46.
- O segundo valor de P_c é calculado usando as equações 3.43 e 3.47.
- O resfriamento por convecção natural é calculado usando a equação 3.48.

O maior valor dentre os três calculados deve ser o escolhido.

3.1.2.2 RESFRIAMENTO POR RADIAÇÃO

A transferência de calor por radiação é normalmente pequena em relação ao resfriamento total, especialmente quando ocorre convecção forçada. A equação 3.49 é a sugerida para esse cálculo:

$$P_r = \pi D \varepsilon \sigma_B [(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad 3.49$$

Onde ε é a emissividade e depende das condições da superfície do condutor variando de

0,23 para condutores novos a 0,95 para condutores escurecidos com o tempo e σ_B é a constante de Stefan-Boltzmann. Assim como no método IEEE, também é sugerido o uso do valor 0,5 para emissividade.

3.1.2.3 AQUECIMENTO POR RADIAÇÃO SOLAR

O cálculo da radiação solar no condutor pode ser feito utilizando a equação 3.50 conhecendo-se o valor da intensidade direta e difusa da radiação solar e demais parâmetros do condutor e do local. Para difusão isotrópica da radiação em um condutor horizontal, o calor total recebido por unidade de comprimento do condutor é dado por:

$$P_s = \alpha_s D \left[I_D (\text{sen } \eta + \frac{\pi}{2} F \text{ sen } H_s) + B \right] \quad 3.50$$

Onde:

I_D = radiação solar direta;

α_s = absorvidade da superfície do condutor;

η = ângulo entre o feixe solar e o eixo do condutor;

F = refletividade (ou albedo) do solo sob o condutor;

H_s = altitude do sol;

I_d = radiação solar difusa;

Z = ângulo da hora do sol;

N^* = dia do ano.

Essas grandezas são calculadas por:

$$I_D = \frac{1280 \text{ sen } H_s}{\text{sen } H_s + 0,314} \quad 3.51$$

$$B = I_d \left(\frac{\pi}{2} \right) (1 + F) \quad 3.52$$

$$I_d = (570 - 0,47 I_D) (\text{sen } H_s)^{1,2} \quad 3.53$$

$$\eta = \arccos [\cos H_s \cos (\gamma_s - \gamma_c)] \quad 3.54$$

$$H_s = \arcsen [\sen \varphi \sen \delta_s + \cos \varphi \cos \delta_s \cos Z] \quad 3.55$$

$$\gamma_s = \arcsen \left[\frac{\cos \delta_s \sen Z}{\cos H_s} \right] \quad 3.56$$

$$\delta_s = 23,4 \sen \left[360^\circ \frac{(284 + N^*)}{365} \right] \quad 3.57$$

Onde:

γ_s = azimute do sol;

γ_c = azimute do condutor;

φ = latitude;

γ_s = inclinação do sol.

O valor do ângulo da hora do sol aumenta 15 graus a cada hora começando em zero às 12h.

Este cálculo está também descrito na seção 3.1.1.4.

A intensidade da radiação solar direta I_D varia de acordo com a massa de ar atravessada pelos raios. Por isso, a altitude do sol H_s é considerada no cálculo. A intensidade I_D aumento de 7 a 13% do nível do mar a uma altitude de 1000m, sendo que o valor mais alto ocorre no verão e de 13 a 22% a uma altitude de 2000m.

O valor do albedo F é de aproximadamente 0,2 para vegetação, 0,3 para areia, 0,1 para solo escuro e 0,3 para sólido claro. Esse valor tende a aumentar com a altitude do sol.

O valor da absorvidade α_s varia de 0,23 para condutores brilhantes a 0,95 para condutores escurecidos imersos em atmosfera industrial. O valor recomendado é de 0,5.

No entanto a medição da radiação solar direta do solo é relativamente cara. E também a medição da radiação solar difusa requer tempo e atenção nas medições. Na prática, o método usado é considerar a radiação solar global. Este método consiste em utilizar a equação simplificada a seguir:

$$P_s = \alpha_s SD \quad 3.58$$

Onde S é a radiação solar global e D é o diâmetro do condutor.

3.1.2.4 AQUECIMENTO POR EFEITO JOULE

A transferência de calor por efeito Joule é o aquecimento do condutor devido a resistência do condutor. Esta transferência é dada por:

$$P_J = k_j I^2 R_{dc} [1 + \alpha (T_{av} - 20)] \quad 3.59$$

Onde:

I = corrente efetiva;

R_{dc} = resistência em corrente contínua a 20°C;

α = coeficiente de temperatura a 20°C (ver quadro na página 39);

T_{av} = é a temperatura média do condutor;

k_j = fator de correção para aumento da resistência por efeito pelicular.

Para o fator de correção é sugerido o uso de um valor médio de 1,0123.

A resistência em corrente alternada pode ser calculada como a seguir:

$$R_{ac} = k_j R_{dc} \quad 3.60$$

Este método é usado para o cálculo do aquecimento por efeito Joule em condutores que utilizam materiais não ferrosos apenas, ou seja, cabos sem alma de aço. Para cabos com núcleo de aço, o CIGRÉ WG22-12 apresenta uma teoria simplificada que permite fazer a correção levando em consideração o número de camadas de alumínio presentes no condutor.

A teoria simplificada é baseada na igualdade das potências de entrada para ambas correntes, alternada e contínua e para a mesma temperatura média do condutor. A corrente contínua que resultará em uma certa temperatura é calculada e uma fórmula empírica é então usada para converter a corrente CC para CA. Da mesma forma, a temperatura precisa ser calculada para uma cada corrente CA, a fórmula empírica é usada para estimar a corrente equivalente CC e o aumento de

temperatura devido a isso. Por fim a equação 3.59 é usada.

O documento CIGRÉ WG 12-22 [8] refere-se a comportamento térmico de linhas aéreas de maneira geral. Desta forma deve-se adaptar a resistência elétrica para o caso de linhas de transmissão que utilizam cabos com alma de aço. No caso de subestações, os cabos com alma de aço são menos utilizados, não sendo importante considerá-los nesse trabalho.

3.1.2.5 RESISTÊNCIA ELÉTRICA DO CONDUTOR

A resistência elétrica R_{dc} em CC do condutor pode ser calculada de acordo com a equação:

$$\frac{1}{R_{dc}} = \frac{1}{R_s} + \sum_1^{n_a} \frac{l}{R_{az}} \quad 3.61$$

Onde a condutância do núcleo de aço, se houver, é dada por:

$$\frac{1}{R_s} = \frac{\pi d_s^2}{4 \rho_s} \left[1 + \sum_1^{n_s} \frac{6z_s}{K_{sz}} \right] \quad 3.62$$

sendo:

$$K_{sz} = \sqrt{1 + \left(\frac{\pi d_{sz}}{l_{sz}} \right)} \quad 3.63$$

d_s = diâmetro do fio de aço;

ρ_s = resistividade do aço a 20°C;

z_s = número da camada;

d_{sz} = diâmetro médio da camada;

l_{sz} = comprimento da camada;

n_s = número de camadas de fios de aço.

E onde a condutância de cada camada de material não ferros (alumínio ou cobre) é:

$$\frac{1}{R_{az}} = \frac{\pi d_a^2 n_{az}}{4 \rho_a K_{az}} \quad 3.64$$

sendo:

$$K_{az} = \sqrt{1 + \left(\frac{\pi d_{az}}{l_{az}} \right)^2} \quad 3.65$$

d_a = diâmetro do fio;

ρ_a = resistividade do material a 20°C;

d_{az} = diâmetro médio da camada;

n_{az} = número de fios na camada;

l_{az} = comprimento da camada;

n_a = número de camadas.

3.1.2.6 DISTRIBUIÇÃO RADIAL DE TEMPERATURA

A distribuição radial de temperatura no interior do condutor é importante pois a resistência elétrica depende da temperatura média T_{av} do condutor e também porque a flecha depende do temperatura T_c do núcleo do condutor. Assumindo ser pequeno o calor gerado no núcleo do condutor e a geração de calor no interior do condutor ser uniforme, pode-se usar a equação simplificada:

$$T_c - T_s = \frac{P_T}{2\pi\lambda} \left[\frac{1}{2} - \frac{D_2^2}{D^2 - D_2^2} \left(\ln \frac{D}{D_2} \right) \right] \quad 3.66$$

Onde:

P_T = ganho total de calor por unidade de comprimento;

D = diâmetro externo do condutor;

D_2 = diâmetro interno do condutor, ou seja, diâmetro do núcleo de aço;

T_s = temperatura na superfície;

T_c = temperatura do núcleo;

λ = condutividade radial térmica efetiva.

O valor médio da condutividade radial térmica efetiva λ é obtido através de medidas e vale aproximadamente 2 W/mK. Assume-se $T_{av}=T_s$ devido ao fato da diferença entre a temperatura do núcleo e da superfície estar entre 0,5 e 7°C.

Este caso aplica-se para condutores com núcleo oco ou com alma de aço. Para condutores integralmente de alumínio ou de liga de alumínio, $D_2=0$, então:

$$T_c - T_s = \frac{P_T}{4\pi\lambda} \quad 3.67$$

3.2 CRITÉRIO TÉRMICO – CAPACIDADE DE CONDUÇÃO DE CORRENTE EM REGIME DE CURTO-CIRCUITO

Este capítulo aborda o dimensionamento dos condutores de subestações na ocorrência de falhas. Alguns autores denominam esse tipo de dimensionamento como critério térmico, pois trata-se da determinação da seção máxima do condutor para que quando haja um curto-circuito na linha, não ocorra o recozimento do barramento sob o efeito de um aquecimento excessivo [1]. Mas convém esclarecer que este critério pode ser entendido também como elétrico, diferenciando-se do subcapítulo anterior apenas pelo fato de que este é o dimensionamento em situação de não estabilidade e aquele em situação de estabilidade [2] [3] [8]. Fala-se em critério térmico a fim de diferenciar do critério mecânico que envolve o cálculo da resistência mecânica ao curto-circuito, principalmente em cabos condutores, que também poderia ser classificado como elétrico.

A temperatura de um condutor aéreo de potência está constantemente mudando em resposta às mudanças da corrente elétrica e das condições climáticas. No entanto, para os cálculos aqui presentes, admite-se que os parâmetros climáticos permanecem constantes e qualquer mudança na corrente elétrica é limitada a um pulso que vai de uma corrente inicial I_i até uma corrente final I_f . A fig 3.4 ilustra o que acontece com um condutor quando ocorre um pulso de corrente. A figura representa uma situação em que o passo de corrente é mantido pelo tempo suficiente para o sistema atingir um novo estado de equilíbrio térmico. Obviamente, em uma situação de curto-circuito, o condutor não suportaria tanto tempo. A situação descrita na figura é para o caso de uma

sobrecarga na linha mas não chegando ao ponto de recozimento do material.

Nota-se que a curva de aumento de tensão é mais acentuada no início quando ainda não há dissipação de calor no ambiente e mais amena no final, quando a dissipação de calor começa a equilibrar a geração de calor por efeito Joule até atingir um novo estado de estabilidade térmica.

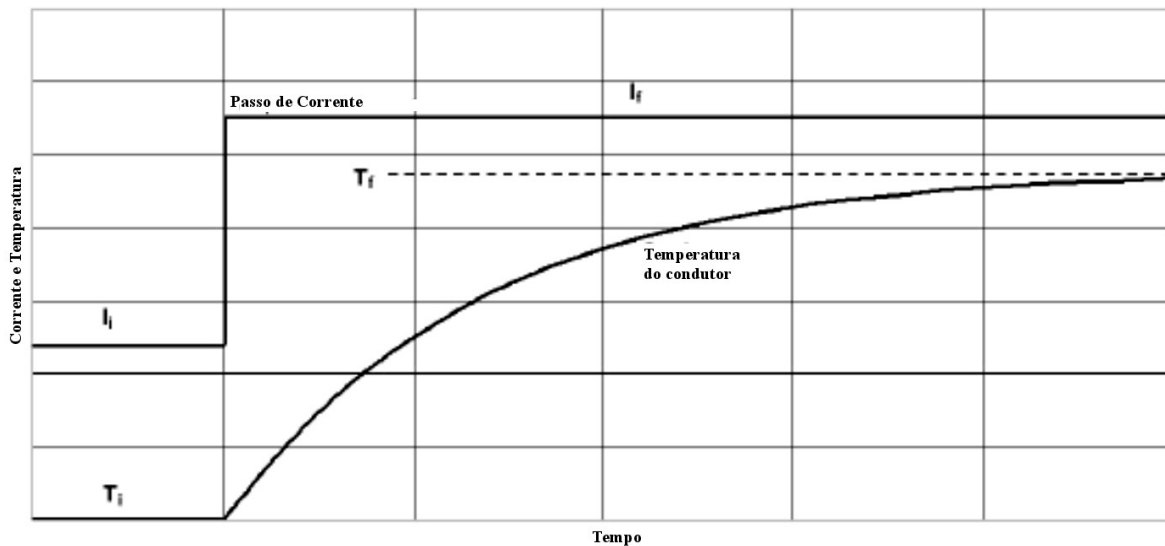


Fig. 3.5 – Passo de corrente
 Fonte: IEEE Std 738 [2]

Segundo o IEEE [2], a curva de temperatura correspondente ao degrau de corrente pode ser encontrada revolvendo-se a equação 3.1 para cada intervalo de tempo. Mas para isso o uso de um programa computacional seria aconselhável, sendo quanto menor o intervalo tomado, melhor a precisão nos resultados. O método descreve ainda uma solução manual usando uma linearização da equação de resfriamento por radiação (eq. 3.14). A equação final é dada por:

$$T_c(t) = T_i + (T_f - T_i)(1 - e^{-t/\tau}) \quad 3.68$$

Sendo que a constante de tempo é dada por:

$$\tau = \frac{(T_f - T_i) m C_p}{R(T_c) \times (I_f^2 - I_i^2)} \quad 3.69$$

Onde as variáveis utilizadas já estão descritas na seção 3.1 e a resistência elétrica do condutor é utilizada para a temperatura média $(T_i + T_f)/2$.

O CIGRÉ [8] também apresenta um método para a determinação da curva. O detalhamento

deste assunto está além do objetivo principal deste trabalho.

Durante um curto-circuito, o calor gerado pelo fluxo de potência do curto é todo armazenado no condutor, não havendo dissipação no meio ambiente pois o intervalo de duração deste curto é muito pequeno.

Se o curto ocorrer no momento em que, em uma fase, a onda de tensão estiver passando por zero, a onda correspondente a corrente de curto-circuito será a princípio assimétrica em relação ao eixo do tempo. Esta é a pior hipótese que pode ocorrer.

Após o pico, a corrente vai decrescer, conforme a constante de tempo do circuito, até um valor permanente. A figura 3.5 apresenta o caso simétrico e assimétrico:

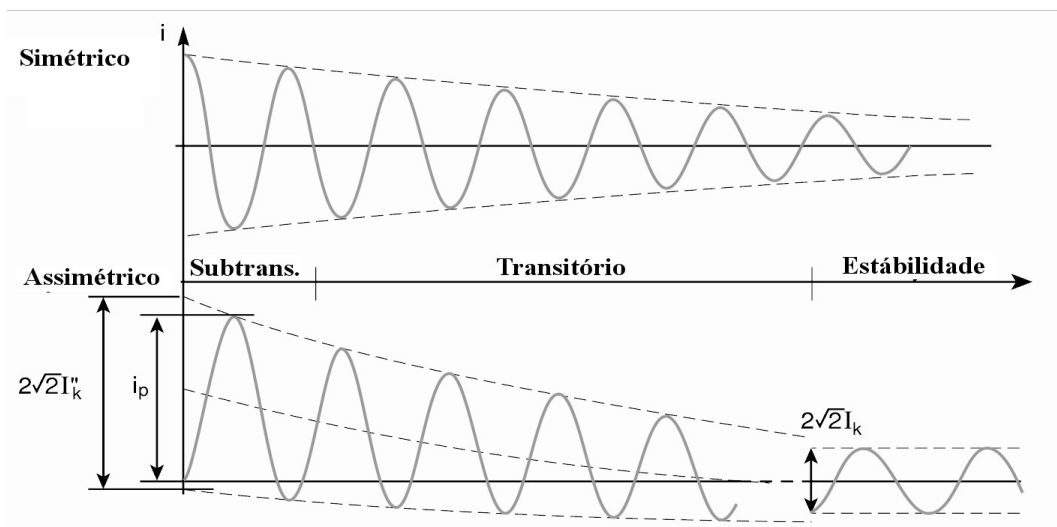


Fig. 3.6 – Diagrama esquemático do curto-circuito

Fonte: SCHNEIDER ELECTRIC. *Calculation of short-circuit currents* [10]

É interessante ao estudo das correntes de curto-circuito, decompor esse diagrama em suas componentes alternada periódica e contínua aperiódica amortecida, como mostra a figura 3.6.

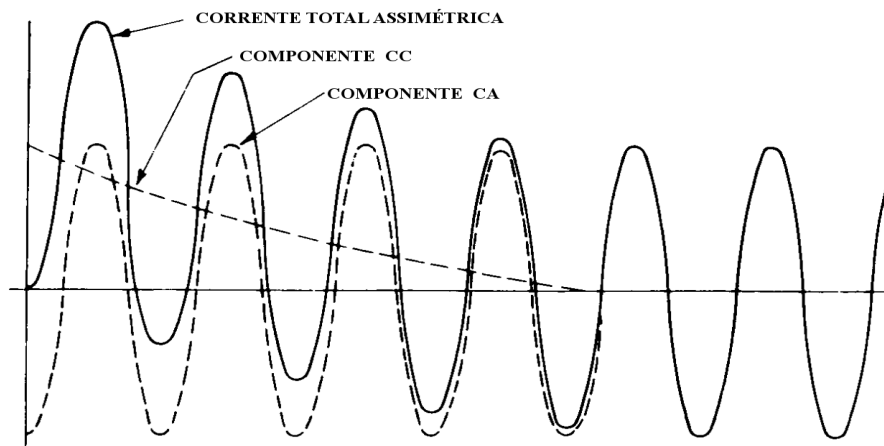


Fig. 3.7 – Decomposição da corrente de curto-circuito
 Fonte: GET-3550F [11]

A escolha do valor do tempo de curto-circuito é um fator relevante para os cálculos da seção do barramento.

Sendo assim, um dos dados do problema de dimensionamento de barramentos, que devem ser conhecidos a priori, é o tempo de atuação das proteções da subestação. Proteções essas que irão extinguir o curto-circuito, optando-se por assumir o tempo de falha como sendo igual ao tempo de atuação das proteções.

Em instalações maiores e de maior importância pode-se ter, com precisão, o tempo total de temporização dos relés e de interrupção dos disjuntores existentes. Já em subestações de média tensão, o tempo de falha normalmente varia de 8 a 12 ciclos, isto é, de 0,13 a 0,20 segundos em 60Hz. Quando não é fácil a determinação desse valor, por falta de informações técnicas dos equipamentos, costuma-se estimar o valor de $t = 0,5 s$ [12].

Normalmente considera-se como corrente de curto-circuito em subestações, a capacidade de interrupção dos disjuntores [7].

O dimensionamento, com relação aos esforços térmicos devidos a curto-circuito é feito de maneira a garantir que o condutor tenha uma seção tal, que não entre em recozimento térmico antes de as proteções atuarem. Essa seção é encontrada através da equação 3.70 [12] [13] [16]:

$$A = \frac{I_t}{k} \sqrt{t} \quad 3.70$$

Onde:

A = seção mínima do condutor;

I_t = corrente térmica;

k = fator relativo às propriedades térmicas do condutor;

t = tempo de curto-circuito.

A chamada corrente térmica I_t é o valor médio eficaz da corrente de curto-circuito em curto tempo. Essa corrente também pode ser interpretada como o valor constante da corrente que, no período que vai do aparecimento do curto-circuito até a sua interrupção, produziria o mesmo quantidade de calor no condutor que a corrente real de curto-circuito.

Essa corrente pode ser expressa por [13]:

$$I_t = I_k \sqrt{m+n} \quad 3.71$$

Sendo:

I_k = valor RMS da componente simétrica da corrente de curto-circuito.

m e n são fatores adimensionais que quantificam o efeito térmico da corrente de curto-circuito. O fator m traduz o efeito da componente contínua da corrente de curto-circuito e do seu amortecimento. O fator n representa o efeito da componente alternada da corrente de curto-circuito e seu amortecimento. Os valores são retirados da figura a seguir.

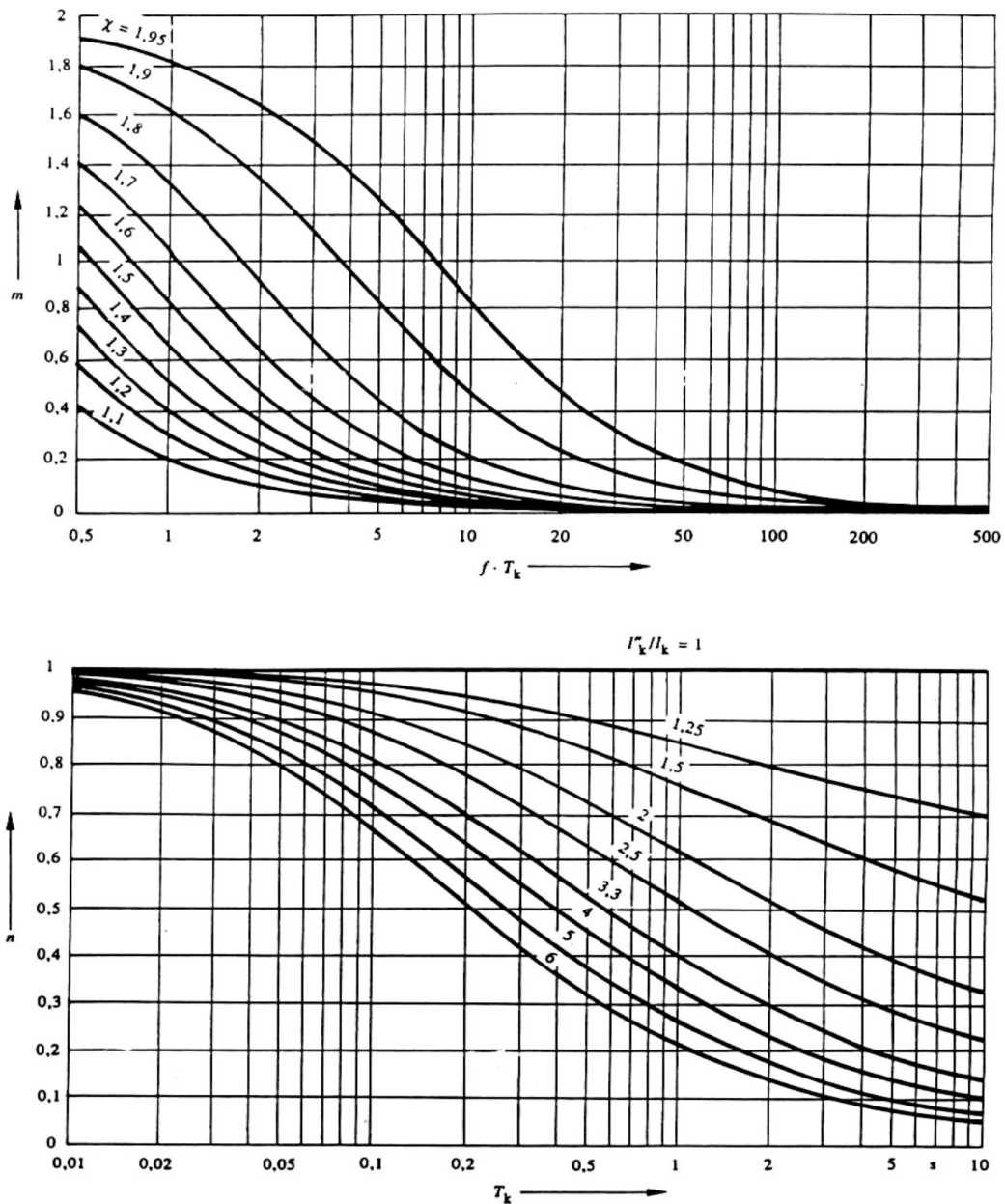


Fig. 3.8 – Fatores m e n
 Fonte: IEC 60865 [13]

Para a obtenção dos valores é necessário o valor de χ que é chamado o fator de amplitude. Esse fator representa o decréscimo da componente contínua da corrente de curto-circuito. Na figura, T_k é o tempo de curto-circuito.

O fator χ pode ser expresso por:

$$\chi = e^{-t\omega R I X} \text{sen } \varphi_0 + \text{sen}(w_t - \varphi_0) \quad 3.72$$

Onde $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$ e $w t = \pi$, então χ pode também ser calculado em função da relação

entre a resistência e a reatância da linha R/X . A figura 3.9 mostra essa relação.

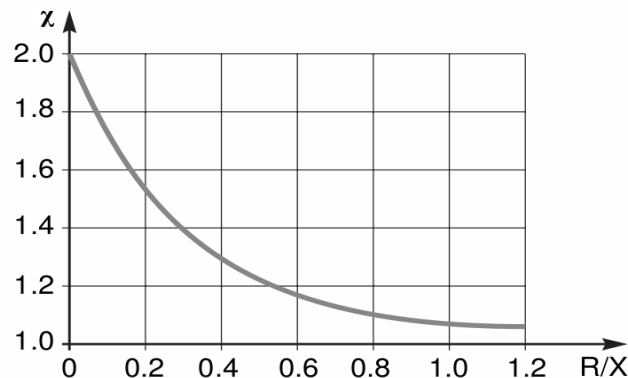


Fig. 3.9 – Fator de assimetria
Fonte: IEC 60865 [13]

Como geralmente não se conhece R/X , toma-se $\chi=1,8$ como pior hipótese e neste caso $R/X=0,071$.

Para o valor de n é necessário o conhecimento de I''_{cc}/I_p que é também um parâmetro da rede análogo a χ mas que por sua vez, quantifica o decréscimo da corrente alternada de curto-circuito. O parâmetro I''_{cc} é o valor inicial em amplitude da componente simétrica da corrente de curto-circuito. É o valor que se determina do cálculo de curto-circuito através da corrente nominal de operação e a impedância no trajeto. O parâmetro I_p é o valor eficaz da corrente permanente de curto-circuito.

Considera-se, para o valor de n , que a constante de tempo do circuito se torna muito grande e então $I''_{cc}=I_p$, portanto, a razão $I''_{cc}/I_p=1$ e $n=1$.

Segundo a norma internacional IEC 60865-1 [13], os valores máximos recomendados para a temperatura do condutor durante um curto-circuito para cabos de cobre, alumínio, liga de alumínio e condutores com alma de aço é de 200 °C. Acima deste valor, a possibilidade de recozimento do material, e conseqüente perda da sua resistência mecânica, é muito grande.

Os valores apresentados no quadro a seguir para temperatura final admissível em barramentos são unanimidade entre diversos autores [12]:

| Tipo de barramento | Material | Temperatura máxima |
|---|----------|--------------------|
| Perfis nus ou pintados não sujeitos a tração prévia | Cobre | 200 °C |
| | Alumínio | 180 °C |
| Barras de subestações contituídas por cabos nus, com tração prévia de 1000N/cm ² ou mais | Cobre | 170 °C |
| | Alumínio | 130 °C |

O fator k está relacionado às propriedades do condutor e temperaturas final e inicial e pode ser expresso por:

$$k = \sqrt{4.144 \frac{\delta c}{\alpha \rho} \cdot \ln[1 + \alpha(T_{cc} - T_i)]} \quad 3.73$$

Onde:

c = calor específico do material do condutor;

δ = peso específico do material do condutor;

α = coeficiente térmico de resistência do material a 0°C;

ρ = resistividade do material do condutor;

T_i = temperatura do condutor antes do curto-circuito;

T_{cc} = temperatura máxima admitida para o condutor.

Sendo assim, o coeficiente k pode ser tabelado de acordo com as temperaturas inicial e final do condutor:

| Valores de k | | | | |
|----------------|--|--|--|--|
| T_i | Barras de cobre | | Barras de alumínio | |
| | $T_{cc} = 200 \text{ } ^\circ\text{C}$ | $T_{cc} = 170 \text{ } ^\circ\text{C}$ | $T_{cc} = 180 \text{ } ^\circ\text{C}$ | $T_{cc} = 130 \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| 50 | 14,09 | 12,88 | 8,63 | 7,02 |
| 60 | 13,46 | 12,20 | 8,20 | 6,51 |
| 70 | 12,83 | 11,51 | 7,78 | 5,97 |
| 80 | 12,21 | 10,82 | 7,35 | 5,41 |
| 90 | 11,58 | 10,12 | 6,91 | 4,80 |
| 105 | 10,63 | 9,02 | - | - |

Para os valores do quadro foram utilizados $\rho = 1,7701 \times 10^{-6} \Omega \cdot cm$ para o cobre e $\rho = 3,0788 \times 10^{-6} \Omega \cdot cm$ para o alumínio. Ambas as resistividade a 20 °C.

Alguns autores utilizam adaptações destas equações.

Segundo a referência [5] uma redução na equação pode ser usada, fazendo-se uso de valores padrões de m e n . Dessa forma pode-se utilizar diretamente o valor da corrente de curto-circuito no cálculo. Neste caso, a área mínima dos condutores flexíveis aéreos para que as correntes de curto-circuito previstas não provoquem uma elevação de temperatura superior a admitida pode ser expressa pela equação 3.74.

$$A = \frac{1000 I_{cc}}{66,113 \sqrt{\frac{c \delta}{\alpha \rho t} \log \frac{1 + \alpha + T_{cc}}{1 + \alpha + T_i}}} \quad 3.74$$

Onde:

A = área mínima dos condutores em função do curto-circuito em pol^2 ;

I_{cc} = corrente de curto-circuito em A.

A referência [16], apresenta a mesma equação de uma maneira mais prática, já incorporando as constantes dos materiais na fórmula e também os fatores m e n . A corrente de curto-circuito (em KA) máxima permitida para uma dada seção de condutor durante um certo tempo será:

$$I_{cc} = \frac{K_1 A}{\sqrt{t}} \sqrt{\log \frac{K_2 + T_{cc}}{K_2 + T_i}} \quad 3.75$$

Onde:

K_1 = 0,34 para condutores de cobre e 0,22 para condutores de alumínio;

K_2 = 234,2 para condutores de cobre e 228,1 para condutores de alumínio.

A liga *GB-D50SWP da ALCAN* tem também uma equação semelhante para este cálculo:

$$I_{cc} = \frac{2,18 \times 10^4 A}{\sqrt{t}} \sqrt{\log \frac{T_{cc} + 258}{T_i + 258}} \quad 3.76$$

3.3 CRITÉRIO MECÂNICO – DIMENSIONAMENTO QUANTO A ESFORÇOS E VIBRAÇÕES

O dimensionamento dos barramentos sob o critério mecânico é subdividido em resistência mecânica ao curto-circuito, resistência mecânica estática e resistência mecânica dinâmica.

Na primeira subdivisão são calculados os esforços mecânicos que surgem nos barramentos quando percorridos por elevadas correntes, no qual surgem forças de origem eletromagnética que podem oferecer graves riscos às instalações e aos operadores que por ventura estiverem próximos aos equipamentos.

Quanto ao dimensionamento mecânico estático, entende-se pelas forças resultantes das deformações devidas ao peso do barramento. Nesta seção, cálculos de momento fletor para caso dos barramentos rígidos e de tração e flecha nos cabos para barramentos flexíveis são a abordagem principal.

No que diz respeito ao dimensionamento dinâmico, a seguir estão apresentadas as equações principais para vibrações próprias e forçadas nos condutores e barras.

3.3.1 DIMENSIONAMENTO MECÂNICO AO CURTO-CIRCUITO

Para o estudo das forças surgidas em presença de um curto-circuito é necessário o conhecimento da corrente máxima que o condutor terá que suportar em caso de falha. Ou seja, este é o valor máximo instantâneo da corrente de curto-circuito e ocorre na sua fase inicial. O cálculo desse valor pode ser feito através da expressão:

$$I_{max} = \chi \sqrt{2} I''_{cc} \quad 3.77$$

Onde:

I_{max} = corrente máxima ou corrente de choque;

χ = fator adimensional que representa o decréscimo da corrente contínua da corrente de curto-circuito;

I''_{cc} = corrente de curto inicial

As variáveis χ e I''_{cc} já foram discutidos na seção 3.2.

Partindo-se do equacionamento da influência do campo magnético que um condutor percorrido por corrente provocada em outro condutor, aplicando a da lei de Biot e Savart que dá o valor da densidade diferencial de campo magnético em um elemento de corrente chega-se a equação da força elementar $d\vec{F}_{12}$ entre dois condutores.

$$d\vec{F} = \frac{\mu_0}{4\pi} \times \frac{I_1 I_2}{r^3} [\vec{dx}_1 \wedge (\vec{dx}_2 \wedge \vec{r})] \quad 3.78$$

Aplicando-se cálculo vetorial e integrando-se a expressão ao longo do comprimento l do barramento chega-se a expressão geral para a força gerada em dois condutores paralelos percorridos por corrente [12][13][16]:

$$F_e = \frac{\mu_0}{2\pi} \times I_1 I_2 \times \frac{\sqrt{l^2 + a^2} - a}{a} \quad 3.79$$

Onde:

F_e = força eletromagnética;

I_1 e I_2 = correntes nos condutores;

l = comprimento dos condutores

a = espaçamento entre os condutores

A partir dessa expressão nota-se que:

- a força está no plano dos condutores;
- quando as correntes são de mesmo sentido, a força é de atração
- quando as correntes são de sentidos opostos, a força é de repulsão

Considerando o caso onde as forças são no mesmo sentido e de amplitude máxima, substituindo μ_0 por $4\pi \times 10^{-7} \text{ N}\cdot\text{A}^{-2}$ e a distância entre os condutores muito pequena em relação ao comprimento da linha ($l \gg a$) chega-se a equação:

$$F_e = 2 \times 10^{-7} I_{cc}^2 \frac{l}{a} \quad 3.80$$

Pode-se ainda fazer-se considerações quanto ao tipo de curto-circuito, desenvolvendo-se equações mais precisas para os curto entre duas fases, entre as três fases, entre a fase e neutro, instalações monofásicas, trifásicas, corrente contínua e assim por diante. Pode-se deduzir [12][17], com base em diversas referências, as equações derivadas de 3.79 para cada caso chegando as expressões a seguir.

Para sistemas monofásicos, utilizando as mesmas considerações quanto ao fator de assimetria (igual a 1,8), chega-se a:

$$F_{e\ 1\phi} = -12,96 \times 10^{-7} I_{cc}^2 \frac{\sqrt{l^2 + a^2} - a}{a} \quad 3.81$$

Para sistemas trifásicos, o condutor do meio é o mais exigido. A expressão fica:

$$F_{e\ 3\phi} = -11,22 \times 10^{-7} I_{cc}^2 \frac{\sqrt{l^2 + a^2} - a}{a} \quad 3.82$$

Para instalações de corrente contínua, o valor da corrente não admite diferença entre amplitude e eficaz e a partir da equação 3.79 chega-se a:

$$F_{e\ cc} = 8 \times 10^{-7} I_{cc}^2 \frac{\sqrt{l^2 + a^2} - a}{a} \quad 3.83$$

De posse do valor da força exercida pela corrente de curto-circuito no barramento, pode-se estabelecer o momento fletor correspondente como sendo:

Para viga apoiada:

$$M = \frac{F_e \cdot l}{8} \quad 3.84$$

Para viga engastada:

$$M = \frac{F_e \cdot l}{16} \quad 3.85$$

A condição de dimensionamento é feita de maneira a que a solicitação de flexão originada das forças desenvolvidas pelo curto-circuito, não ultrapassem a máxima deformação permitida. Essa condição se estabelece no limite de deformação elástico-plástico causado pelo momento fletor e é

dada por:

$$W \leq \frac{M}{\sigma} \quad 3.86$$

Onde:

W = módulo de resistência;

σ = limite de escoamento;

O limite de escoamento consiste na tensão em que o material começa a deformar-se plasticamente e que para o alumínio é de 0,2% do comprimento original medido segundo a ABAL. Mas diversas normas adotam o valor de 0,5% do comprimento. Estes valores são fornecidos nos catálogos de fabricantes e associações como a ALCAN, ABAL, ASTM, etc.

O quadro a seguir apresenta esses valores:

| Tipo de barramento | Valores de σ 0,5% | |
|--------------------|--------------------------|--------------------|
| | Alumínio | Cobre |
| Barras chatas | $12,5 \times 10^3$ | 21×10^3 |
| Tubos | $12,5 \times 10^3$ | $22,5 \times 10^3$ |

O módulo de resistência é definido a partir da geometria do barramento, conforme figura:

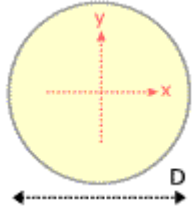
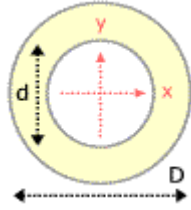
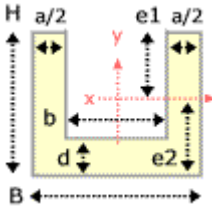
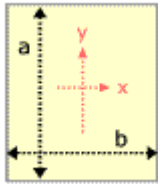
| Tipo de barramento | Geometria | Módulo de Resistência | Momento de Inércia |
|--------------------|---|---|---|
| Vergalhão |  | $W = \frac{\pi D^3}{32}$ | $J = \frac{\pi D^4}{64}$ |
| Tubo |  | $W = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D}$ | $J = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}$ |
| Perfil U |  | $W = \frac{h^2(a^2 + 4ab + b^2)}{12(2a + b)}$ | $J = \frac{Be_2^3 + bh^3 + ae_1^3}{3}$ Sendo: $e_2 = \frac{aH^2 + bd^2}{2(aH + bd)}$ $e_1 = H - e_2$ |
| Barra chata |  | $W = \frac{ba^2}{6}$ | $J = \frac{ab^3}{12}$ |

Fig. 3.10 – Módulo de Resistência e Momento de Inércia

Fonte: MSPC. Resistência dos Materiais V30. [18]

Se a condição 3.86 não for satisfeita, é necessário escolher outro barramento e refazer os cálculos.

3.3.2 DIMENSIONAMENTO ESTÁTICO DOS BARRAMENTOS

Neste tipo de dimensionamento encontram-se também os cálculos para os esforços realizados pelas barras devidos ao seu próprio peso. No caso de barramentos rígidos, devido à utilização de vãos relativamente curtos, a flexão referente ao próprio peso não precisa, na maioria das vezes ser verificado.

Para barramentos flexíveis, o problema do dimensionamento pode ser tratado da mesma maneira que o problema do dimensionamento mecânico de linhas aéreas de transmissão. E então a norma IEC 60826 [21] é de grande valia, pois fornecem métodos aceitos internacionalmente para o cálculo mecânico de cabos aéreos.

Este cálculo conta com a determinação de tensões mecânicas e flechas para determinadas condições e portanto não é especificamente um dimensionamento de barramento. Este cálculo é incluído como um complemento ao capítulo anterior, uma vez que utiliza-se dos valores de curto-circuito lá determinados e é parte importante para a montagem da linha aérea na subestação.

A tração máxima a que o condutor poderá estar sujeito é dada por:

$$T_{max} = A \cdot \sigma_{adm} \quad 3.87$$

A = área da seção transversal do condutor;

σ_{adm} = limite de resistência mecânica a tração.

O limite de resistência à tração pode ser encontrado nos catálogos de condutores e também está padronizado pela ASTM.

A curva plana gerada por um condutor suspenso sob o efeito da gravidade é a função matemática chamada catenária. Entretanto, historicamente, por simplicidade, considera-se a parábola como sendo a função da curva do cabo, chamando-a igualmente de catenária. A figura 3.11 mostra a catenária de um cabo suspenso (função parabólica):

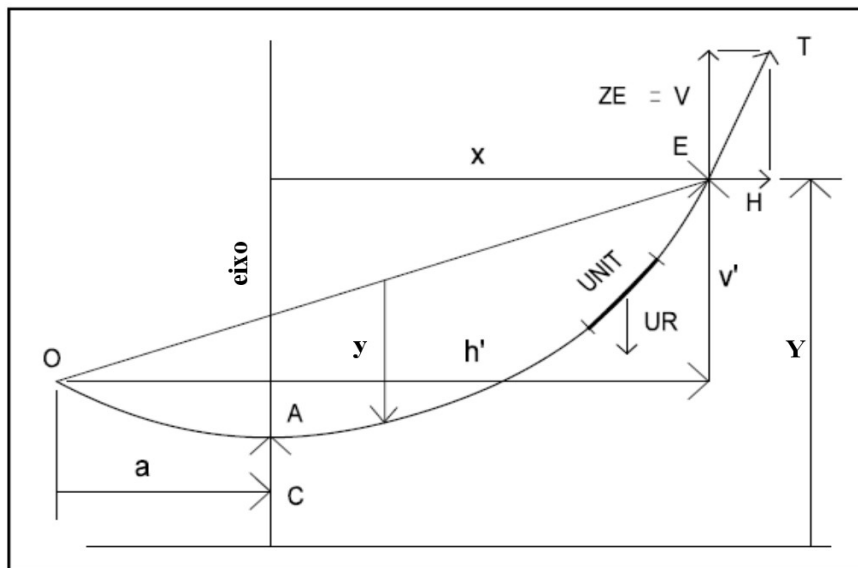


Fig. 3.11 – Catenária

Fonte: *Cálculo mecânico para cabos – notas aula disciplina ENG 04470 [20]*

O projeto de uma subestação é feito em nível. Na figura 3.11 tem-se uma curva catenária para pontos de apoio desnivelados, servindo apenas de ilustração e suporte ao equacionamento.

Para um sistema de coordenadas centrado à distância C do ponto mais baixo do vão, a função da catenária é:

$$Y = C \cosh\left(\frac{x}{C}\right) \quad 3.88$$

Nesta equação, o parâmetro C é conhecido como “parâmetro da catenária” e vale:

$$C = \frac{T_0}{p} \quad 3.89$$

Onde T_0 é a tração horizontal e p é o peso do cabo por unidade de comprimento. Nota-se que C terá também unidade de comprimento.

Deve ser determinada a tensão inicial a dar no cabo, com o respectivo peso, e temperatura inicial (condições iniciais) para que no momento do curto-circuito (condições finais) a tensão máxima não seja ultrapassada, com temperatura e carga final.

O desenvolvimento das equações da catenária, levando em consideração o efeito da variação da temperatura no comprimento dos condutores, leva a conhecida *equação da mudança de estado*

que é dada por [12][20][22]:

$$T_0^3 + T_0^2 \left[\frac{EA p_f^2 l^2}{24T_0^2} + EA \alpha (\theta_f - \theta_0) - T_f \right] = \frac{EA p_0 l^2}{24} \quad 3.90$$

Onde:

l = comprimento do vão;

E = módulo de elasticidade do condutor;

A = área da seção transversal do condutor;

α = coeficiente de dilatação linear do metal do condutor;

Os parâmetros iniciais são:

T_0 = tensão inicial no cabo, a ser determinada;

θ_0 = temperatura inicial (ambiente);

p_0 = carga inicial no condutor por unidade de comprimento;

Os parâmetros finais são:

θ_f = temperatura final (máxima admitida);

$p_f = p_0 + q$ que é a carga final submetida ao condutor;

q = força de curto-circuito q distribuída ao longo do comprimento.

Onde $q = \frac{F_e}{l}$ e o valor de F_e pode ser encontrado através das equações 3.81, 3.82 e 3.83.

Para encontrar o valor de T_0 na equação 3.90, recomenda-se o uso de ferramentas computacionais, evitando assim, o uso de métodos numéricos, o que seria muito dispendioso.

De posse do valor da tração, pode-se encontrar o parâmetro C da catenária na equação 3.89 e então a flecha y no vão.

A flecha é uma informação extramamente importante, uma vez que não deve ultrapassar o limite de segurança admitido para a instalação. A flecha é a distância y na figura 3.11, compreendendo o maior comprimento na vertical entre o cabo e a linha que liga os dois apoios. A flecha é dada por:

$$y = C \left[\cosh \left(\frac{h'}{2C} \right) - 1 \right] \sqrt{1 + \left(\frac{v'}{2C \sinh \left(\frac{h'}{2C} \right)} \right)^2} \quad 3.91$$

Onde h' é a projeção horizontal do vão e v' é a projeção vertical do vão. Quando não há desnível entre os pontos de apoio, v' será zero e h' será a distância entre os pontos. A equação 3.87 torna-se:

$$y = C \left[\cosh \left(\frac{h'}{2C} \right) - 1 \right] \quad 3.92$$

3.3.3. DIMENSIONAMENTO ESTÁTICO DOS BARRAMENTOS

Este critério de dimensionamento, fundamenta-se em verificar se o barramento escolhido não apresenta uma frequência própria de ressonância próxima à frequência da rede (60 Hz no Brasil).

Um condutor, quando apoiado em dois pontos relativamente afastados, está sempre sujeito a oscilações e vibrações causadas por vários fatores. Esses fatores podem ser de origem eletrodinâmica e também devido ao vento. Enquanto em regime permanente, os esforços eletrodinâmicos que atuam sobre o barramento, são de grandeza desprezível, durante a ocorrência de um curto-circuito, os esforços aumentam consideravelmente. No caso de a frequência própria de ressonância do barramento estar próxima da frequência elétrica da instalação ou dos seus múltiplos, as oscilações poderão crescer acima dos limites de estabilidade do sistema. Convém portanto garantir que tal não acontece.

A frequência própria de um barramento rígido é dada pela equação geral [12]:

$$f_p = \frac{\beta_1^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}} \quad 3.93$$

Onde:

l = comprimento do barramento;

E = módulo de elasticidade;




J = momento de inércia;

m = massa da barra [kg/cm];

β_1 = constante

O momento de inércia J pode ser calculado de acordo com as equações presentes na figura 3.10.

O valor da constante β_1 pode ser retirado do quadro a seguir [12]:

| Tipo de barra | Valor de β_1 |
|---|--------------------|
|  | $\beta_1 = 4,730$ |
|  | $\beta_1 = \pi$ |
|  | $\beta_1 = 3,927$ |

Curvas baseadas na equação 3.93 são mostradas na figura 3.12 servindo como um guia para evitar comprimentos críticos de barras.

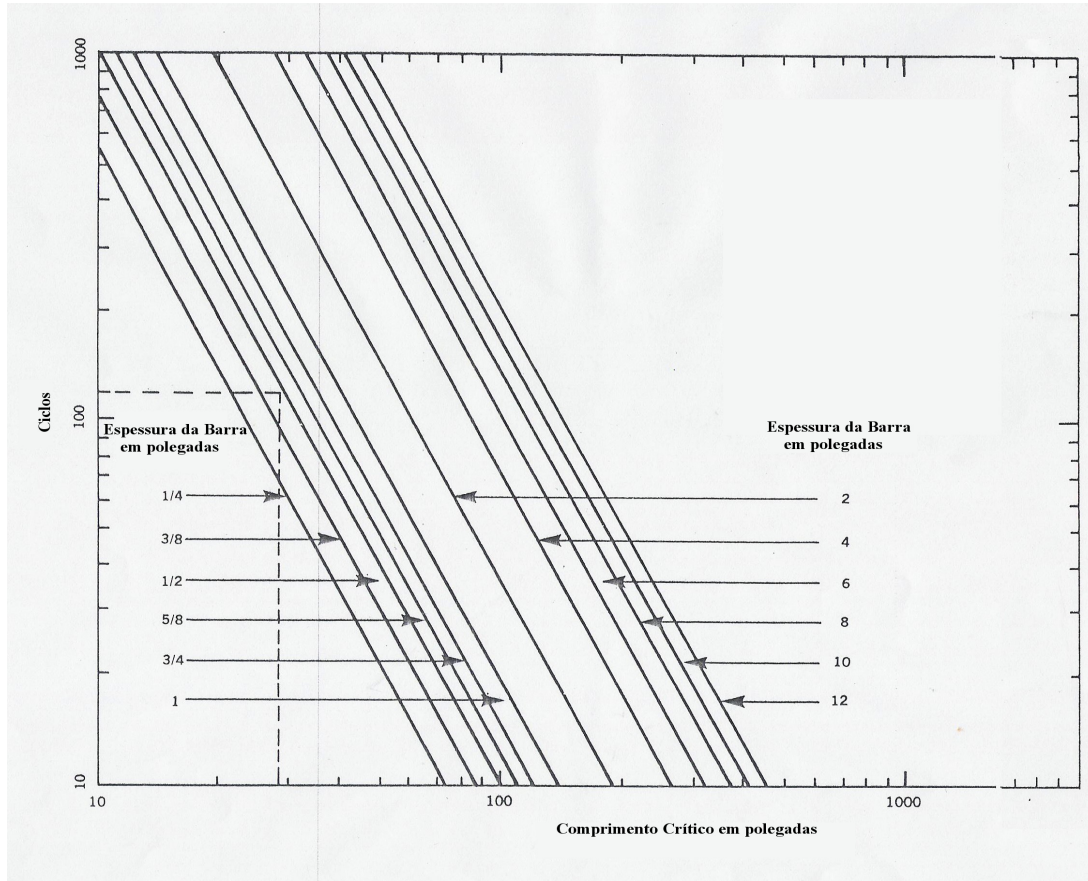


Fig. 3.12 – Comprimentos Críticos segundo a frequência própria

Fonte: Bus Conductor Shapes and Applications

Em se tratando de barramentos flexíveis, a frequência própria é dada por [12]:

$$f_p = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad 3.94$$

Onde:

l = comprimento do vão;

T = tração no cabo (determinada pela eq. 3.87);

m = massa do cabo [kg/cm];

O valor resultante do cálculo de f_p deve estar suficientemente afastado do valor da frequência elétrica da rede e de seus múltiplos. Utiliza-se 10% de afastamento do valor da frequência da rede e 20% de afastamento para o dobro do valor da frequência da rede, como sendo aceitável [12][16].

Sendo assim, os valores a se evitar são:

$$[f - 0,1 f ; f + 0,1 f] \cup [2f - 0,2 f \cdot 2 f ; 2 f + 0,4 f] \quad 3.95$$

Onde f é a frequência elétrica da rede.

Para a rede elétrica brasileira, de 60 Hz, temos que os valores a se evitar estão entre 54 e 66 Hz e entre 100 e 140 Hz.

3.4 DIMENSIONAMENTO SOB EFEITO CORONA

O efeito corona é um fenômeno que aparece na superfície dos condutores de uma linha aérea de alta tensão quando o valor do gradiente de potencial existente nesse condutor excede o valor do gradiente crítico disruptivo do ar, gerando descargas elétricas nos gases presentes ao redor do barramento. Em geral, atinge linhas com tensão acima de 110kV [24]. Normalmente não é um fator considerado em barramentos rígidos abaixo desta tensão.

Descargas elétricas em gases são geralmente iniciadas por um campo elétrico que acelera elétrons livres nele existentes. Quando esses elétrons adquirem energia suficiente do campo elétrico, podem produzir novos elétrons por choque com outros átomos. É o chamado processo de ionização por impacto. Durante a sua aceleração no campo elétrico, cada elétron livre colide com átomos de oxigênio, nitrogênio e outros gases presentes, perdendo, nessa colisão, parte de sua energia cinética. Ocasionalmente um elétron pode atingir um átomo com força suficiente, de forma a excitá-lo. Nessas condições, o átomo atingido passa a um estado de energia mais elevado. O estado orbital de um ou mais elétrons muda e o elétron que colidiu com o átomo perde parte de sua energia, para criar esse estado. Posteriormente, o átomo atingido pode reverter ao seu estado inicial, liberando o excesso de energia em forma de calor, luz, energia acustica e radiações eletromagnéticas.

O efeito corona é caracterizado primeiramente por efeitos visuais, quando as pequenas descargas formam uma espécie de coroa ao redor do condutor. Depois problemas de maior importância podem também aparecer, como ruído audível, perda de energia elétrica (em linhas de transmissão), rádio interferência, vibrações mecânicas e reações químicas. Essas reações ocorrem no

ar produzindo ozônio e óxido de nitrogênio.

Os problemas mencionados acima devem ser minimizados, pois interferem em toda a vizinhança. São de especial interesse em subestações localizadas em regiões urbanas fortemente povoadas, onde os efeitos visuais podem causar medo aos moradores. Além disso, o transtorno causado pela radio interferências podem ser inaceitável para a população.

Uma série de condições controlam a tensão disruptiva, tais como a pressão do ar, a presença do vapor d'água, o tipo de tensão aplicada e a fotoionização incidente. A divergência do campo exerce influência adicional, e qualquer saliência transforma-se em fonte puntual de descargas. Em subestações, efeitos desagradáveis podem ser originados nos cantos vivos das barras, conectores, roscas de parafusos, etc.

A tensão crítica disruptiva pode ser expressa por [12][24][25]:

$$V_0 = 21,1 \delta m_0 r \ln\left(\frac{a}{r}\right) \quad 3.96$$

Onde:

V_0 = tensão disruptiva do ar em kV;

δ = fator de densidade do ar;

m_0 = fator de irregularidade (entre 0 e 1);

r = raio do condutor em cm;

a = espaçamento entre dois condutores em cm;

O valor do fator de densidade do ar pode ser calculado da seguinte forma:

$$\delta = \frac{3,9211 p}{273 + T} \quad 3.97$$

Onde T é a temperatura em °C e p é a pressão atmosférica em centímetros de mercúrio.

O fator de irregularidade do ar dependerá do condutor e das condições climáticas, conforme quadro [24]:

| Fator de irregularidade | Condição |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| $m_0 = 1$ | Liso (novo), cilíndrico |
| $0.93 \leq m_0 < 0.98$ | Envelhecido, cilíndrico |
| $0.87 \leq m_0 < 0.90$ | Envelhecido, cabo com mais de 7 fios |
| $0.80 \leq m_0 < 0.87$ | Envelhecido, cabo com menos de 7 fios |

Obviamente, para o projeto convém utilizar o pior caso, $m_0 = 0,8$.

Com base na equação 3.96, o dimensionamento do condutor deve ser verificado para que a tensão nominal do barramento não ultrapasse a tensão de ruptura, ou seja:

$$e^{\frac{U_n}{21,1 \delta m_0 r}} \leq \frac{a}{r} \quad 3.98$$

Pode se ainda considerar, alternativamente à equação 3.96, a tensão crítica visual de corona, dada por [24][25]:

$$V_v = 21,1 \delta m_0 r \left[1 + \frac{0,3}{\sqrt{\delta r}} \right] \ln \left(\frac{a}{r} \right) \quad 3.99$$

4 METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO

4.1 ROTEIRO DE DIMENSIONAMENTO

Ao longo deste projeto, descrevem-se etapas de dimensionamento de barramentos condutores em subestações mas sem efetuar um roteiro propriamente dito.

Pode-se ordenar os passos para um bom dimensionamento pensando em prioridades quanto a operação do barramento. Obviamente que todos os passos são importantes, mas alguns terão maior prejuízo no caso de algum dimensionamento estar incorreto. Este trabalho, mais precisamente o capítulo 3, está estruturado nesta ordem.

Primeiramente, determina-se a capacidade de condução de corrente em regime permanente, visto que é o critério de maior periculosidade. Um mal dimensionamento elétrico implica em aquecimento excessivo do condutor, degradação do material a longo prazo, recozimento do metal e por fim, o colapso de todo o sistema. É então natural, adotar este como sendo o primeiro critério. Os cálculos pertinentes estão na seção 3.1 e levam em consideração a corrente nominal de operação no condutor e as condições climáticas do local.

O dimensionamento térmico também pode ser considerado como um dos determinantes da capacidade de condução de corrente. Neste caso, efetua-se os cálculos da seção do condutor, supondo uma temperatura máxima admitida e uma corrente máxima de sobrecarga que o sistema poderá atuar. Há ainda um outro tipo de dimensionamento, também térmico que leva em consideração a corrente e o tempo de curto-circuito a fim de determinar a seção mínima para uma dada máxima elevação de temperatura permitida. Mas isto não chega a ser determinante pois, na prática, o curto se extingue antes de que condutor chegue a atingir qualquer temperatura considerada perigosa. Estes cálculos são apresentados na seção 3.2.

Em seguida, é preciso que o barramento esteja bem dimensionado do ponto de vista mecânico, para que os esforços que ajam sobre o barramento não o levem a ruir. Os cálculos

mecânicos estão presentes na seção 3.3. Neste caso considera-se o esforço total a que o barramento está submetido, ou seja, o esforço do próprio peso acrescido do esforço causado por uma possível corrente de curto-circuito.

Por fim na escala de prioridades, está o dimensionamento com relação às vibrações. Neste critério, deve-se tentar evitar que a frequência própria do barramento esteja em ressonância com a frequência da rede, pois ao ocorrer um curto-circuito, serão geradas forças eletromagnéticas pulsantes nos condutores e isto romperia os mesmos.

Neste critério, pode-se também efetuar cálculos a fim de evitar também a ação do vento mas isto é um certo exagero no dimensionamento de barramentos em subestações, visto que para um condutor chegar a entrar em ressonância devido ao vento é necessária uma combinação de efeitos. Além disso, os condutores de subestação estão em geral posicionados em vãos relativamente curtos e entre equipamentos, diminuindo a possibilidade de ação do vento. Este critério é mais importante para linhas aéreas de transmissão.

Existe ainda o dimensionamento levando em conta o efeito corona. Deve-se levar esta etapa em consideração quanto constar nas exigências do projeto. Mas em geral, não é um critério fundamental para o funcionamento da subestação e provavelmente não acarrete riscos ao condutor quando da sua operação. Normalmente considera-se o efeito corona quando a subestação se situa em uma área urbana. Neste caso, a influência visual, sonora e eletromagnética poderá ser um fator importante.

O fluxograma a seguir ilustra de maneira simplificada os passos para o dimensionamento sob o ponto de vista da determinação da seção do condutor.

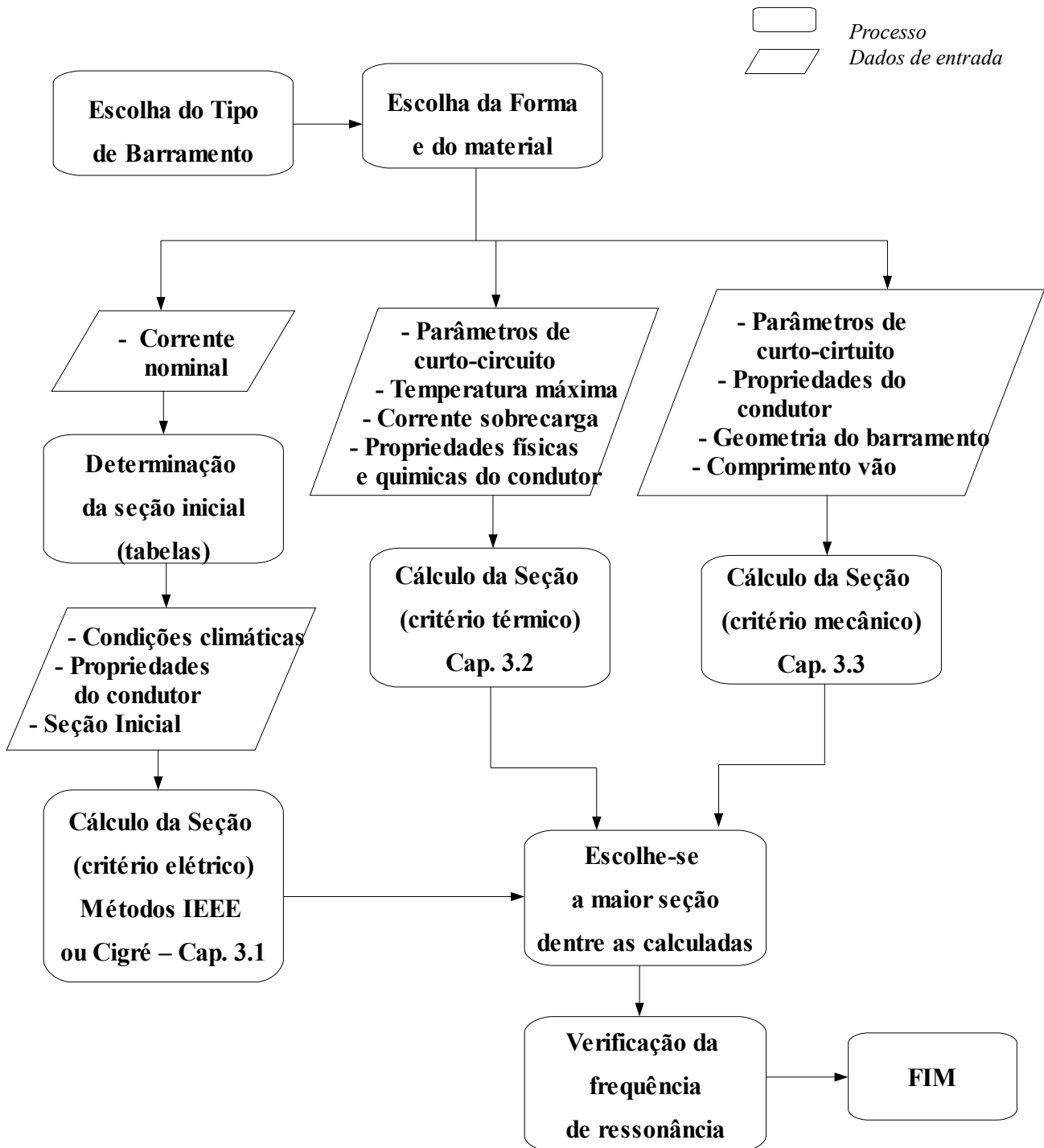


Fig. 4.1 – Fluxograma simplificado – dimensionamento de barramentos

Caso a frequência de ressonância se situe em um dos intervalos proibidos descritos em 3.95, é necessário efetuar alterações. As alternativas seriam:

- Escolher um novo barramento;
- Definição de um novo vão.

No caso de se optar pela primeira hipótese, o novo barramento escolhido, deverá ter obrigatoriamente uma seção superior ao anteriormente escolhido, sob pena de os cálculos até aqui efetuados deixarem de ser válidos.

A escolha de uma nova seção de barramento é, normalmente, a opção mais aconselhada, uma vez que a alteração do vão vai provavelmente obrigar a um rearranjo de toda a subestação. No caso de se definir um vão mais curto, pode-se até mesmo ser necessária a utilização de um maior número de estruturas metálicas. Isto é, obviamente, também um problema do ponto de vista econômico.

No caso de se definir um vão maior, deixa de existir o problema da utilização de mais estruturas metálicas. Porém, continua a existir o problema do redesenho da subestação, e sendo o vão maior, isto poderá levar a problemas de espaço, pois muitas vezes, essencialmente no caso de subestações particulares, o espaço destinado às mesmas é reduzido, tendo o projetista que procurar reduzir ao máximo o espaço ocupado..

Além disso, e não menos importante, o alargamento do vão iria aumentar o momento flector, calculado anteriormente, podendo a condição 3.86 deixar de se verificar. Nesse caso volta-se a primeira questão: escolha de um outro barramento com uma seção superior e então haveria também a necessidade de repetição dos cálculos.

4.2 DIFERENÇAS ENTRE MÉTODOS IEEE E CIGRÉ PARA CÁLCULO DA CAPACIDADE DE CONDUÇÃO DE CORRENTE EM CONDUTORES AÉREOS

Em se tratando de cálculo de capacidade em condutores aéreos, os principais métodos encontrados e aceitos internacionalmente são o *IEEE Standard 738 – Calculating the Current Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors* [2] e o *CIGRÉ WG22-12 – Thermal Behavior of Overhead Conductors* [8]. Ambos os métodos estão detalhados no capítulo 3 deste trabalho.

Estes dois documentos, baseiam-se no mesmo conceito de balanço térmico para o cálculo da capacidade de condução de corrente em condutores aéreos nus. Apesar disso, utilizam-se de

diferentes metodologias para a determinação de cada uma das transferências de calor deste balanço.

Este princípio de balanço térmico, foi primeiramente apresentado por *Vincent Morgan*, em seu trabalho *The Current Carrying Capacities of Overhead Conductors (1978)*, servindo de base para a elaboração das duas normas mencionadas.

Ao efetuar-se o cálculo da ampacidade em um barramento, é necessário a escolha de um entre todos os métodos de cálculo existentes. Devido a esse fato, é necessário conhecer e comparar os métodos e então eleger o que mais se enquadra a situação proposta.

A ANEEL, em 2004 publicou uma nota técnica [30] com o objetivo de apresentar, como um critério único, uma metodologia para determinação da Capacidade Operativa de Longa Duração de Linhas de Transmissão (RN 191/2005 ANEEL), desenvolvido pela ONS. O modelo apresentado fundamenta-se também nos trabalhos de Vincente Morgan e segue as recomendações do CIGRÉ WG22-12 e da norma IEEE 638, além da norma brasileira NBR 5422 [14].

O conceito de balanço térmico utilizado pelos métodos segue a equação 3.32 (seção 3.2) apresentada pelo CIGRÉ:

$$P_J + P_M + P_S + P_i = P_c + P_r + P_w \quad 3.32$$

Esta equação representa a igualdade entre a soma dos aquecimentos no condutor e a soma dos resfriamentos no condutor. O IEEE simplifica esta equação, eliminando fatores de menor impacto. São eles: aquecimento por magnetização, aquecimento por efeito corona e resfriamento por evaporação.

Esses três fatores são apenas uma inclusão teórica. O CIGRÉ considera o resfriamento por evaporação como não significativo para a maioria dos casos, sendo apenas apreciável quando o condutor estiver totalmente molhado, e então descondidera este fator no método. De maneira semelhante, o aquecimento por efeito corona é também desprezível e considerado significativo apenas quando o gradiente de tensão na superfície do condutor for muito alto. Isto ocorre apenas em situações climáticas específicas e então também foi descondiderado nos cálculos.

O efeito de aquecimento por magnetização foi incluído no cálculo da resistência equivalente do condutor. No IEEE, este efeito aparece como aumento da resistência provocado por efeito pelicular e de proximidade.

Desta forma a equação geral de balanço térmico para o IEEE, equação 3.1, se torna a mesma que a equação 3.32 do CIGRÉ.

Quando ao aquecimento por radiação solar, o ponto chave do cálculo é a posição solar. A posição do sol é uma função da inclinação do sol ou altura do sol com relação ao dia do ano, o ângulo da hora do sol devido hora do dia e da latitude. Tanto CIGRÉ quanto IEEE, usam fórmulas para calcular a posição do sol. Estas fórmulas são muito semelhantes e podem ser aplicadas para qualquer hora ou dia e qualquer latitude. O IEEE conta ainda com tabelas de valores obtidos a partir destas fórmulas, o que facilita o cálculo. Os dois métodos também apresentam correções para difusão da radiação solar na atmosfera em função da altura do sol e do aumento da radiação em função da altitude acima do nível do mar.

Como diferenças principais, há o fato do CIGRÉ utilizar a refletividade do solo como variável para o cálculo da quantidade de radiação recebida e o IEEE não. Em contrapartida, este último faz diferenciação entre atmosfera limpa e atmosfera industrial, para chegar ao valor final da radiação solar recebida.

No cálculo do resfriamento por convecção, ambos os métodos, consideram a convecção forçada, advinda do ar em movimento e a convecção natural, quando não há vento. O maior valor dentre os dois é então usado. O CIGRÉ cita e equaciona os números de Grashof, Prandtl, Rayleigh, Nusselt e Reynolds. Esses números são determinados de acordo com equações empíricas apresentadas e propriedades do ar como viscosidade, densidade relativa, condutividade térmica, direção e velocidade do vento.

O IEEE não explicita os números mas utiliza em suas equações, também essas mesmas

propriedades, diferenciando qual equação usar pelo número de Reynolds. Já o CIGRÉ utiliza, além do número de Reynolds, a função de rugosidade do condutor (eq. 3.45) para determinação do número de Nusselt a ser usado na sua equação principal da convecção.

O resfriamento por radiação é calculado através da mesma equação, porém IEEE apresenta uma equação mais prática, substituindo constantes.

Quanto a determinação da resistência equivalente do condutor, o IEEE recomenda o uso da resistência em CA a 60Hz encontrada em tabelas específicas [5] e já com as correções de efeito pelicular e de proximidade. Sugere ainda uma equação de interpolação (eq. 3.24) a fim de se obter a resistência para diferentes temperaturas.

O CIGRÉ prefere o uso da resistência em CC e sugere uma correção para CA (eq.3.60). Adicionalmente, o CIGRÉ apresenta métodos para a determinação da resistência em CC dividindo por camadas do condutor, sendo ele de aço ou de metal não ferroso e determinação da distribuição radial de temperatura no interior do condutor.

De um modo geral, pode-se afirmar que o método do IEEE é mais prático utilizando-se de simplificações e tabelas quando possível e o método do CIGRÉ é mais teórico e também mais completo, citando equações mais gerais e evitando o uso de tabelas de valores.

4.3 CONDIÇÕES CLIMATOLÓGICAS NO BRASIL

O Brasil por ser um país de proporções continentais, abrange áreas com panoramas climáticos muito diferentes. Os fatores climáticos são de importância para o cálculo da ampacidade dos condutores em subestações ao tempo.

A radiação total solar que atinge um plano horizontal localizado na superfície terrestre é a soma de duas componentes: a radiação direta e a radiação difusa. Há ainda uma terceira componente que pode ser considerada que é a radiação refletida no solo, também chamada de albedo.

Tanto a radiação difusa quanto albedo são consideradas como função da radiação direta. Esta é então a radiação que deve ser conhecida a priori para os cálculos de ampacidade da seção 3.1.

No Brasil convencionou-se usar a radiação solar direta como sendo 1000 W/m^2 . Mas, segundo o mapa de irradiação solar no solstício de verão do hemisfério Sul, apresentado pela ONS, esse valor pode sofrer alterações (vide fig. 4.2).

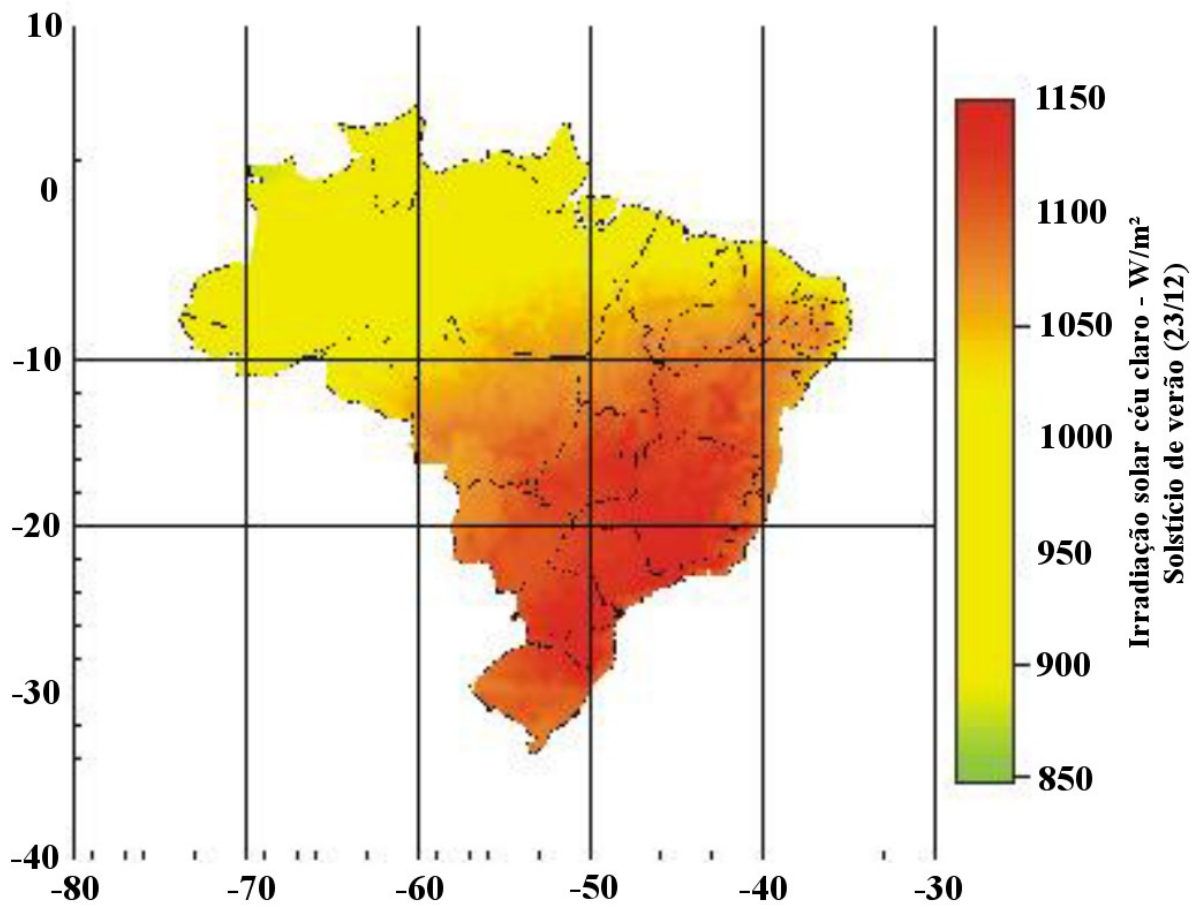


Fig. 4.2 – Mapa de irradiação solar global no Brasil – solstício de verão

Fonte: atlas solarimétrico do brasil – UFPE

Pode-se notar que nos estados de São Paulo e Rio Grande do Sul, por exemplo, os índices são maiores do que no estado do Piauí e da região norte, ao contrário do que se poderia supor com base na proximidade com a linha do equador.

De acordo com a referência [31], observando-se o mapa, justifica-se o uso do valor de 1200 W/m^2 , quando não forem utilizados valores regionais e nem feitas medições.

Segundo o CIGRÉ WG22-12 e IEEE Std 738, os valores de emissividade térmica e

coeficiente de absorção solar variam de 0,2 a 0,9 dependendo do envelhecimento do condutor. Ambos sugerem o valor intermediário de 0,5. Entretanto, observa-se que a emissividade dos condutores atinge valores próximos de 0,9 já nos primeiros dois anos para condutores imersos em ambientes industriais e 0,8 em quatro anos para ambientes rurais [31].

O quadro abaixo mostra alguns valores adotados pelas principais empresas estatais do ramo de energia no país.

| Empresa | Local | Temperatura Ambiente (°C) | Radiação Solar (W/m²) | Velocidade do Vento (m/s) | Emissividade | Absorvidade |
|--------------------|--------------------------------------|----------------------------------|---|----------------------------------|---------------------|--------------------|
| CHESF | RN, PB, PE, AL, BA, Sudeste CE | 30,0 | 1200 | 1,0 | 0,77 | 0,78 |
| | Noroeste CE | 32,0 | 1200 | 1,0 | 0,77 | 0,78 |
| | PI | 34,0 | 1200 | 0,7 | 0,77 | 0,78 |
| Eletrosul | RS | 30,1 | 1000 | 0,61 | 0,77 | 0,78 |
| | PR Curitiba, SC Planalto | 25,3 | 1000 | 0,61 | 0,77 | 0,78 |
| | PR-Norte | 29,3 | 1000 | 0,61 | 0,77 | 0,78 |
| | PR-Oeste | 31,8 | 1000 | 0,61 | 0,77 | 0,78 |
| | SC-Litoral | 28,8 | 1000 | 0,61 | 0,77 | 0,78 |
| | MS | 29,9 | 1000 | 0,61 | 0,77 | 0,78 |
| Eletronorte | Região Norte | 33,5 | 1000 | 0,61 | 0,5 | 0,5 |
| Furnas | RJ, SP, PR, MG, GO, MT | 30,0 | 1000 | 0,61 | 0,77 | 0,78 |

Fonte: SNPTEE – GLT 23 grupo III – Rio de Janeiro, 14 a 17 de outubro de 2007 [31]

A NBR 5422 [14] apresenta instruções para obtenção da velocidade e da direção do vento com seu respectivo tempo de retorno, através da utilização de anemógrafos. Para isso, seria necessária uma ampla coleção de dados a fim de se estimar os valores médios. Na prática, utilizam-se tabelas prontas com esses valores.

Também nesta norma, encontram-se recomendações a respeito da temperatura superficial do cabo e da obtenção dos dados relativos as condições climáticas do local. É apresentado o conceito de risco térmico, que utiliza uma distribuição estatística log-normal a fim de estimar os parâmetros climáticos na falta de estudos específicos à série horária de temperatura superficial do condutor.

Segundo esta norma, as condições de sol forte correspondem a 1000 W/m^2 e a sol a pino correspondem a 1300 W/m^2 . Este último representa o valor mais conservativo que pode-se utilizar. Como os métodos de cálculo para convecção forçada e natural tomam as devidas precauções para o caso de não haver vento, pode-se desconsiderar dimensionar os barramentos sem riscos de sobreaquecimento sob aspectos climáticos.

4.4 PERFIL NORMALMENTE ESCOLHIDO PARA BARRAMENTOS RÍGIDOS

Os barramentos tubulares são quase que sempre a melhor escolha entre os barramentos rígidos de subestações.

Isto se deve porque para uma mesma seção de metal condutor (cobre ou alumínio), estes perfis conduzem mais corrente pois em altas tensões, a corrente passa pela periferia dos condutores devido ao efeito pelicular, isto é, o interior da seção fica inutilizado. Como consequência disso, são mais baratos que os maciços ou em chapa para uma mesma capacidade de condução de corrente.

Outro fator é o de que possuem maior resitência mecânica do que uma seção retangular (maior momento de inércia), para o caso de um esforço de tração em um curto-circuito na linha, vento, etc.

4.5 O USO DE PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

O cálculo de barramentos em subestações é trabalhoso e muitas vezes complexo, exigindo cálculos iterativos. Por isso, cada vez mais, o desenvolvimento de aplicações computacionais se torna importante para facilitar esses cálculos.

Outro fator que vai a favor do uso de ferramentas de informática é o uso de muitas

constantes e tabelas. Todas essas informações, podem ser facilmente armazenadas e acessadas pelo software, ao invés de serem consultadas manualmente pelo projetista, o que aumenta a chance de erro.

Por outro lado, quando é feito o projeto de uma subestação, é necessário a apresentação de um memorial de cálculos, embasando a escolha de tal barramento. Esta exigência, evita por assim dizer, que todo o dimensionamento seja feito com o uso de programas de computador.

O uso dos programas teria como função, a facilitação dos cálculos iterativos, que seriam muito complicados de serem executados manualmente por métodos numéricos, a consulta de tabelas e constantes, obtenção e interpretação de gráficos e a conferência dos cálculos necessários em cada etapa da escolha do barramento.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O dimensionamento de barramentos é uma etapa importante no projeto de uma subestação não devendo ser deixado em segundo plano. A importância deste dimensionamento está relacionada principalmente a segurança das instalações e dos operadores. Também tem relevância o fato de barramentos mal dimensionados elevarem o custo do projeto.

Não há nas normas brasileiras qualquer tipo de padrão nacional para o dimensionamento de barramentos em subestações. Desta forma, o método utilizado no cálculo dos barramentos fica a critério do engenheiro responsável pelo projeto e normalmente recaem em normas internacionais ou padrões internos das próprias empresas.

Existem algumas recomendações internacionais, sendo a principal delas o *IEEE Std 605 – Guide for Design of Substation Rigid-Bus Struct* [34]. Outras bibliografias complementares podem ser adotadas, principalmente em se tratando de barramentos flexíveis, onde não existe um guia específico. São documentos importantes o *IEC 60865 - Short-circuit currents - Calculation of effects* [13] e os dois métodos utilizados para o cálculo da ampacidade em linhas aéreas: *IEEE Std 738* [2] e *CIGRÉ WG22-12* [8]. De maneira geral, os dois métodos apresentados para determinação da capacidade de condução de corrente não oferecem grandes divergências em termos de resultados.

Pode-se concluir que em subestações, o dimensionamento elétrico tende a ser mais influente em se tratando de barramentos flexíveis, pois normalmente, o critério de ampacidade irá determinar a seção do condutor que será apenas confirmada nos cálculos mecânicos. Já em barramentos rígidos, a tendência é em relação ao dimensionamento mecânico, ou seja, via de regra o barramento está superdimensionado no que diz respeito a capacidade de condução de corrente.

Na prática, o dimensionamento por efeito corona não precisa ser verificado. Ele apenas estará presente na memória de cálculo quando as especificações do projeto assim o exigirem.

A principal sugestão de continuidade deste trabalho é a confecção de um software que automatize os cálculos apresentados neste trabalho. Como já foi discutido anteriormente, o software não substitui nem elimina a necessidade de apresentação dos cálculos mas facilita o uso de tabelas, verificação dos resultados, análise de dados através de gráficos e resolução de cálculos que necessitem métodos numéricos para resolução.

O curto-circuito em subestações também é um tema que poderia receber maior aprofundamento. É necessário um estudo a parte para a determinação dos parâmetros de curto-circuito da subestação. O próprio dimensionamento de barramentos com relação ao curto-circuito é um tópico que pode ser bastante ampliado.

Pode-se também expandir os cálculos de dimensionamento levando-se em conta as disposições de barramentos não coplanares nos conjuntos de manobra e controle, as influências das derivações e conexões de barramentos secundários nos barramentos principais e também considerações sobre o momento de inércia quanto ao arranjo das barras em fases compostas.

O presente trabalho limita-se ao cálculo das seções dos condutores mas pode-se também incluir os cálculos das colunas de isoladores da subestação.

Durante a busca por documentação sobre condutores, encontra-se muita informação a respeito de linhas de transmissão. Dessa forma, sugere-se também alguns assuntos que podem ser objeto de trabalhos e não somente sugestões de continuidade destes projeto.

A respeito da capacidade de condução de corrente, corriqueiramente cai-se no terreno da capacidade estatística. Esta é uma questão que vem sendo cada vez mais discutida pelas autoridades do ramo energético brasileiro. Este assunto será incluído na próxima revisão da NBR 5422. Está atualmente em fase de debate. Este é um assunto que poderia merecer análise complementar e está bastante relacionado com os métodos descritos na seção 3.1 deste trabalho.

Também em linhas de transmissão, o efeito corona pode ser melhor estudado pois traz maiores transtornos do que em subestações. Os efeitos de rádio interferência podem ser bastante

aprofundados com equacionamentos e modelagem eletromagnética. O efeito corona também é responsável por perdas de energia nas linhas de transmissão, trazendo impactos econômicos. Perdas essas que não são tão sentidas em se tratando de barramentos na maior parte das subestações. Talvez apenas em se tratando de subestações de grande porte. Existem métodos e dispositivos [32] para redução do efeito corona que podem também ser detalhados.

6 REFERÊNCIAS

- [1] HOUSE, H. E; TUTTLE, P. D.. **Current-Carrying Capacity of ACSR**. Transaction of the American Institute of Electrical Engineers – Part III: Power Apparatus and Systems. 1958
- [2] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 738-2006** . IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors . Nova York: 2007.
- [3] NEW YORK POWER POOL. **Appendix A: Calculation of Overhead Conductor Ampacities**. Tie-Line Ratings Task Force, Nova York: 1995
- [4] DE PAULA, João J.A. **Capacidade de condução de corrente em cabos de alumínio nu**. Disponível em: <<http://www.nexans.com.br>>. Acesso em: setembro 2009
- [5] ALCOA. **Aluminum Electrical Conductor Handbook**. Aluminum Association, 3ª ed. 1989
- [6] WRIGHT, Sherwin H.; HALL, C. F. **Transmission and Distribution – Cap 3: Characteristics of Aerial Lines**. Westinghouse Electric Corporation, East Pittsburg, PA, USA: 1950
- [7] COMPANIA ESTADUAL DE ENERGIA ELÉTRICA Rio Grande do Sul- CEEE. **Memória de Cálculo para Dimensionamento de Barramentos** – SE Porto Alegre 10. Porto Alegre, 1984
- [8] CIGRÉ INTERNATIONAL CONCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS. **Thermal Behaviour of Overhead Conductor**. Revista Electra nº 144, seções 1 e 2– SC22 WG22.12, 1992.
- [9] MORGAN, V. T. **The thermal rating of overhead line conductors**. 1982
- [10] SCHNEIDER ELECTRIC. **Calculation of short-circuit currents**. Cahier Technique no. 158, 2005
- [11] GENERAL ELECTRIC COMPANY. **Short-circuit current calculations for industrial and commercial power systems** – Application Information GET-3550F 0489 BLC: Plainville, USA, 1989.
- [12] WALDON SALENGUE. **Barramentos condutores em instalações elétricas industriais**. Rio de Janeiro, 1974.
- [13] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Short-circuit currents – Calculation of effects**. IEC 60865-1 International Standard – second edition, Geneva, Suíça:1993.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-5422 - Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica**. Rio de Janeiro, 1984.
- [15] NEXANS FICAP S/A. **Fios e Cabos Termoplásticos para Instalações Elétricas de Baixa Tensão**. Cabos de Energia, Página 38
- [16] FARIA, Elder. **Cálculo de barramentos**. FEUP, Porto, Portugal: 2004

- [17] THIERRY, Jean-Pierre; KILINDJIAN, Christophe. **Electrodynamic Forces on Busbars in LV Systems - Cahier Technique Merlin Gerin n° 162**, France.
- [18] MSPC. **Resistência dos Materiais V30**. <<http://www.mspc.eng.br>>. Acessado em novembro de 2009.
- [19] KIESSLING, F. ; NOLASCO. **Overhead Power Lines – Planning, Design, Construction**. Springer-verlag, Berlin, Alemanha: 2003.
- [20] UFRGS. **Cálculo mecânico para cabos – notas aula disciplina ENG 04470** - Transmissão em Energia Elétrica, Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes: 2009.
- [21] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Design criteria of overhead transmission lines**. IEC 60826 International Standard – third edition, Genebra, Suíça: 2003.
- [22] FUCHS, R. D.; ALMEIDA, M. T. **Projeto mecânico das linhas aéreas de transmissão**. Editora Edgard Blücher, São Paulo: 1982.
- [23] HUERTAS, J. I.; BARRAZA, Roberto; ECHEVERRY, J. M. **Wireless Data Transmission From Incide Electromagnetic Fields**. Toluca, México: 2000.
- [24] INDULKAR, C. S. **Sensitivity Analysis of Corona and Radio Noise in EHV Transmission Lines**. J. of Institution of Engineers, Vol. 84 pp.197-200, Índia: 2004.
- [25] INDULKAR, C. S. **Statistical Evaluation of Corona and Radio Noise in EHV Transmission Lines**. J. of Institution of Engineers, Vol. 85 pp.158-163, Índia: 2004.
- [26] SHORT, T.A. **Electric Power Distribution Handbook**. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA: 2004
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR07270 – Cabos de Alumínio com Alma de Aço para Linhas Aéreas**. 1988
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR07271 - Cabos de Alumínio para Linhas Aéreas**. 1988
- [29] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Bare Overhead Transmission and Distribution Conductor Design Overview**. IEEE Conference Paper, 1995.
- [30] SRT/ ANEEL. **Metodologia para determininação da capacidade operativa de longa duração de linhas aéreas de transmissão**. Nota Técnica n° 038 de 14 de novembro de 2005
- [31] SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Determinação das capacidades operativas das linhas de transmissão de acordo com a resolução normativa 191 da aneel – a visão da CHESF**. SNPTEE Grupo III GTL 23, Rio de Janeiro: 2007
- [32] WILLIAN POKORNY. **Transmission Line Audible Noise and Corona Reducing Device**. Unites States Patent, 1974.