



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RAFAEL ARCANJO MELLO DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE CABOS ISOLADOS DE POTÊNCIA EM REDES  
COLETORAS**

Recife  
2023

RAFAEL ARCANJO MELLO DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE CABOS ISOLADOS DE POTÊNCIA EM  
REDES COLETORAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Prof. Dr. Otoni Nóbrega Neto.

Recife  
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Oliveira, Rafael Arcanjo Mello de.

Análise do comportamento de cabos isolados de potência em redes  
coletoras / Rafael Arcanjo Mello de Oliveira. - Recife, 2023.

73 : il., tab.

Orientador(a): Otoni Nóbrega Neto

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de  
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica -  
Bacharelado, 2023.

Inclui referências, anexos.

1. Redes Subterrâneas. 2. Ampacidade. 3. Cabos Isolados. I. Nóbrega Neto,  
Otoni. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

[RAFAEL ARCANJO MELLO DE OLIVEIRA]

**análise do comportamento de cabos isolados de potência em redes coletoras**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: 27/09/2023.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Otoni Nóbrega Neto (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Zanoni Dueire Lins (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. M.Sc. Ericles Mauricio Barbosa (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

Este trabalho é dedicado a todos que de alguma forma contribuíram para esta construção.

## **AGRADECIMENTOS**

A realização deste Trabalho de Conclusão de Curso representa uma jornada de aprendizado e crescimento que não teria sido possível sem o apoio e a colaboração de diversas pessoas. Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Primeiramente, meu profundo agradecimento a minha família, especialmente ao meu irmão, pelo apoio e paciência demonstrados durante os momentos desafiadores desta jornada acadêmica.

Agradeço também ao meu orientador Otoni Nóbrega Neto pela orientação ao longo deste processo.

Por fim não posso deixar de mencionar meus amigos, professores e colegas de classe, que compartilharam conhecimento, experiências e forneceram um apoio valioso.

Este TCC representa não apenas uma conquista pessoal, mas também o resultado do apoio generoso e da colaboração de muitos. Obrigado a todos por fazerem parte desta jornada.

O treinamento de usuários consiste em parte do processo de educação, em base repetitiva, compreende ações e/ou estratégias para desenvolver determinadas habilidades ou habilidades específicas do usuário por desconhecer situações específicas de uso da biblioteca e seus recursos informacionais, que envolvem o conjunto de meios necessários para tal (DIAS; PIRES, 2004, p. 36).

## RESUMO

As redes de transmissão subterrâneas são largamente utilizadas em unidades de geração a partir de fontes eólicas. O aumento significativo da capacidade instalada destas unidades de geração no Brasil com previsão que em 2027 passem a corresponderem a 14,6% da matriz energética brasileira com uma capacidade instalada de 33.770 MW de acordo com a ONS, faz com que a importância de entender o comportamento dos cabos isolados quando inseridos no solo se torne essencial, de modo que as redes subterrâneas operem em segurança, sem que os cabos sejam submetidos a condições extremas as quais possam alterar suas propriedades materiais, buscando a partir disto a maior confiabilidade do sistema elétrico. Este trabalho apresenta uma análise de estudo de caso e descreve uma metodologia específica em média tensão, baseada em normas, utilizada para estimar a capacidade máxima que o cabo pode transmitir corrente elétrica e a corrente termicamente admissível suportada em um curto-circuito. Como também, analisar como os aspectos construtivos e de configurações destes cabos causam sobre esta ampacidade do condutor e nas as correntes termicamente admissíveis em condição de curto-circuito. A consideração desses dados revela-se crucial durante o processo de seleção do cabo isolado, pois sua finalidade primordial é assegurar a durabilidade, a segurança, e a confiabilidade do sistema elétrico de potência ao qual a rede subterrânea está submetida.

**Palavras-chave:** redes subterrâneas; ampacidade; cabos isolados

## ABSTRACT

Underground transmission networks are widely used in power generation units from wind sources. The significant increase in the installed capacity of these generation units in Brazil, with a forecast that by 2027 they will account for 14.6% of the Brazilian energy matrix with an installed capacity of 33,770 MW according to ONS, makes it essential to understand the behavior of insulated cables when inserted into the ground. This is to ensure that underground networks operate safely, without the cables being subjected to extreme conditions that could alter their material properties, aiming to achieve greater reliability of the electrical system. This work presents a case study analysis and describes a specific methodology for medium voltage, based on standards, used to estimate the maximum capacity that the cable can carry electrical current and the thermally permissible current supported in a short circuit. It also analyzes how the construction aspects and configurations of these cables affect the conductor's ampacity and the thermally permissible currents under short-circuit conditions. Consideration of this data is crucial during the cable selection process, as its primary purpose is to ensure the durability, safety, and reliability of the power electrical system to which the underground network is subjected.

**Keywords:** underground power grids; ampacity; insulated cables.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Cabos de potência inseridos a 90 cm abaixo do solo. ....	17
Figura 2 – Composição dos cabos isolados de média tensão.....	18
Figura 3 – Fio redondo sólido.....	20
Figura 4 – Condutor redondo normal. ....	20
Figura 5 – Condutor redondo Compacto. ....	21
Figura 6 – Condutor setorial compacto. ....	21
Figura 7 – Condutor flexível. ....	21
Figura 8 – Campo elétrico em cabo isolado sem camadas semicondutoras.....	24
Figura 9 – Campo elétrico em cabo isolado com camadas semicondutoras.....	25
Figura 10 – Cabo isolado tripolar sem a camada semicondutora externa.....	26
Figura 11 – Cabo isolado tripolar com a camada semicondutora externa.....	26
Figura 12 – Aterramento das blindagens metálicas dos cabos isolados unipolares..	30
Figura 13 – Aterramento da blindagem metálica em dois pontos.....	31
Figura 14 – Aterramento da blindagem metálica em um ponto único. ....	31
Figura 15 – Sistema de aterramento <i>cross-bonding</i> .....	32
Figura 16 – Capacidade de condução de corrente (A) para isolação: XLPE, TR XLPE, EPR ou HEPR. Temperatura do condutor 90 °C.....	45
Figura 17 – Capacidade de condução de corrente (A) para isolação: EPR 105. Temperatura do condutor 105 °C. ....	45
Figura 18 – Fatores de correção para temperatura ambiente do solo, para linhas subterrâneas. ....	47
Figura 19 – Fatores de correção para a resistividade térmica do solo de acordo com o método de referência. ....	48
Figura 20 – Vista perfil do sistema que interliga o aerogerador a estrutura de transição.....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ampacidade cabos de cobre e alumínio.....	22
Tabela 2 – Tipos de isolação.....	27
Tabela 3 – Tipo de isolações em relação a tensão de isolamento. ....	28
Tabela 4 – Limite térmicos para cada isolação. ....	29
Tabela 5 – Temperatura máxima em regime permanente em função da cobertura. .	33
Tabela 6 – Valores das constantes K e $\beta$ , e Calor específico volumétrico $\sigma_c$ para cobre e alumínio.....	36
Tabela 7 – Constantes térmicas dos materiais circundantes ao condutor. ....	38
Tabela 8 – Temperatura da blindagem no final do curto. ....	40
Tabela 9 – Constantes térmicas dos materiais circundantes a blindagem.....	42
Tabela 10 – Especificações técnicas do aerogerador. ....	51
Tabela 11 – Sistema. ....	52
Tabela 12 – Fatores de correção aplicados a ampacidade do cabo de 25mm <sup>2</sup> - XLPE. ....	53
Tabela 13 – Características do cabo isolado.....	55
Tabela 14 – Fatores de correção aplicados a ampacidade do cabo de 70mm <sup>2</sup> - EPR 105. ....	55
Tabela 15 – Variáveis para o cálculo de corrente de curto-circuito termicamente admissível para o condutor. ....	57
Tabela 16 – Variáveis para o cálculo de corrente de curto-circuito termicamente admissível para o condutor escolhido. ....	58
Tabela 17 – Variáveis para o cálculo de corrente de curto-circuito termicamente admissível para o condutor. ....	59
Tabela 18 – Variáveis para o cálculo de corrente de curto-circuito termicamente admissível para a blindagem metálica. ....	60
Tabela 19 – Trecho da Tabela 25 da NBR 14039 – Tipos de linhas elétricas.....	66
Tabela 20 – Trecho da Tabela 28 da NBR 14039 – Capacidade de condução de corrente (A) para isolação: XLPE, TR XLPE, EPR ou HEPR. Temperatura do condutor 90 °C. ....	67
Tabela 21 – Trecho da Tabela 29 da NBR 14039 – Capacidade de condução de corrente (A) para isolação: EPR 105. Temperatura do condutor 105 °C.....	68
Tabela 22 – Trecho da Tabela 31 da NBR 14039 – Fatores de correção para temperatura ambiente, para linhas subterrâneas.....	69
Tabela 23 – Trecho da Tabela 32 da NBR 14039 – Fatores de correção para a resistividade térmica a serem aplicados às capacidades de condução de corrente do método de referência F1, F2, G1, G2, H ou I. ....	69
Tabela 24 – Trecho da Tabela 33 da NBR 14039 – Fatores de correção para profundidades a serem aplicados às capacidades de condução de corrente do método de referência F1, F2, G1, G2, H ou I. ....	70
Tabela 25 – Trecho da Tabela 36 da NBR 14039 – Fatores de correção de agrupamento a serem aplicados às capacidades de condução de corrente do método de referência F1. ....	70
Tabela 26 – Trecho da Tabela 37 da NBR 14039 – Fatores de correção de agrupamento a serem aplicados às capacidades de condução de corrente do método de referência F2. ....	71

Tabela 27 – Trecho da Tabela 38 da NBR 14039 – Fatores de correção de agrupamento a serem aplicados às capacidades de condução de corrente do método de referência G1.....	71
Tabela 28 – Tabela 39 da NBR 14039 – Fatores de correção de agrupamento a serem aplicados às capacidades de condução de corrente do método de referência G2. ....	72
Tabela 29 – Tabela 40 da NBR 14039 – Fatores de correção de agrupamento a serem aplicados às capacidades de condução de corrente do método de referência H.....	72
Tabela 30 – Tabela 41 da NBR 14039 – Fatores de correção de agrupamento a serem aplicados às capacidades de condução de corrente do método de referência I. ....	72

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampere
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
°C	Grau Celsius
EPR	Borracha de Etileno Propileno
g	Gramma
HEPR	Borracha de Etileno Propileno de Alto Peso Molecular
IACS	<i>International Annealed Copper Standard</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
K	Kelvin
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PE	Polietileno
PVC	Cloro de Polivinila
RDA	Rede de distribuição aérea
RDS	Rede de distribuição subterrânea
TR XLPE	Polietileno Reticulado com Características Retardantes a Chama
V	Volt
W	Watt
XLPE	Polietileno Reticulado

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V_0$	Tensão eficaz entre o condutor e terra ou blindagem
$V_1$	Tensão eficaz entre as fases dos condutores
$I$	Corrente de curto-circuito admissível do componente condutor de corrente
$I_{AD}$	Intensidade da corrente de curto-circuito em hipótese adiabática
$\varepsilon$	Fator não adiabático do componente condutor de corrente
$t$	Duração do curto-circuito
$K$	Constante do material do componente condutor de corrente
$S$	Seção geométrica do componente condutor de corrente
$\theta_f$	Temperatura final
$\theta_i$	Temperatura inicial
$\beta$	Inverso do coeficiente de variação da resistência com a temperatura do componente condutor de corrente
$F$	Fator de contato térmico entre fios adjacentes e materiais não metálicos
$\sigma_c$	Calor específico volumétrico do componente condutor de corrente
$\sigma_i$	Calor específico volumétrico dos materiais não-metálicos adjacentes
$\rho_i$	Resistividade térmica dos materiais não-metálicos adjacentes
$Ac$	Ampacidade corrigida
$A$	Ampacidade de acordo com o método de instalação
$Ft$	Fator de correção por temperatura do solo
$Fr$	Fator de correção por resistividade térmica do solo
$Fp$	Fator de correção por profundidade
$Fa$	Fator de correção por agrupamento

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	OBJETIVOS .....	14
1.1.1	Geral.....	14
1.1.2	Específicos .....	15
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	15
<b>2</b>	<b>CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS CABOS ISOLADOS .....</b>	<b>17</b>
2.1	CONDUTOR.....	19
2.1.1	Características construtivas dos condutores .....	19
2.1.2	Material condutor: cobre ou alumínio.....	22
2.2	CAMADAS SEMICONDUTORAS.....	23
2.2.1	Camada semicondutora interna (blindagem do condutor) .....	24
2.2.2	Camada semicondutora externa (blindagem da isolação).....	25
2.3	ISOLAÇÃO .....	27
2.4	BLINDAGEM METÁLICA.....	29
2.4.1	Sistema de aterramento das redes de distribuição subterrânea.....	30
2.4.1.1	<i>Sistema de aterramento em dois ou mais pontos.....</i>	<i>30</i>
2.4.1.2	<i>Sistema de aterramento em ponto único .....</i>	<i>31</i>
2.4.1.3	<i>Sistema de aterramento cross-bonding .....</i>	<i>32</i>
2.5	COBERTURA .....	33
<b>3</b>	<b>CORRENTES DE CURTO TERMICAMENTE ADMISSÍVEIS.....</b>	<b>34</b>
3.1	CAPACIDADE DE CURTO NOS CONDUTORES.....	35
3.2	CAPACIDADE DE CURTO NAS BLINDAGENS METÁLICAS .....	39
<b>4</b>	<b>AMPACIDADE DOS CABOS ISOLADOS .....</b>	<b>43</b>
4.1	CONFIGURAÇÕES DOS CABOS.....	43
4.2	CÁLCULO DA AMPACIDADE E FATORES DE CORREÇÃO .....	46
<b>5</b>	<b>ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>51</b>
5.1	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA.....	51
5.2	AMPACIDADE PARA O SISTEMA.....	52
5.3	CORRENTES TERMICAMENTE ADMISSÍVEIS NO CURTO-CIRCUITO ...	56
5.3.1	Correntes admissíveis no condutor .....	56
5.3.2	Correntes admissíveis na blindagem metálica .....	59
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE .....</b>	<b>62</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>64</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>66</b>

# 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, redes de distribuição aéreas (RDA) são amplamente utilizadas para distribuição de energia elétrica, porém existem ocasiões em que se faz necessário transmitir a energia por condutores sob o solo devido condições que tornam a distribuição aérea evitável, como a falta de espaço para construções destas redes, obstáculos e até mesmo a estética para a paisagem urbana. Além disso, as redes de distribuição subterrânea (RDS) traz consigo vantagens para o sistema elétrico em que estão inseridas, como o aumento do grau de mobilidade, uma vez que dispensa a utilização de postes; o aumento da confiabilidade do sistema, devido a menor possibilidade de descargas elétricas, redução do risco de rupturas dos condutores e contatos acidentais; e maior vida útil. Estas redes de distribuição subterrâneas possuem alto custo de implantação em relação as redes de distribuição aéreas, porém as RDSs podem ser mais viáveis economicamente a longo prazo dependendo do projeto executado, uma vez que, os custos de manutenções podem ser inferiores comparado às RDAs [1].

Segundo a ONS, a capacidade instalada de unidades de geração a partir de fonte eólicas no Brasil corresponde a 12,5% da matriz energética brasileira fornecendo cerca de 25.850 MW de potência e com previsão de que em 2027, passe a corresponder a 14,6% com uma capacidade instalada de 33.770 MW [2]. Isto impulsiona o maior investimento no conhecimento em RDSs, pois esse tipo de distribuição é usualmente utilizado nestas unidades geradoras. Com isso, é importante compreender o comportamento dos cabos isolados de potência energizados em linhas subterrâneas.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Geral

Compreender e analisar, a partir de uma metodologia baseada em normas, o comportamento dos cabos isolados de potência referente a sua capacidade de

condução de corrente em regime permanente e de curto-circuito em redes coletoras de média tensão a partir de um estudo de caso.

### **1.1.2 Específicos**

Este trabalho, tem como objetivo principal explicar uma metodologia para o cálculo das correntes termicamente admissíveis que o cabo isolado pode suportar em condição de curto-circuito e a sua capacidade de condução de corrente em regime permanente nas redes subterrâneas.

Posteriormente, determinar como se comporta a ampacidade dos cabos isolados em média tensão, sobre uma determinada condição ambiental e construtiva, em trechos subterrâneos, nas saídas de aerogeradores até a estrutura de transição aero-subterrâneo.

Para isso se faz necessário entender os aspectos construtivos destes cabos para a aplicação da metodologia utilizada.

## **1.2 Organização do Trabalho**

A estrutura deste trabalho está dividida em seis capítulos.

No Capítulo 2, é apresentada uma análise detalhada dos aspectos construtivos dos cabos isolados de potência, revelando a composição de cada componente e esclarecendo a função desempenhada por cada um deles

O Capítulo 3, apresenta as normas e os cálculos específicos para a determinação das correntes de curto-circuito termicamente admissíveis nestes cabos.

O Capítulo 4, aborda as condições de configuração dos cabos isolados nas RDSs, bem como os requisitos estabelecidos pelas normas para a correta instalação desses cabos. Além disso, são apresentados métodos para o cálculo da ampacidade dos cabos isolados de potência.

No Capítulo 5, é conduzido um estudo de caso que abrange o trajeto dos cabos desde o aerogerador até uma estrutura de transição. Este estudo tem por objetivo demonstrar os efeitos das diversas configurações dos cabos, bem como das

condições ambientais, sobre a capacidade de condução de corrente nos cabos isolados de potência.

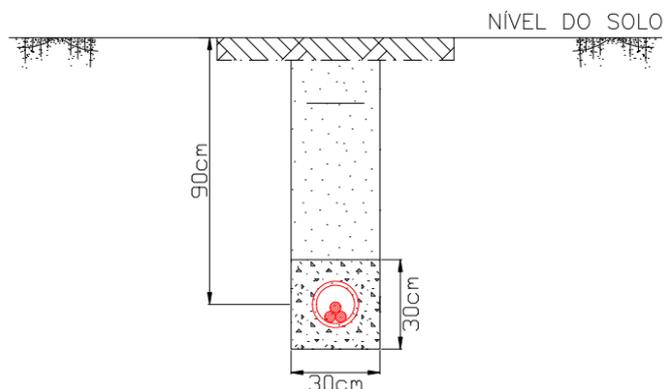
O Capítulo 6 é formado pela conclusão do trabalho.

## 2 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS CABOS ISOLADOS

As redes de energia subterrânea são largamente utilizadas em diversos segmentos dentro do setor elétrico, como na geração de energia, instalações elétricas, transmissão e distribuição. Essas redes demandam o uso de cabos isolados, que possuem como vantagens a resistência mecânica e a resistência a condições ambientais mais adversas como calor e umidade. Além de alta durabilidade, trazendo assim confiabilidade ao sistema elétrico de potência e maior segurança devido sua isolação. Contudo, estes cabos possuem alto custo de implementação, comparado aos cabos nus normalmente utilizados em RDAs, o que torna extremamente importante o seu dimensionamento e características adequadas, a fim de que, atuem durante um maior período e tragam menor custo de operação.

A Figura 1, apresenta uma configuração de cabos de potência de um sistema trifásico inseridos a 90 cm do solo, dispostos em trifólio, dentro de um banco de dutos.

Figura 1 – Cabos de potência inseridos a 90 cm abaixo do solo.



Fonte: autor.

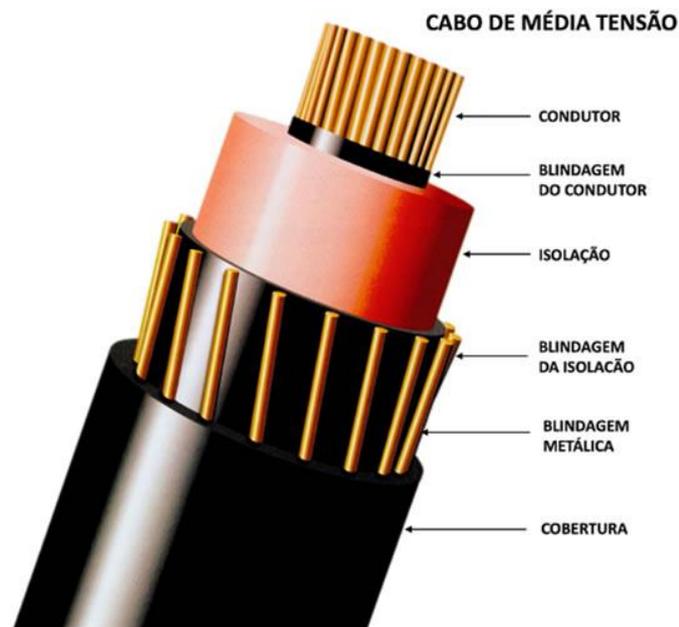
Nas redes de distribuição subterrânea, os cabos isolados de potência sofrem impacto em sua ampacidade quando inseridos sobre condições ambientais externas, principalmente quando estão sob o solo. A temperatura, resistividade térmica do solo e profundidade em que eles são introduzidos interfere diretamente na sua capacidade de condução de corrente de acordo com a norma ABNT NBR 14039 [3]. Além disso, impactos das correntes de curto-circuito sobre estes condutores são tão importantes quanto o cálculo da sua ampacidade, pois quando são submetidos a uma corrente de

curto-circuito além da capacidade admissível provocam sérios problemas nos materiais composto pelo cabo.

Para melhor entendimento dos cálculos aplicados referentes a corrente termicamente admissível e a ampacidade, neste mesmo capítulo será apresentado o cabo isolado de potência e sua composição, que consistem essencialmente em um condutor metálico revestido por uma camada semicondutora. Sobre essa camada, é aplicada a isolação, seguida por uma segunda camada semicondutora, posicionada entre a isolação e a blindagem metálica. Por fim, o cabo é finalizado com uma cobertura externa [4].

Em resumo, o cabo isolado de potência apresenta respectivamente os seguintes materiais: condutor, camada semicondutora interna (blindagem do condutor), isolante, camada semicondutora externa (blindagem da isolação), blindagem metálica e cobertura. Todos estes componentes serão apresentados e explicados de acordo com sua função no decorrer desta capítulo. A Figura 2 apresenta um modelo do cabo isolado e seus elementos.

Figura 2 – Composição dos cabos isolados de média tensão.



Fonte: cabos elétricos de média tensão 6 kV a 35kV - disponível em [5].

As especificações de um condutor requerem indicação mínima de certos parâmetros: Seção, tipo do condutor, tipo da isolação e tensão nominal da isolação [4]. Além disso, composição da blindagem e tipo da cobertura que contemplam o cabo isolado também serão valores fundamentais para o cálculo das correntes termicamente admissíveis apresentadas no capítulo 3.

## **2.1 Condutor**

Os condutores são materiais nos quais as cargas elétricas se movem com facilidade, como nos metais [6]. O seu dimensionamento, seção transversal, deve ser precedido de uma análise detalhada das condições de sua instalação e da carga a ser suprida. Um condutor mal dimensionado, implica na operação inadequada da carga [4]. Além disso, o cabo mal dimensionado poderá estar submetido a uma temperatura fora do seu escopo de trabalho ocasionando alterações em suas propriedades isolantes e materiais, oferecendo risco de acidentes e menor confiabilidade ao sistema.

Uma das características importantes a ser tratada sobre estes cabos são os valores das tensões de isolamento. Estas tensões podem ser vistas através de dois valores ( $V_0/V_1$ ), nos catálogos dos fabricantes, como é indicado pela NBR 6251, sendo o primeiro deles  $V_0$  referente a tensão eficaz entre o condutor e terra ou blindagem e o segundo  $V_1$  que determina a tensão eficaz entre as fases dos condutores, como exemplo: (20/35 kV) [4]. Esta isolação deve ser escolhida em função das características dos sistemas que está inserido.

### **2.1.1 Características construtivas dos condutores**

Os condutores apresentam diferentes formas, sendo cada um deles usados de acordo com suas características específicas. Este tópico esclarecerá sobre alguns tipos de construção de condutores.

O primeiro deles apresentado na Figura 3, é fio redondo sólido. Esse tipo de condutor possui à seção de até 10 mm<sup>2</sup>. Acima disso apresenta baixa flexibilidade,

dificultando os trabalhos de puxamento, acomodação e ligação. Ele é largamente utilizado nas instalações de iluminação e força por ser mais econômico [7].

Figura 3 – Fio redondo sólido.



Fonte: disponível em [7].

O segundo deles é o condutor redondo normal, Figura 4. Ele amplamente utilizado nas instalações elétricas industriais e prediais quando são necessárias seções transversais superiores a 10 mm<sup>2</sup>, devido a sua grande flexibilidade. Esse tipo de condutor pode ser empregado com quaisquer tipos de isolamento [7].

Figura 4 – Condutor redondo normal.



Fonte: disponível em [7].

A Figura 5 apresenta condutor redondo compacto, que é o tipo de condutor que será utilizado no estudo de caso deste trabalho: Esse tipo de condutor apresenta o mesmo aspecto construtivo que o condutor redondo normal. A única diferença é que ele é submetido a um processo de compactação que resulta na deformação dos fios, reduzindo, dessa forma, o seu diâmetro. Essa formação, no entanto, leva o cabo a uma maior rigidez e, conseqüentemente à dificuldade no seu manuseio. Cabe ressaltar que os condutores de baixa e média tensões, em geral, nas seções de 10 mm<sup>2</sup> a 500 mm<sup>2</sup> têm construção compactada [7].

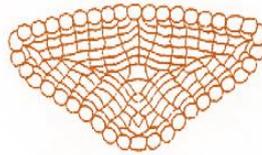
Figura 5 – Condutor redondo Compacto.



Fonte: disponível em [7].

O condutor setorial compacto está apresentado na Figura 6. Ele é fabricado a partir do condutor redondo compacto que sofre um processo de deformação específica dos fios elementares que dá uma forma achatada ao condutor. É destinado basicamente à construção de cabos tripolares e quadripolares, já que sua forma proporciona a redução do seu diâmetro [7].

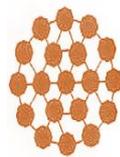
Figura 6 – Condutor setorial compacto.



Fonte: disponível em [7].

Por fim, a Figura 7 apresenta o condutor flexível, que é fabricado a partir do encordoamento de vários fios elementares de diâmetro reduzido. Este tipo de condutor é amplamente utilizado na alimentação de máquinas e aparelhos específicos, como pontes rolantes, escavadeiras, máquinas de solda, aspiradores industriais e domésticos [7].

Figura 7 – Condutor flexível.



Fonte: disponível em [7].

### 2.1.2 Material condutor: cobre ou alumínio

Quanto ao material utilizado nestes condutores, de acordo com o fabricante de cabos isolados, Prysmian Group, o mais utilizados em sua fabricação são o cobre e o alumínio, sendo o alumínio mais viável economicamente [8]. A Tabela 1 apresenta uma rápida análise de acordo com a NBR 14039 e mostra os valores de ampacidade de cabos unipolares em eletrodutos enterrados espaçados com mesmo tipo de isolamento e seção do condutor, diferenciando apenas o material composto pelo condutor, sendo cobre ou alumínio.

Tabela 1 – Ampacidade cabos de cobre e alumínio.

Material	Seção do condutor 150mm <sup>2</sup> Tensão Nominal 8,7/15 kV	Seção do condutor 240mm <sup>2</sup> Tensão Nominal 8,7/15 kV
Cobre	270 A	351 A
Alumínio	211 A	277 A

Fonte: adaptado de [3].

Com os dados fornecidos pela norma, conclui-se que a seção que o condutor de alumínio deve ter para produzir uma ampacidade próxima a do condutor do cobre de 150 mm<sup>2</sup>, sobre estas mesmas condições de configurações descritas, deve ser de aproximadamente 240 mm<sup>2</sup>, estabelecendo uma diferença de diâmetro de aproximadamente 26,48% entre eles.

O cobre apresenta boas vantagens sobre o alumínio que vão além da condutividade elétrica, por exemplo, quando se trata de oxidação, pois a superfície do alumínio quando exposta ao ar fica recoberta por uma camada invisível de óxido, com propriedades altamente isolantes e de difícil remoção, o que dificulta o contato de emenda desses cabos. Em casos de instalações que possua muitas conexões é mais recomendado a utilização da liga de cobre [9]. Por isso o cobre é intensamente empregado nas instalações prediais, comerciais e industriais [7].

Além disso, a condutibilidade do alumínio equivale a 61% da condutibilidade do cobre, isso significa que para o transporte da mesma corrente o condutor de alumínio

terá que ter diâmetro de 28% maior que a do cobre. Contudo, o condutor de alumínio pesará cerca da metade deste, uma vez que a relação entre o peso específico do cobre e o alumínio é de 3,29 [8]. Em outras palavras, 1 kg de alumínio realizará o mesmo trabalho elétrico que cerca de 2 kg de cobre [9]. E sendo o cobre mais caro, torna o alumínio mais viável economicamente.

O alumínio, por si só, representa um dos materiais metálicos mais versáteis, econômicos e atrativos para uma vasta série de aplicações, como metal estrutural sua aplicação só é menor que a dos aços. Além disso, quando empregado como condutor em cabos isolados, o alumínio desempenha um papel significativo nas redes de distribuição subterrânea, especialmente em sistemas de média ou baixa tensão, bem como em parques eólicos [8, 7]. E para exercer esta função de condutor, o alumínio é obtido por laminação contínua. Esse metal oferece notáveis vantagens, tais como excelentes trabalhabilidades, menor peso específico e atratividade econômica. O alumínio puro utilizado em condutores isolados é, normalmente, de têmpera meio-dura e de condutibilidade 61% IACS (*International Annealed Copper Standard*) [8, 10].

O cobre, em termos gerais, é o terceiro material mais utilizado no mundo, perdendo apenas para o aço e o alumínio. Segundo a Associação Brasileira do cobre, suas principais características são as elevadas condutividades elétrica e térmica, boa resistência à corrosão e facilidade de fabricação, aliadas a elevadas resistências mecânica e à fadiga. O cobre empregado na fabricação de condutores elétricos é submetido a um processo de purificação por eletrólise, resultando em um grau de pureza de 99,9%. Em circunstâncias especiais, torna-se imprescindível o uso de cobre com têmperas meio-dura e dura [8, 10, 11].

## **2.2 Camadas semicondutoras**

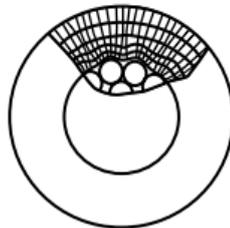
Estas camadas, também conhecidas como blindagens do campo elétrico, são materiais semicondutores que envolvem o condutor elétrico (camada semicondutora interna) ou envolvem sua isolação (camada semicondutoras externa). Sua função consiste em confinar o campo eletrostático no cabo isolado.

### 2.2.1 Camada semicondutora interna (blindagem do condutor)

A principal finalidade da camada semicondutora interna, também chamada de blindagem sobre o condutor, nos cabos isolados é de estabelecer uma distribuição uniforme do campo elétrico no condutor, evitando esforços elétricos que possam danificar o cabo. Esta camada é composta por materiais semicondutores, que possuem propriedades elétricas intermediárias entre os condutores e não condutores [6], e que devem ser compatíveis quimicamente e termicamente com o material do condutor e da isolação [12].

Para melhor entendimento da finalidade desta camada, a Figura 8 apresenta o campo elétrico no cabo isolado sem camadas semicondutoras. De acordo com [9], esta construção simples faz com que o campo elétrico devido à energização, assuma uma forma distorcida, acompanhando as irregularidades da superfície do condutor, como visto nos condutores redondos compactados, assim provocando concentração de esforços elétricos em determinados pontos. Nestas condições, as solicitações elétricas concentradas podem exceder os limites admissíveis pelo isolamento, ocasionando uma depreciação na vida do cabo. Além disso, no caso de cabos com isolamento sólido, a existência de ar entre o condutor e o isolante pode dar origem a ionização, com consequências danosas para o material isolante [9, 8].

Figura 8 – Campo elétrico em cabo isolado sem camadas semicondutoras.

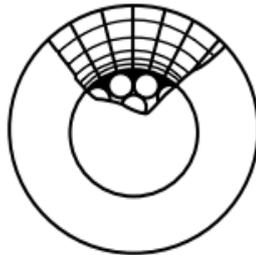


Fonte: disponível em [9].

A Figura 9 apresenta o cabo isolado com a camada semicondutora, que faz com que o campo elétrico se torne uniforme e os problemas anteriormente citados minimizados ou mesmo totalmente eliminados. Contudo, para o ótimo desempenho desta função, a blindagem interna, constituída pela camada semicondutora, deve

estar em íntimo contato com a superfície interna do isolamento. No caso de cabos com isolamento extrudado isto é alcançado mediante extrusão simultânea da camada semicondutora e da camada isolante [9, 8].

Figura 9 – Campo elétrico em cabo isolado com camadas semicondutoras.



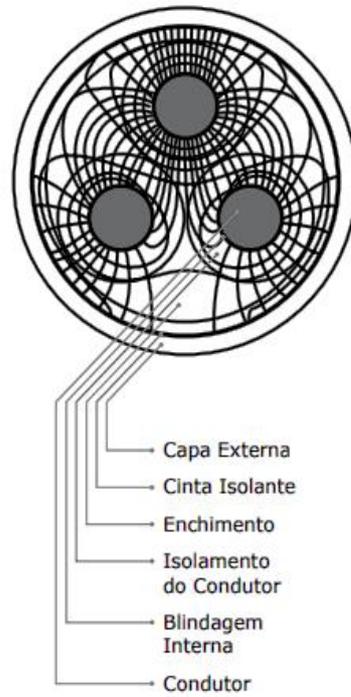
Fonte: disponível em [9].

### **2.2.2 Camada semicondutora externa (blindagem da isolação)**

A camada semicondutora externa, se situa visualmente entre a blindagem metálica e a isolação do condutor, por isso é chamada de blindagem sobre a isolação. Sua função, assim como a camada semicondutora interna, é de alinhar e confinar o campo elétrico dentro do cabo isolado [13, 9]. Eliminando o efeito dos vazios ionizáveis entre a isolação e blindagem metálica [7].

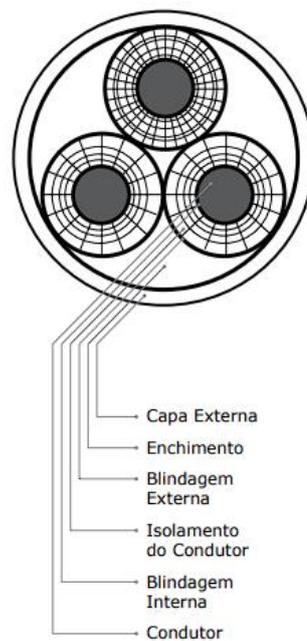
Da mesma maneira, quando um cabo não contém a camada semicondutora externa, o campo eletrostático se torna não radial, com distribuição desigual ao longo do cabo como mostra a Figura 10. Quando o cabo isolado inclui a camada semicondutora externa em sua construção, como mostra a Figura 11, o campo elétrico passa ser radial e de forma balanceada. Sendo assim este tipo de construção para tensões mais elevadas garante solicitações elétricas uniformes em cada ponto da isolação equidistantes do condutor [9].

Figura 10 – Cabo isolado tripolar sem a camada semicondutora externa.



Fonte: disponível em [8].

Figura 11 – Cabo isolado tripolar com a camada semicondutora externa.



Fonte: disponível em [8].

## 2.3 Isolação

A isolação do cabo tem finalidade de proteger os condutores e assegurar o transporte eficiente de energia, sem que haja falhas no sistema, acidentes ou correntes de fuga. Estes isolantes sólidos, extrudados, se dividem em 2 grupos: termofixos (ou termoestáveis), que são polímeros tridimensionais obtidos por vulcanização e não amolecem com o aumento da temperatura; e termoplásticos, que são polímeros de cadeia linear e amolecem com o aumento da temperatura [8, 9].

Os materiais termofixos quando são fabricados, na primeira aplicação de calor se tornam moles e plásticos, mas prosseguindo no processo de aplicação de calor, eles se alteram quimicamente tornando-se duros e rígidos. E assim permanecem, mesmo quando reaquecidos eles não se tornam mais moles, porém sob intenso calor haverá combustão do material isolante. Eles possuem maior dureza em relação aos termoplásticos e apresentam maior estabilidade térmica e maior resistência a uma deformação permanente [10].

Os termoplásticos, ao serem aquecidos sob pressão, passam a apresentar características solidas e moles. Diferente dos termofixos no processo de aplicação de calor, os termoplásticos não sofrem alterações químicas, sendo assim estes materiais podem ser amolecidos novamente sob a ação do calor e endurecidos quando resfriados. Esta isolação apresenta baixa rigidez dielétrica, péssima condução de chama, boa flexibilidade e resistência à abrasão. [10, 7].

A Tabela 2 apresenta os tipos de isolações que serão vistos neste trabalho.

Tabela 2 – Tipos de isolação.

Isolação		Designação
Policloreto de vinila	Termoplásticos	PVC/A
Polietileno termoplástico		PE
Borracha etilenopropileno	Termofixos	EPR, HEPR e EPR 105
Polietileno reticulado quimicamente		XLPE
Polietileno reticulado quimicamente retardante a arborescência		TR XLPE

Fonte: editado de [12].

Conforme estabelecido na NBR 6251, a construção da isolação deve estar em conformidade com os limites recomendados para a tensão de isolamento e a temperatura correspondente. Sendo assim, é essencial compreender que os materiais termoplásticos operam com temperaturas menores que os materiais termofixos e sob uma tensão de isolamento menor ou igual a 3,6/6 kV, porém quando são aplicados a uma tensão de isolamento maior que 6/10 kV a isolação deve ser extrudada simultaneamente com a blindagem semicondutora da isolação e a blindagem do condutor [12]. Já os materiais termofixos tem a vantagem de operar com temperaturas maiores e com tensões de isolações acima de 3,6/ 6 kV ou com qualquer nível de tensão de isolamento [12].

A Tabela 3 representa um resumo sobre as isolações em relação a tensão de isolamento correspondente de acordo com a ABNT NBR 6251.

Tabela 3 – Tipo de isolações em relação a tensão de isolamento.

Isolação		Tensão de Isolamento
Termoplásticos	PVC/A	Menor que 3,6/6 kV*
	PE	3,6/6 kV*
Termofixos	EPR	Qualquer tensão de isolamento
	HEPR	Qualquer tensão de isolamento
	EPR 105	Maior que 3,6/6 kV
	XLPE	Qualquer tensão de isolamento
	TR XLPE	Maior que 3,6/6 kV**
(*) NOTA – Para a fabricação de cabos com tensão de isolamento iguais ou superiores a 6/10 kV, a isolação deve ser extrudada simultaneamente com a blindagem semicondutora da isolação e a blindagem do condutor. (**) NOTA – Retardante à arborescência.		

Fonte: criada a partir de dados de [12].

A Tabela 4, demonstra os limites térmicos em função da isolação, para condições em regime permanente, em regime de sobrecarga e em regime de curto-circuito. Sendo a duração em regime de curto-circuito não superior a 5 segundos [12].

Tabela 4 – Limite térmicos para cada isolação.

Isolação			Temperatura máxima no condutor (°C)		
			Regime permanente	Regime sobrecarga	Regime curto-circuito
Termoplásticos	PVC/A	<300mm <sup>2</sup>	70	100	160
		>300mm <sup>2</sup>			140
	PE		70*	90	130**
Termofixos	EPR e HEPR		90	130	250
	EPR 105		105	140	250
	XLPE e TR XLPE		90	130	250

(\*) NOTA – 75°C para os cabos com isolação de PE de densidade de massa superior a 0,940 g/cm<sup>3</sup> a 23°C.  
(\*\*) NOTA – 150°C, desde que seja utilizada uma blindagem do condutor adequada, como por exemplo, através de um acréscimo na espessura da blindagem do condutor ou através de combinação de fita têxtil semicondutora com camada extrudada.

Fonte: criada a partir de dados de [12].

## 2.4 Blindagem metálica

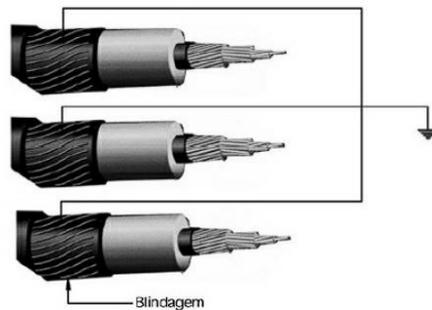
A blindagem metálica pode ser vista constituída por fios condutores, normalmente de cobre, aplicados de forma helicoidal ao longo da camada semicondutora externa. A área da seção transversal desses fios pode ser calculada com base na magnitude da corrente de curto-circuito e na sua duração, respeitando um valor mínimo de 6,0 mm<sup>2</sup> conforme recomendado pela NBR 6251 [12]. Em etapa subsequente deste trabalho inserido no capítulo 3, será apresentado detalhadamente o referido método de cálculo.

Sua função, assim como as camadas semicondutoras, é de confinar o campo elétrico aos limites da isolação. Além disso, quando esta blindagem é corretamente aterrada, evita a ocorrência de acidentes envolvendo choques elétricos e, ao mesmo tempo, possibilita o escoamento de correntes de curto-circuito entre fase e terra, pois proporciona um caminho de impedância reduzida.

### 2.4.1 Sistema de aterramento das redes de distribuição subterrânea

A Figura 12 apresenta como as blindagens metálicas do cabo unipolar de cada fase devem ser conectados juntos em ponto comum ao terra. Estas conexões são feitas nas extremidades dos cabos isolados quando estes são submetidos a um tipo específico de sistema de aterramento.

Figura 12 – Aterramento das blindagens metálicas dos cabos isolados unipolares.



Fonte: editada de [7].

Não fará parte do escopo deste trabalho a relação quantitativa entre o tipo de aterramento desta blindagem com a capacidade de condução de corrente do cabo isolado. Análises mais detalhadas são descritas na norma NBR 11301. Porém, este trabalho apresentará de forma sucinta os tipos mais comuns de aterramento das blindagens metálicas, sendo eles: aterramento em ponto único (*single-point-bonding*), aterramento em dois ou mais pontos (*both-ends-bonding*) e o sistema *cross-bonding*.

#### 2.4.1.1 Sistema de aterramento em dois ou mais pontos

Quando a blindagem é aterrada nas duas extremidades do cabo, configura o tipo de aterramento chamado *both-ends-bonding*, como mostrado na Figura 13. Nesta configuração, a corrente de carga no condutor, gera uma corrente induzida que atravessa a blindagem, já que há um caminho fechado para tal efeito. Estas correntes por sua vez, acabam gerando aquecimento nas blindagens metálicas e conseqüentemente, implica no aquecimento do cabo o que influenciara negativamente em sua capacidade de condução [13].

Figura 13 – Aterramento da blindagem metálica em dois pontos.

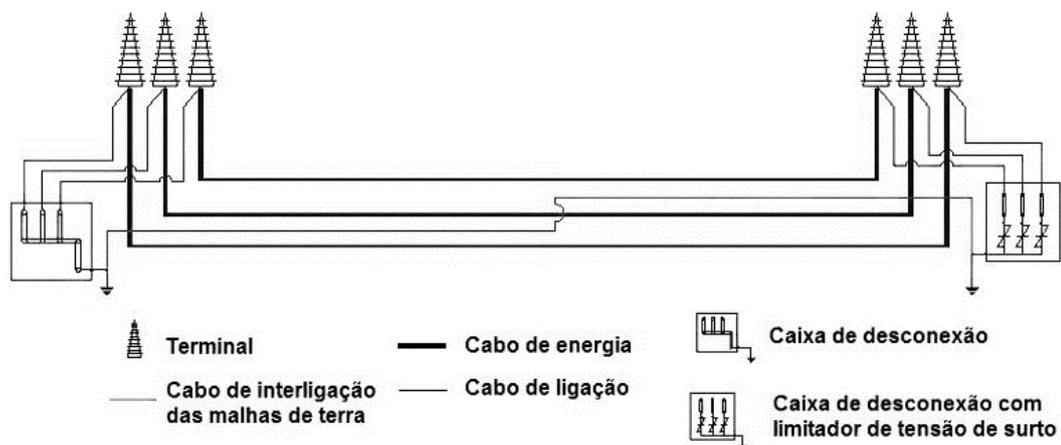


Fonte: disponível em [14].

#### 2.4.1.2 Sistema de aterramento em ponto único

Já no aterramento em ponto único, também chamado de *single-point-bonding*, é aterrado apenas uma extremidade do cabo, como mostrado na Figura 14. Como não há um caminho fechado no circuito, então não haverá correntes induzidas na blindagem metálica, porém haverá uma tensão induzida, que se elevara à medida que se distancia do ponto de aterramento e esta deve ser cerceada através de limitadores de tensão a um valor adequado para atender os requisitos de segurança. Como consequência, este tipo de aterramento fica limitado a circuitos curtos, de aproximadamente 150 m [13, 14].

Figura 14 – Aterramento da blindagem metálica em um ponto único.



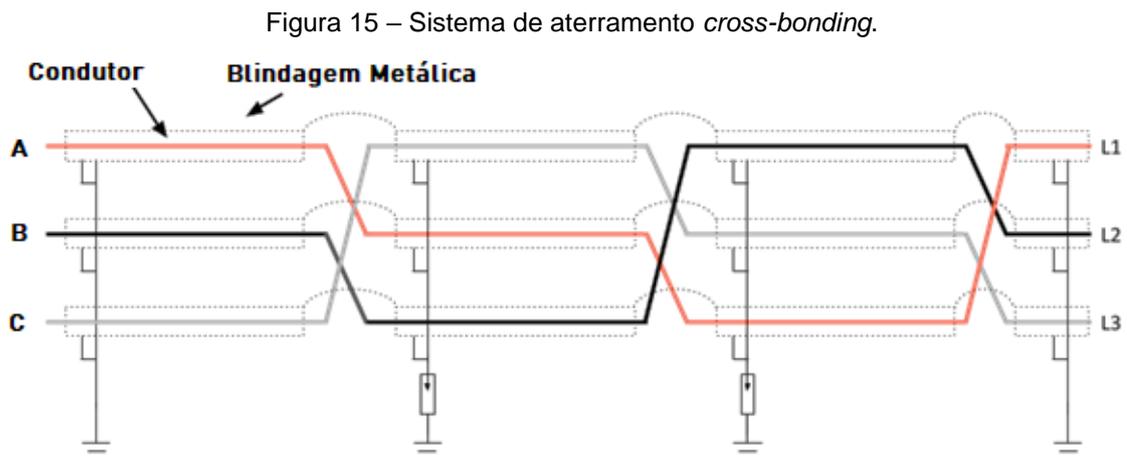
Fonte: disponível em [14].

### 2.4.1.3 Sistema de aterramento *cross-bonding*

Neste sistema de aterramento mostrado na Figura 15, é realizada uma transposição entre as blindagens de cada fase do circuito em trechos segmentados da linha em cabos unipolares. Após três comprimentos sucessivos, resulta como consequência que a soma vetorial das tensões induzidas na blindagem metálica passa a ser nula, desde que a transposição e segmentos dos lances sejam iguais e a disposição seja simétrica [14].

Para melhor esclarecimento, neste método os cabos são aterrados nas extremidades da linha através de caixas de desconexões e os cabos condutores são transpostos espacialmente, enquanto as blindagens metálicas seguem conectadas em linha reta através de limitadores de tensão de surto [14]. Como demonstra a Figura 15, onde cabo condutor da fase A passa a tomar a posição do cabo condutor da fase B, enquanto a blindagem da fase A permanece em linha reta junto com o cabo da Fase C, este que tomou a posição da fase A.

Este tipo de sistema é aplicado em linhas longas, acima de um quilometro, e de alta potência [14]. Por isto, é um sistema de aterramento mais caro por possuir maior construção com limitadores de tensão a cada transposição.



Fonte: adaptado de [15].

## 2.5 Cobertura

E por fim, a cobertura é a camada mais externa do cabo isolado, normalmente formada de um composto termoplástico a base de cloreto de polivinila (PVC) [7]. Sua função é de isolação, a fim de evitar choques elétricos devido ao contato com a blindagem metálica e de proteção mecânica, principalmente em ambientes onde os cabos estão inseridos no solo sem a presença de dutos. Além disso, a cobertura pode ser resistente a uma variedade de agentes químicos.

O material composto pela cobertura a ser usado depende das condições de aplicação no projeto, e devem estar de acordo com as características de limite de temperatura mencionadas na Tabela 5, conforme a norma NBR 6251 [12].

Tabela 5 – Temperatura máxima em regime permanente em função da cobertura.

Cobertura		Temperatura máxima no condutor °C
ST1	Termoplástico	80
ST2		105
ST3		80*
ST7		105
SE1/A e SE1/B	Termofixos	90**
(*) NOTA – 85°C, para os cabos com tensões de isolamento iguais ou superiores a 6/10 kV.		
(**) NOTA – 85°C, para cabos com coberturas SE 1/B e tensões de isolamento inferiores a 6/10 kV.		

Fonte: disponível em [12].

Os valores do limite de temperatura de cada elemento, será de utilidade neste trabalho para o cálculo das correntes termicamente admissíveis dos cabos isolados, tanto para os condutores e tanto para as blindagens metálicas.

### 3 CORRENTES DE CURTO TERMICAMENTE ADMISSÍVEIS

Em razão das circunstâncias expostas aos cabos quando submetidos as correntes de curto-circuito, se faz necessário o seu adequado dimensionamento para que o mesmo suporte com segurança os efeitos térmicos resultantes das elevadas correntes de curto-circuito. A finalidade deste capítulo é verificar se o dimensionamento do cabo, considerando a seção do condutor e a seção da blindagem metálica, suporta apropriadamente as correntes de curto-circuito do sistema. Estes valores máximos de correntes que podem circular através dos componentes mencionados podem ser fornecidos pelo fabricante dos cabos isolados, mas este trabalho demonstrará de acordo com a norma IEC 60949 os cálculos referentes as correntes admissíveis tanto para o condutor como para a blindagem metálica.

O método de cálculo para as estas correntes apresentado na NBR 14039 assume que o calor ocasionado pelo curto é retido apenas no componente transportador de corrente durante a duração do curto, ou seja, um aquecimento adiabático. Entretanto, existe transferência de calor para os materiais adjacentes durante o curto-circuito e este pode ser aproveitado [16].

A norma IEC 60649 apresenta o cálculo das correntes de curto-circuito termicamente admissíveis, tendo em vista os efeitos do aquecimento não adiabático, fornecendo um método simples de incorporar esses efeitos ao cálculo na classificação de curto-circuito. Em outras palavras, será realizado um cálculo da corrente considerando o aquecimento adiabático, onde todo o calor ocasionado pelo curto estará contido apenas no componente transportador de corrente, e um outro cálculo de um fator modificador que leve em conta o aquecimento não adiabático, onde o calor se propaga ao longo do cabo. Estes dois valores obtidos serão multiplicados entre si e o resultado será a corrente de curto termicamente admissível no componente transportador de corrente (condutor ou blindagem) como demonstra a equação (3.1) [16]

$$I = \varepsilon \cdot I_{AD} \quad (3.1)$$

em que:

$I$  – Corrente de curto-circuito admissível do componente condutor de corrente;

$I_{AD}$  – É a intensidade da corrente de curto-circuito em hipótese adiabática e;  
 $\varepsilon$  – Fator não adiabático do componente condutor de corrente.

### 3.1 Capacidade de curto nos condutores

Como descrito no capítulo anterior o cabo isolado é formado por alguns componentes, entre eles o condutor, camada semicondutora interna, isolante, camada semicondutora externa, blindagem metálica e cobertura. Em razão dos cálculos apresentados nesta seção, será necessário o entendimento da composição do cabo considerando o condutor como também os materiais circundantes ao mesmo. Além disso os limites térmicos de alguns materiais mencionados em tabelas anteriores serão utilizados para os próximos cálculos.

A equação (3.2), de acordo com a NBR 14039 [3], mostra o cálculo para o valor da corrente de curto-circuito em um aquecimento adiabático, onde todo o calor fica contido no condutor

$$I_{AD} = \sqrt{\frac{K^2 \cdot S^2 \cdot \ln\left(\frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}\right)}{t}} \quad (3.2)$$

em que:

$t$  – Duração do curto-circuito [s];

$K$  – Constante do material do condutor de corrente [ $A \cdot S^{\frac{1}{2}}/mm^2$ ];

$S$  – Seção geométrica do condutor de corrente [ $mm^2$ ];

$\theta_f$  – Temperatura final [ $^{\circ}C$ ];

$\theta_i$  – Temperatura inicial [ $^{\circ}C$ ];

$\beta$  – Inverso do coeficiente de variação da resistência com a temperatura do condutor de corrente [ $^{\circ}C$ ].

Os valores  $K$  e  $\beta$ , constante do material do condutor de corrente e inverso do coeficiente de variação da resistência com a temperatura do condutor de corrente respectivamente, estão apresentados na Tabela 6. Estas matérias serão predominantemente o cobre ou o alumínio.

Tabela 6 – Valores das constantes  $K$  e  $\beta$ , e Calor específico volumétrico  $\sigma_c$  para cobre e alumínio.

Material	$\beta(^{\circ}C)$	$K(A * S^{\frac{1}{2}}/mm^2)$	$\sigma_c (\frac{J}{K} \cdot m^3)$
Cobre	234,5	226	$3,45 \cdot 10^6$
Alumínio	228	148	$2,5 \cdot 10^6$

Fonte: disponível em [16].

A temperatura  $\theta_i$  do condutor nos cabos isolados no início do curto deve ser assumida como a máxima temperatura de regime permanente permitida para o material da isolação, assim como também a temperatura final  $\theta_f$  deve assumida como a máxima temperatura em regime de curto-curto [3]. Estes valores de limite de temperatura estão apresentados na Tabela 4 citada no capítulo 2 na seção referente à isolação.

Com isso obtém-se o valor de  $I_{AD}$ , correspondente a intensidade da corrente de curto-circuito em hipótese adiabática. Agora, fica restando o valor de  $\varepsilon$  correlato ao fator não adiabático do componente condutor de corrente. Este valor é dado pela equação (3.3)

$$\varepsilon = \sqrt{1 + F \cdot A \cdot \sqrt{\frac{t}{S}} + F^2 \cdot B \cdot \left(\frac{t}{S}\right)} \quad (3.3)$$

em que:

$F$  – Fator de contato térmico entre fios adjacentes e materiais não metálicos;

$t$  - Duração do curto-circuito [S];

$S$  - Seção geométrica do componente condutor de corrente [ $mm^2$ ];

$A$  e  $B$  - Constantes empíricas baseadas nas propriedades térmicas do material não metálico adjacente ao condutor.

O valor  $F$ , fator de contato térmico entre fios adjacentes e materiais não metálicos é determinado pelo tipo de contato que os fios condutores estão submetidos entre eles e outro materiais. De acordo com a IEC 60949, quando eles estão totalmente incorporados, isto é, separado por pelo menos um diâmetro de fio e totalmente rodeados por materiais não metálicos recomenda-se que o valor de  $F$ , fator de contato térmico, deve ser igual a 0,7 [16]. Já quando esses cabos não estão totalmente incorporados, ou seja, sob um tubo extrudado e há espaços de ar presentes entre os fios recomenda-se que o valor de  $F$ , fator de contato térmico, deve ser igual a 0,5 [16].

$A$  e  $B$  são constantes empíricas baseadas nas propriedades térmicas do material não metálico adjacente ao condutor e seus valores quantitativos são representados pelas equações (3.4) e (3.5), respectivamente

$$A = \frac{C_1}{\sigma_c} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_i}{\rho_i}} \quad (3.4)$$

em que:

$C_1$  - Possui um valor de 2464 [ $mm/m$ ], conforme IEC 60949 [16];

$\sigma_c$  - Calor específico volumétrico do componente condutor de corrente [ $J/K.m^3$ ];

$\sigma_i$  - Calor específico volumétrico dos materiais não-metálicos adjacentes [ $J/K.m^3$ ];

$\rho_i$  - Resistividade térmica dos materiais não-metálicos adjacentes [ $K.m/W$ ].

$$B = \frac{C_2}{\sigma_c} \cdot \left(\frac{\sigma_i}{\rho_i}\right) \quad (3.5)$$

em que:

$C_2$  - Possui um valor de 1,22 [ $K \cdot m \cdot mm^2 / J$ ], conforme IEC 60949 [16];

$\sigma_c$  - Calor específico volumétrico do componente condutor de corrente [ $J / K \cdot m^3$ ];

$\sigma_i$  - Calor específico volumétrico dos materiais não-metálicos adjacentes [ $J / K \cdot m^3$ ];

$\rho_i$  - Resistividade térmica dos materiais não-metálicos adjacentes [ $K \cdot m / W$ ].

O valor de  $\sigma_c$  é obtido de acordo com o material condutor e apresentado na Tabela 6. Enquanto,  $\sigma_i$  e  $\rho_i$  estão de acordo com o material não metálico circundante ao condutor e são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Constantes térmicas dos materiais circundantes ao condutor.

Material		$\rho_i (K \cdot m / W)$	$\sigma_i (\frac{J}{K} \cdot m^3)$
Material Isolante	PE	3,5	$2,4 \cdot 10^6$
	XLPE	3,5	$2,4 \cdot 10^6$
	EPR	3,5	$2,0 \cdot 10^6$
	EPR*	5,0	$2,0 \cdot 10^6$
Outros componentes	Semicondutor XLPE e PE	2,5	$2,4 \cdot 10^6$
	Semicondutor EPR	3,5	$2,1 \cdot 10^6$
(*) NOTA – Valores para o material isolante de cabos maiores que 3 kV.			

Fonte: disponível em [16].

Com os valores obtidos, a partir de  $I_{AD}$  e  $\varepsilon$  calcula-se a corrente de curto-circuito admissível pelo condutor a partir da equação (3.1).

As Tabela 6 e Tabela 7 apresenta apenas alguns elementos de mais importância para este trabalho, demais valores podem ser encontrados na norma IEC 60949. É importante ressaltar que as tabelas apresentadas na a IEC 60949 contém valores padronizados internacionalmente como resistividade elétrica, coeficientes de

temperatura de resistência e calores específicos que variam de acordo com os materiais usados nos cabos [16].

### 3.2 Capacidade de curto nas blindagens metálicas

Assim como a capacidade de curto no condutor, a capacidade de curto na blindagem metálica apresenta as mesmas fórmulas e praticamente o mesmo raciocínio. Sendo assim, estas formulas serão citadas e rescritas novamente para melhor compreensão do leitor.

Em razão dos cálculos apresentados nesta sessão, será necessário o entendimento da composição do cabo considerando a blindagem metálica como também os materiais circundantes a mesma. Além disso, os limites térmicos de alguns materiais mencionados em tabelas anteriores serão de utilização para os próximos cálculos.

A corrente nos casos envolvendo a blindagem metálica é calculada por fio e em seguida multiplicada pelo número de fios para obter a corrente de curto-circuito completa. Sendo assim, a área da seção transversal de um único fio é usada em todas as fórmulas para a blindagem metálica [16].

A equação (3.6) mostra o cálculo para o valor da corrente de curto-circuito em um aquecimento adiabático, onde todo o calor fica contido na blindagem metálica

$$I_{AD} = \sqrt{\frac{K^2 \cdot S^2 \cdot \ln\left(\frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}\right)}{t}} \quad (3.6)$$

em que:

$t$  - Duração do curto-circuito [s];

$K$  - Constante do material do componente condutor de corrente [ $A \cdot S^{\frac{1}{2}}/mm^2$ ];

$S$  - Seção geométrica de um único fio da blindagem metálica [ $mm^2$ ];

$\theta_f$  - Temperatura final [ $^{\circ}C$ ];

$\theta_i$  - Temperatura inicial [ $^{\circ}C$ ];

$\beta$  - Inverso do coeficiente de variação da resistência com a temperatura do componente condutor de corrente [ $^{\circ}C$ ].

Os valores  $K$  e  $\beta$ , constante do material componente do condutor de corrente, neste caso a blindagem metálica e inverso do coeficiente de variação da resistência com a temperatura do componente da blindagem metálica respectivamente, estão apresentados na Tabela 6 mencionada anteriormente. Estes matérias serão predominantemente o cobre ou alumínio, assim como no condutor.

A temperatura  $\theta_i$  na blindagem nos cabos isolados no início do curto deve ser assumida como sendo  $5^{\circ}C$  menor que a máxima temperatura de regime permanente permitida para o material da isolação [3]. O valor do limite desta temperatura está apresentado na Tabela 4 citada no capítulo anterior referente à isolação. Enquanto a temperatura final  $\theta_f$  deve assumida de acordo com a Tabela 8.

Tabela 8 – Temperatura da blindagem no final do curto.

Cobertura		Temperatura da blindagem $^{\circ}C$
ST1	Termoplástico	200
ST2		200
ST3		150
ST7		180
SE1/A e SE1/B	Termofixos	220
(*) NOTA – $85^{\circ}C$ , para os cabos com tensões de isolamento iguais ou superiores a 6/10 kV.		
(**) NOTA – $85^{\circ}C$ , para cabos com coberturas SE 1/B e tensões de isolamento inferiores a 6/10 kV.		

Fonte: disponível em [12].

Com isso obtém-se o valor de  $I_{AD}$ , correspondente a intensidade da corrente de curto-circuito em hipótese adiabática para a blindagem metálica, agora fica restando o valor de  $\varepsilon$  correlato ao fator não adiabático. Este valor é dado pela equação (3.7)

$$\varepsilon = \sqrt{1 + F \cdot A \cdot \sqrt{\frac{t}{S}} + F^2 \cdot B \cdot \left(\frac{t}{S}\right)} \quad (3.7)$$

em que:

$F$  – Fator de contato térmico entre fios adjacentes e materiais não metálicos;

$t$  - Duração do curto-circuito [S];

$S$  - Seção geométrica de um único fio da blindagem metálica [ $mm^2$ ];

$A$  e  $B$  - Constantes empíricas baseadas nas propriedades térmicas do material não metálico adjacente a blindagem

O valor de  $F$ , que representa o fator de contato térmico entre os fios adjacentes e materiais não metálicos, como mencionado anteriormente, é determinado pelo tipo de contato ao qual os fios condutores da blindagem metálica estão submetidos entre si e com outros materiais. Como exemplo, o cabo isolado apresentado na Figura 2, mostra que os fios da blindagem, não estão em contato entre si, sendo assim, seguindo a recomendação da IEC 60949 o fator de contato térmico deve ser igual a 0,5 já que há espaços presentes entre os fios da blindagem.

$A$  e  $B$  são constantes empíricas baseadas nas propriedades térmicas do material não metálico adjacente a blindagem e seus valores quantitativos são representados pelas equações (3.8) e (3.9), respectivamente

$$A = \frac{C_1}{\sigma_c} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_i}{\rho_i}} \quad (3.8)$$

em que:

$C_1$  - Possui um valor de 2464 [ $mm/m$ ], conforme IEC 60949 [16];

$\sigma_c$  - Calor específico volumétrico do componente formado pela blindagem [ $J/K \cdot m^3$ ];

$\sigma_i$  - Calor específico volumétrico dos materiais não-metálicos adjacentes [ $J/K \cdot m^3$ ];

$\rho_i$  - Resistividade térmica dos materiais não-metálicos adjacentes [ $K \cdot m/W$ ]

$$B = \frac{C_2}{\sigma_c} \cdot \left( \frac{\sigma_i}{\rho_i} \right) \quad (3.9)$$

em que:

$C_2$  - Possui um valor de 1,22 [ $K.m.mm^2/J$ ], conforme IEC 60949 [16];

$\sigma_c$  - Calor específico volumétrico do componente formado pela blindagem [ $J/K.m^3$ ];

$\sigma_i$  - Calor específico volumétrico dos materiais não-metálicos adjacentes [ $J/K.m^3$ ];

$\rho_i$  - Resistividade térmica dos materiais não-metálicos adjacentes [ $K.m/W$ ].

O valor de  $\sigma_c$  é obtido de acordo com o material da blindagem metálica, apresentado na Tabela 6. Enquanto,  $\sigma_i$  e  $\rho_i$  estão de acordo com o material não metálico circundantes a blindagem metálica e são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Constantes térmicas dos materiais circundantes a blindagem.

Material		$\rho_i(K.m/W)$	$\sigma_i \left( \frac{J}{K} . m^3 \right)$
Cobertura protetora	PVC*	5,0	$1,7 \cdot 10^6$
	PE	3,5	$2,4 \cdot 10^6$
(*) NOTA – Valores para o material da cobertura de cabos até 35 kV.			

Fonte: disponível em [16].

Com os valores adquiridos, a partir de  $I_{AD}$  e  $\varepsilon$  calcula-se a corrente de curto-circuito admissível por cada fio blindagem metálica a partir da equação (3.1). E a corrente de curto-circuito admissível, será o valor encontrado vezes o número de fios composto pela blindagem metálica.

## **4 AMPACIDADE DOS CABOS ISOLADOS**

Neste capítulo será apresentado algumas das configurações dos cabos em redes de distribuição subterrâneas, assim também como alguns dos requisitos baseado em normas para instalações adequadas destes cabos, e por fim o cálculo da ampacidade dos cabos isolados de potência. Como este trabalho visa o comportamento dos cabos isolados de potência em redes coletoras, então será levado em considerações as configurações mais presentes neste tipo de instalação. As fórmulas e tabelas mencionadas neste capítulo estão exclusivamente de acordo com a norma NBR 14039.

### **4.1 Configurações dos cabos**

Em sistemas de geração de energia eólica, os cabos elétricos conectados aos geradores eólicos estão normalmente distribuídos abaixo do solo. Quando estes cabos condutores estão carregados parte da energia elétrica é convertida em calor, por conta da resistência elétrica do material condutor. Este aquecimento provocado por este efeito, conhecido também como efeito joule, é um grande problema em sistemas elétricos, pois este calor pode aquecer os cabos a limites de temperatura que levam a perda da eficiência energética, falha no sistema e deterioração da isolamento do cabo. Com isso, sabe-se que o efeito joule é o fator principal que limita a máxima corrente em regime permanente suportada nos cabos isolados de potência.

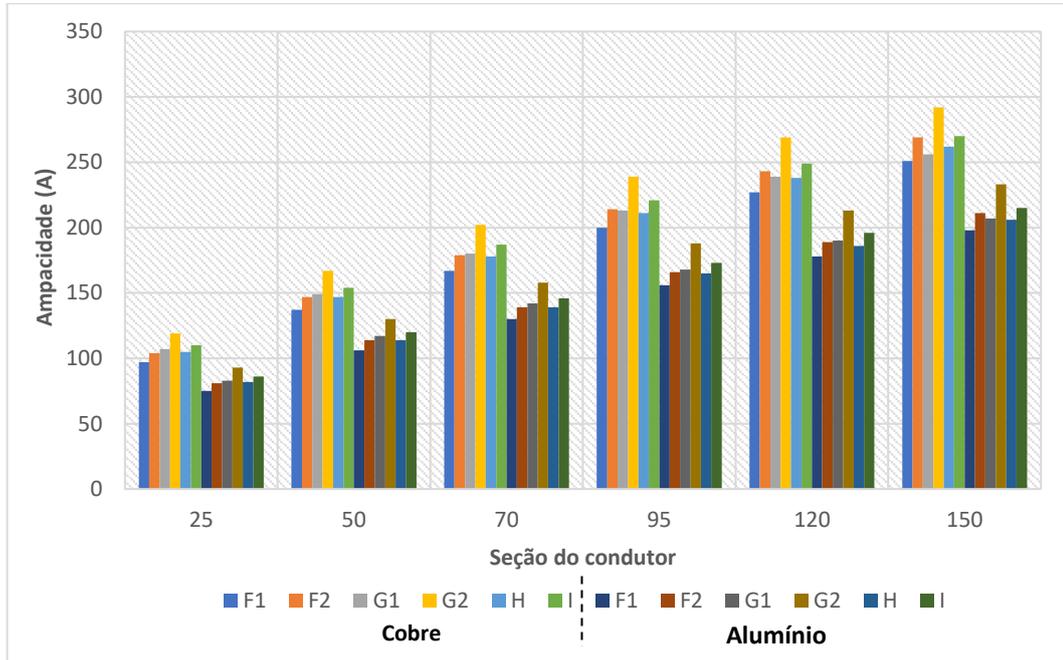
Quando estes cabos estão inseridos no solo nas RDSs, alguns fatores podem desfavorecer a ampacidade destes cabos, entre eles a temperatura do solo, a resistividade térmica do solo, profundidade que se encontra os cabos, configurações que eles estão submetidos e até mesmo as características do tipo do cabo utilizado [3]. A NBR 14039 considera esses fatores que são adotados com a finalidade de garantir que o sistema subterrâneo opere sem o comprometimento das propriedades mecânicas e elétricas dos cabos ocasionados pelos efeitos térmicos [3]. Desta forma, estes cabos devem operar em regime permanente sem que excedam o limite de temperatura da sua isolamento.

Quando inseridos no solo o conjunto unido destes cabos estabelece um tipo de configuração que está sujeito a um valor de ampacidade característica do método de instalação. Esta ampacidade depende também do material, seção do condutor e do tipo de isolamento do cabo utilizado.

Existem diversos métodos de instalações destes cabos, que podem estar inseridos diretamente no solo ou no interior de dutos enterrados no solo, podem estar dispostos linearmente ou em trifólio, dentro ou não de dutos, ou também pode ser uma combinação das configurações mencionadas. Além disso, estes cabos podem ser tripolares ou unipolares, aspectos que também interferem nas capacidades de condução de corrente.

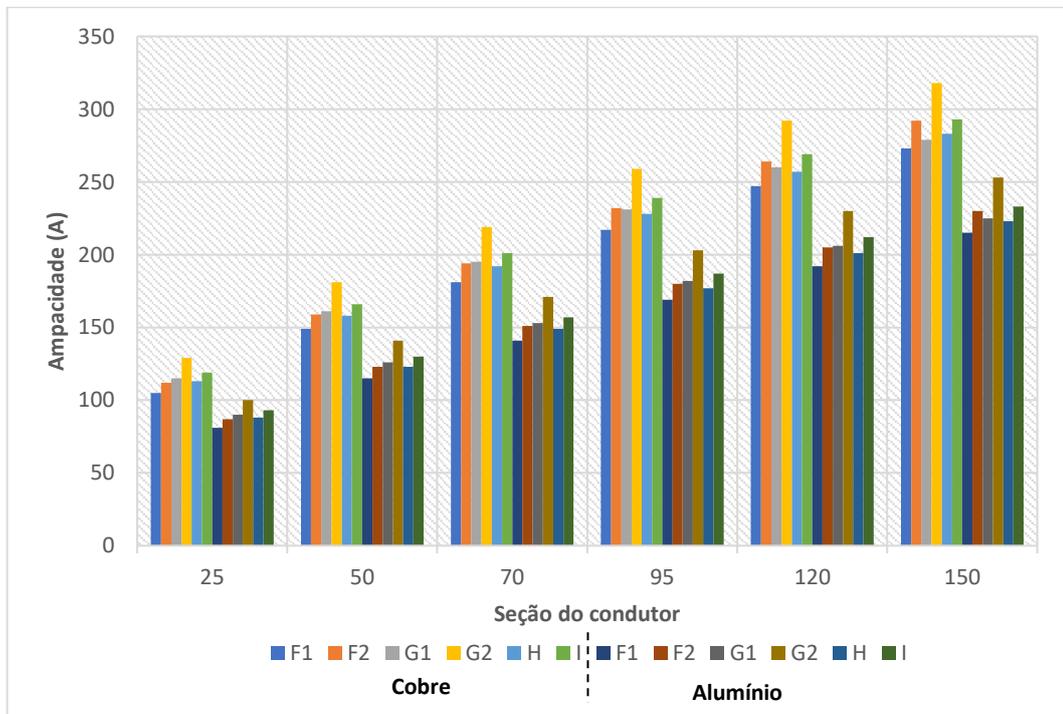
A Tabela 19 - Anexo A apresenta os métodos de instalações dos cabos de potência em redes de distribuição subterrânea a temperatura ambiente natural do solo de 20°C, resistividade térmica do solo igual a 2,5 K.m/W e profundidade de 90 cm abaixo do nível do solo. Dentre os métodos de referência apresentados o método de referência G2 se mostra como sendo o melhor método de instalação, pois apresenta em todos os casos a melhor ampacidade para o cabo isolado de potência. A Figura 16 e a Figura 17 apresentam o valor da ampacidade para temperaturas máxima de 90 °C e 105°C para o condutor respectivamente, em função da seção do condutor, método de instalação e o material composto pelo condutor.

Figura 16 – Capacidade de condução de corrente (A) para isolamento: XLPE, TR XLPE, EPR ou HEPR. Temperatura do condutor 90 °C.



Fonte: elaborada a partir de dados de [3].

Figura 17 – Capacidade de condução de corrente (A) para isolamento: EPR 105. Temperatura do condutor 105 °C.



Fonte: elaborada a partir de dados de [3].

No caso em que as características ambientais e construtivas da instalação apresentem diferenças dos valores mencionados a pouco, será preciso implementar fatores de correção com a finalidade de obter a capacidade de condução corrigida para o sistema. Estes fatores serão esclarecidos ainda neste capítulo.

## 4.2 Cálculo da ampacidade e fatores de correção

Após, escolhido o método de instalação dos cabos e tendo como informação a composição do cabo, isto é, conhecendo o tipo de material do condutor, seção transversal do condutor e tipo do material da isolação, pode-se determinar a ampacidade a partir da Tabela 20 - Anexo A e Tabela 21 - Anexo A, de acordo com as características preditas.

Obtido o valor da ampacidade, caso a condição específica do método de instalação difira das condições ambientais reais ou construtivas, será necessário aplicar os fatores de correção que poderão estar associados a temperatura ambiente, resistividade térmica, profundidade em relação ao solo ou correção de agrupamento, a fim de obter a capacidade de condução corrigida para o sistema. Por conseguinte, a ampacidade corrigida será dada pela equação (4.1)

$$A_c = A * (F_t * F_r * F_p * F_a) \quad (4.1)$$

em que:

$A_c$  – Ampacidade corrigida [A];

$A$  – Ampacidade de acordo com o método de instalação [A];

$F_t$  – Fator de correção por temperatura do solo;

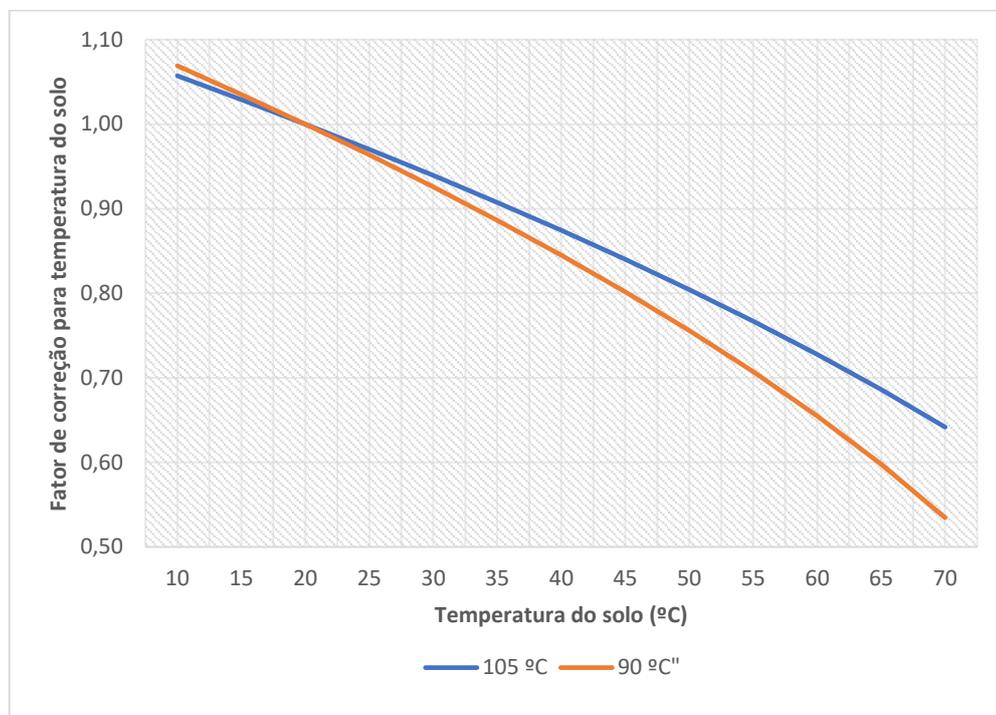
$F_r$  – Fator de correção por resistividade térmica do solo;

$F_p$  – Fator de correção por profundidade e;

$F_a$  – Fator de correção por agrupamento;

Caso, a temperatura do solo quando o condutor estiver desenergizado seja diferente de 20°C, se aplicará o fator de correção apresentado na Tabela 22 - Anexo A. Sendo assim, quanto maior a temperatura do solo menor será o fator de correção  $F_t$ , conseqüentemente o valor da ampacidade corrigida será também menor. É importante ressaltar que este fator de correção por temperatura do solo está associado com o tipo de isolamento do cabo isolado. A Figura 18 demonstra a relação entre o  $F_t$  e a temperatura do solo para isolações que suportam temperaturas de até 105 °C e de até 90 °C.

Figura 18 – Fatores de correção para temperatura ambiente do solo, para linhas subterrâneas.

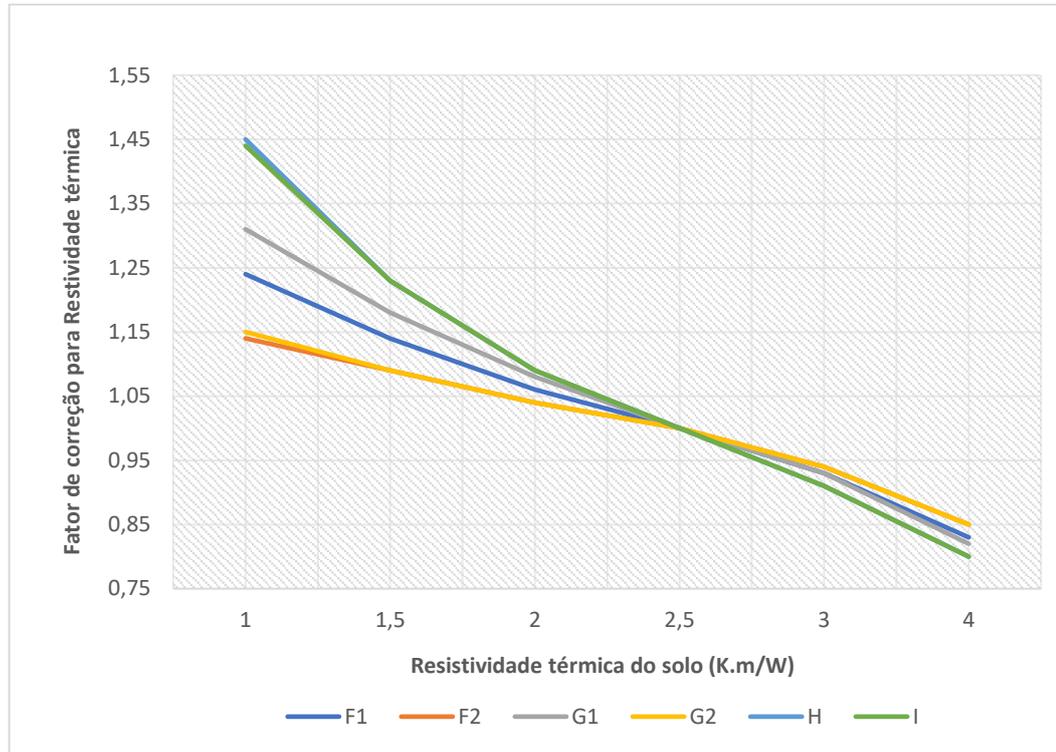


Fonte: elaborada a partir de dados de [3].

A resistividade térmica é a capacidade de conduzir o calor, que é análoga à resistência elétrica em relação a condução de corrente. Em outras palavras, quanto maior a resistividade térmica do solo, menor será o calor conduzido por ele. Conseqüentemente, quando introduzido no solo um cabo energizado, que produz calor devido ao efeito joule, a alta resistividade térmica do solo dificultará a troca de calor entre o cabo condutor e o ambiente, impedindo que o cabo possa operar com correntes maiores. Portanto, a resistividade térmica do solo é inversamente

proporcional a ampacidade. A Figura 19 demonstra a relação entre o  $Fr$  e a resistividade térmica do solo para os métodos de referências escolhidos.

Figura 19 – Fatores de correção para a resistividade térmica do solo de acordo com o método de referência.



Fonte: elaborada a partir de dados de [3].

O  $Fr$ , fator de correção para uma determinada resistividade térmica do solo de acordo com o método de instalação escolhido é descrito a partir da Tabela 23 - Anexo A. Em suma, estes dados contidos nesta tabela demonstram que os métodos de referências H e I apresentam maiores alterações da ampacidade com a variação da resistividade térmica do solo uma vez que nestes métodos os cabos estão em contato direto com o solo. No caso dos métodos de referências F2 e G2, onde os cabos estão contidos em um banco de dutos de concreto, há uma menor variação da ampacidade em relação a variação da resistividade térmica do solo.

A distância mínima que o centro dos dutos ou dos condutores devem ter em relação a superfície do solo é de pelo menos 90 cm, a fim de prevenir contra os efeitos de movimentação de terra, porém caso estes cabos atravessassem vias acessíveis a

veículos essa profundidade deve ser aumentada para 120 cm, com o propósito de evitar danos ocasionados por influências externas que eles estarão submetidos. Além disso, quando uma linha enterrada cruzar outra linha elétrica, elas devem estar distanciadas de pelo menos 20 cm [3]. Essas mudanças de distâncias em relação a profundidade podem implicar o uso do fator de correção por profundidade para obtenção do valor de ampacidade corrigida para o sistema. De acordo com [3], quanto maior esta profundidade menor será a capacidade de condução de corrente elétrica do cabo isolado.

O fator  $F_p$  para uma determinada profundidade do solo e método de referência escolhido é descrito a partir da Tabela 24 - Anexo A. Neste caso, o método de referência G2 apresenta maiores alterações da ampacidade com variação da profundidade do solo já no método de referência H a variação da ampacidade em relação a profundidade é menor comparada aos outros métodos.

Por fim, o fator de correção por agrupamento, que está associado ao número de eletrodutos ou cabos isolados utilizados na instalação e a distância que eles estão entre si. O fato é que, quando estes cabos estão mais próximos, o calor produzido por um único cabo energizado afeta negativamente a capacidade de condução dos cabos vizinhos, logo, quanto mais próximos estão, maior será o calor compartilhado entre eles e menor acabam a ampacidade do conjunto de cabos. Os valores fornecidos do fator de agrupamento para uma determinada distância entre os cabos e para o método de referência F1, F2, G1, G2, H ou I escolhido é apresentado na Tabela 25, Tabela 26, Tabela 27, Tabela 28, Tabela 29 e Tabela 30 respectivamente, inseridas no Anexo A.

Este cálculo da ampacidade corrigida deve levar em conta o trecho mais crítico da rede subterrânea, ou seja, o trecho da linha onde apresenta menor nível de capacidade de condução para os cabos isolados de potência. Como exemplo, caso se tenha dois trechos semelhantes na linha que difira apenas na profundidade, onde um possua a profundidade de 120 cm e outro de 90 cm em relação a superfície do solo, o cálculo de ampacidade corrigida deve levar em conta o trecho de 120 cm já que este fornece o menor nível de capacidade de condução de corrente para a linha. Em caso de uma linha que possua vários trechos com as características de temperatura do solo, resistividade térmica, profundidade e agrupamento diferentes,

será necessário calcular a ampacidade para todos estes trechos com o objetivo de encontrar o menor valor de capacidade de condução a ser considerada pela linha subterrânea.

Todos os valores tabelados pela NBR 14039 estão conforme as normas específicas para este cálculo. Apesar disso, métodos de instalações que apresentariam valores de capacidade de condução de corrente próximas foram reunidas em um único valor, levando-se em consideração o menor deles. O mesmo ocorre para cabos com blindagem aterrada em um, dois ou mais pontos ou *cross-bonding* [3]. Caso haja uma configuração não tabelada, este cálculo de ampacidade pode ser obtido com maior precisão de acordo com a norma NBR 11301.

## 5 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo é realizada uma análise de estudo de caso envolvendo a saída de cabos subterrâneos de um aerogerador em um parque eólico. Demasiadas características acerca do funcionamento do aerogerador, ampacidade envolvendo trechos aéreos, transformadores, conexões e da subestação que compõe o parque eólico não farão parte do escopo desse estudo. Em resumo, este trabalho visa apenas entender o comportamento do cabo isolado sob o solo na saída do aerogerador até o poste de transição aero-subterrâneo. Este estudo pode ser aplicado em qualquer caso que envolva trechos de redes subterrâneas, desde que estejam nos critérios de níveis de tensão estabelecidos neste trabalho.

### 5.1 Características do sistema

Para entender o comportamento do cabo isolado em redes subterrâneas é necessário ter o conhecimento do sistema em que ele está submetido. Com as características elétricas e ambientais torna-se possível o estudo que tem como finalidade encontrar a ampacidade dos cabos e a corrente termicamente admissíveis pelo condutor e pela blindagem em condições de curto-circuito.

O sistema analisado será composto por um aerogerador AGW147 / 4.2 da empresa WEG de potência ativa nominal de 4,2 MW com a tensão de saída de 34,5 kV – 60 Hz [17], com fator de potência de 0,95 e fator de carga 1,00. Suas características estão apresentadas na Tabela 10.

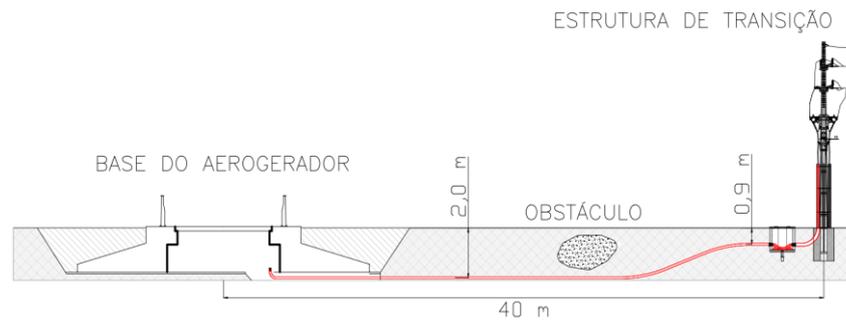
Tabela 10 – Especificações técnicas do aerogerador.

Especificações técnicas – aerogerador	
Modelo	AGW147 / 4.2
Potência nominal	4,2 MW
Tensão de saída	34,5 kV
Corrente nominal	74 A
Diâmetro do rotor	147 m
Altura do cubo	125 m
Gerador	Síncrono de ímãs permanentes

Fonte: editado de [17].

Já as características ambientais do sistema apresentam valores de resistividade térmica do solo de 3,0 K.m/W e temperatura do solo de 30°C. A vista perfil do sistema está apresentada pela Figura 20, onde a base central do aerogerador se encontra a 40 metros da estrutura de transição, e a profundidade máxima dos cabos isolados, destacados em vermelho, a nível do solo é de 2 metros.

Figura 20 – Vista perfil do sistema que interliga o aerogerador a estrutura de transição.



Fonte: Autor.

## 5.2 Ampacidade para o sistema

Neste projeto os cabos serão unipolares em formação trifólio e enterrados diretamente no solo, assim como apresentado no método H da Tabela 19 – Anexo A. A seção transversal do cabo será de 25 mm<sup>2</sup>, com isolamento XLPE e o material condutor é o alumínio.

Em primeiro lugar, será analisada a ampacidade dos cabos sobre estas condições com o método descrito no capítulo 4. Caso sejam válidos os valores para este sistema, serão calculados os valores de correntes termicamente admissíveis em condição de curto-circuito. Sendo assim, a Tabela 11 apresenta os valores característicos do sistema.

Tabela 11 – Sistema.

Dados gerais do sistema	
Temperatura do solo	30 °C
Resistividade térmica do solo	3,0 K.m/W

Dados gerais do sistema	
Profundidade máxima	2,0 m
Método de instalação	H
Material condutor	Alumínio
Isolação	XLPE
Seção do condutor	25 mm <sup>2</sup>

Fonte: autor.

Com isto, é possível o cálculo da ampacidade de acordo com o sistema. Para o método de referência H sendo material condutor alumínio, com isolação XLPE de seção igual a 25 mm<sup>2</sup>, tem-se de acordo com a Tabela 20 – Anexo A, valores de ampacidade iguais a 81 A. Agora, levando em consideração o método de instalação e o cabo isolado a ser utilizado, é necessário aplicar os fatores de correção para temperatura do solo, resistividade térmica do solo e profundidade apresentados na Tabela 12. Todos os valores de fator de correção são fornecidos através da Tabela 22, da Tabela 23 e da Tabela 24 no Anexo A, respectivamente. O fator de correção para agrupamentos não será necessário, pois o sistema apresenta apenas um condutor por fase e um único circuito no trecho subterrâneo.

Tabela 12 – Fatores de correção aplicados a ampacidade do cabo de 25mm<sup>2</sup> - XLPE.

Fatores de Correção			
$F_t$	$F_r$	$F_p$	$F_a$
0,93	0,91	0,92	1,0

Fonte: autor.

Utilizando a equação (4.1) obtém-se o resultado de ampacidade corrigida de aproximadamente 63,84 A. O que significa que o cabo utilizado é incompatível para este sistema que apresenta uma corrente nominal de 74 A. Existem possíveis soluções para driblar este problema e aumentar a capacidade de condução do sistema. Primeiramente, seria o aumento da seção do cabo condutor, depois a substituição do material condutor para o cobre que possui condutância maior que o alumínio e pôr fim a escolha do material da isolação que suporte temperaturas

maiores. Outra forma de obter uma ampacidade maior seria a troca do método de instalação escolhido.

$$A_c = A * (F_t * F_r * F_p * F_a) \quad (4.1)$$

O fato é que, a escolha de um cabo de maior dimensão de modo que a sua ampacidade corrigida seja ligeiramente maior que a exigida pelo sistema, ou seja, um pouco maior a 74 A, não é viável. Pois, estes cabos irão operar na temperatura limite de sua isolação, reduzindo a vida útil do cabo devido aos efeitos térmicos que provocam o rápido envelhecimento e degradação das propriedades mecânicas e elétricas do material ao longo do tempo. Além disso, cabos quando dispersam grande calor devido ao efeito joule, possuem maior resistência elétrica, conseqüentemente apresentam maiores quedas de tensão ao longo do caminho, especialmente em trechos de distância maiores. Em alguns casos, a escolha conservadora destes cabos pode ser realizada com o objetivo de uma futura ampliação do sistema, que levará em conta uma maior potência a ser utilizada, por conseguinte, uma maior ampacidade exigida pelo sistema.

A fim de evitar tais situações, a escolha do novo cabo condutor, será feita da forma mais cautelosa com o objetivo de não submeter a sua isolação a temperaturas próximas ao seu limite. O traçado será o mesmo apresentado na Figura 20, e o método de instalação será substituído. Agora, invés de cabos unipolares em trifólio enterrados diretamente sob o solo, como no método H, eles serão cabos unipolares em trifólio enterrados em eletrodutos, como apresentado no método F1. Esta escolha tem como finalidade de obter uma proteção mecânica maior aos cabos isolados de potência.

O cabo escolhido será da fabricante Prysmian Group e terá seção transversal de 70 mm<sup>2</sup>, com isolação EPR 105 20/35 kV e o material condutor sendo alumínio [18]. As características do cabo isolado necessárias para este trabalho estão apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Características do cabo isolado.

Cabo Compact 105 20/35 kV	
Material condutor	Fios de alumínio nu de forma compactada
Seção do condutor	70 mm <sup>2</sup>
Isolação	EPR 105
Material da blindagem metálica	Fios de cobre nu espaçados
Seção da blindagem metálica	6,0 mm <sup>2</sup>
Número de fios	15
Seção de um único fido da blindagem metálica	0,4 mm <sup>2</sup>
Cobertura	PVC – tipo ST2

Fonte: editado de [18].

Como as condições ambientais permanecerão as mesmas, mas devido a troca do método utilizado e a troca do material componente da isolação do cabo, alguns fatores de correção serão alterados de acordo com a Tabela 22, a Tabela 23 e a Tabela 24 no Anexo A. Estes fatores estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Fatores de correção aplicados a ampacidade do cabo de 70mm<sup>2</sup> - EPR 105.

Fatores de Correção			
$F_t$	$F_r$	$F_p$	$F_a$
0,94	0,93	0,91	1,0

Fonte: autor.

Utilizando a equação (4.1) obtém-se o resultado de ampacidade corrigida de aproximadamente 112,17 A. O que significa que o cabo utilizado é compatível para este sistema que apresenta uma corrente nominal de 74 A, ou seja, o cabo em serviço contínuo opera com 66% de sua capacidade total reduzindo as perdas por efeito joule e conseqüentemente o envelhecimento precoce material do cabo isolado. Lembrando

que esta análise é feita para todos os métodos de aterramento das blindagens, considerando aquele que apresenta menor nível de ampacidade.

### 5.3 Correntes termicamente admissíveis no curto-circuito

Com isto, agora será necessário analisar as correntes termicamente admissíveis para o condutor e para a blindagem do cabo isolado de potência em condições de curto-circuito apresentadas no capítulo 3. O tempo de duração de um curto-circuito em geradores eólicos pode variar significativamente, dependendo das condições específicas do sistema e da resposta de proteção implementada. Sendo assim, o ajuste da proteção que será aplicada ao projeto está calibrado para um tempo de disparo de 0,5 segundos, e este valor não deve ultrapassar 5 segundos de acordo com a NBR 14039 [3].

#### 5.3.1 Correntes admissíveis no condutor

Em primeiro lugar será necessário o cálculo do valor da corrente de curto em um aquecimento adiabático, onde todo calor fica retido no condutor de acordo com a equação (3.2).

$$I_{AD} = \sqrt{\frac{K^2 \cdot S^2 \cdot \ln\left(\frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}\right)}{t}} \quad (5.2)$$

Os valores da constante do material do componente condutor de corrente, da seção geométrica do condutor, do inverso do coeficiente de variação da resistência com a temperatura do componente condutor de corrente, a temperatura final e a temperatura inicial devem permanecer de acordo com o tipo do condutor escolhido. Estes valores são retirados a partir da Tabela 4, da Tabela 6 e da Tabela 13. Em resumo, a Tabela 15 representa os valores destas variáveis obtidas necessárias para o cálculo.

Tabela 15 – Variáveis para o cálculo de corrente de curto-circuito termicamente admissível para o condutor.

Variáveis	Valor	Unidade
$t$	0,5	s
$K$	148	$A * S^{\frac{1}{2}}/mm^2$
$S$	70	$mm^2$
$\theta_f$	250	$^{\circ}C$
$\theta_i$	105	$^{\circ}C$
$\beta$	228	$^{\circ}C$

Fonte: autor.

Seguindo a equação (3.2) obtém-se o resultado de uma da corrente de curto-circuito para o condutor em um aquecimento adiabático de 8,809 kA.

Agora será necessário o cálculo do fator não adiabático do componente condutor de corrente. Primeiramente será determinado o valor das constantes empíricas  $A$  e  $B$  descritas na equação (3.4) e equação (3.5).

$$A = \frac{C_1}{\sigma_c} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_i}{\rho_i}} \quad (5.3)$$

$$B = \frac{C_2}{\sigma_c} \cdot \left(\frac{\sigma_i}{\rho_i}\right) \quad (5.4)$$

Estes valores necessitam dos calores específicos volumétricos do condutor e dos materiais não-metálicos adjacentes ao próprio condutor, e a resistividade térmica dos materiais não- metálicos adjacentes ao condutor. Estes valores são retirados a partir da Tabela 6 e da Tabela 7. Após o cálculo dessas variáveis, aplica-se seus valores a equação (3.3), que apresenta outras variáveis como o fator de contato térmico e seção geométrica do componente condutor, estas que podem ser encontradas a partir da Tabela 13. E a duração de curto-circuito é dada por 0,5 segundos. Em resumo, a Tabela 16 representa os valores das variáveis necessárias para o cálculo.

Tabela 16 – Variáveis para o cálculo de corrente de curto-circuito termicamente admissível para o condutor escolhido.

Variáveis	Valor	Unidade
$C_1$	2464	$m \cdot mm^3$
$C_2$	1,22	$K \cdot m \cdot mm^2 / J$
$\sigma_c$	$2,5 \cdot 10^6$	$J / K \cdot m^3$
$\sigma_i$	$2,1 \cdot 10^6$	$J / K \cdot m^3$
$\rho_i$	3,5	$K \cdot m / W$
$F$	0,7	-
$t$	0,5	s
$S$	70,0	$mm^2$

Fonte: autor.

Seguindo a equação (3.3) obtém-se o resultado do fator não adiabático do componente condutor de corrente de 1,0228.

$$\varepsilon = \sqrt{1 + F \cdot A \cdot \sqrt{\frac{t}{S}} + F^2 \cdot B \cdot \left(\frac{t}{S}\right)} \quad (5.5)$$

Com os valores da intensidade da corrente de curto-circuito em hipótese adiabática e o fator não adiabático do componente condutor aplica-se seus valores na equação (3.1). Sendo assim, o valor da corrente de curto admissível do componente condutor de corrente será de 9,01 kA para o sistema.

$$I = \varepsilon \cdot I_{AD} \quad (5.6)$$

### 5.3.2 Correntes admissíveis na blindagem metálica

Em primeiro lugar será necessário o cálculo do valor da corrente de curto-circuito em um aquecimento adiabático, onde todo calor fica retido na blindagem de acordo com a equação (3.6).

$$I_{AD} = \sqrt{\frac{K^2 \cdot S^2 \cdot \ln\left(\frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}\right)}{t}} \quad (5.7)$$

Os valores da constante do material da blindagem metálica, da sua seção geométrica, do inverso do coeficiente de variação da resistência com a temperatura da blindagem metálica, a temperatura final e a temperatura inicial devem permanecer de acordo com o tipo de blindagem escolhida. Estes valores são retirados a partir da Tabela 8, da Tabela 6 e da Tabela 13. Em resumo, a Tabela 15 representa os valores das variáveis obtidas necessárias para o cálculo.

Tabela 17 – Variáveis para o cálculo de corrente de curto-circuito termicamente admissível para o condutor.

Variáveis	Valor	Unidade
$t$	0,5	s
$K$	226	$A * S^{\frac{1}{2}}/mm^2$
$S$	0,4	$mm^2$
$\theta_f$	200	$^{\circ}C$
$\theta_i$	100	$^{\circ}C$
$\beta$	234,5	$^{\circ}C$

Fonte: autor.

A seção  $S$  considerada pela blindagem corresponde a um único fio e é determinada pela razão entre a seção total e os números de fios na blindagem metálica. Seguindo a equação (3.6) e multiplicando pelo número de fios da blindagem

obtém-se o resultado de uma da corrente de curto-circuito para a blindagem metálica em um aquecimento adiabático de 0,981 kA.

Agora será necessário o cálculo do fator não adiabático da blindagem metálica. Primeiramente será determinado o valor das constantes empíricas  $A$  e  $B$  descritas na equação (3.8) e equação (3.9).

$$A = \frac{C_1}{\sigma_c} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_i}{\rho_i}} \quad (5.8)$$

$$B = \frac{C_2}{\sigma_c} \cdot \left(\frac{\sigma_i}{\rho_i}\right) \quad (5.9)$$

Estes valores necessitam dos calores específicos volumétricos da blindagem e dos materiais não-metálicos adjacentes a própria blindagem metálica, e a resistividade térmica dos materiais não-metálicos adjacentes a blindagem metálica. Estes valores são retirados a partir da Tabela 6 e da Tabela 9. Após o cálculo dessas variáveis, aplica-se seus valores a equação (3.7), que apresenta outras variáveis como o fator de contato térmico e seção geométrica do componente de um único fio da blindagem, estas variáveis podem ser encontradas a partir da Tabela 13. A duração de curto-circuito é dada por 0,5 segundos. Em resumo, a Tabela 18 representa os valores das variáveis necessárias para o cálculo.

Tabela 18 – Variáveis para o cálculo de corrente de curto-circuito termicamente admissível para a blindagem metálica.

Variáveis	Valor	Unidade
$C_1$	2464	$m \cdot mm^3$
$C_2$	1,22	$K \cdot m \cdot mm^2 / J$
$\sigma_c$	$3,45 \cdot 10^6$	$J / K \cdot m^3$
$\sigma_i$	$1,70 \cdot 10^6$	$J / K \cdot m^3$
$\rho_i$	5,0	$K \cdot m / W$
$F$	0,5	-

Variáveis	Valor	Unidade
$t$	0,5	s
$S$	0,4	$mm^2$

Fonte: autor.

Seguindo a equação (3.7) obtém-se o resultado do fator não adiabático da blindagem metálica de 1,1271.

$$\varepsilon = \sqrt{1 + F \cdot A \cdot \sqrt{\frac{t}{S}} + F^2 \cdot B \cdot \left(\frac{t}{S}\right)} \quad (5.10)$$

Com os valores da intensidade da corrente de curto-circuito em hipótese adiabática e o fator não adiabático da blindagem metálica aplica-se seus valores na equação (3.1). Sendo assim, o valor da corrente de curto-circuito admissível pela blindagem metálica é de 1,105 kA para o sistema.

$$I = \varepsilon \cdot I_{AD} \quad (5.11)$$

Neste estudo, demonstra-se que um cabo de seção transversal de 70 mm<sup>2</sup>, com isolamento EPR 105 20/35 kV e o material condutor sendo alumínio conectado sob o solo entre uma estrutura de transição e o aerogerador de potência de 4,2 MW, com tensão igual a 34,5 kV e, possui uma ampacidade de 112,17 A e opera com 66% de sua capacidade total. Evitando esforços elétricos e térmicos sobre o cabo.

Além disso foi obtido as correntes de curto-circuito termicamente admissíveis de 9,01 kA para o condutor e 1,105 kA para a blindagem metálica do cabo isolado de 70 mm<sup>2</sup>. Sendo estas correntes fundamentais para dimensionamento de equipamentos de proteção e para viabilidade de instalação dos cabos dentro de uma unidade geradora.

## 6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

As redes de distribuição subterrânea desempenham um papel extremamente importante no setor elétrico, especialmente nas unidades de geração eólica no Brasil. E com isso cresce a necessidade de compreender o comportamento dos cabos isolados quando inseridos no solo. Esta análise é fundamental para garantir a operação segura e confiável das redes subterrâneas, evitando que os cabos sejam expostos a condições extremas que possam comprometer suas propriedades materiais.

Este trabalho apresentou uma metodologia específica em média tensão baseada em normas para estimar a capacidade dos cabos isolados quando estes estão implantados no solo. Além disso, este trabalho analisou os efeitos da temperatura ambiente do solo, sua profundidade, resistividade térmica e seus aspectos construtivos e de configuração na capacidade de condução de corrente elétrica dos cabos. Como também foi feito o cálculo das correntes termicamente admissíveis pelo condutor e pela blindagem em condições de curto-circuito.

Com isso, toda essa metodologia foi aplicada a um estudo de caso que envolve a conexão subterrânea entre os aerogeradores e as estruturas de transição em unidades coletoras de energia. Onde, especificamente, demonstra-se que um cabo com uma área de seção transversal de  $70 \text{ mm}^2$ , isolamento EPR 105 20/35 kV e condutor de alumínio, quando instalado sob o solo para conectar um aerogerador de 4,2 MW operando a 34,5 kV a uma estrutura de transição, é capaz de transportar uma corrente de 112,17 A com segurança, o que equivale a 66% de sua capacidade máxima de condução de corrente. Essa configuração foi projetada para evitar tensões elétricas e térmicas excessivas no cabo. Além disso, observou-se que cabos de menor seção, como os de  $25 \text{ mm}^2$ , não eram adequados para o sistema, pois sua capacidade de corrente permanente era insuficiente para atender às exigências do sistema.

Neste estudo, foram determinadas as correntes de curto-circuito termicamente admissíveis, com valores de 9,01 kA para o condutor e 1,105 kA para a blindagem metálica do cabo isolado de seção transversal de  $70 \text{ mm}^2$ . Essas correntes desempenham um papel fundamental no dimensionamento dos equipamentos de proteção e na avaliação da viabilidade da instalação dos cabos em uma unidade geradora.

A análise cuidadosa desses dados desempenha um papel crucial no processo de seleção dos cabos isolados, pois seu objetivo é assegurar a durabilidade, segurança e confiabilidade do sistema elétrico de potência ao qual a rede subterrânea está submetida. Além disso, a escolha de um bom fabricante de cabos isolados é essencial para garantir a sua qualidade, uma vez que, estes bons fabricantes costumam seguir normas e regulamentações estabelecidas em normas.

A análise mais efetiva deste cálculo pode ser feita através do uso de *softwares* especializados que oferecerão um resultado mais otimizado. E como existem diversas configurações de instalações de cabos podendo alterar desde a composição do cabo e o método de instalação, é necessário um estudo mais profundo sobre os custos operacionais e de aquisição de materiais de modo que o trecho opere com segurança, longevidade e viabilidade econômica.

Como proposta de continuidade, tem-se como um deles: o estudo de cálculo das correntes induzidas nas blindagens metálicas pelo condutor em condições operacionais normais ou em curto-circuito, que forneceria dados essenciais para o dimensionamento mais adequado do cabo isolado, uma vez que a seção da blindagem pode ser alterada pelo fabricante de acordo com a necessidade exigida pelo sistema. Como também, os estudos de queda de tensão e circuito equivalente dos cabos isolados em questão, pois estes estudos desempenham um papel crucial na eficiência e estabilidade do sistema, garantindo que o cabo isolado funcione dentro dos parâmetros adequados e atendam aos requisitos regulatórios.

À medida que estes estudos são realizados, o conhecimento adquirido fornece uma metodologia mais orientada para a escolha dos cabos isolados garantindo um fornecimento efetivo, confiável e seguro para a sociedade.

## REFERÊNCIAS

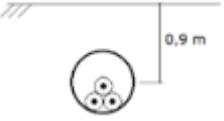
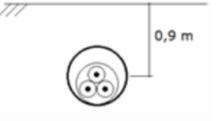
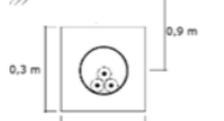
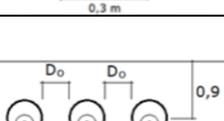
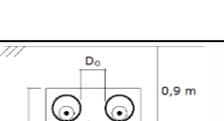
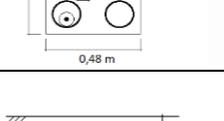
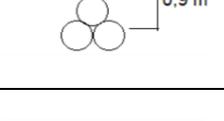
- [1] L. Arango e B. D. Bonatto, “A Infraestrutura Subterrânea como uma alternativa para melhoria da qualidade das redes elétricas: Estudo Econômico das Redes Aéreas x Redes Subterrâneas,” IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2021. [Online]. Available: <https://proceedings.science/cbqee-2021/papers/a-infraestrutura-subterranea-como-uma-alternativa-para-melhoria-da-qualidade-das?lang=en>. [Acesso em 06 Julho 2023].
- [2] PMO - Programa Mensal de Operação, “O sistema em números: Evolução da capacidade instalada no SIN - Julho 2023/ Dezembro 2027,” ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico, Julho 2023. [Online]. Available: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. [Acesso em 06 Julho 2023].
- [3] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2kV,” *NBR14039*, nº 3, pp. 40-67, 2021.
- [4] J. Mamede, *Instalações Elétricas Industriais*, 6ª ed., Livros Técnicos Científicos Editora, pp. 357-358.
- [5] KIT Acessórios, “Cabos Elétricos de Média Tensão - 6kV a 35kV,” 06 Novembro 2020. [Online]. Available: <https://www.kitacessorios.com.br/cabos-eletricos-de-media-tensao/>. [Acesso em 27 Julho 2023].
- [6] Halliday e Resnick, *Fundamentos de Física*, 8ª ed., vol. 3, Livros Técnicos e Científicos Editora, pp. 3-4.
- [7] J. Mamede, *Manual de Equipamentos Elétricos*, 4ª ed., Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2013.
- [8] Prysmian Group, “Cabos Energia: Construção e Dimensionamento,” 2012. [Online]. Available: [https://br.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/Cabos\\_Energia\\_Construcao\\_Dimensionamento.pdf](https://br.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/Cabos_Energia_Construcao_Dimensionamento.pdf). [Acesso em 19 Julho 2023].
- [9] A. A. M. B. Cotrim, *Instalações elétricas*, 5ª ed., Pearson Education do Brasil Ltda, 2008.
- [10] A. P. Boeira e D. Beck, Centro Federal de Educação Tecnológica de Pelotas – Rs Unidade de Ensino Passo Fundo, Outubro 2007. [Online]. Available: [http://docente.ifsc.edu.br/claudio.schaeffer/material/2\\_Mecatr%C3%B4nica/Materiais\\_1\\_Meca\\_2/Tecnologia%20dos%20Materiais\\_Complementar.pdf](http://docente.ifsc.edu.br/claudio.schaeffer/material/2_Mecatr%C3%B4nica/Materiais_1_Meca_2/Tecnologia%20dos%20Materiais_Complementar.pdf). [Acesso em 21 Julho 2023].
- [11] Associação Brasileira do Cobre, “Informações Técnicas: Cobre e suas ligas,” [Online]. Available: <https://abcobre.org.br/cobre-e-suas-ligas/>. [Acesso em 21 Julho 2023].
- [12] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “Cabos de potência com isolamento extrudada para tensões de 1kV a 35kV - Requisitos construtivos,” *NBR 6251:2000*, 2000.
- [13] J. Mamede, “Fascículo - Instalações elétricas de média e alta tensão,” [Online]. Available: <https://osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2021/06/Fasciculo-Instalacoes-eletricas-de-media-e-alta-tensao.pdf>. [Acesso em 26 Julho 2023].

- [14] R. O. C. Moreira, *Avaliação Teórico-Experimental de Campos Magnéticos nas Proximidades das Linhas de Transmissão Subterrâneas*, Belo Horizonte, 2011.
- [15] myCableEngineering, "Sheath Induced Voltage & Circulating Current," 28 Fevereiro 2023. [Online]. Available: <https://mycableengineering.com/knowledge-base/sheath-induced-voltage-circulating-current>. [Acesso em 02 Agosto 2023].
- [16] IEC: International Electrotechnical Commission, "IEC 60949," *Calculation of thermally permissible short-circuit currents, taking into account non-adiabatic heating effects*, nº 1, 1988.
- [17] WEG, "Aerogeradores - AGW147 / 4.2," WEG, [Online]. Available: [https://www.weg.net/catalog/weg/PT/pt\\_PT/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Aerogeradores/Aerogeradores---AGW147-4-2/Aerogeradores---AGW147-4-2/p/MKT\\_WEN\\_WIND\\_AGW147](https://www.weg.net/catalog/weg/PT/pt_PT/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Aerogeradores/Aerogeradores---AGW147-4-2/Aerogeradores---AGW147-4-2/p/MKT_WEN_WIND_AGW147). [Acesso em 23 Agosto 2023].
- [18] Prysmian Group, "Cabos de energia média tensão - Epro Compact 105," [Online]. Available: <https://br.prysmiangroup.com/pt/cabos-energia>. [Acesso em 24 08 2023].

## ANEXOS

### ANEXO A – TRECHOS DE TABELAS RETIRADAS DA ABNT NBR 14039

Tabela 19 – Trecho da Tabela 25 da NBR 14039 – Tipos de linhas elétricas.

Método de Instalação	Esquema ilustrativo	Descrição	Método de referência
12		Cabos unipolares em eletroduto diretamente enterrado	F1
13		Cabos tripolares em eletroduto diretamente enterrado	F1
14		Cabos unipolares em eletroduto embutido em concreto e enterrado no solo	F2
15		Cabos tripolares em eletroduto embutido em concreto e enterrado no solo	F2
16		Cabos unipolares em eletroduto enterrados e espaçados – um cabo por eletroduto não condutor	G1
17		Cabos unipolares em banco de dutos enterrado – um cabo por eletroduto não condutor	G2
18		Cabos unipolares em formação plana e em contato diretamente enterrados	H
19		Cabos unipolares em formação trifólio diretamente enterrados	H
20		Cabo tripolar diretamente enterrado	H

Método de Instalação	Esquema ilustrativo	Descrição	Método de referência
21		Cabos unipolares espaçados, diretamente enterrados.	I

Fonte: disponível em [3].

Tabela 20 – Trecho da Tabela 28 da NBR 14039 – Capacidade de condução de corrente (A) para isolamento: XLPE, TR XLPE, EPR ou HEPR. Temperatura do condutor 90 °C.

Seção do condutor (mm <sup>2</sup> )	Condutor de cobre					
	Método de instalação					
	F1	F2	G1	G2	H	I
25	97	104	107	119	105	110
50	137	147	149	167	147	154
70	167	179	180	202	178	187
95	200	214	213	239	211	221
120	227	243	239	269	238	249
150	251	269	256	292	262	270

Seção do condutor (mm <sup>2</sup> )	Condutor de alumínio					
	Método de instalação					
	F1	F2	G1	G2	H	I
25	75	81	83	93	82	86
50	106	114	117	130	114	120
70	130	139	142	158	139	146
95	156	166	168	188	165	173
120	178	189	190	213	186	196
150	198	211	207	233	206	215

Fonte: disponível em [3].

Tabela 21 – Trecho da Tabela 29 da NBR 14039 – Capacidade de condução de corrente (A) para isolamento: EPR 105. Temperatura do condutor 105 °C.

Seção do condutor (mm <sup>2</sup> )	Condutor de cobre					
	Método de instalação					
	F1	F2	G1	G2	H	I
25	105	112	115	129	113	119
50	149	159	161	181	158	166
70	181	194	195	219	192	201
95	217	232	231	259	228	239
120	247	264	260	292	257	269
150	273	292	279	318	283	293

Seção do condutor (mm <sup>2</sup> )	Condutor de alumínio					
	Método de instalação					
	F1	F2	G1	G2	H	I
25	81	87	90	100	88	93
50	115	123	126	141	123	130
70	141	151	153	171	149	157
95	169	180	182	203	177	187
120	192	205	206	230	201	212
150	215	230	225	253	223	233

Fonte: disponível em [3].

Tabela 22 – Trecho da Tabela 31 da NBR 14039 – Fatores de correção para temperatura ambiente, para linhas subterrâneas.

Temperatura ambiente °C	Isolação	
	EPR, HEPR, XLPE OU TR XLPE	EPR 105
15	1,04	1,03
20	1,00	
25	0,96	0,97
30	0,93	0,94
35	0,89	0,91
40	0,85	0,87

Fonte: disponível em [3].

Tabela 23 – Trecho da Tabela 32 da NBR 14039 – Fatores de correção para a resistividade térmica a serem aplicados às capacidades de condução de corrente do método de referência F1, F2, G1, G2, H ou I.

Resistividade térmica (K.m/W)	Fatores de correção para resistividade térmica					
	Método de instalação					
	F1	F2	G1	G2	H	I
1	1,24	1,14	1,31	1,15	1,45	1,44
1,5	1,14	1,09	1,18	1,09	1,23	1,23
2	1,06	1,04	1,08	1,04	1,09	1,09
2,5	1,00					
3	0,93	0,94	0,93	0,94	0,91	0,91
4	0,83	0,85	0,82	0,85	0,80	0,80

Fonte: disponível em [3].

Tabela 24 – Trecho da Tabela 33 da NBR 14039 – Fatores de correção para profundidades a serem aplicados às capacidades de condução de corrente do método de referência F1, F2, G1, G2, H ou I.

Profundidade (m)	Fatores de correção para profundidades					
	Método de instalação					
	F1	F2	G1	G2	H	I
0,7	1,02	1,02	1,02	1,03	1,01	1,02
0,9	1,00					
1,2	0,97	0,96	0,96	0,95	0,97	0,96
1,5	0,94	0,94	0,93	0,92	0,94	0,93
2,0	0,91	0,91	0,90	0,88	0,92	0,90

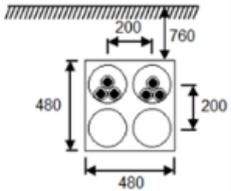
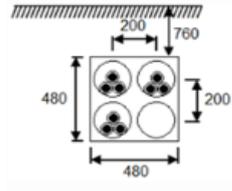
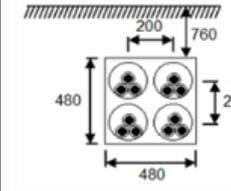
Fonte: disponível em [3].

Tabela 25 – Trecho da Tabela 36 da NBR 14039 – Fatores de correção de agrupamento a serem aplicados às capacidades de condução de corrente do método de referência F1.

Número de dutos	Seção do condutor (mm <sup>2</sup> )	Espaçamento entre os centros dos eletrodutos (mm)				
		Encostados	200	400	600	800
2	10 a 150	0,80	0,84	0,88	0,91	0,93
	185 a 1000		0,80	0,85	0,88	0,90
3	10 a 150	0,68	0,74	0,80	0,84	0,87
	185 a 1000		0,69	0,75	0,80	0,83
4	10 a 150	0,62	0,69	0,76	0,81	0,84
	185 a 1000		0,64	0,71	0,76	0,80

Fonte: disponível em [3].

Tabela 26 – Trecho da Tabela 37 da NBR 14039 – Fatores de correção de agrupamento a serem aplicados às capacidades de condução de corrente do método de referência F2.

Seção do condutor (mm <sup>2</sup> )	Modelo de método de instalação		
			
10 a 150	0,84	0,73	0,65
185 a 1000	0,81	0,69	0,61

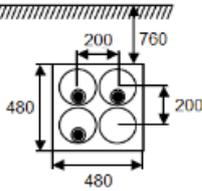
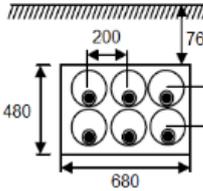
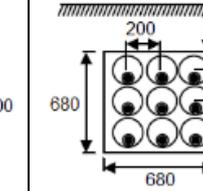
Fonte: disponível em [3].

Tabela 27 – Trecho da Tabela 38 da NBR 14039 – Fatores de correção de agrupamento a serem aplicados às capacidades de condução de corrente do método de referência G1.

Número de dutos	Seção do condutor (mm <sup>2</sup> )	Espaçamento entre os centros dos eletrodutos (mm) G1			
		200	400	600	800
3	10 a 150	1,06	1,10	1,12	1,14
	70 a 150	1,00	1,01	1,02	1,02
	185 a 400	0,97	0,93	0,92	0,92
	500 a 1000	0,97	0,92	0,89	0,88
6	10 a 150	0,92	1,00	1,05	1,09
	70 a 150	0,86	0,91	0,95	0,97
	185 a 400	0,82	0,83	0,85	0,86
	500 a 1000	0,82	0,81	0,81	0,82

Fonte: disponível em [3].

Tabela 28 – Tabela 39 da NBR 14039 – Fatores de correção de agrupamento a serem aplicados às capacidades de condução de corrente do método de referência G2.

Seção do condutor (mm <sup>2</sup> )	Modelo de método de instalação G2		
			
10 a 120	0,99	0,78	0,67
150 a 300	0,95	0,71	0,61
400 a 1000	0,94	0,67	0,57

Fonte: disponível em [3].

Tabela 29 – Tabela 40 da NBR 14039 – Fatores de correção de agrupamento a serem aplicados às capacidades de condução de corrente do método de referência H.

Número de condutores isolados		
6 condutores isolados	9 condutores isolados	12 condutores isolados
0,76	0,65	0,58

Fonte: disponível em [3].

Tabela 30 – Tabela 41 da NBR 14039 – Fatores de correção de agrupamento a serem aplicados às capacidades de condução de corrente do método de referência I.

Espaçamento entre centros de cabos	Seção do condutor (mm <sup>2</sup> )	Número de cabos			
		3	6	9	12
2 * diâmetro externo	Todas	1,00	0,78	0,68	0,61
200 mm	10 a 120	1,06	0,90	0,82	0,78
	150 a 300	0,97	0,81	0,74	0,70
	400 a 1000	0,92	0,76	0,68	0,64

Fonte: disponível em [3].