

GUIA DE APLICAÇÃO PARA CABOS
ELÉTRICOS COM CONDUTORES EM COBRE

ENERGIAS RENOVÁVEIS

VOLUME V



International Copper
Association Brazil
Copper Alliance

GUIA DE APLICAÇÃO PARA CABOS
ELÉTRICOS COM CONDUTORES EM COBRE

ENERGIAS RENOVÁVEIS

VOLUME V



International Copper
Association Brazil
Copper Alliance

AGRADECIMENTOS

O ICA/Procobre agradece o apoio das empresas fabricantes de cabos e a participação direta ou indireta dos instaladores e empresas do setor de Energias Renováveis para a realização desta publicação.

Apoio

NEXANS BRASIL S.A.

PRYSMIAN CABOS E SISTEMAS DO BRASIL S.A.

ESCLARECIMENTOS

O presente documento foi redigido meramente para fins de informação e debate. As informações aqui presentes não devem ser consideradas e aplicadas a todas as circunstâncias, em virtude das características específicas de cada tipo de instalação e projeto. O ICA/Procobre e qualquer outra instituição que participou de sua elaboração não se responsabilizarão por qualquer dano ou prejuízo causado pelo uso das informações aqui contidas, uma vez que este documento não dispensa a consulta às Normas ABNT NBR da Associação Brasileira de Normas Técnicas, outras fontes normativas aplicáveis e o estudo da instalação ou projeto específico.

INTRODUÇÃO

O “Guia de Aplicação para Cabos Elétricos com Condutores em Cobre” foi elaborado para fornecer ao leitor os principais conceitos teóricos referentes às diversas partes que compõem um cabo elétrico e sua aplicabilidade em cada segmento de mercado.

O Guia é composto por diversos volumes. Nesse quinto volume é abordado o setor de Energias Renováveis, com foco nos segmentos fotovoltaico e eólico, de modo a elencar os desafios encontrados para determinar o cabo elétrico correto a ser utilizado.

O texto procura introduzir novas e relevantes visões sobre o tema, utilizando como critérios, além do dimensionamento técnico de cabos elétricos, também a eficiência energética e conceitos ambientalmente sustentáveis.

A elaboração do “Guia de Aplicação para Cabos Elétricos com Condutores em Cobre” contou com o apoio dos fabricantes de cabos elétricos, os quais disponibilizaram seu acervo técnico a respeito das características dos cabos. Além disso, foram realizadas pesquisas em mídia impressa e eletrônica, e com empresas do setor, permitindo que o presente guia pudesse reunir as informações necessárias para uma correta seleção e dimensionamento de cabos de cobre.

Este Guia foi desenvolvido com base nas Normas ABNT NBR vigentes na data de sua publicação. Portanto, os leitores deverão complementar as informações resumidas aqui citadas e se atualizarem com as eventuais futuras revisões das Normas, não tendo este Guia a intenção de substituí-las.

Uma vez que o mercado utiliza três denominações diferentes, é necessário esclarecer que os termos “cabo elétrico”, “condutor elétrico”, ou simplesmente “cabo” significam um fio ou cabo, isolado ou não, unipolar (um único condutor isolado) ou multipolar (dois ou mais condutores isolados) utilizado para a condução da energia elétrica.

Para facilitar a pesquisa bibliográfica, as fontes bibliográficas foram numeradas e a numeração de referência disposta no decorrer do texto da seguinte maneira: [1], [2], etc.

O ICA/Procobre espera que este Guia possa facilitar a aplicação dos cabos em cobre. Caso haja necessidade de aprofundamento das informações, ao final do texto estão disponibilizadas as fontes utilizadas para sua elaboração.

Boa leitura!

Agosto de 2017

1. Objetivo.....	09
2. Institucional - ICA/Procobre	10
3. Cobre – História, Características e Benefícios	13
3.1 Uso do Cobre ao Longo da História	14
3.2 Propriedades e Características do Cobre	17
3.3 O Cobre na Área Elétrica	20
4. Sustentabilidade.....	23
4.1 Cobre: Elemento Essencial Para um Mundo Sustentável.....	24
4.2 Eficiência Energética e Fontes de Energia Limpa	25
4.3 Dimensionamento Econômico e Ambiental dos Condutores Elétricos	32
5. Dados Construtivos de um Cabo Elétrico de Potência	35
5.1 Condutor.....	37
5.1.1 Material do condutor	37
5.1.2 Formação do condutor.....	41
5.1.3 Classe de encordoamento.....	42
5.1.4 Seção nominal dos condutores.....	45
5.2 Blindagem do Condutor.....	46
5.3 Isolação	47
5.4 Blindagem da Isolação e Blindagem Metálica	50
5.5 Armação	51
5.6 Cobertura	52
5.7 Comportamento dos Cabos Elétricos em Relação ao Fogo e Fumaça	54
6. A Engenharia de Aplicação dos Cabos Elétricos	57
6.1. Como Redigir a Especificação de um Cabo Elétrico	59
6.2 Sugestões para Enriquecer a Relação entre Cliente e Fabricante	61

7. Aplicação de Produtos nas Instalações de Fontes de Energias	
Renováveis: Sistemas Fotovoltaicos	65
7.1 O Setor de Energia Fotovoltaica.....	66
7.2. Visão Geral de uma Instalação Fotovoltaica.....	68
7.3 Cabos Elétricos para Sistemas Fotovoltaicos	70
7.4 Instalação dos Cabos para Sistemas Fotovoltaicos	72
7.5 Seleção e Dimensionamento de Cabos Fotovoltaicos	76
8. Aplicação de Produtos nas Instalações de Fontes de	
Energias Renováveis: Sistemas Eólicos.....	93
8.1 O Setor de Energia Eólica.....	94
8.2 Visão Geral de Uma Instalação Eólica	96
8.3 Cabos Elétricos para Sistemas Eólicos	97
8.4 Seleção e Dimensionamento dos Cabos Eólicos.....	102
9. Conclusão	105
Bibliografia	106

1. OBJETIVO

O “Guia de Aplicação para Cabos Elétricos com Condutores em Cobre” busca estabelecer parâmetros importantes para a definição do uso de cabos elétricos produzidos em cobre, bem como demonstrar, para fins elétricos, sua qualidade, seu desempenho e os benefícios que somente este metal pode oferecer.

É apresentada uma breve história do cobre, suas principais características e benefícios. Além disso, são feitas considerações sobre os aspectos de sustentabilidade que envolvem o metal, com destaque para o tema da eficiência energética, incluindo o dimensionamento econômico e ambiental de circuitos elétricos que utilizam condutores de cobre.

Como as partes dos cabos de potência para uso no setor de Energias Renováveis são similares aos cabos de uso geral, são descritos então os principais componentes dos cabos de baixa e média tensões, identificando as funções de cada elemento, materiais mais utilizados, propriedades, etc. Em seguida, são indicados alguns aspectos relativos à seleção e especificação dos cabos elétricos para todas as aplicações que são importantes na relação entre clientes e fabricantes, visando a obtenção do melhor resultado na utilização dos produtos.

Na sequência deste Guia, são então apresentados os cabos elétricos apropriados para uso no setor de Energias Renováveis, com destaque para as gerações fotovoltaica e eólica. Não se tem a pretensão de abordar todos os cabos elétricos envolvidos nessas áreas específicas, mas sim informar ao leitor os produtos mais usuais, bem como suas principais aplicações, seleção e dimensionamento.

Em termos de energias renováveis, o Brasil ocupa posição de destaque no cenário internacional. Atualmente, cerca de 40 % da energia gerada no país é proveniente de fontes renováveis, enquanto a média mundial está na faixa de 13 %, segundo o Balanço Energético Nacional de 2016, publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), do Ministério de Minas e Energia (MME).

Se considerarmos apenas a geração de energia elétrica, as fontes renováveis ganham ainda maior destaque no Brasil, respondendo por 75,5 % da oferta interna de eletricidade no país (dados divulgados pela EPE em 2016). O destaque é a geração hidráulica, que responde

por cerca de 64 % da oferta interna (dados divulgados em 2016). No entanto, as fontes eólica e fotovoltaica têm conquistado espaço nos últimos anos. Em 2015, por exemplo, as usinas eólicas e solares foram responsáveis pelo aumento de 39,6 % do grid nacional (total). E as projeções indicam que elas tendem a crescer ainda mais nas próximas décadas.

2. INSTITUCIONAL - ICA/PROCOBRE

A International Copper Association (ICA) é uma organização sem fins lucrativos com a missão de integrar, desenvolver, promover e defender o mercado do cobre por meio de funções de suporte, tais como: regulamentação, treinamento, comunicação, parceria, suporte técnico e inteligência de mercado.

Levando a mensagem de que o cobre é único e essencial, o ICA apoia e desenvolve pesquisas em várias áreas para a evolução das aplicações e tecnologias na indústria e para o crescimento do mercado. A sólida base de relacionamento com o governo, ONGs, órgãos reguladores, entidades afins e usuários permite a defesa dos interesses comuns, com atuação marcante em projetos, normas e regulamentações.

A International Copper Association, financiada por seus membros, vem atuando ao longo de muitos anos na defesa do uso do cobre. Como representante de seus associados intercede persistentemente para garantir o acesso contínuo dos produtos derivados do cobre ao mercado, conquistando junto a eles um elevado nível de credibilidade e confiança.

Sua história remonta a mais de 90 anos e, atualmente, os seus associados compreendem 43 empresas globais constituídas por mineradoras e fabricantes, sendo que as mineradoras representam 60 % da produção mundial de cobre. Com sede em Nova Iorque, o ICA possui escritórios regionais em Bruxelas, Nova Iorque, Santiago e Xangai, dispõe de 26 centros de promoção e tem atividades em 60 países, nos 5 continentes.

Na América Latina, o ICA é representado pelo Procobre e atua na Argentina, Brasil, Colômbia, Chile, México e Peru, países que, juntos, representam 90 % do consumo de cobre desta região. Além disso,

a região responde por aproximadamente 50 % da produção mundial do metal.

O ICA/Procobre disponibiliza importante conteúdo técnico e informativo por meio do projeto Leonardo Energy, criado na Europa em 2001, que provocou a formação de uma grande comunidade, cuja proposta é estabelecer uma economia sustentável baseada na eficiência energética e na energia renovável.

Tal experiência também está disponível no Brasil, oferecendo aos profissionais do setor elétrico e energético acesso a notícias, palestras, artigos e *webinars* sobre temas da atualidade, tais como: eficiência energética, energias renováveis, gestão de energia, gestão de ativos, segurança com a eletricidade e sustentabilidade. Todo esse conteúdo está disponível em uma plataforma simples e amigável.

Este projeto é ferramenta indispensável para os profissionais técnicos, que podem se atualizar no que há de mais interessante nesse segmento, consultando os sites:

www.procobre.org/pt e www.leonardo-energy.org.br





COBRE

HISTÓRIA, CARACTERÍSTICAS
E BENEFÍCIOS

3. COBRE – HISTÓRIA, CARACTERÍSTICAS E BENEFÍCIOS

3.1 USO DO COBRE AO LONGO DA HISTÓRIA

A história do cobre se mistura com a própria evolução da vida humana na Terra. Graças às suas características, o metal (e suas ligas) ocupou – e continua ocupando – um papel de destaque no processo evolutivo da humanidade, sendo utilizado em praticamente todas as fases das revoluções tecnológicas pelas quais o ser humano passou, inclusive nas civilizações mais antigas.

Alguns registros e pesquisas indicam que o cobre foi o primeiro metal a ser efetivamente utilizado pelo homem, o que teria acontecido cerca de 15.000 anos atrás, quando ele foi encontrado na superfície da terra na forma de cobre nativo.

Porém, foi no final do período Neolítico, ou da Pedra Lascada, que seu uso avançou no dia a dia das comunidades. Nesse período, o homem começou a dominar algumas técnicas de manuseio e fundição do metal, que passou a, gradativamente, substituir elementos como madeira, ossos e pedra na fabricação de armas, ferramentas de trabalho, instrumentos de caça e utensílios agrícolas.

Essa era (entre 4.000 a.C. e 3.000 a.C.) é identificada pelos historiadores como Idade do Cobre, que corresponde à transição do Neolítico para a Idade do Bronze, e que deu início à Idade dos Metais. Foi um período pré-histórico de grande desenvolvimento humano, principalmente em civilizações da Europa, Oriente Médio e sul da Ásia.



NA IDADE DO COBRE, ESSE METAL FOI UTILIZADO NA:

- Confecção de artefatos como potes, copos, vasilhas e facas
- Confecção de armas como lanças, espadas, escudos, facões e machados
- Confecção de joias e objetos artísticos como estatuetas, máscaras, anéis e colares
- Confecção de instrumentos agrícolas como enxadas e charruas. Este avanço levou ao aumento da produção de alimentos e, por consequência, ao crescimento populacional nas comunidades que dominavam a técnica de fundição do cobre



Em termos de registros escritos, a Bíblia possivelmente contém as menções mais antigas sobre a utilização do cobre por parte de civilizações da antiguidade. No Velho Testamento, por exemplo, há várias citações sobre o metal, como a passagem do Livro de Gênesis que trata do filho de Lamec e Sela, 'Tubal-Caim': "O pai de todos aqueles que trabalham o cobre e o ferro" (Gn 4:22).

No Livro do Êxodo há alusões do uso do metal na construção dos templos, como em Êxodo 38:1 - 20, com inúmeras citações do uso de bronze em itens como utensílios do altar, cinzeiros, garfos, pás, grelhas e braseiros. A Bíblia cita ainda a aplicação de bronze na construção do Templo de Salomão.

Além dos registros bíblicos, objetos encontrados em escavações arqueológicas, hoje espalhados por museus de todo o mundo, revelam o uso do cobre pelo homem há milhares de anos, em diferentes regiões e períodos históricos. Por exemplo, no norte do atual Iraque foi encontrado um colar de cobre de 8.700 a.C.

Na Europa, o 'Homem de Gelo' encontrado no Tirol (Itália) em 1991, cujos restos datam de cerca de 5.000 anos atrás, estava acompanhado de um machado de cobre com pureza de 99,7 %.

Também foram descobertas moedas, armas e utensílios domésticos sumérios e egípcios de cobre e bronze de 3.000 a.C. Os egípcios, aliás, descobriram que a adição de pequenas quantidades de estanho facilitava a fusão do cobre e aperfeiçoaram os métodos de obtenção do bronze.

Na antiga China se conhece o uso do cobre desde, ao menos, 2.000 a.C.

Particularmente no que tange ao uso do cobre vinculado à eletricidade, uma descoberta realizada em meados de 1936 chama a atenção. Nesse ano, durante uma escavação nas ruínas da vila de Khujut Rabu (Iraque), os arqueólogos encontraram artefatos que foram batizados de 'Bateria de Bagdá'.

Cada artefato era composto de um vaso de argila e, em seu interior, havia um tubo feito de chapa de cobre, com cerca de 2,5 cm de diâmetro e 10 cm de comprimento. A base do tubo estava selada por um disco, também de cobre, e uma barra de ferro, aparentemente corroída por ácido, se projetava através de uma tampa de betume na parte superior.

A princípio, o item foi catalogado como objeto de culto. Porém, algum tempo depois o arqueólogo alemão Wilhelm Konig examinou a peça em detalhe e chegou a uma conclusão surpreendente: se o tubo havia sido preenchido com uma solução ácida, havia funcionado como um tipo de bateria elétrica rudimentar, daí o termo 'Bateria de Bagdá'. Isso há cerca de 2.000 anos.



CURIOSIDADES

- Na antiguidade, as principais minas de cobre ficavam nas regiões do Sinai, Síria, Afeganistão, Chipre, Macedônia, Ibéria e na Europa Central. Na Europa, em particular, as principais reservas da Era do Bronze estavam na Áustria, Alemanha, França, Espanha, Portugal, Grécia e Tirol.



- Os romanos foram os responsáveis pelo uso mais intensivo do cobre em sua época. Isso porque o emprego do metal se espalhou por todas as regiões conquistadas por suas legiões. A maior parte do cobre romano veio da ilha de Chipre, que eles chamavam Cyprium, da qual derivou a palavra Cuprum, dando origem à sigla Cu como símbolo químico do cobre.

3.2 PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DO COBRE

O cobre é um metal relativamente fácil de se manusear, daí sua utilização (e de suas ligas) pelo homem há milhares de anos, bem antes do uso de outros metais também importantes, como o ferro e o ouro. No entanto, são as suas características e propriedades, que oferecem inúmeros benefícios, que explicam o seu uso crescente, em diversas atividades, ao longo da história e da evolução tecnológica da humanidade.

Metal nobre e elemento de transição, o cobre pertence ao grupo 11 (1B) da Tabela Periódica. De coloração avermelhada, ele exhibe uma estrutura cristalina cúbica de

face centrada, com propriedades semelhantes às da prata e do ouro. Entre algumas de suas características podemos citar que ele é dútil, maleável, resistente à corrosão, possui propriedades antibacterianas e é um ótimo condutor elétrico e térmico.

Além disso, suas inúmeras ligas oferecem uma gama enorme de combinações de propriedades mecânicas que refletem um alto grau de adaptabilidade. Por isso elas são utilizadas em aplicações variadas, que podem demandar de baixa a moderada resistência à tensão mecânica, moderada estabilidade térmica ou resistência à deformação por estresse.

As propriedades do cobre e suas ligas permitem ainda que sua aplicação contribua para o aumento da qualidade de vida das pessoas; aumento da eficiência energética na produção, distribuição e consumo de eletricidade; estimule a evolução da energia sustentável; e promova o desenvolvimento tecnológico.

Ou seja, apesar de sua relevância histórica, o cobre torna-se cada vez mais atual, indo ao encontro dos desafios da sociedade moderna, do século XXI, como a escassez de recursos, as mudanças climáticas e os problemas de saúde pública.

Atualmente, o metal é aplicado em inúmeras áreas, incluindo: arquitetura, saúde, meio ambiente, piscicultura, construção civil, energia, telecomunicações e transporte, apenas para citar alguns setores. Sem contar que o cobre é um dos metais mais importantes na indústria moderna e, portanto, essencial para a sua evolução. Ou seja, ele continua cada vez mais presente na vida das pessoas.

Graças ao grande número de aplicações, a demanda global por cobre continua em crescimento. Nos últimos 50 anos o consumo de produtos refinados de cobre mais que triplicou [1], reforçando o papel do cobre no avanço da tecnologia, expansão da atividade econômica e para melhorar a qualidade de vida.



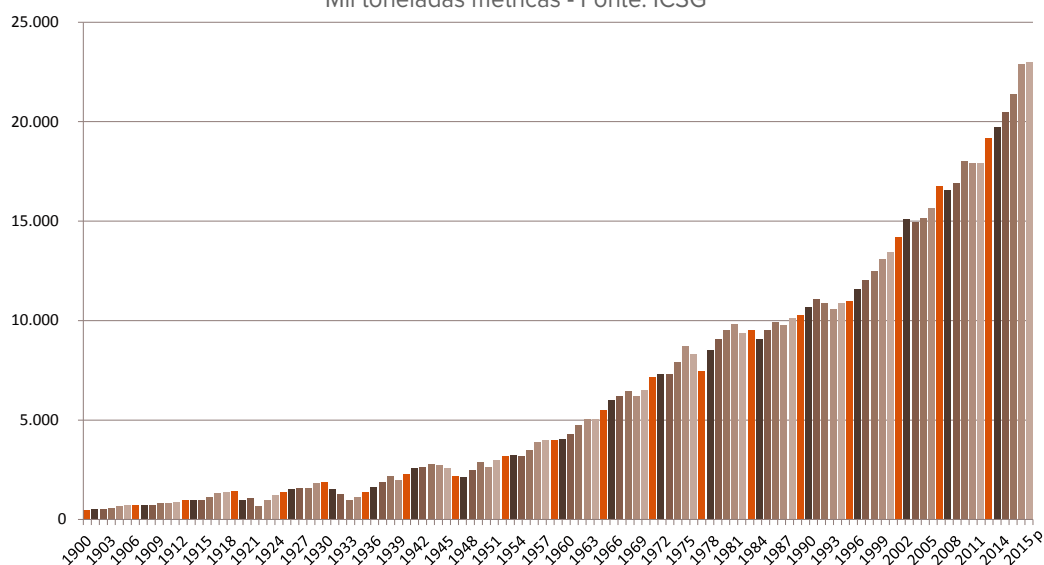
Se considerarmos como ponto de partida o ano de 1900, o avanço do metal fica ainda mais evidente. Naquele ano, o uso de cobre refinado foi de cerca de 500 mil toneladas. Em 2014, esse montante atingiu a marca de 22,9 milhões de toneladas, o que mostra, neste período, uma taxa composta de crescimento anual de 3,4 %.

ALGUMAS APLICAÇÕES DO COBRE

- **Aquicultura:** bastante utilizado nessa área devido às suas propriedades metalúrgicas e biológicas naturais e longa vida útil
- **Ar-condicionado:** o cobre possui maiores coeficientes de transferência de calor e colabora para a redução geral no custo do sistema
- **Área hospitalar:** devido à sua propriedade antimicrobiana, o cobre e suas ligas têm capacidade de eliminar vários agentes patogênicos em um curto espaço de tempo
- **Arquitetura, arte e design:** devido à sua coloração, durabilidade, riqueza de qualidades mecânicas e estéticas
- **Energia:** por ser um dos melhores condutores de eletricidade e de calor, o cobre é amplamente empregado em redes de alta, média e baixa tensão. Essencial para o melhor desempenho de motores, transformadores e diversos equipamentos eletroeletrônicos. Está presente também nas instalações de fontes de energia renovável (com destaque para a hídrica, eólica e fotovoltaica)
- **Instalações elétricas prediais:** devido à ótima condutividade do cobre, ele desempenha papel fundamental no desenvolvimento de aplicações elétricas e eletrônicas
- **Sistemas de aquecimento solar de água:** o cobre tem ótima condutividade térmica e por isso é empregado nas placas dos coletores solares e no revestimento interno dos boilers
- **Tecnologias modernas:** o cobre é um dos metais mais usados em sistemas de informática e telecomunicações, por suas características de condutividade, resistência e versatilidade
- **Tubulações para fluidos e gases:** utilizado em diversos tipos de construções, sejam residenciais, comerciais ou industriais por sua confiabilidade e segurança

O USO MUNDIAL DO COBRE REFINADO

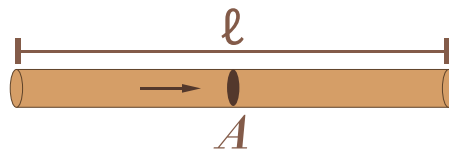
Mil toneladas métricas - Fonte: ICSG



3.3 O COBRE NA ÁREA ELÉTRICA

O cobre detém inúmeras características que o definem como o elemento metálico ideal a ser utilizado para a condução de energia elétrica, principalmente devido à sua resistividade elétrica e condutividade térmica.

A resistividade elétrica é a medida da oposição ao fluxo da corrente elétrica. O condutor ideal é o material com a menor resistividade. No Sistema Internacional de Unidades (SI) a resistividade é representada por ρ e sua unidade é o ohm.m (Ωm).



A partir desse conceito e aplicando-se a Segunda Lei de Ohm pode-se definir a resistência elétrica de um condutor – no SI sua unidade é o ohm (Ω). [2]

$$R = \rho \frac{\ell}{A}$$

ρ é a resistividade elétrica do material (Ωm)

R é a resistência elétrica do condutor (Ω)

ℓ é o comprimento do condutor (m)

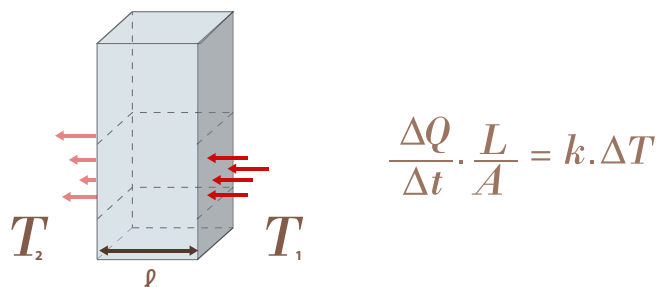
A é a área da seção do condutor (m^2)

A condutividade térmica (k) quantifica a habilidade dos materiais de conduzir energia térmica. Condutores elétricos construídos com materiais de alta condutividade térmica conduzem energia térmica de forma mais rápida e eficiente.

A condutividade térmica é uma característica específica de cada material, e depende tanto da pureza como da temperatura na qual ele se encontra (especialmente em baixas temperaturas). Em geral, a condução de energia térmica nos materiais aumenta à medida que a temperatura aumenta.

A condutividade térmica equivale numericamente à quantidade de calor Q transmitida por unidade de tempo através de um objeto com espessura L unitária, numa direção normal à área da superfície de sua seção reta A , também unitária, devido a uma variação de temperatura ΔT unitária entre as extremidades longitudinais. O inverso da condutividade térmica é a resistividade térmica. [3]

No SI a condutividade térmica é medida em unidades de watt por metro kelvin [W/(m·K)].



Unidades:

ΔQ em joule (J)

Δt em segundo (s)

L em metro (m)

A em metro quadrado (m²)

ΔT em kelvin (K)

Graças à sua resistividade elétrica e condutividade térmica, desde os primórdios da eletricidade o cobre e suas ligas têm sido usados no desenvolvimento e fabricação de inúmeros produtos, como fios e cabos, motores, transformadores, geradores, dispositivos de comando e proteção, componentes elétricos e eletrônicos, etc.

Aliás, foi a utilização do cobre na área elétrica que impulsionou o seu uso pelo homem. O cobre alcançou sua real dimensão como metal imprescindível para o desenvolvimento industrial em 1831, quando Michael Faraday descobriu a indução eletromagnética, que é o princípio por trás do gerador e do transformador elétrico. Deste momento em diante, a demanda pelo metal cresceu de forma notável.

Como um dos melhores condutores de eletricidade conhecidos, naturalmente o cobre também desempenha um importante papel no universo das energias renováveis. Suas excelentes propriedades elétricas e térmicas atendem perfeitamente às necessidades da energia limpa, gerando e transmitindo eletricidade com eficiência máxima e um mínimo impacto ambiental.





SUSTENTABILIDADE

4. SUSTENTABILIDADE

4.1 COBRE: ELEMENTO ESSENCIAL PARA UM MUNDO SUSTENTÁVEL

Um dos desafios do século XXI é a busca contínua pela sustentabilidade em todas as áreas e setores que envolvem a atividade humana. E, nesse quesito, o cobre também exerce papel importante, com participação marcante em diversas aplicações.

Ecologicamente amigável, o cobre é um metal presente nas mais diversas ações de preservação ambiental, como na busca pela eficiência energética, na geração de energia renovável e na redução dos efeitos nocivos da emissão de CO₂ na atmosfera.

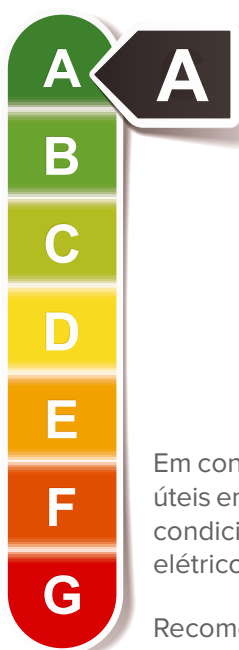
Uma característica altamente sustentável do cobre é que ele é 100 % reciclável e um dos poucos materiais que podem ser reciclados e reutilizados sem qualquer perda de desempenho. Quando reciclado, ele volta ao mercado nas mais variadas formas e aplicações, apresentando elevado grau de pureza e altíssimo valor agregado, tanto que pode ser reutilizado como o material original da mineração.



Atualmente, cerca de 9 milhões de toneladas de cobre são recicladas anualmente, o que significa que 35 % da demanda global de cobre são utilizados na forma de metal reciclado [4]. O processo de reciclagem do metal consome 85 % menos energia do que a sua produção. Isso representa uma economia anual de 100 milhões de MWh de energia elétrica e 40 milhões de toneladas de CO₂ que deixam de ser produzidos.

Outro apelo sustentável do cobre relaciona-se ao seu uso nas construções sustentáveis, também conhecidas como construções verdes. Esse tipo de edificação considera vários aspectos durante e depois da obra, incluindo os impactos econômico, social e ambiental. Essas construções são projetadas para serem eficientes em termos energéticos, reduzirem a poluição e minimizarem o desperdício de água.

Nesse segmento de mercado também é válido analisar o papel que o cobre pode representar. Devido às suas propriedades intrínsecas, o cobre é amplamente utilizado no setor de construção civil, destacando-se como opção para estruturas, reforços, revestimentos, coberturas, esquadrias, instalações elétricas, equipamentos de aquecimento e muitas outras aplicações.



Em construções sustentáveis, em particular, as qualidades do cobre são úteis em uma variedade de aplicações, incluindo seu uso em sistemas de condicionamento de ar, tubulação de água quente, fiação e dispositivos elétricos, nos sistemas de cogeração de energia, etc.

Recomenda-se como literatura relacionada a este item o *webinar* “O Portal da Eficiência Energética - Construções Sustentáveis” no site do ICA/Procobre [5].

4.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E FONTES LIMPAS DE ENERGIA

A crescente demanda por energia elétrica, verificada especialmente nas últimas décadas, colocou a busca por eficiência energética como tema fundamental para pessoas, empresas, cidades e países. Afinal, obter conforto e melhor rendimento com menor consumo de eletricidade só traz vantagens, seja pelo lado financeiro (economia na hora de pagar a conta), ou pelo lado ambiental (preservação dos recursos naturais e redução da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera).

Na busca por essa eficiência, o uso do cobre ajuda, e muito, começando pelo transporte de eletricidade. Graças à sua excelente capacidade em conduzir a corrente elétrica, o cobre colabora para evitar perdas de energia nas redes de transmissão e distribuição, tornando o sistema mais eficiente. Da mesma forma, o uso do cobre e suas ligas em equipamentos elétricos amplia seu nível de eficiência, oferecendo vantagens para usuários de todos os setores: comercial, industrial, residencial e público.

• A importância do cobre para insta



Suas propriedades únicas tornam as instalações elétricas mais seguras, eficientes e duráveis.

Fios e cabos de cobre são capazes de reduzir significativamente as perdas de energia contribuindo para a baixa emissão de CO₂.



Os condutores elétricos são fabricados com cobre eletrolítico de alta pureza (99,99%), o que garante a melhor condutividade elétrica.

O cobre é capaz de transmitir energia com qualidade, apresentando baixo índice de perdas.



O cobre apresenta grande resistência à deformação e à corrosão, aumentando a vida útil e a segurança dos produtos aplicados nas instalações elétricas.

Atualmente o cobre está presente em diversos dispositivos, como os disjuntores, fusíveis, hastes de aterramento, barramentos, interruptores e tomadas.



Ter uma instalação segura é importante porque:

Reduz a probabilidade de incêndios



Diminui os riscos de choques elétricos



Aumenta a proteção das pessoas e do patrimônio



*O cobre
contribui para
um mundo
melhor.*

lações elétricas seguras e eficientes •



Quando as instalações elétricas são bem dimensionadas e revisadas periodicamente, a segurança das pessoas e do imóvel aumenta significativamente.

10

A recomendação é que, no mínimo, a instalação passe por manutenções preventivas a cada dez anos.



Tanto a manutenção como os reparos devem sempre ser feitos por um profissional qualificado.

Assim como os automóveis, as instalações precisam de manutenções constantes para continuar funcionando adequadamente.

Melhorar a eficiência energética contribui diretamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa, principalmente quando a geração de energia decorre da queima de combustíveis fósseis.

Para dar uma ideia de grandeza nessa questão, vamos aos números. Alguns estudos apontam que, hoje, a eletricidade é o fator que mais contribui para a emissão de gases de efeito estufa no mundo. Estima-se que mais de 50 % das emissões de CO₂ são atribuídas ao consumo de eletricidade decorrente da geração de energia, tendo como base a queima de combustíveis fósseis [6].



Significa que o uso mais eficiente da energia pode levar à redução de consumo e, por consequência, à menor necessidade de geração através de fontes mais ‘sujas’, como o carvão e derivados de petróleo.

Nesse sentido, o cobre pode ser considerado um ‘material verde’, que desempenha um papel importante para tornar as redes de distribuição de energia e os dispositivos elétricos mais eficientes, reduzindo, automaticamente, as emissões de CO₂ na atmosfera.

Outra ação fundamental para reduzir a emissão de gases de efeito estufa é a substituição de fontes de energia poluentes pelas chamadas energias renováveis, ou limpas, como a eólica, fotovoltaica, biomassa e hídrica. Nesse caso, novamente o cobre aparece, visto que vários equipamentos utilizados na geração de energia através dessas fontes, como fios e cabos, geradores e transformadores, utilizam uma grande quantidade do metal, que colabora para a sua eficiência, segurança e longevidade. Além disso, o uso do cobre para transmitir a energia gerada por esses sistemas renováveis assegura a máxima eficiência e mínimo impacto ambiental no projeto.

A UTILIZAÇÃO DO COBRE

- Melhora a qualidade do meio ambiente e dos processos produtivos
- Colabora para a preservação ambiental, através da redução da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera
- Proporciona maior eficiência e ótima relação custo-benefício para equipamentos elétricos e seus sistemas elétricos
- Colabora para o desenvolvimento e eficiência das fontes de energia renováveis, como a fotovoltaica, eólica e hídrica



• Cobre: conduzindo energia

Um dos melhores condutores de eletricidade conhecidos, o cobre desempenha um importante papel no universo das energias renováveis.



O baixo impacto ambiental deste metal e suas excelentes propriedades elétricas e térmicas atendem perfeitamente as necessidades da energia limpa.



As principais fontes sustentáveis de energia que necessitam de cobre são:



Eólica
(ação dos ventos)



Fotovoltaica
(solar)



Hídrica
(usinas hidrelétricas)



Biomassa
(queima do bagaço da cana, por exemplo)

A energia fotovoltaica resulta da transformação da luz solar em eletricidade.

Na geração fotovoltaica, uma instalação doméstica de 2,5 kW pode consumir até

12 kg
de cobre



O cobre está presente em vários equipamentos utilizados nas instalações de geração elétrica limpa, como os sistemas de aterramento, equipamentos de proteção, fios e cabos, motores, geradores, transformadores e componentes elétricos e eletrônicos.

para um mundo sustentável. •



O funcionamento de uma turbina eólica de 2 MW requer o uso de

5 a 12
ton de cobre



Vantagens da energia sustentável para a sociedade:

✓
Reduz a
emissão de CO₂

✓
Naturalmente
renováveis

✓
São menos
poluentes

As energias renováveis, como a solar e a eólica, ajudam a combater o aquecimento do planeta, pois reduzem a emissão de gases de efeito estufa.

Um estudo do Greenpeace indica que as fontes renováveis podem suprir metade da demanda mundial de energia até 2050.

Em 2010, essas fontes já representavam 19,7 % da matriz elétrica mundial.

Em 2012, as fontes limpas de energia receberam investimentos de US\$ 211 bilhões.



O cobre é vital para que os sistemas de energias renováveis gerem e transmitam a eletricidade com máxima eficiência e mínimo impacto ambiental.

4.3 DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO E AMBIENTAL DOS CONDUTORES ELÉTRICOS

Na área elétrica, a busca por sistemas mais sustentáveis não ocorre apenas na fabricação de produtos e soluções. Um bom projeto e a aplicação bem executada também podem colaborar. Nesse sentido, ir além das orientações técnicas faz bastante sentido. E, na parte de cabos elétricos de cobre, temos uma norma que pode ser referência para o dimensionamento econômico e ambiental.

No universo dos cabos elétricos, o método tradicional de determinação da seção de um condutor elétrico é conhecido como “dimensionamento técnico”. Nesse método, são aplicados os requisitos das Normas ABNT NBR 5410 – Instalações elétricas de baixa tensão [7] e ABNT NBR 14039 – Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV [8].

O dimensionamento técnico do condutor resulta na menor seção nominal possível que não comprometa a segurança, a qualidade e a durabilidade da instalação elétrica. Neste dimensionamento, são considerados os seguintes critérios:

- Seção mínima do condutor
- Capacidade de condução de corrente do condutor em regime permanente
- Queda de tensão no condutor
- Proteção do condutor contra sobrecarga
- Proteção do condutor contra curto-circuito

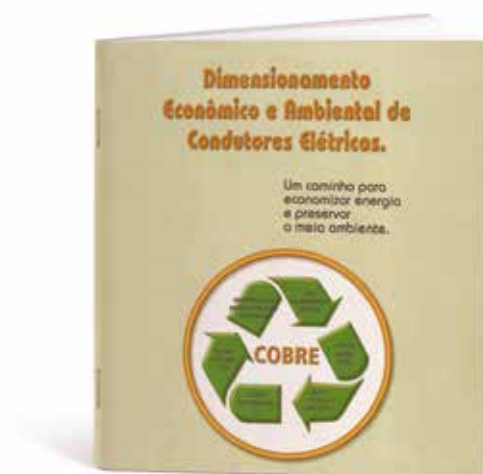
No entanto, quanto menor a seção do condutor, maior a sua resistência elétrica e maior a perda de energia (joule). Consequentemente, maior a emissão de CO₂ ao longo de sua vida útil. Para reduzir estas emissões a valores insignificantes, faz-se necessário aumentar a seção do condutor.



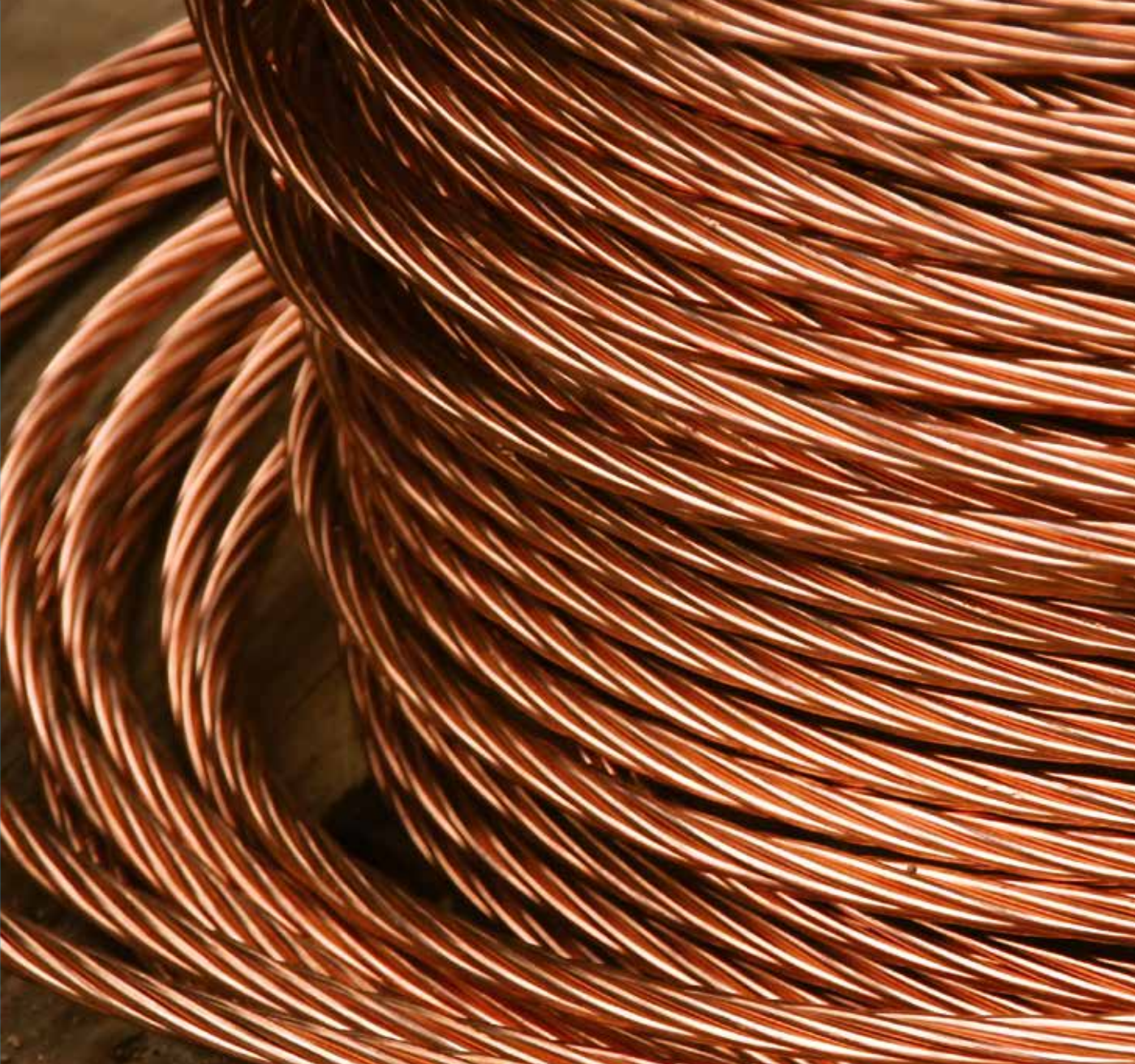
Esse aumento de seção significa elevar o custo inicial do cabo e seus acessórios, sendo necessário encontrar um equilíbrio entre a “redução nas perdas” versus o “aumento do custo inicial da instalação” – processo que pode ser auxiliado com a aplicação dos critérios estabelecidos na Norma ABNT NBR 15920 – Cabos elétricos – Cálculo da corrente nominal - Condições de operação – Otimização econômica das seções dos cabos de potência [9].

Tal conceito parece simples, mas é mais abrangente do que aparenta. Portanto, ponderá-lo é imprescindível no desenvolvimento de um futuro mais consciente e sustentável. Um caminho que contribui para economizar energia e preservar o meio ambiente.

Em função do exposto, pode-se concluir que a melhor ocasião para se observar a importância do dimensionamento econômico e ambiental de um condutor elétrico é a fase de implantação do projeto, na qual custos adicionais são menores e previsíveis.



A metodologia de cálculo que considera o dimensionamento ambiental dos cabos elétricos e o cálculo das emissões de CO_2 é apresentada na publicação do ICA/Procobre Brasil intitulada “Dimensionamento Econômico e Ambiental de Condutores Elétricos” [10], disponível no site <http://leonardo-energy.org.br/>.



DEFINIÇÕES

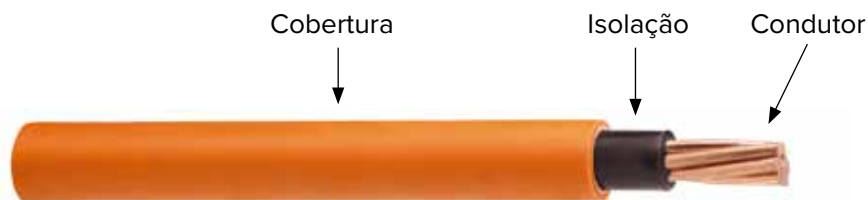
DADOS CONSTRUTIVOS DE UM
CABO ELÉTRICO DE POTÊNCIA

5. DADOS CONSTRUTIVOS DE UM CABO ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Os cabos elétricos de potência possuem componentes que devem cumprir funções específicas para que a potência elétrica seja conduzida de forma segura e com desempenho adequado. Dependendo da tensão nominal do circuito onde o cabo será instalado, sua construção terá mais ou menos componentes, uma vez que tensões mais elevadas requerem um confinamento mais rigoroso das linhas de campo elétrico.

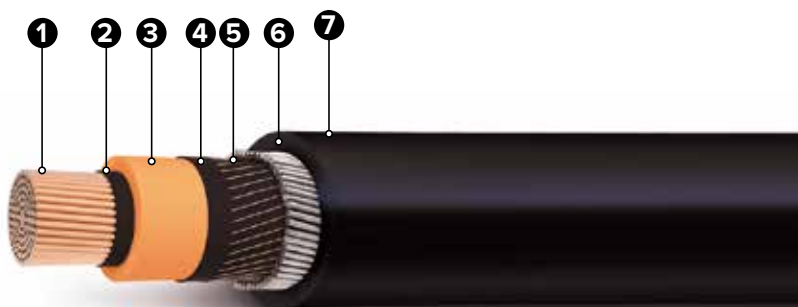
Os sistemas elétricos de baixa e média tensões são previstos para várias classes de tensão. Objetivando racionalizar a utilização de cabos e acessórios para esses sistemas, as seguintes tensões de isolamento são padronizadas para os cabos elétricos de potência (V_o/V): 450/750 V; 0,6/1 kV; 1,8/3 kV; 3,6/6 kV; 6/10 kV; 8,7/15 kV; 12/20 kV; 15/25 kV; 20/35 kV; 27/35 kV.

Os principais componentes de um cabo de baixa tensão estão indicados na figura a seguir:



Os principais componentes de um cabo de média tensão estão indicados na figura abaixo:

1. Condutor
2. Blindagem do condutor
3. Isolação
4. Blindagem da isolamento
5. Blindagem metálica
6. Armação
7. Cobertura



A seguir são descritos os componentes dos cabos de potência de baixa e média tensão.

5.1 CONDUTOR

Condutores são os meios materiais que permitem facilmente a passagem de cargas elétricas. Metais como cobre e alumínio são os escolhidos para tal finalidade, tendo em vista seu custo e suas propriedades elétricas.

5.1.1 MATERIAL DO CONDUTOR

O cobre e o alumínio são os dois metais mais utilizados na fabricação de condutores elétricos, tendo em vista suas propriedades elétricas e mecânicas, bem como seu custo. No entanto, ao longo dos anos, o cobre tem sido o mais usado, sobretudo em condutores providos de isolação.

O cobre utilizado nos condutores é o cobre eletrolítico, com pureza de até 99,99 %. Esse tipo de cobre é obtido em lingotes que, por processo de laminação ou extrusão a quente, são transformados em vergalhões, que são produtos de seção maciça circular. Do vergalhão, os condutores são obtidos por “estiramento a frio”, que origina o cobre duro, ou por “recozimento”, que origina o cobre mole ou recozido; entre esses dois tipos, tem-se o cobre meio-duro.

O alumínio para condutores, com pureza de cerca de 99,5 %, é obtido normalmente por laminação contínua. Por meio de processos análogos aos do cobre, obtém-se o alumínio meio-duro. O uso desse metal baseia-se principalmente na relação condutividade/peso.

PROPRIEDADES - COBRE X ALUMÍNIO				
	Cobre		Alumínio	
Símbolo químico	Cu		Al	
Número atômico	29	-	13	-
Massa atômica	63,546 u	-	26,981 u	-
Densidade	8,91 g/cm ³	100 %	2,70 g/cm ³	30 %
Resistividade elétrica a 20 °C	0,017241 x 10 ⁻⁶ Ωm	100 %	0,027 x 10 ⁻⁶ Ωm	157 %
Condutividade térmica a 20 °C	397 W/(m·K)	100 %	230 W/(m·K)	58 %
Módulo de elasticidade	118 MPa	100 %	70 MPa	59 %
Coeficiente de expansão linear	17 x 10 ⁻⁶ °C ⁻¹	100 %	23 x 10 ⁻⁶ °C ⁻¹	135 %
Condutividade elétrica (%IACS)		100 %		61 %
Ponto de fusão	1.083 °C	100 %	660 °C	61 %
Estrutura cristalina	Cúbica de faces centradas	-	Cúbica de faces centradas	-
Tensão de ruptura (material recozido)	23 kgf/mm ²	100 %	4,9 kgf/mm ²	21 %
Limite de escoamento (σ=0,2 %)	7,0 kgf/mm ²	100 %	1,3 kgf/mm ²	19 %
Calor específico	385 J/kg°C	100 %	900 J/kg°C	234 %

ESTUDO SOBRE CONEXÕES DE CONDUTORES REALIZADO PELO POWERTECH LABS DE VANCOUVER, CANADÁ [12]

Objetivo: comparar o desempenho de conexões de cobre e alumínio nas instalações elétricas.

PRINCIPAIS CONCLUSÕES

1. Estudo de corrosão acelerada

Para este estudo, foram realizados os seguintes tipos de conexões com diferentes seções de condutores:

- Entre dois condutores de alumínio através de conectores de alumínio de compressão
- Entre dois condutores de alumínio através de conectores de alumínio mecânicos
- Entre dois condutores de cobre através de conectores de cobre de compressão
- Entre dois condutores de cobre através de conectores de cobre mecânicos
- Entre dois condutores de cobre através de conectores de alumínio de compressão
- Entre dois condutores de cobre através de conectores de alumínio mecânicos

As conexões foram submetidas ao ensaio de corrosão por névoa salina em ciclos de 500 horas com aplicação de corrente elétrica em cada período. O critério de avaliação considerou a medição da resistência elétrica da montagem em corrente contínua a cada 170 horas, antes e após a aplicação da corrente elétrica. A duração total do ensaio foi de aproximadamente 2.000 horas.

CONCLUSÕES DO ESTUDO

a) Conectores de alumínio em condutores de alumínio:

40 % falharam; 10 % apresentaram um significativo aumento na resistência; 20 % apresentaram um moderado aumento na resistência; 30 % apresentaram uma diminuição na resistência

b) Conectores de alumínio em condutores de cobre:

40 % apresentaram um significativo aumento na resistência; 30 % apresentaram um moderado aumento na resistência; 30 % apresentaram uma diminuição na resistência

c) Conectores de cobre em condutores de cobre:

70 % apresentaram um pequeno aumento na resistência; 30 % apresentaram uma diminuição na resistência

Em resumo, todas as conexões em cobre tiveram um desempenho melhor do que as conexões em alumínio no ensaio de corrosão acelerada.

2. Comparação entre desempenho do cobre e alumínio com conectores mecânicos em relação ao envelhecimento térmico acelerado

Para este estudo, foram realizados os seguintes tipos de conexões mecânicas com diferentes seções de condutores:

- Entre dois condutores de alumínio através de conectores bimetálicos (alumínio/cobre) mecânicos
- Entre dois condutores de cobre através de conectores bimetálicos (alumínio/cobre) mecânicos
- Entre dois condutores de cobre através de conectores de cobre mecânicos

As conexões foram submetidas ao ensaio de envelhecimento térmico acelerado conforme Normas ANSI C119.4 (para montagem) e IEC 61238-1 para análise dos resultados. Foram realizados 1.500 ciclos de aquecimento/resfriamento, com aplicação de curto-circuito no ciclo 270 e medição de resistência elétrica a cada 100 ciclos.

CONCLUSÕES DO ESTUDO

- a) todas as amostras com condutores e conectores de cobre tiveram o melhor desempenho
- b) amostras de condutores de cobre com conectores de alumínio tiveram desempenho ruim
- c) todas as amostras com condutores de cobre ou alumínio com conectores de alumínio tiveram o pior desempenho

3. Comparação entre desempenho do cobre e alumínio com conectores de compressão em relação ao envelhecimento térmico acelerado

Para este estudo, foram realizados os seguintes tipos de conexões por compressão com diferentes seções de condutores:

- Entre dois condutores de alumínio através de conectores de alumínio por compressão
- Entre dois condutores de cobre através de conectores de cobre por compressão

As conexões foram submetidas ao ensaio de envelhecimento térmico acelerado conforme Normas ANSI C119.4 (para montagem) e IEC 61238-1 para análise dos resultados. Foram realizados 1.500 ciclos de aquecimento/resfriamento, com aplicação de curto-circuito no ciclo 270 e medição de resistência elétrica a cada 100 ciclos.

CONCLUSÕES DO ESTUDO

- a) todas as amostras com condutores e conectores de cobre tiveram o melhor desempenho
- b) amostras de condutores de alumínio com conectores de alumínio com aplicação de produto inibidor de oxidação tiveram desempenho adequado
- c) amostras de condutores de alumínio com conectores de alumínio que tiveram o condutor lixado antes da aplicação do conector tiveram o mesmo desempenho das amostras que não tiveram o condutor lixado
- d) amostras de condutores de alumínio com conectores de alumínio sem aplicação de produto inibidor de oxidação e sem lixar o condutor antes da aplicação do conector tiveram o pior desempenho

4. Ensaio de tração (deformação)

Para este estudo foram preparados corpos de prova de cobre, alumínio e liga de alumínio, em diferentes seções, que foram submetidos a esforço de 20 Mpa por 7 horas, a 100 °C, para alongá-los até a ruptura.

CONCLUSÕES DO ESTUDO

As amostras de cobre sempre tiveram desempenho melhor do que as amostras de alumínio.

A seguir, são apresentados alguns aspectos comparativos entre o cobre e o alumínio [11]:

- **Condutividade:** o alumínio apresenta uma condutividade de cerca de 60 % da do cobre. Assim, para dada capacidade de condução de corrente, é necessário usar um condutor de alumínio com seção nominal 1,67 vez maior que a seção do condutor de cobre.
- **Densidade:** a densidade do alumínio é de 2,7 g/cm³ e a do cobre de 8,91 g/cm³. A relação entre as densidades e as condutividades mostra que 1 kg de alumínio realiza o mesmo “trabalho elétrico” que cerca de 2 kg de cobre.
- **Oxidação:** quando exposta ao ar, a superfície do alumínio fica recoberta por uma camada invisível de óxido, de características altamente isolantes e de difícil remoção. Nas conexões com alumínio, um bom contato só será conseguido com a ruptura dessa camada. Com efeito, a principal finalidade dos conectores utilizados, de pressão e aparafusados, é a de romper o filme de óxido. Uma vez removida a camada inicial, costuma-se usar, durante a preparação de uma conexão, compostos que inibem a formação de uma nova camada de óxido. O cobre, com relação a esse aspecto, é bem superior ao alumínio.
- **Escoamento:** por ser mais mole que o cobre, o alumínio escoia com pequenas pressões. Por esse motivo, os conectores usados em condutores de alumínio devem ter as superfícies de contato grandes o suficiente para distribuir as tensões e evitar danos no local do condutor a ser comprimido. Por sua vez, é indispensável o reaperto periódico dos conectores, afrouxados pelo escoamento, para evitar a formação de óxido, que eleva a resistência elétrica da conexão, provocando o seu aquecimento. Para o condutor de alumínio, as conexões devem atender às Normas ABNT NBR 9513, ABNT NBR 9313 e a ABNT NBR 9326.
- **Eletropositividade:** o alumínio e o cobre estão separados eletroquimicamente por 2 V. Essa diferença de potencial é responsável pela predisposição da conexão cobre-alumínio (ou liga de cobre – liga de alumínio) à corrosão galvânica. Devem-se utilizar conectores especiais para evitar a ocorrência da corrosão galvânica.

Dos aspectos comparativos apresentados, pode-se chegar a algumas conclusões, a seguir elencadas [11]:

- Em instalações em que as linhas possuam muitas conexões, não são realizadas manutenções periódicas e/ou são utilizados componentes com liga de cobre em seus pontos de contato (por exemplo, interruptores, tomadas de corrente, etc.), geralmente os condutores de cobre (condutores e/ou cabos isolados) são os mais recomendados.
- Em locais da alta salinidade, tais como em regiões litorâneas, os condutores de cobre são recomendáveis.

5.1.2 FORMAÇÃO DO CONDUTOR

Conforme a Norma ABNT NBR NM 280:2011 [13], os condutores são classificados quanto à sua formação em:

● **Fio ou fio sólido:**



É o produto metálico formado por um único condutor rígido (monofilar), pouco flexível, o que faz com que ele tenha usos específicos.

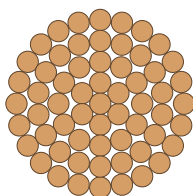
● **Cabo:**



É o produto metálico formado por um conjunto de fios elementares encordoados (multifilar). A formação pode ser normal, compactada, comprimida ou composta por feixes (ou cochas). O conceito do encordoamento aumenta a flexibilidade e facilita o manuseio e a instalação.

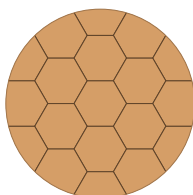
Os condutores podem ter os encordoamentos com as seguintes configurações [14]:

● **Condutor encordoado circular não compactado:**



O condutor é formado por um único fio ou por duas ou mais camadas concêntricas de fios de mesmo diâmetro em torno de um fio central, sendo este conjunto chamado de corda.

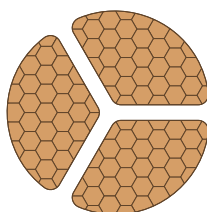
● **Condutor encordoado circular compactado:**



Após a formação da corda ocorre sua compactação, o que provoca uma redução significativa de seu diâmetro, uma vez que os espaços vazios são substancialmente

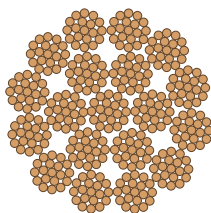
reduzidos. Como resultado desta compactação, os cabos isolados apresentam:

- Menor diâmetro final
- Menor consumo de materiais isolantes e cobertura
- Melhor aproveitamento na instalação em dutos
- Menores raios de curvatura
- **Condutor setorial:**



Estas cordas são normalmente utilizadas em cabos multipolares com três ou quatro veias isoladas para a obtenção de um menor diâmetro.

- **Condutor flexível:**



O encordoamento composto é formado pela reunião de vários condutores previamente encordoados denominados de feixes (ou cochas). As cochas encordoadas constituirão um condutor composto.

Este tipo de encordoamento oferece excelente flexibilidade ao cabo, sendo utilizado tanto nas instalações elétricas fixas, facilitando a enfição, quanto em equipamentos que possuem movimentação durante o seu funcionamento.

5.1.3 CLASSE DE ENCORDOAMENTO

Os condutores podem ser reunidos em diversas formas distintas e com fios que diferem em diâmetros e têmperas. Devido a isso, Normas específicas determinam esse processo de reunião para formação do condutor elétrico:

- **ABNT NBR NM 280** – Condutores de cabos isolados
- **ABNT NBR 5349** – Cabos nus de cobre mole para fins elétricos – Especificação

Os condutores de cobre têm cinco classes de encordoamento, a saber:

● **Classe 1:** Condutores sólidos circulares (fios)



● **Classe 2:** Condutores encordoados circulares, compactados ou não



● **Classes 4(*), 5 e 6:** Condutores flexíveis



(*) O condutor classe 4 foi eliminado da Norma IEC (*International Electrotechnical Commission*), sendo de uso frequente nos países do MERCOSUL (Anexo B – Tabela 4 da Norma ABNT NBR NM 280:2011).

Para exemplificar, a tabela a seguir apresenta a formação de um condutor com a seção nominal de 10 mm² para as várias classes de encordoamento existentes.

CONDUTOR - SEÇÃO NOMINAL DE 10 MM ²		
Classe 1		1/3,50
Classe 2	Normal	7/1,35
	Compacto	7 fios
Classe 5		7 x 15/0,35
Classe 6		12 x 27/0,20

As medidas da tabela anterior se referem ao número de fios/diâmetro dos fios elementares em milímetros. Por exemplo, para a classe 6 são 12 cochas, cada uma sendo formada por 27 fios de 0,20 mm de diâmetro, totalizando 324 fios de 0,20 mm de diâmetro.

As tabelas a seguir, reproduzidas da Norma ABNT NBR 5349, mostram as características dos condutores classes 2, 4, 5 e 6. Vale esclarecer que, para as classes flexíveis (4, 5 e 6), o número de fios elementares pode variar dependendo do fabricante, uma vez que a respectiva Norma não define a quantidade de fios, definindo apenas a resistência elétrica máxima do condutor e o diâmetro máximo dos fios elementares.

CABOS DE CLASSE DE ENCORDOAMENTO 2

Seção Nominal (mm²)	Número de fios		Resistência elétrica máxima, em c.c., a 20 °C (Ω/km)	
	Cabo Não Compactado	Cabo Compactado	Fios Nus	Fios Revestidos
0,5	7	-	36	36,7
0,75	7	-	24,5	24,8
1	7	-	18,1	18,2
1,5	7	6	12,1	12,2
2,5	7	6	7,41	7,56
4	7	6	4,61	4,7
6	7	6	3,08	3,11
10	7	6	1,83	1,84
16	7	6	1,15	1,16
25	7	6	0,727	0,734
35	7	6	0,524	0,529
50	19	6	0,387	0,391
70	19	12	0,268	0,27
95	19	15	0,193	0,195
120	37	18	0,153	0,154
150	37	18	0,124	0,126
185	37	30	0,0991	0,1
240	61	34	0,0754	0,0762
300	61	34	0,0601	0,0607
400	61	53	0,047	0,0475
500	61	53	0,0366	0,0369
630	91	53	0,0283	0,0286
800	91	53	0,0221	0,0224
1000	91	53	0,0176	0,0177
1200	- 2)	- 2)	0,0151	0,0151
1400 ¹⁾	- 2)	- 2)	0,0129	0,0129
1600	- 2)	- 2)	0,0113	0,0113
1800 ¹⁾	- 2)	- 2)	0,0101	0,0101
2000	- 2)	- 2)	0,009	0,009

¹⁾ Seções não recomendadas

²⁾ Número mínimo de fios não especificado

CABOS DE CLASSE DE ENCORDOAMENTO 4, 5 E 6					
Seção Nominal (mm ²)	Diâmetro máximo dos fios (mm)			Resistência elétrica máxima, em cc., a 20 °C (Ω/km)	
	Classe 4	Classe 5	Classe 6	Fios Nus	Fios Revestidos
0,5	0,31	0,21	0,16	39	40,1
0,75	0,31	0,21	0,16	26	26,7
1	0,31	0,21	0,16	19,5	20
1,5	0,41	0,26	0,16	13,3	13,7
2,5	0,41	0,26	0,16	7,98	8,21
4	0,51	0,31	0,16	4,95	5,09
6	0,51	0,31	0,21	3,3	3,39
10	0,51	0,41	0,21	1,91	1,95
16	0,61	0,41	0,21	1,21	1,24
25	0,61	0,41	0,21	0,78	0,795
35	0,68	0,41	0,21	0,554	0,565
50	0,68	0,41	0,31	0,386	0,393
70	0,68	0,51	0,31	0,272	0,277
95	0,68	0,51	0,31	0,206	0,21
120	0,68	0,51	0,31	0,161	0,164
150	0,86	0,51	0,31	0,129	0,132
185	0,86	0,51	0,41	0,106	0,108
240	0,86	0,51	0,41	0,0801	0,0817
300	0,86	0,51	0,41	0,0641	0,0654
400	0,86	0,51	-1)	0,0486	0,0495
500	0,86	0,61	-1)	0,0384	0,0391
630	- 2)	0,61	- 2)	0,0287	0,0292

¹⁾ Seções não especificadas para a classe de encordoamento 6
²⁾ Seção não especificada para as classes de encordoamento 4 e 6.

5.1.4 SEÇÃO NOMINAL DOS CONDUTORES

A série métrica (mm²) passou a ser utilizada no Brasil em 1982, quando se adotou o padrão da *International Electrotechnical Commission* (IEC). Neste sistema, a seção nominal do condutor é definida em função da resistência elétrica máxima e complementada por outras características (como quantidade mínima de fios ou diâmetro máximo dos fios que a compõem), não tendo relação direta com as dimensões geo-

métricas do condutor (área, raio, diâmetro). Como resultado do sistema métrico, as seções padronizadas são nominais, ou seja, embora tenham valores muito próximos das seções transversais dos condutores, não possuem exatamente essas dimensões. Por exemplo, um condutor de seção nominal $1,5 \text{ mm}^2$, pode ter uma seção transversal de $1,48$ ou $1,52 \text{ mm}^2$ (valores apenas para exemplificar, sendo que valores reais devem ser consultados nos catálogos dos fabricantes).

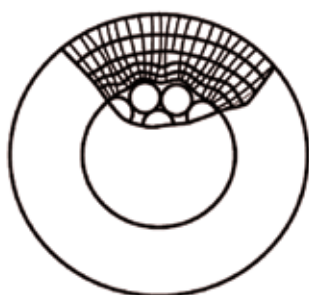
As seções nominais típicas mais utilizadas em cabos de potência são as seguintes (em mm^2): 1,5; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120; 150; 185; 240; 300; 400; 500.

5.2 BLINDAGEM DO CONDUTOR (APENAS PARA CABOS DE MÉDIA E ALTA TENSÃO)

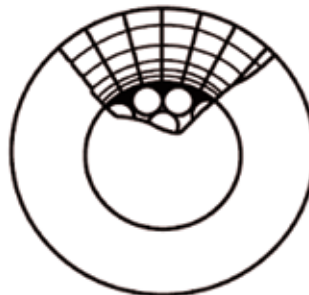
A blindagem do condutor é constituída por uma camada de material semicondutor aplicada diretamente sobre o condutor metálico. Ela tem como principal finalidade dar uma forma perfeitamente cilíndrica ao condutor e eliminar espaços vazios entre o condutor e a isolação.

Quando um condutor encordoado de um cabo de média ou alta tensão não possui essa blindagem (Figura abaixo), o campo elétrico gerado pela tensão elétrica aplicada no condutor assume uma forma distorcida, acompanhando a superfície irregular do condutor, o que provoca uma concentração de linhas de campo elétrico em determinados pontos da isolação. Em tais condições, as solicitações elétricas concentradas podem exceder os limites permissíveis pela isolação, resultando em uma depreciação na vida do cabo ou até falhas.

Se não houvesse a presença da blindagem semicondutora do condutor preenchendo os espaços vazios, o ar existente entre o condutor e a isolação – formado quando da extrusão da isolação – seria ionizado pela ação do campo elétrico, ocorrendo então descargas parciais que degradariam o material isolante até a sua perfuração.



Condutor sem Blindagem



Condutor com Blindagem

5.3 ISOLAÇÃO

Isolação é o material ou conjunto de materiais isolantes aplicados sobre o condutor para isolá-lo eletricamente do ambiente onde está instalado e dos outros condutores que o circundam.

Os materiais isolantes sólidos são os mais utilizados nos cabos de baixa e de média tensão. Possuem diversas características comuns, porém, cada tipo possui propriedades específicas cujo conhecimento é determinante na escolha do material. A seguir, são apresentadas as características comuns [15]:

- **Homogeneidade da isolação e boa resistência ao envelhecimento em serviço:** os cuidados sempre crescentes com a homogeneidade e com a eliminação de vazios nesses materiais isolantes fazem que sejam reduzidos ao mínimo os riscos de envelhecimento por causas elétricas. Outros mecanismos de envelhecimento, por causas químicas ou térmicas, podem apresentar-se, mas são eficazmente combatidos por uma formulação adequada das misturas.
- **Ausência de escoamento:** sendo sólido o isolante, o risco de escoamento é mínimo mesmo na posição vertical.
- **Reduzida sensibilidade à umidade:** os isolantes sólidos praticamente não absorvem a umidade.
- **Insensibilidade às vibrações:** os cabos com isolação sólida geralmente são insensíveis às vibrações.
- **Bom comportamento ao fogo:** a resistência à propagação do fogo pode ser garantida por composições adequadas de isolantes sólidos, e a atenuação de propagação pode ser obtida com o uso de isolações especiais e por uma construção judiciosa do cabo.

Os três materiais isolantes sólidos mais utilizados nos cabos de potência são o PVC (termoplástico), o EPR (ou HEPR) e o XLPE (termofixos), que possuem temperaturas em regime permanente conforme tabela a seguir:

Categoria	Material da isolação	Operação em regime contínuo	Operação em sobrecarga	Operação em curto-circuito
Termoplásticos	PVC $\leq$ 300 mm ²	70 °C	100 °C	160 °C
	PVC > 300 mm ²	70 °C	100 °C	140 °C
Termofixos	XLPE	90 °C	130 °C	250 °C
	EPR e HEPR	90 °C	130 °C	250 °C
	EPR 105	105 °C	140 °C	250 °C

Principais características dos materiais isolantes:

Cloreto de polivinila (PVC)

- É uma mistura de cloreto de polivinila puro (resina sintética), plastificante, cargas e estabilizantes.
- Sua rigidez dielétrica é elevada, porém, comparado com o polietileno, seu poder indutor específico é alto e sua resistência de isolamento mais fraca.
- Suas perdas dielétricas são elevadas, principalmente acima de 20 kV, limitando o seu emprego a sistemas de até 10 kV.
- Sua estabilidade química é considerável ante os produtos usuais. Misturas adequadas são muito pouco sensíveis à água.
- Transmite mal o fogo, mas sua combustão (em grande quantidade) provoca a produção de fumaça, gases corrosivos e tóxicos.
- O envelhecimento térmico pode ser eficazmente combatido por estabilizantes apropriados.
- É facilmente colorido com cores vivas.
- É um material isolante muito bom para os cabos de potência e para os cabos de transmissão a distância média.
- De modo geral, o fabricante pode formular a mistura para satisfazer às mais variadas exigências. Assim, pode-se conseguir, por exemplo, para as coberturas, uma fraca absorção de água e uma elevada resistência mecânica e à abrasão, um bom comportamento com relação ao fogo e resistência específica aos solventes ou à gasolina.

Borracha etileno-propileno (EPR)

- Os compostos de EPR são, em geral, reticulados por meio de peróxidos orgânicos. As misturas correspondentes têm, por conseguinte, a melhor resistência possível ao envelhecimento térmico e aos agentes oxidantes.
- Sua flexibilidade é muito grande, mesmo a temperaturas inferiores a 0 °C.
- Apresenta uma resistência excepcional às descargas e radiações ionizantes, mesmo a quente.
- Seu ângulo de perdas é bastante baixo para as misturas destinadas aos cabos de média tensão.
- Possui uma resistência à deformação térmica que permite temperaturas de 250 °C, durante os curtos-circuitos.

- Apresenta uma absorção razoável de umidade, que, no entanto, pode ser reduzida por meio de formulação adequada.
- Possui boa característica no que diz respeito ao envelhecimento térmico, o que permite conservar densidades de corrente aceitáveis quando os cabos funcionam em temperatura ambiente elevada.
- Apresenta baixa dispersão da rigidez dielétrica e é praticamente isento do *treeing* — fenômeno que consiste na formação de arborescências no material, provocando descargas parciais localizadas e sua consequente deterioração.
- A borracha EPR é considerada um ótimo isolante sólido. Há exaustiva experiência mundial e nacional de utilização desse material em baixa, média e alta tensões.
- A nomenclatura “EPR” é um nome genérico que significa qualquer borracha que contenha etileno e propileno. No mercado existem algumas variações da borracha EPR utilizada como material isolante em cabos elétricos, por exemplo, EPR 105 e HEPR, conforme tabela abaixo.

Nomenclatura	Tipo de isolação	Nota
EPR	Borracha etileno-propileno	Temperatura em regime permanente 90 °C.
EPR 105	Borracha etileno-propileno de alto módulo	Temperatura em regime permanente 105 °C. Tensão de ruptura duas vezes superior ao EPR. Alongamento de 150 % contra 200 % do EPR. Este composto é utilizado para a produção de cabos com isolação coordenada (isolação com espessura reduzida).
HEPR	Borracha etileno-propileno de alto módulo	Temperatura em regime permanente 90 °C. Tensão de ruptura duas vezes superior ao EPR. Alongamento de 150 % contra 200 % do EPR. Este composto é utilizado para a produção de cabos com isolação coordenada (isolação com espessura reduzida).

Polietileno reticulado (XLPE)

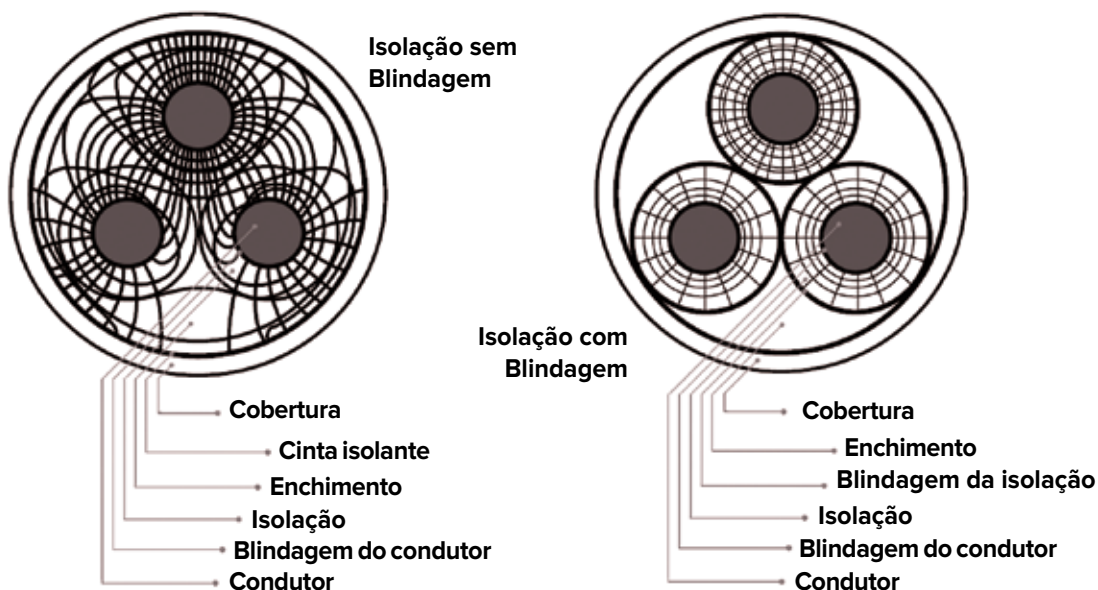
- A reticulação química do polietileno torna-o um material termofixo adequado à construção de isolações de cabos. O processo de reticulação consiste em criar, no interior do material, pontos intermoleculares estáveis por via química, com o auxílio de peróxidos orgânicos ou de moléculas de ligação especiais. Pode-se dizer que o polietileno sofre uma transformação interna análoga à da borracha quando vulcanizada.
- O material apresenta uma resistência à deformação térmica bastante satisfatória em temperaturas de até 250 °C.

- A reticulação faz desaparecer por completo a tendência à fissuração (*stress cracking*), apresentada pela resina original.
- A reticulação não modifica sensivelmente o bom comportamento do polietileno a baixas temperaturas e, por outro lado, reforça a estabilidade química.
- A reticulação do polietileno permite a incorporação de cargas minerais e orgânicas utilizadas para melhorar o comportamento mecânico, a resistência às intempéries e, sobretudo, o comportamento ao fogo.
- O XLPE é utilizado em cabos de baixa, média e alta tensões. Apresenta dispersão relativamente alta da rigidez dielétrica, bem como o fenômeno do *treeing*, que pode ser compensado pela correta formulação da mistura química.

5.4 BLINDAGEM DA ISOLAÇÃO E BLINDAGEM METÁLICA (APENAS PARA CABOS DE MÉDIA E ALTA TENSÃO)

Consiste em duas camadas, sendo uma em material semicondutor e a outra em material condutor metálico, ambas aplicadas sobre a superfície da isolação. Sua finalidade principal é confinar e distribuir uniformemente o campo elétrico dentro do cabo isolado [15].

Na figura à esquerda, o cabo sem blindagem, isto é “o campo não radial”, apresenta distribuição irregular do campo elétrico; na figura à direita, o cabo blindado, denominado “campo radial”, apresenta campo elétrico distribuído de forma equilibrada e radial





em relação ao condutor. A construção do campo radial é preferível, principalmente, para tensões mais elevadas, uma vez que garante solicitações elétricas uniformes em cada camada isolante (conjunto de pontos da isolação equidistantes do condutor). Da mesma maneira que a blindagem do condutor, a blindagem da isolação deve ser extrudada de modo a eliminar qualquer possibilidade de vazios entre ela e a superfície externa da isolação.

A camada condutora é constituída por fitas ou fios de cobre e fornece um caminho de baixa impedância para a condução das correntes induzidas provenientes das correntes de curto-circuito de outros cabos.

5.5 ARMAÇÃO

Elemento destinado à proteção contra esforços mecânicos, de tração, compressão ou usos específicos. A armação pode ser metálica ou formada por compostos especiais que possam satisfazer as necessidades e condições para uso em aplicações especiais.

Os vários tipos de armações são:

- **Fios de aço galvanizado, cobre ou bronze:** confere resistência aos esforços de tração.
- **Fitas de aço galvanizado, cobre ou alumínio planas:** confere resistência aos esforços radiais.

- **Fitas de aço galvanizado, cobre ou alumínio corrugado e intertravada (*inter-locked*):** confere maior resistência aos esforços radiais e maior flexibilidade que as fitas planas.
- **Outras:** armação com trança de fios de aço ou cobre, armação de chumbo ou liga de chumbo.

A armação pode ser utilizada para proteger mecanicamente o cabo elétrico nas mais variadas formas, dependendo do tipo de produto e sua aplicação final.

Este elemento construtivo pode ser aplicado nas fases internas do cabo, desde a proteção dos condutores isolados até a proteção externa do cabo, dependendo de sua aplicação.

Cabe informar que, no caso de cabos unipolares (também denominados como “singelos”), para se evitarem perdas elétricas adicionais, são empregados materiais não magnéticos, ou seja, fitas ou fios de cobre, bronze ou alumínio. As armações com material ferromagnético (aço) somente poderão ser utilizadas em cabos tripolares, os quais, devido às defasagens da corrente elétrica entre as fases do circuito de corrente alternada, não irão gerar as citadas perdas elétricas.

5.6 COBERTURA

Revestimento externo de proteção ao cabo como um todo. A cobertura será definida mediante os requisitos especiais de utilização e desempenho do cabo.

Os materiais utilizados na cobertura são dotados de características específicas que compreendem, desde uma simples proteção mecânica (a fim de facilitar instalações, proteção permanente e garantia de preservação do produto), até produtos de alta tecnologia, que protegem o cabo e lhe conferem características especiais.

As seguintes características são determinantes para os materiais de cobertura:

- Resistência à abrasão, rasgo, corte e impacto
- Impermeabilidade
- Inflamabilidade
- Baixa emissão de fumaça, gases tóxicos e corrosivos durante eventual queima
- Estabilidade térmica
- Resistência a agentes químicos e ambientais
- Flexibilidade

Os compostos termoplásticos para as coberturas são os seguintes:

ST1	Composto à base de policloreto de vinila ou copolímero de cloreto de vinila, para temperatura no condutor menor ou igual a 80 °C
ST2	Composto à base de policloreto de vinila ou copolímero de cloreto de vinila e acetato de vinila, para temperatura no condutor menor ou igual a 105 °C
ST3	Composto à base de polietileno termoplástico para temperatura no condutor menor ou igual a 80 °C, para cabos com tensões de isolamento inferiores a 6/10 kV, e menor ou igual a 85 °C, para cabos com tensões de isolamento iguais ou superiores a 6/10 kV
ST7	Composto à base de polietileno termoplástico para temperatura no condutor menor ou igual a 90 °C, para cabos com tensões de isolamento inferiores a 6/10 kV, e menor ou igual a 105 °C, para cabos com tensões de isolamento iguais ou superiores a 6/10 kV

Os compostos termofixos para as coberturas são os seguintes:

SE1/A	Composto à base de policloropreno, polietileno clorossulfonado, polietileno clorado ou polímeros similares, para temperaturas no condutor menores ou iguais a 90 °C e para cabos com qualquer tensão de isolamento
SE1/B	Composto à base de policloropreno, polietileno clorossulfonado, polietileno clorado ou polímeros similares, para temperatura no condutor menor ou igual a 85 °C, para cabos com tensões de isolamento inferiores a 6/10 kV e menor ou igual a 90 °C, para cabos com tensões de isolamento iguais ou superiores a 6/10 kV

Temperatura máxima em regime permanente em função do tipo da cobertura:

COBERTURA	TEMPERATURA MÁXIMA NO CONDUTOR
ST1	80 °C
ST2	105 °C
ST3	80 °C (*)
ST7	105 °C
SE1/A e SE1/B	90 °C (**)
(*) 85 °C para cabos com tensões de isolamento iguais ou superiores a 6/10 kV. (**) 85 °C para cabos com coberturas SE1/B e tensões de isolamento inferiores a 6/10 kV.	

Para os compostos ST3 e ST7, a temperatura máxima no condutor em regime de sobrecarga deve ser limitada a 115 °C e 130 °C, respectivamente. Entretanto, em função do tipo e condições de instalação do cabo e/ou da tensão de isolamento, pode ser necessário estabelecer limites inferiores aos indicados.

Não se recomenda o emprego de compostos do tipo ST1, ST2, SE1/A ou SE1/B para cabos com construção bloqueada longitudinalmente, a menos que estes possuam construção bloqueada transversalmente.

Estão listadas a seguir as coberturas mais utilizadas no mercado:

● **Termoplástica**

Policloreto de vinila (PVC)

Polietileno (PE) e (HDPE)

Poliuretano

Polipropileno (PP)

Poliâmidas (PA)

Poliolefinas não halogenadas com baixa emissão de fumaça e de gases tóxicos (LSHF)

● **Termofixa**

Polietileno clorossulfurado (CSP) - Hypalon

Policloropreno (PCP) – Neoprene

5.7 COMPORTAMENTO DOS CABOS ELÉTRICOS EM RELAÇÃO AO FOGO E FUMAÇA

Durante a ocorrência de incêndio, um cabo elétrico pode ser um elemento propagador de fogo e emissor de fumaça devido aos vários tipos de compostos utilizados em sua isolamento e cobertura, e pode ser assim classificado:

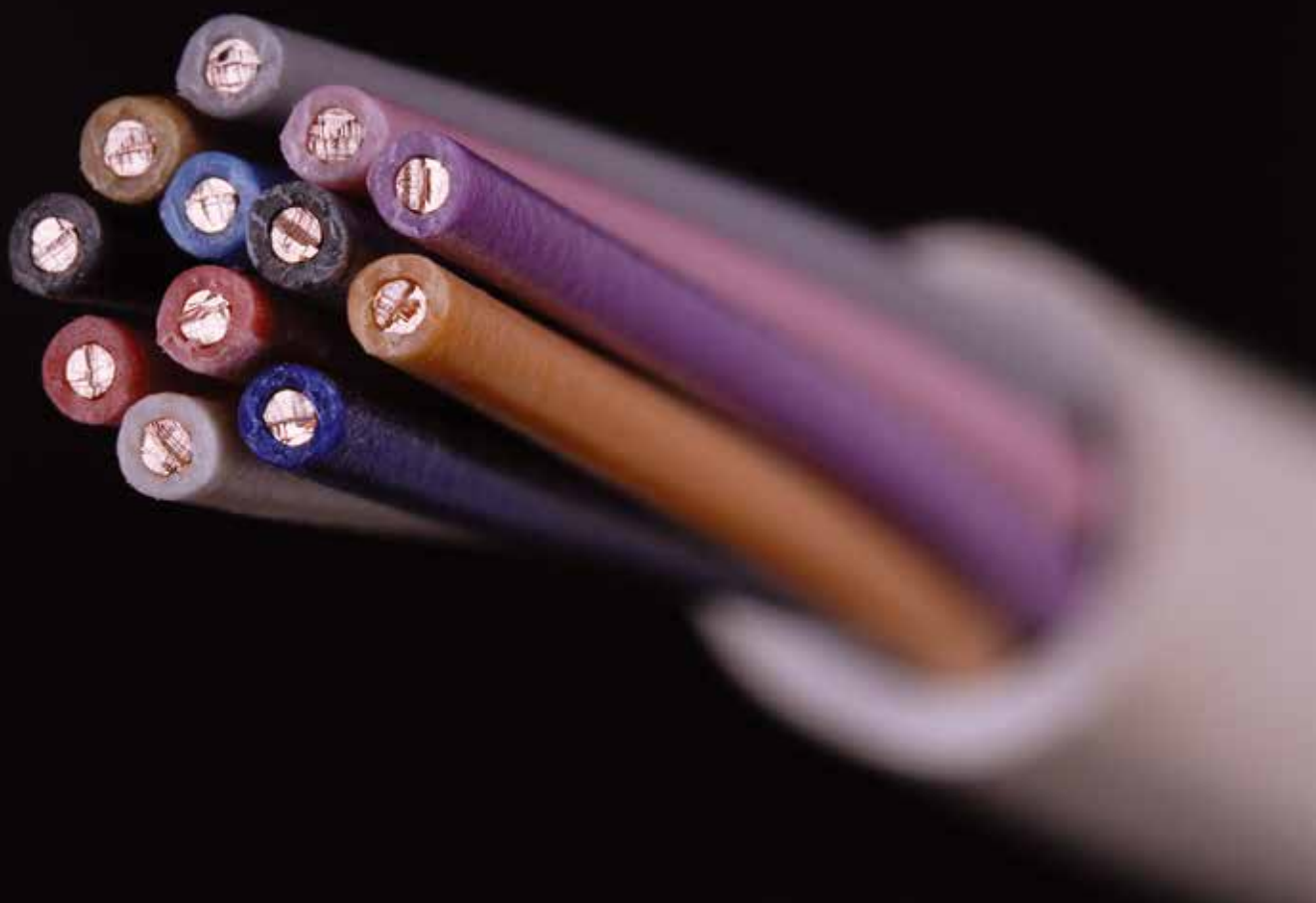
- **Cabo propagador de chama:** quando for submetido a uma ação direta da chama, por um curto intervalo de tempo, ele entrará em combustão e manterá a chama mesmo após ela ser retirada.
- **Cabo não propagador de chama:** a chama não se propaga e irá se auto extinguir quando acabar a causa que a gerou.
- **Cabo resistente à chama:** a chama não se propaga e irá se auto extinguir mesmo mediante exposição prolongada. Esta característica é comprovada pelo “Ensaio de Queima Vertical”, conforme as séries da Norma ABNT NBR NM – IEC 60332.
- **Cabo resistente ao fogo:** mesmo na presença do incêndio o cabo continua operando e mantendo o circuito energizado conforme estabelecido pela Norma ABNT NBR 10301, que estabelece 3 horas em regime permanente sob exposição à chama direta (750 °C).

Características relativas às chamas de alguns compostos:

Propagador de chama	Polietileno termoplástico – PE
Não propagador de chama	Policloreto de vinila – PVC
Resistente à chama	Poliolefina não halogenada e PVC aditivado
Resistente ao fogo	Compostos especiais

- ☉ **Cabos com baixa emissão de fumaça e de gases tóxicos e corrosivos:** a obtenção da propriedade de resistência à chama, ou seja, a propriedade de não propagação do fogo sob condições simuladas de incêndio (queima vertical) é, em muitos casos, conseguida à custa da utilização de compostos halogenados (à base de cloro, bromo e flúor), que são incombustíveis. No entanto, cabos que empregam esses materiais geram fumaça e gases tóxicos e corrosivos, o que os tornam inadequados para uso em locais de circulação e de concentração de público e edificações de grande altura. Tais cabos utilizam materiais especificamente desenvolvidos para essa finalidade, que devem ser construídos e ensaiados segundo a Norma ABNT NBR 13248 - Cabos de potência e controle e condutores isolados sem cobertura, com isolamento extrudada e com baixa emissão de fumaça para tensões até 1 kV - Requisitos de desempenho.





APLICAÇÃO

A ENGENHARIA DE APLICAÇÃO
DOS CABOS ELÉTRICOS

6. A ENGENHARIA DE APLICAÇÃO DOS CABOS ELÉTRICOS

A engenharia, por definição, é a aplicação do conhecimento científico, social, econômico e prático com intuito de inventar, criar, desenvolver, construir e melhorar processos, produtos, materiais e sistemas.

A engenharia de aplicação voltada aos cabos elétricos discorre sobre o conhecimento, identificação e desenvolvimento do processo de instalação e operação de circuitos elétricos – passando pelo projeto, especificação, recebimento, manutenção e destino final do produto depois de decorrido seu tempo de vida útil.

A determinação dos corretos meios de aplicação destes produtos, das normas aplicáveis, das possíveis inovações tecnológicas, dos novos materiais e processos são premissas para o desenvolvimento e para a consolidação da aplicação de produtos e métodos.

Nesse contexto, é primordial a correta determinação e especificação dos cabos elétricos que devem ser aplicados em um determinado projeto, objetivando atender integralmente às necessidades dos clientes. A relação “fabricante-cliente” – tendo como foco a engenharia de aplicação – fortalece de forma saudável esse vínculo, de modo a resultar na troca de experiências positivas para ambas as partes, o que faz com que o fabricante busque soluções técnicas para uma determinada situação de projeto e com que o cliente utilize um produto que atenda integralmente ao seu projeto, garantindo um desempenho adequado.

Resumidamente, pode-se sinalizar passos básicos para o início de um processo de engenharia de aplicação de cabos elétricos:

- Identificar uma necessidade para a especificação de um cabo.



- Elaborar uma descrição técnica (de modo mais completo possível), informando também as características especiais que o produto deve conter.
- Interagir com o fabricante de cabos para a correta especificação do produto.
- Garantir e assegurar a correta aplicação, conforme o projeto e a necessidade do cliente final.

6.1. COMO REDIGIR A ESPECIFICAÇÃO DE UM CABO ELÉTRICO

As principais características que devem ser incluídas na especificação de um cabo elétrico são as seguintes:

- Tipo do condutor (metal, nu ou estanhado, têmpera, tipo e classe de encordoamento).
- Classe de tensão.
- Número de condutores e seção nominal (em mm²).
- Blindagem do condutor (quando cabo de média tensão).
- Tipo de isolamento (material).
- Temperatura em regime permanente, sobrecarga e curto-circuito.
- Blindagem da isolamento – Parte não metálica (quando cabo de média tensão).
- Blindagem da isolamento – Parte metálica (fio e/ou fita de cobre + têmpera + seção em mm²) (quando cabo de média tensão).
- Armação (quando for o caso).
- Cobertura (indicar material).
- Cor da cobertura externa (quando for cabo unipolar ou multipolar).
- Identificação das veias isoladas ou do condutor isolado.
- Gravação.
- Norma de fabricação.
- Características técnicas especiais (quando for o caso).

- Tipo de acondicionamento (conforme ABNT NBR 11137) e comprimento do lance em metros.
- Ensaios (rotina, especiais ou tipo).
- Tipo de inspeção – a) com inspetor no local da produção; b) não haverá inspeção, sendo necessário o envio de relatórios juntamente com o produto; ou c) outra forma de inspeção.
- Garantia.

O exemplo a seguir indica um modelo de especificação técnica para uma solicitação de cotação de um cabo de média tensão:

Descrição do produto

Cabo elétrico com condutor de cobre estanhado, têmpera mole, redondo compacto, classe de encordoamento 2, 3 x 50 mm², 12/20 kV, blindagem do condutor com camada semicondutora aplicada por extrusão, isolamento com composto termofixo de XLPE para temperatura em regime permanente de 90 °C, temperatura em sobrecarga de 130 °C, temperatura em curto-circuito 250 °C, blindagem da isolamento com camada semicondutora aplicada por extrusão (retirada a frio) e fios de cobre nu com têmpera mole de seção nominal 6 mm², capa interna com composto termoplástico, armação com fios de aço galvanizado, cobertura com composto termoplástico PVC tipo ST2 na cor preta. As veias isoladas devem ser identificadas por números através de fios ou fitilhos coloridos. A cobertura externa deverá ser gravada de acordo com a norma de fabricação.

Norma de fabricação

O cabo deverá ser produzido e ensaiado conforme Norma ABNT NBR 7287 - Cabos de potência com isolamento sólida extrudada de polietileno reticulado (XLPE) para tensões de isolamento de 1 kV a 35 kV – Requisitos de desempenho.

Característica especial

O cabo deverá conter bloqueio contra a penetração longitudinal de água.

Acondicionamento

O material deverá ser acondicionado em bobinas de madeira conforme ABNT NBR 11137 com lance de 350 m.

Ensaios

Deverão ser realizados os ensaios de rotina conforme Norma ABNT NBR 7287 e os respectivos relatórios de ensaios enviados juntamente com o produto.

Inspeção

A inspeção será final, em fábrica, e realizada com a presença de inspetor.

Garantia

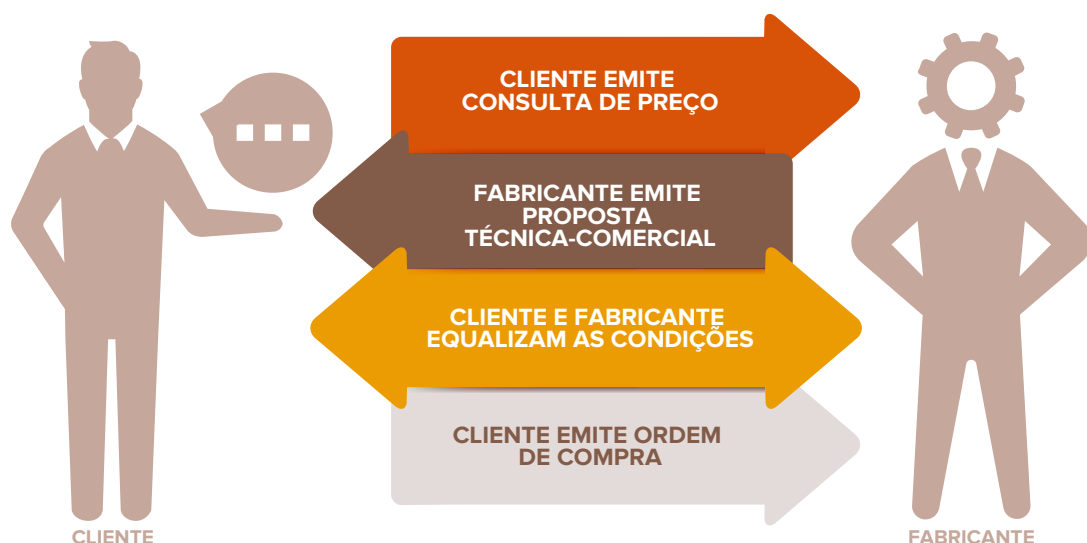
O período de garantia deve ser de 18 meses da compra ou 12 meses da instalação, prevalecendo o prazo que primeiro ocorrer.

6.2 SUGESTÕES PARA ENRIQUECER A RELAÇÃO ENTRE CLIENTE E FABRICANTE

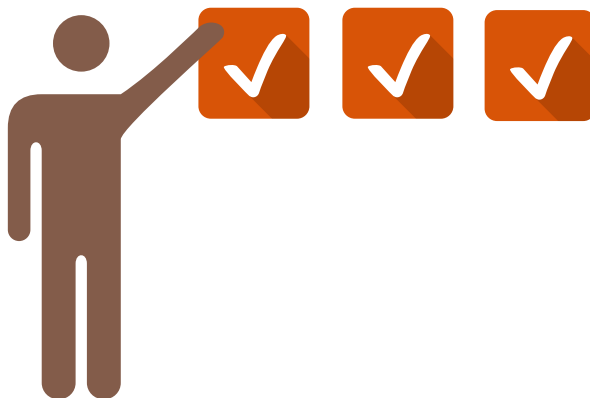
Para a correta especificação de um cabo elétrico deve-se considerar os aspectos técnicos abordados até aqui. Contudo, há outros aspectos que merecem atenção e devem ser observados para que os processos de consulta de preço do cliente, proposta do fabricante de cabo, emissão de ordem de compra do cliente e produção e entrega do cabo pelo fabricante sejam processados sem intercorrências que venham a prejudicar o cumprimento do prazo de entrega, o que resultaria em prejuízo para o andamento da obra.

É importante reforçar que o pedido de ordem de compra esteja perfeitamente alinhado com a consulta de preços do cliente e a proposta do fabricante, com as eventuais dúvidas e discrepâncias devidamente esclarecidas.

Fluxo adequado de informações entre o cliente e fabricante:



A tabela a seguir apresenta os itens que merecem atenção especial pelo fato de ocorrerem com certa frequência no mercado quando da emissão de consultas de preço e ordens de compra:



SITUAÇÕES	CONSEQUÊNCIAS
- Informar um lance(s) ou a quantidade total de cabo errado ou estimado. - Informar a quantidade total de cabo como sendo o comprimento do circuito (circuitos trifásicos). Ou seja, 1.000 m de cabo onde o correto seria 3.000 m. - Comunicar ao fabricante, após vários dias da emissão da ordem de compra, a correção do(s) fato(s) acima.	- Necessidade de nova produção. - Não atendimento do prazo de entrega desejado pelo cliente. Motivos do não atendimento: - Se a nova quantidade for maior, o fabricante poderá não ter matérias-primas em estoque e os seus fornecedores não conseguirem agilizar a entrega. - Caso a nova quantidade seja menor, o fabricante poderá não ter como atender, pois não desejará ficar com matéria-prima não consumida em estoque ou, eventualmente, a quantidade reduzida seja menor do que a quantidade mínima de fornecimento do fabricante. - O fabricante poderá ter dificuldades em mudar seu planejamento de produção devido aos compromissos com demais ordens de compra em andamento.
Lance grande	- Pode gerar bobina com dimensão muito grande e peso significativo, gerando problemas no recebimento do produto: - Dificuldades para descarregar a bobina. - Cavelete não suporta as dimensões e peso da bobina.
- Informar a tolerância do lance errada. - Comunicar ao fabricante, após vários dias da emissão da ordem de compra, uma correção de tolerância.	- Necessidade de nova produção. - Não atendimento do prazo de entrega desejado pelo cliente. Motivos do não atendimento: - Fabricante não tem como atender à tolerância solicitada. As tolerâncias do lance indicadas nas Normas ABNT NBR são: 3 % para cabos isolados e 5 % para cabos nus (a tolerância total do fornecimento deverá ser negociada com o fabricante).
Informar a tolerância do lance de um circuito trifásico que não seja real ou deixar de informá-la.	Fornecimento com um lance inadequado ou com o padrão do fabricante e, conseqüentemente, poderá não atender ao comprimento necessário para as fases do circuito trifásico devido às tolerâncias de fabricação gerarem lances distintos.
Informar a unidade de medida equivocada (o padrão do mercado é: “cabos de cobre nu” em quilograma e “cabos isolados” em metro).	Produção equivocada em termos de quantidade podendo resultar em necessidade de nova produção e atrasos na entrega.

SITUAÇÕES	CONSEQUÊNCIAS
Devido à falta de planejamento no momento da emissão da consulta de preços e ordem de compra, as quantidades, descrições de produtos e a indicação de normas técnicas são informadas equivocadamente.	- Geralmente, esta situação é percebida somente no momento do recebimento do material. - Necessidade de nova produção. - Não atendimento do prazo de entrega desejado pelo cliente.
Informar a cor de cobertura ou isolamento (cabo sem cobertura) que não seja um padrão de fornecimento do fabricante.	- Necessidade de negociação entre cliente e fabricante. - Risco de não atendimento do prazo de entrega desejado pelo cliente.
Emitir ordem de compra sem observar eventuais comentários e conteúdo da proposta técnica-comercial do fabricante de cabos.	- Necessidade de renegociação entre cliente e fabricante. - Não atendimento do prazo de entrega desejado pelo cliente.
- Informar que haverá inspeção somente próximo à data do faturamento, uma vez que, equivocadamente, não ter sido informada na ordem de compra. - Agendar inspeção em dias e horários não coordenados com o fabricante.	- Fabricante não terá tempo hábil para o planejamento da inspeção, bem como, funcionário disponível para o recebimento do inspetor devido às inspeções de outras ordens de compra. - Não atendimento do prazo de entrega desejado pelo cliente.
- Local de entrega do material não tem o CNPJ estabelecido. - Não indicar eventuais incentivos fiscais obtidos.	- Gerar faturamento equivocado ou a impossibilidade de efetuar o faturamento e entrega do material. - Não atendimento do prazo de entrega desejado pelo cliente.
Cancelamento de ordem de compra de cabos a serem produzidos (produtos que não fazem parte da política de estoque do fabricante).	Muitos fabricantes não aceitam o cancelamento deste tipo de ordem de compra (dependendo do momento do cancelamento) por já terem adquirido as matérias-primas necessárias.



MERCADO

APLICAÇÃO DE PRODUTOS
NAS INSTALAÇÕES DE FONTES
DE ENERGIA RENOVÁVEIS:
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

7 APLICAÇÃO DE PRODUTOS NAS INSTALAÇÕES DE FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS: SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

7.1 O SETOR DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

Nos últimos anos, a geração de energia fotovoltaica tem evoluído de forma consistente no Brasil, principalmente em função dos avanços no campo regulatório, da redução dos preços dos sistemas e da própria percepção de suas vantagens.

Com base nos projetos executados e contratados até o final de 2016, especialistas dessa área estimam que, até 2030, o mercado fotovoltaico deverá movimentar mais de R\$ 100 bilhões no Brasil. Segundo os players do setor, até meados de 2026 a representatividade dessa fonte de energia na matriz nacional poderá chegar a 5 %.



Embora positivas, essas estimativas podem ser superadas com relativa facilidade. Primeiro, porque os investimentos nesse mercado são crescentes e tendem a se manter em alta nos próximos anos. Segundo, pelo próprio potencial de geração de energia elétrica que o Brasil possui nessa área. A Alemanha, uma das líderes do ranking mundial de geração fotovoltaica, tem menos de 5 % da superfície territorial do Brasil e índices médios de irradiação solar bem inferiores aos registrados no território brasileiro.

Um estudo recente da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), do Ministério de Minas e Energia (MME), dá a dimensão do potencial fotovoltaico no Brasil. De acordo com o documento, se um total de 2.400 km² de painéis fotovoltaicos fossem instalados numa região com irradiação anual média da ordem de 1.400 kWh/m²/ano, a energia gerada seria equivalente a todo o consumo do Sistema Interligado Nacional registrado em 2011. Essa quantidade de painéis corresponde a menos de 0,03 % da área territorial brasileira.

No Brasil estão em pleno desenvolvimento tanto a geração centralizada, que envolve os grandes projetos de parques solares fotovoltaicos (usinas de maior porte), quanto a geração distribuída, formada por mini e micro pontos de geração fotovoltaica, que se diferencia pela geração de energia nos próprios centros consumidores, com a instalação de sistemas solares nos telhados de residências, comércios, prédios públicos, hospitais, indústrias, etc.

A geração centralizada tem crescido principalmente em função da política governamental de contratar a fonte por meio de leilões.

Os projetos envolvendo a geração distribuída, por sua vez, foram estimulados por algumas ações regulatórias, como a que estabelece a possibilidade de compensação da energia excedente produzida por sistemas de menor porte. Graças a essa regulamentação (decorrente da Resolução Normativa 482/2012 e da Resolução Normativa 687/2015, ambas da Aneel), quando o sistema fotovoltaico é instalado em locais ligados à rede de distribuição de energia, como uma residência, o excesso de eletricidade produzida por ele volta para a rede, podendo ser convertido em créditos por meio de um sistema de compensação de energia elétrica.

Outro aspecto que tem favorecido o avanço da micro e mini geração fotovoltaica é a percepção, por parte dos usuários e do mercado como um todo, de suas vantagens. Por exemplo, o fato da energia gerada ser consumida no local em que é produzida evita perdas em sua transmissão, reduz o volume de investimentos em linhas de transmissão e distribuição, e não exige área física dedicada, já que os sistemas podem ser instalados nos telhados.

Outras vantagens apontadas pelos especialistas passam pelo fato de que a energia fotovoltaica exerce papel complementar às hidrelétricas e outras fontes, alivia o au-

mento do pico da demanda de energia durante o dia, é isenta de emissões de CO₂ durante a geração de energia elétrica e dispensa o uso de combustíveis.

Atualmente, entre as unidades consumidoras beneficiadas por sistemas solares fotovoltaicos no Brasil, a maior parcela é de residências, que representam 77,5 % do total; seguida de comércios, com 17 %; indústrias, com 2,2 %; consumidores rurais, com 1,8 %, e consumidores do poder público, somando 1,5 %.

A EPE estima que o potencial da geração distribuída no Brasil no segmento residencial, com sistemas fotovoltaicos instalados nos telhados, seja de 33 GW médios, o que equivale a 165 GW instalados. Isso significa que, se todos os telhados de residências brasileiras forem equipados com geração distribuída solar fotovoltaica, a energia elétrica gerada seria capaz de abastecer 2,3 vezes toda a demanda residencial do país.

Importante destacar que, sejam nos projetos de geração distribuída ou centralizada, os cabos elétricos exercem papel fundamental. E, devido às características desse tipo de instalação, muitas vezes precisam ser desenvolvidos com características especiais, como veremos a seguir nesse Guia.

7.2 VISÃO GERAL DE UMA INSTALAÇÃO FOTOVOLTAICA

Uma **célula fotovoltaica** é um dispositivo fotovoltaico elementar, especificamente desenvolvido para realizar a conversão direta de energia solar em energia elétrica [16].

Um **módulo fotovoltaico** é a unidade básica formada por um conjunto de células fotovoltaicas, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica [16].

Uma **série fotovoltaica** é um circuito no qual módulos fotovoltaicos são conectados em série, com o intuito de gerar a tensão de saída desejada de um arranjo fotovoltaico [16].

Um **arranjo fotovoltaico** é um conjunto de módulos fotovoltaicos ou subarranjos fotovoltaicos, mecânica e eletricamente integrados, incluindo a estrutura de suporte. Um arranjo fotovoltaico compreende todos os componentes até os terminais de entrada em corrente contínua da UCP (Unidade de Condicionamento de Potência), das baterias ou das cargas.

Um **arranjo fotovoltaico** pode ser constituído por um único módulo fotovoltaico, uma única série fotovoltaica, ou várias séries ou subarranjos fotovoltaicos conectados em paralelo, e os demais componentes elétricos associados [16].

A **unidade de condicionamento de potência** (UCP) é o sistema que converte a potência elétrica entregue por um arranjo fotovoltaico na potência elétrica com valores

apropriados de frequência e/ou tensão para ser entregue à carga, ou armazenada em uma bateria ou injetada na rede elétrica [16].

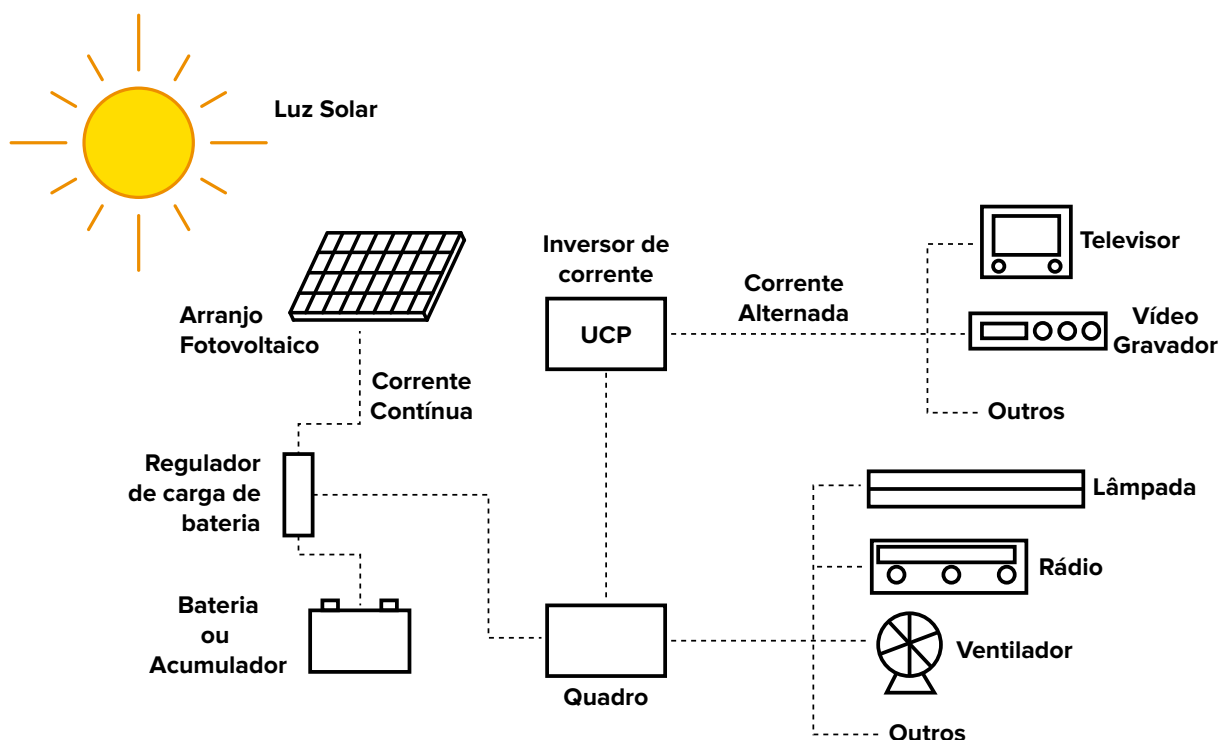
Uma **caixa de junção** é um invólucro no qual subarranjos fotovoltaicos, séries fotovoltaicas ou módulos fotovoltaicos são conectados em paralelo, e que pode alojar dispositivos de proteção e/ou de seccionamento (os termos equivalentes em inglês são: *string box*, *junction box* ou *combiner box*) [16].

Em suma, uma **instalação fotovoltaica** inclui arranjos fotovoltaicos, condutores do cabeamento em corrente contínua (cabos fotovoltaicos), dispositivos de proteção elétrica, dispositivos de chaveamento, aterramento e equipotencialização do arranjo fotovoltaico, dispositivos de armazenamento de energia (opcional), unidades de condicionamento de potência, caixas de junção, medidores (opcional) e quadros de distribuição.

Há duas formas básicas de instalações fotovoltaicas (figura a seguir):

- O arranjo fotovoltaico é conectado às cargas diretamente em corrente contínua.
- O arranjo fotovoltaico é conectado a uma UCP que, por sua vez, se conecta às cargas em corrente alternada.

Visão geral de uma instalação fotovoltaica



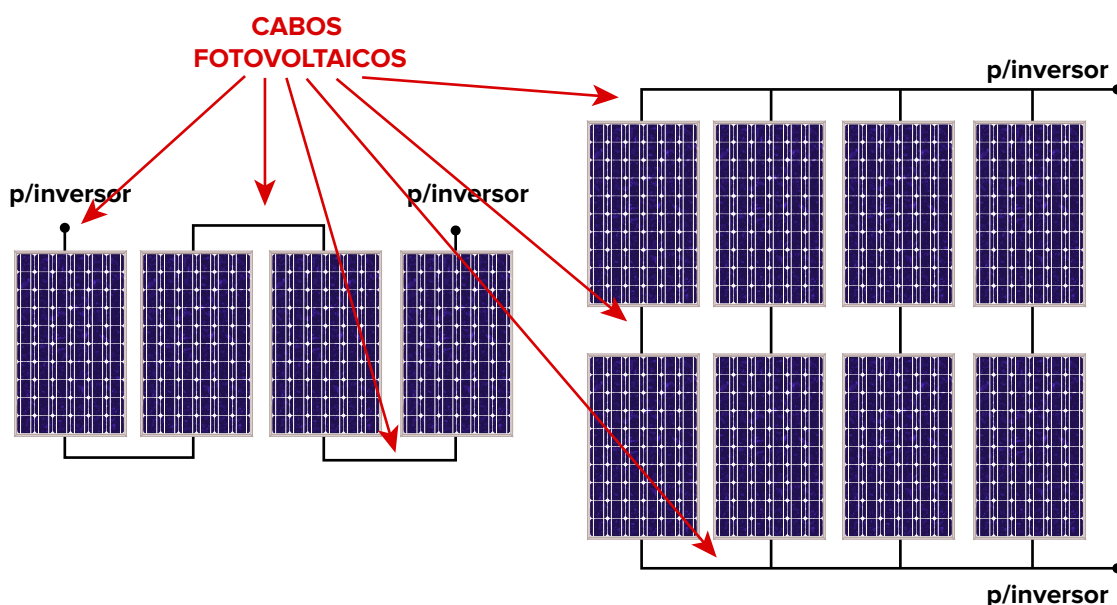
7.3 CABOS ELÉTRICOS PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Um **cabo da série fotovoltaica** é aquele que interliga os módulos fotovoltaicos em uma série fotovoltaica, ou que conecta a série fotovoltaica a uma caixa de junção [16].

Por sua vez, um **cabo do subarranjo fotovoltaico** é o cabo de saída de um subarranjo fotovoltaico que transporta a corrente de saída total do subarranjo a que está associado [16].

Um **cabo do arranjo fotovoltaico** é aquele que transporta a corrente de saída total do arranjo fotovoltaico [16].

Aplicações dos cabos elétricos fotovoltaicos



Os cabos utilizados em sistemas fotovoltaicos devem atender às especificações da Norma ABNT NBR 16612 - Cabos de potência para sistemas fotovoltaicos, não halogenados, isolados, com cobertura, para tensão de até 1,8 kVcc entre condutores – Requisitos de desempenho [17].

a) Condições de instalação e serviços

Os principais requisitos da ABNT NBR 16612 sobre as condições de instalação e serviço dos cabos fotovoltaicos são as seguintes [17]:

- **Instalação:** estes cabos foram previstos para serem instalados entre a célula fotovoltaica e os terminais de corrente contínua do inversor fotovoltaico.
- **Condições ambientais:** estes cabos devem ser adequados a operar em temperatura ambiente de -15 °C até 90 °C.
- **Condições em regime permanente:** a temperatura do condutor em regime permanente não deve ultrapassar 90 °C. Por um período máximo de 20.000 horas é permitida uma temperatura máxima em regime permanente no condutor de 120 °C a uma máxima temperatura ambiente de 90 °C.
- **Condições em regime permanente em regime de curto-circuito:** a temperatura no condutor, em regime de curto-circuito, não pode ultrapassar 250 °C. A duração neste regime não pode ultrapassar 5 segundos.

b) Construção

Conforme figura abaixo, os principais requisitos da ABNT NBR 16612 sobre a construção dos cabos fotovoltaicos são os seguintes [17]:

- **Condutor (1):** deve ser de cobre estanhado, têmpera mole e estar conforme ABNT NBR NM 280 na classe 5 de encordoamento.
- **Separador:** sobre o condutor pode ser aplicado um separador, a critério do fabricante, a fim de facilitar a remoção da isolação e evitar a aderência desta, e este separador deve estar de acordo com a ABNT NBR 6251.
- **Isolação (2):** deve ser constituída por uma ou mais camadas extrudadas de composto não halogenado termofixo.
- **Separador:** sobre a isolação pode ser aplicado um separador, a critério do fabricante. Este separador deve estar de acordo com a ABNT NBR 6251.
- **Cobertura (3):** deve ser constituída por uma ou mais camadas extrudadas de composto não halogenado termofixo. A cobertura deve ser nas cores preta ou vermelha.





7.4 INSTALAÇÃO DOS CABOS PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

De um modo geral, a instalação elétrica fotovoltaica deve atender as Condições gerais de instalação, conforme 6.2.9, os requisitos sobre Disposição dos condutores (6.2.10) e as Prescrições para a instalação (6.2.11) da Norma ABNT NBR 5410:2004—Instalações elétricas de baixa tensão.

No momento da publicação deste Guia ainda não existia uma norma brasileira específica sobre instalações elétricas fotovoltaicas. Algumas recomendações a seguir constam do documento IEC/TS 62548 [16], que poderá ser utilizado como base de futura norma brasileira sobre o tema.

a) Segregação entre linhas em corrente alternada e corrente contínua

Para evitar confusão entre linhas em corrente alternada e corrente contínua dentro de uma instalação, bem como evitar riscos de faltas entre linhas de alimentações distintas, as linhas em corrente contínua e em corrente alternada devem ser separadas. Além disso, os diferentes tipos de circuitos devem ser claramente identificados, por exemplo, pelo uso de etiquetas ou condutores com cores diferentes [16].

b) Condutores

- Os cabos utilizados dentro do arranjo fotovoltaico devem ser adequados para aplicações em corrente contínua e devem ser dimensionados para a temperatura em regime permanente de acordo com a aplicação. Se expostos ao tempo, devem ser resistentes à radiação UV. Se não resistentes à radiação UV, devem estar abrigados da radiação UV por proteção apropriada, ou ser instalados em eletrodutos resistentes à radiação UV [16].
- Os cabos fotovoltaicos devem ser resistentes à água e, por serem eventualmente expostos a ambientes salinos, devem ter condutores de cobre estanhado, a fim de reduzir a degradação do condutor ao longo do tempo [16].
- Os cabos fotovoltaicos devem ser do tipo retardante de chama e não halogenados, com baixa emissão de fumaça e isentos de gases tóxicos e corrosivos [16].

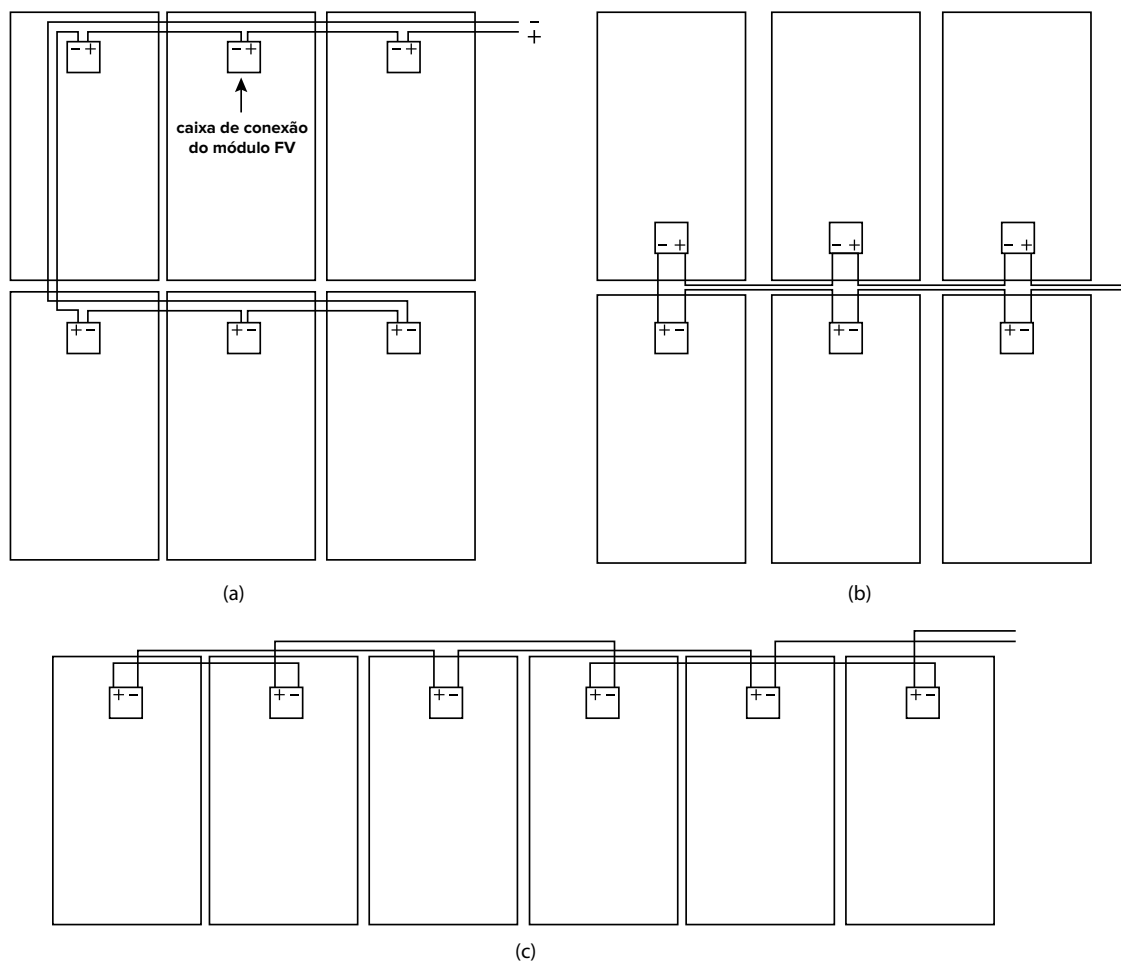
c) Instalação dos cabos fotovoltaicos

- Os cabos fotovoltaicos devem ser instalados de forma a não sofrer fadiga devido a esforços mecânicos, como, por exemplo, vento. Eles também devem ser protegidos contra bordas cortantes ou perfurantes. Os condutores devem ser instalados de forma que suas propriedades e os requisitos de instalação sejam mantidos ao longo da vida útil do sistema fotovoltaico [16].
- Abraçadeiras e presilhas de cabos não devem ser utilizadas como o método principal de fixação, a menos que tenham uma vida útil maior ou igual à do sistema ou do período de manutenção programada. Além disso, é preciso considerar que abraçadeiras metálicas podem ter bordas cortantes que, ao longo do tempo e em função do vento, podem causar danos aos condutores [16].
- O cabeamento de geradores fotovoltaicos deve ser realizado de tal forma que a possibilidade de ocorrências de faltas entre dois condutores energizados ou entre um condutor energizado e a terra seja minimizada [16].
- Todas as conexões dos cabos devem ser verificadas quanto ao torque mínimo e polaridade durante a instalação para reduzir o risco de faltas e possíveis arcos durante o comissionamento, operação e manutenção futura [16].



- Para reduzir a magnitude de sobretensões induzidas por descargas atmosféricas, os condutores do arranjo fotovoltaico devem ser dispostos de tal maneira que a área de laços de condutores seja mínima, por exemplo, pela instalação de condutores em paralelo, conforme mostrado na Figura abaixo [16]:

Exemplos de cabeamento de série fotovoltaica com área mínima de laço:



- No caso em que os cabos de séries fotovoltaicas entre módulos fotovoltaicos não sejam protegidos por eletroduto ou outros invólucros, eles devem ser protegidos contra danos mecânicos e presos para aliviar a tensão mecânica, a fim de evitar que o cabo se solte da conexão [16].
- Quando condutores são inseridos diretamente em caixas de junção, sem eletrodutos, deve ser utilizado um sistema de alívio de tensão mecânica para evitar desconexões de cabos dentro da caixa de junção, como, por exemplo, um prensa-cabo [16].

- ⦿ Deve ser fornecida uma identificação permanente e durável para o cabeamento do arranjo fotovoltaico, realizada por um dos seguintes métodos [16]:
 - ✓ Cabeamento utilizando cabos marcados de fábrica como “Cabo para sistema fotovoltaico”. Esta marcação deve ser permanente, legível e durável, ou, no caso de o cabeamento não ser claramente marcado de fábrica como “Cabo para sistema fotovoltaico”, etiquetas com as palavras “SOLAR c.c.” deverão ser fixadas em um intervalo não superior a 5 m em condições normais e não superior a 10 m em linha reta, onde uma visão clara é possível entre etiquetas.
 - ✓ No caso de o condutor ser colocado em um conduto fechado, a identificação deve ser anexada ao exterior do conduto em intervalos não superiores a 5 m e/ou nas caixas de passagem dessas linhas.
- ⦿ Apesar da distinção por cor não ser exigida, é recomendado, quando possível, fazer a distinção por cores. O código de cores utilizado deve ser exposto claramente no local da instalação. Em geral, utiliza-se a cor vermelha para o condutor positivo e a cor preta para o negativo.
- ⦿ Sempre que possível, deve haver separação entre os condutores positivos e negativos dentro das caixas de junção, de maneira a minimizar os riscos de arcos em corrente contínua que possam ocorrer entre estes condutores.
- ⦿ Em um arranjo fotovoltaico, os conectores de encaixe devem ser completamente compatíveis, do mesmo tipo e devem cumprir os seguintes requisitos mínimos [16]:
 - ✓ Ser classificados para uso em corrente contínua.
 - ✓ Oferecer proteção contra o contato com partes vivas em estado conectado e desconectado (por exemplo, encapsulados).
 - ✓ Ter uma corrente nominal igual ou superior a capacidade de condução de corrente para o circuito no qual estão instalados.



- ✓ Ser dimensionados para a temperatura do local de instalação.
- ✓ Em caso de exposição ao meio ambiente, ser dimensionados para uso ao tempo, ser resistentes à radiação UV e ter índice de proteção (IP) adequado para o local de instalação.
- ✓ Devem ser instalados de tal maneira a minimizar os esforços mecânicos sobre os conectores.
- ✓ Plugues e tomadas, normalmente utilizados para a conexão de equipamentos domésticos de baixa tensão em corrente alternada, não devem ser utilizados em arranjos fotovoltaicos.
- ✓ A crimpagem dos cabos aos conectores deve ser realizada com ferramenta própria para essa finalidade.
- ✓ Devem exigir força intencional para serem separados.
- ✓ Se acessíveis por pessoas não qualificadas, devem ser do tipo com bloqueio, onde duas ações independentes são necessárias para desconectar.
- ✓ Devem ser polarizados, no caso de conexões multipolares.

7.5 SELEÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE CABOS FOTOVOLTAICOS

A seção nominal dos cabos das séries fotovoltaicas, dos subarranjos fotovoltaicos e do arranjo fotovoltaico deve ser determinada em conformidade com a mínima capacidade de corrente dos cabos e a queda de tensão. Deve ser aplicada a maior seção nominal do condutor obtida a partir destes critérios.

a) Capacidade de condução de corrente

As seções mínimas dos condutores do arranjo fotovoltaico expostos à radiação UV e a temperaturas elevadas, próximos aos módulos fotovoltaicos ou dos cabos das séries fotovoltaicas, baseadas na capacidade de condução de corrente, devem tomar como referência a mínima capacidade de corrente dos circuitos e a capacidade de condução de corrente dos condutores conforme especificado na Norma ABNT NBR 16612, incluindo os eventuais fatores de redução da capacidade destes condutores que consideram a localização e o método de instalação [16].

A temperatura em regime permanente de módulos fotovoltaicos e, consequentemente, a dos condutores associados, pode ser significativamente mais elevada do que a temperatura ambiente. Uma temperatura operacional mínima igual à temperatura



ambiente máxima esperada acrescida de 40 °C deve ser considerada para os condutores instalados perto ou em contato com os módulos fotovoltaicos [16].

A localização e o método de instalação dos cabos fotovoltaicos também necessitam ser considerados no dimensionamento dos condutores.

Os demais cabos do arranjo fotovoltaico, ou seja, os que operam em corrente alternada, devem tomar como referência a mínima capacidade de corrente dos circuitos e a capacidade de condução de corrente dos condutores conforme especificado na cláusula 6.2 da ABNT NBR 5410:2004. Fatores de redução da capacidade destes condutores devem levar em consideração a localização e o método de instalação, também de acordo com a cláusula 6.2 da ABNT NBR 5410:2004.

O Anexo B da NBR 16612 fornece a capacidade de condução de corrente para sistemas fotovoltaicos, conforme descrito a seguir.

O critério de cálculo da capacidade de condução de corrente e as tabelas foram calculados para as seguintes condições básicas:

A.1 Cabo instalado ao ar livre:

1. Dois cabos unipolares encostados um ao outro, na horizontal.
2. Dois cabos unipolares encostados um ao outro, na vertical.
3. Dois cabos unipolares espaçados de, pelo menos, 0,75 x diâmetro externo, na horizontal.
4. Dois cabos unipolares espaçados de, pelo menos, um diâmetro externo, na vertical.

Todos os cabos devem estar a uma distância equivalente a, pelo menos, meio diâmetro externo do cabo, de superfícies como uma paredes, tetos, muros e similares. No caso dos cabos expostos ao sol, foi considerada uma intensidade de radiação de 1.000 W/m².

Tabela B.1 – Capacidade de condução de corrente (A) para cabos instalados em temperatura ambiente de 20 °C e temperatura no condutor em regime permanente de 90 °C - condutor de cobre

Seção mm ²	Instalação ao Ar Livre Protegida do Sol				Instalação ao Ar Livre Exposta ao Sol			
	Modo de Instalação:				Modo de Instalação:			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1,5	29	28	33	29	26	25	30	26
2,5	39	38	44	39	35	34	41	35
4	51	51	58	52	46	45	54	46
6	65	65	74	66	58	57	69	59
10	91	90	104	93	80	80	95	82
16	120	120	137	124	106	106	125	110
25	160	161	182	166	139	140	165	146
35	199	201	226	208	172	174	205	183
50	251	254	285	264	215	219	256	231
70	313	318	356	330	267	273	319	288
95	376	383	428	399	319	327	382	347
120	441	450	502	470	373	383	447	408
150	508	518	577	543	426	440	512	470
185	580	592	657	621	483	499	580	535
240	694	710	787	746	575	595	692	641
300	802	821	910	864	662	685	797	741
400	965	987	1093	1042	790	819	953	890

Tabela B.2 – Capacidade de condução de corrente (A) para cabos instalados em temperatura ambiente de 30 °C e temperatura no condutor em regime permanente de 90 °C - condutor de cobre

Seção mm²	Instalação ao Ar Livre Protegida do Sol				Instalação ao Ar Livre Exposta ao Sol			
	Modo de Instalação:				Modo de Instalação:			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1,5	26	26	30	26	23	22	27	23
2,5	35	35	40	35	31	30	36	31
4	47	46	53	47	41	40	48	41
6	60	59	68	60	51	51	61	52
10	83	82	95	84	71	71	85	73
16	110	110	125	113	93	93	112	97
25	146	147	166	151	123	124	147	129
35	181	183	207	189	151	153	182	161
50	229	232	260	240	189	193	228	204
70	285	290	325	301	234	239	283	254
95	343	349	390	364	279	287	339	306
120	402	410	458	428	325	335	396	359
150	463	473	527	495	371	384	453	413
185	528	540	600	566	420	435	513	470
240	633	647	719	681	499	518	612	563
300	732	749	831	789	573	596	705	650
400	880	901	998	952	682	710	842	780



Tabela B.3 – Capacidade de condução de corrente (A) para cabos instalados em temperatura ambiente de 40 °C e temperatura no condutor em regime permanente de 90 °C - condutor de cobre

Seção mm ²	Instalação ao Ar Livre Protegida do Sol				Instalação ao Ar Livre Exposta ao Sol			
	Modo de Instalação:				Modo de Instalação:			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1,5	24	23	27	23	20	19	24	20
2,5	32	31	36	32	26	26	32	26
4	42	41	48	42	35	34	42	35
6	53	53	61	54	44	43	53	45
10	74	74	85	76	61	60	74	62
16	98	98	112	101	79	79	97	83
25	131	131	149	136	104	105	127	110
35	163	164	185	170	128	130	157	137
50	205	208	233	215	159	163	197	173
70	255	259	291	270	196	201	244	216
95	307	313	350	326	233	241	291	259
120	360	367	411	384	271	281	340	304
150	415	424	473	444	308	321	388	349
185	474	484	539	508	347	363	439	397
240	568	581	645	611	411	431	523	475
300	656	671	746	708	471	494	601	547
400	790	808	897	854	558	586	716	656





Tabela B.4 – Capacidade de condução de corrente (A) para cabos instalados em temperatura ambiente de 50 °C e temperatura no condutor em regime permanente de 90 °C - condutor de cobre

Seção mm ²	Instalação ao Ar Livre Protegida do Sol				Instalação ao Ar Livre Exposta ao Sol			
	Modo de Instalação:				Modo de Instalação:			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1,5	21	20	23	20	16	16	20	16
2,5	28	27	32	28	22	21	27	21
4	37	36	42	37	28	27	35	28
6	47	46	53	47	36	35	44	36
10	65	64	74	66	49	48	61	50
16	86	86	98	88	63	63	80	67
25	114	115	130	118	82	83	105	88
35	142	143	162	148	100	102	129	109
50	179	181	204	188	123	127	160	137
70	223	227	255	236	151	156	198	171
95	268	273	307	285	178	186	236	205
120	315	321	360	336	205	216	274	239
150	363	371	414	389	232	245	313	274
185	414	424	472	445	259	275	352	310
240	497	508	565	535	303	324	418	370
300	574	588	654	620	344	369	479	425
400	691	708	786	749	402	433	568	506

Tabela B.5 – Capacidade de condução de corrente (A) para cabos instalados em temperatura ambiente de 60 °C e Temperatura no condutor de 120 °C por um período máximo de 20.000h - condutor de cobre

Seção mm ²	Instalação ao Ar Livre Protegida do Sol				Instalação ao Ar Livre Exposta ao Sol			
	Modo de Instalação:				Modo de Instalação:			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1,5	25	25	28	25	22	21	26	22
2,5	34	33	38	34	29	29	35	29
4	45	44	51	45	39	38	46	39
6	57	56	65	58	49	49	59	50
10	79	79	90	81	68	67	81	70
16	105	105	120	108	89	89	107	93
25	140	140	159	145	117	118	141	124
35	174	175	198	181	145	147	174	154
50	219	222	249	230	181	184	218	195
70	273	277	311	288	224	229	271	243
95	328	334	374	348	267	274	324	293
120	385	392	438	410	311	321	379	343
150	443	452	504	474	355	367	434	395
185	506	516	574	542	402	416	491	450
240	606	619	688	651	477	496	586	539
300	700	716	795	755	548	570	674	622
400	842	862	955	910	652	680	805	746





A.2 Cabo diretamente enterrado:

Dois cabos em paralelo enterrados na profundidade indicada. Resistividade térmica do terreno igual a 2,5 K.m/W.

Tabela B.6 – Capacidade de condução de corrente (A) para cabos instalados em temperatura ambiente de 20 °C e temperatura no condutor em regime permanente de 90 °C - condutor de cobre

Seção mm ²	Profundidade					
	0,5 m	0,6 m	0,7 m	0,8 m	0,9 m	1 m
Capacidade de Condução de Corrente (A)						
1,5	35	35	35	34	34	34
2,5	47	46	46	45	45	45
4	61	60	60	59	59	58
6	76	75	74	74	73	73
10	103	102	101	100	99	98
16	132	131	129	128	127	126
25	169	166	164	163	161	160
35	204	201	198	196	194	193
50	249	245	242	239	237	235
70	302	297	293	290	287	284
95	353	347	342	338	335	332
120	405	398	392	388	384	380
150	456	448	442	436	432	428
185	509	500	493	487	481	477
240	595	584	575	568	561	556
300	674	661	650	642	635	628
400	788	772	760	750	741	733



Tabela B.7 – Capacidade de condução de corrente (A) para cabos instalados em temperatura ambiente de 30 °C e temperatura no condutor em regime permanente de 90 °C - condutor de cobre

Seção mm ²	Profundidade					
	0,5 m	0,6 m	0,7 m	0,8 m	0,9 m	1 m
	Capacidade de Condução de Corrente (A)					
1,5	33	32	32	32	31	31
2,5	43	43	42	42	42	41
4	56	56	55	55	54	54
6	71	70	69	68	68	67
10	96	94	93	92	92	91
16	123	121	120	118	117	116
25	156	154	152	150	149	148
35	189	186	184	182	180	179
50	230	227	224	221	219	218
70	280	275	271	268	266	263
95	327	321	317	313	310	307
120	375	369	363	359	355	352
150	422	415	409	404	400	396
185	471	463	456	450	446	441
240	551	541	532	525	520	515
300	624	612	602	594	588	582
400	729	715	703	694	686	679

Tabela B.8 – Capacidade de condução de corrente (A) para cabos instalados em temperatura ambiente de 40 °C e temperatura no condutor em regime permanente de 90 °C - condutor de cobre

Seção mm ²	Profundidade					
	0,5 m	0,6 m	0,7 m	0,8 m	0,9 m	1 m
	Capacidade de Condução de Corrente (A)					
1,5	30	29	29	29	29	29
2,5	39	39	39	38	38	38
4	51	51	50	50	50	49
6	64	64	63	62	62	61
10	87	86	85	84	84	83
16	112	110	109	108	107	106
25	143	140	139	137	136	135
35	172	170	168	166	164	163
50	210	207	204	202	200	199
70	255	251	248	245	242	240
95	298	293	289	286	283	281
120	342	336	332	328	324	321
150	386	379	373	369	365	361
185	430	423	416	411	407	403
240	503	493	486	480	474	470
300	569	558	550	543	536	531
400	666	653	642	633	626	620

A.3 Cabo em eletroduto diretamente enterrado:

Dois cabos em paralelo em um eletroduto enterrado na profundidade de 1,0 m. Resistividade térmica do terreno igual a 2,5 K.m/W, resistividade térmica do eletroduto igual a 6,0 K.m/W.



Tabela B.9 – Capacidade de condução de corrente (A) para temperatura no condutor em regime permanente de 90 °C - condutor de cobre

Seção mm ²	Capacidade de Condução de Corrente		
	A		
	20 °C	30 °C	40 °C
1,5	21	20	18
2,5	28	26	23
4	36	33	30
6	44	41	37
10	60	56	51
16	77	71	65
25	98	91	83
35	120	111	102
50	145	135	123
70	179	166	152
95	209	194	177
120	241	224	205
150	278	258	236
185	310	287	263
240	367	341	311
300	414	384	351
400	485	449	411

A.4 Cabos em eletroduto não metálico em parede:

Dois cabos em paralelo em eletroduto não metálico embutido em parede

Tabela B.10 – Capacidade de condução de corrente para temperatura no condutor em regime permanente de 90 °C

Seção mm ²	Capacidade de Condução de Corrente		
	A		
	20 °C	30 °C	40 °C
1,5	25	22	19
2,5	32	29	24
4	42	37	32
6	52	46	39
10	73	64	55
16	93	83	71
25	121	107	92
35	150	133	114
50	184	163	140

A.5 Agrupamento de Circuitos:

Em caso de agrupamento de circuitos, devem ser utilizados os fatores de agrupamento dados na ABNT NBR 5410.

b) Queda de tensão nos cabos

O dimensionamento dos cabos do arranjo fotovoltaico afeta a queda de tensão sob condições de carga. Essa queda de tensão pode ser particularmente significativa em arranjos fotovoltaicos com baixa tensão e alta corrente de saída. Sob condições de carga máxima, recomenda-se que a queda de tensão verificada não deve ser superior a 3 % da tensão do arranjo fotovoltaico em seu ponto de máxima potência [16].

Por operar em corrente contínua, a seção nominal de um cabo fotovoltaico pelo critério da queda de tensão pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$S = L \cdot I_B / \sigma \cdot e$$

Onde:

S: seção do condutor (mm²)

L: comprimento total de cabos (positivo + negativo) (m)

I_B: corrente de projeto (A)

σ: condutividade do cobre = 44 m/Ω.mm² (a 90 °C, que é a hipótese mais desfavorável a considerar para regime permanente)

e: queda de tensão máxima (V)

c) Exemplo de dimensionamento

Seja uma geração distribuída fotovoltaica com as seguintes características:

☉ Cada módulo fotovoltaico:

✓ Potência nominal: 222 W

✓ Corrente no ponto de máxima potência: I_p = 7,5 A

✓ Tensão no ponto de máxima potência: U_p = 30 Vcc

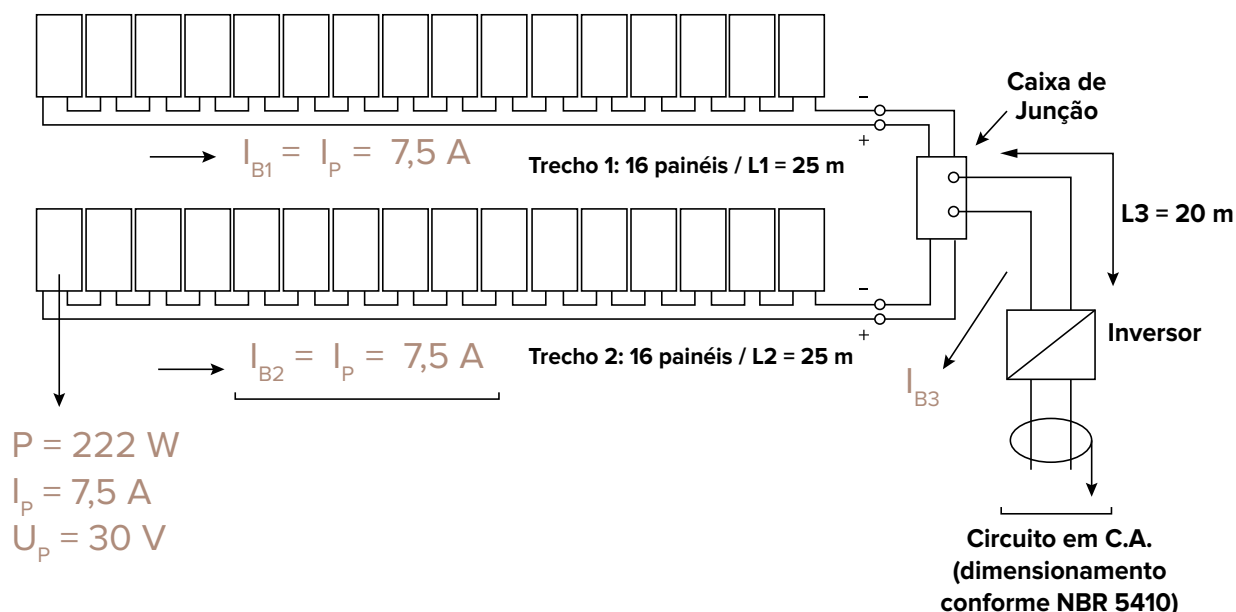
☉ Número de módulos fotovoltaicos em série (arranjo): 16

☉ Número de arranjos: 2

● Potência de pico total da instalação: $16 \times 2 \times 222 \text{ W} = 7.104 \text{ W} = 7,1 \text{ kW}$

● Potência do inversor = 7 kW

Exemplo de arranjo fotovoltaico para dimensionamento dos cabos:



Dimensionamento dos cabos fotovoltaicos dos trechos 1 e 2 (cabos que interligam os módulos entre si e até a caixa de junção)

Conforme a figura acima, os módulos estão ligados em série e, portanto:

$$I_{B1} = I_{B2} = I_P = 7,5 \text{ A}$$

$$U_{Ptotal} = 16 \text{ módulos} \times 30 \text{ Vcc por módulo} = 480 \text{ Vcc}$$

O método de instalação escolhido para esta ligação é A.1 (Cabo instalado ao ar livre: Modo 1 - dois cabos unipolares encostados um ao outro, na horizontal). Instalação ao ar livre exposta ao Sol. Temperatura ambiente máxima: 40°C

Critério da capacidade de corrente:

Conforme Tabela B.3 da NBR 16612 (página 80), para $I_{B1} = I_{B2} = 7,5 \text{ A}$, Instalação exposta ao Sol, Modo de Instalação 1, a seção nominal do cabo é $1,5 \text{ mm}^2$.

Critério da queda de tensão:

Admitindo-se uma queda de tensão máxima de 2 % nos trechos 1 e 2, tem-se:

$$S = L \cdot I_B / \sigma \cdot e$$

$$L1 = L2 = 25 \text{ m} + 25 \text{ m (positivo + negativo)} = 50 \text{ m}$$

$$I_{B1} = I_{B2} = 7,5 \text{ A}$$

$$\sigma = 44 \text{ m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$$

$$e = 0,02 (2\%) \times 480 \text{ V} = 9,6 \text{ V}$$

Então:

$$S = 50 \cdot 7,5 / 44 \cdot 9,6 = 0,9 \text{ mm}^2$$

A seção nominal padronizada mais próxima de 0,9 mm² é 1,5 mm².

Seção final do cabo fotovoltaico:

Pelos dois critérios de dimensionamento (capacidade de corrente e queda de tensão), a seção calculada foi a mesma e, portanto, a seção nominal do cabo fotovoltaico que interliga os módulos entre si e até a caixa de junção é 1,5 mm² (trecho 1 e trecho 2).

Dimensionamento dos cabos fotovoltaicos do trecho 3 (cabos da caixa de junção até o inversor)

Conforme figura da página anterior, a corrente de projeto no trecho entre a caixa de junção e o inversor é a soma das correntes de cada conjunto de módulos (arranjo) e a tensão máxima é a mesma de cada conjunto. Portanto:

$$I_{B3} = I_{B1} + I_{B2} = 15 \text{ A}$$

$$U_{Ptotal} = 480 \text{ Vcc}$$

O método de instalação escolhido para esta ligação é A.3 (Cabo em eletroduto diretamente enterrado). Temperatura do solo máxima: 30 °C



Critério da capacidade de corrente:

Conforme Tabela B.9 da NBR 16612 (página 86), para $I_{B3} = 15$ A, temperatura 30 °C, a seção nominal do cabo é 1,5 mm².

Critério da queda de tensão:

Admitindo-se uma queda de tensão máxima de 1 % no trecho 3, temos:

$$S = L \cdot I_B / \sigma \cdot e$$

$$L3 = 20 \text{ m} + 20 \text{ m (positivo + negativo)} = 40 \text{ m}$$

$$I_{B3} = 15 \text{ A}$$

$$\sigma = 44 \text{ m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$$

$$e = 0,01 (1\%) \times 480 \text{ V} = 4,8 \text{ V}$$

Então:

$$S = 40 \times 15 / 44 \times 4,8 = 2,9 \text{ mm}^2$$

A seção nominal padronizada mais próxima do resultado obtido é 4 mm².

Seção final do cabo fotovoltaico:

Deve-se escolher a maior dentre as seções calculadas e, portanto, a seção nominal do cabo fotovoltaico entre a caixa de junção e o inversor é de 4 mm² (critério de queda de tensão).

Dimensionamento dos cabos que saem do inversor

Estes cabos operam em corrente alternada em baixa tensão e, portanto, devem ser dimensionados conforme os critérios da ABNT NBR 5410 [7].



MERCADO

APLICAÇÃO DE PRODUTOS
NAS INSTALAÇÕES DE FONTES
DE ENERGIA RENOVÁVEIS:
SISTEMAS EÓLICOS

8 APLICAÇÃO DE PRODUTOS NAS INSTALAÇÕES DE FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS: SISTEMAS EÓLICOS

8.1 O SETOR DE ENERGIA EÓLICA

Assim como ocorre na área de geração fotovoltaica, em termos mundiais o Brasil também tem se destacado no segmento de geração eólica. De acordo com o Global Wind Energy Council (GWEC), o Brasil foi o quinto país em crescimento de energia eólica no mundo em 2016. Ao longo do ano, foram gerados no país 33,15 TWh de energia eólica, representando, em média, 5,4 % do total produzido por todas as fontes. Na comparação com 2015, a produção de energia dos ventos foi superior em 52 %.





Alguns números de 2016 dão a dimensão desse mercado no Brasil: mais de 10 GW de capacidade instalada; 430 parques eólicos instalados; cerca de 15 empregos gerados a cada MW instalado; na média, por mês, mais de 17 milhões de residências abastecidas pela energia eólica ao longo do ano.

Dados divulgados pela ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica revelam parte da força dessa cadeia produtiva na economia do país. Segundo a associação, a indústria eólica encerrou o ano de 2016 com investimentos da ordem de US\$ 5,4 bilhões. Se considerarmos o investimento acumulado, esse valor supera a marca de US\$ 25 bilhões entre 1998 e 2016.

A boa notícia é que ainda há bastante espaço para esse mercado crescer no país. A energia eólica já é responsável por mais de 7 % da matriz elétrica brasileira. E, até 2020, há mais de 8 GW já contratados para serem implantados.

Em volume, os parques eólicos brasileiros decolaram apenas nos últimos anos. E, com eles, se estabeleceu uma cadeia produtiva local eficiente, com fabricantes que oferecem a maior parte das soluções e equipamentos utilizados nesse tipo de instalação.

A produção local foi estimulada por políticas governamentais de incentivo, que incluíram uma política de incentivo fiscal bem-sucedida, que gerou benefícios relevantes para o país. Por exemplo: durante a crise energética de 2015, o Brasil chegou a ter 10 % da energia consumida vindo das eólicas. Esse volume evitou que um número maior de térmicas fossem acionadas, levando o governo a economizar mais de R\$ 6 bilhões no período.

O avanço dessa fonte de energia também é explicado pelas próprias características naturais do país, que tem alguns dos melhores ventos do mundo para a geração de energia elétrica. Segundo a ABEEólica, o Fator de Capacidade do Brasil está acima da média mundial, que é de 25 %. No Brasil essa média gira em torno de 40 %, com áreas que superam os 70 % nas épocas de melhores ventos.

Esse índice aponta a relação, no mesmo período, entre a produção efetiva de energia elétrica por uma usina e a sua capacidade total máxima de geração.

Quanto ao potencial desse setor, segundo o relatório Global Wind Market Report, publicado em 2015 pelo GWEC, os ventos brasileiros têm capacidade de gerar pelo menos três vezes a demanda atual de eletricidade do país.

8.2 VISÃO GERAL DE UMA INSTALAÇÃO EÓLICA

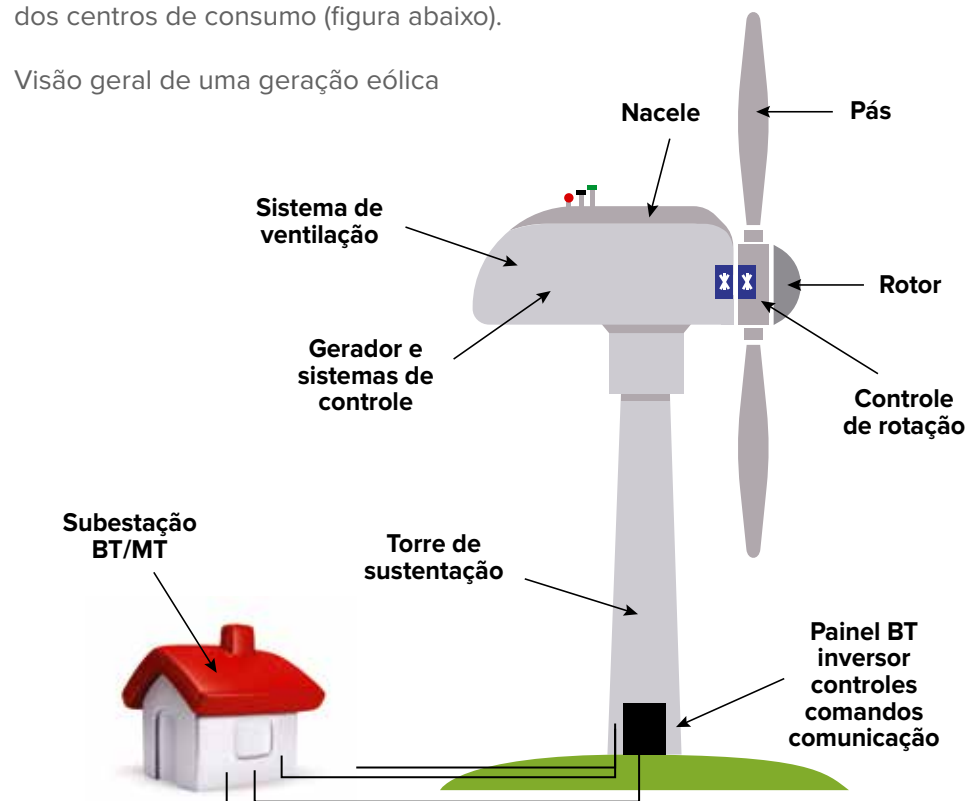
A geração eólica de energia ocorre por meio da transformação da energia cinética dos ventos, que provocam o movimento mecânico das pás do aerogerador. Estas pás são acopladas ao eixo de um rotor, que faz girar um gerador elétrico que, por sua vez, transforma este movimento de rotação em energia elétrica. A nacele, que fica situada na extremidade superior da torre, é um cubículo fechado no qual estão instalados todos os equipamentos que compõem uma turbina eólica (aerogerador).

Nos casos das usinas (parques eólicos), a geração eólica de energia elétrica pode ser realizada em média tensão ou em baixa tensão.

No caso da geração em baixa tensão (a maioria dos fabricantes utiliza tensão nominal de 690 V em corrente alternada), a tensão normalmente é elevada para média tensão através de subestações elevadoras que, dependendo de cada caso, podem estar localizadas dentro da nacele, em algum local no interior da torre ou então do lado externo, junto à torre de sustentação.

Após a tensão ser elevada para valores de média tensão, a energia gerada em cada torre é encaminhada para uma subestação central por meio de alimentadores primários. Finalmente, nessa subestação central a média tensão é elevada e a energia é conduzida por meio de uma linha de transmissão em alta tensão até as proximidades dos centros de consumo (figura abaixo).

Visão geral de uma geração eólica



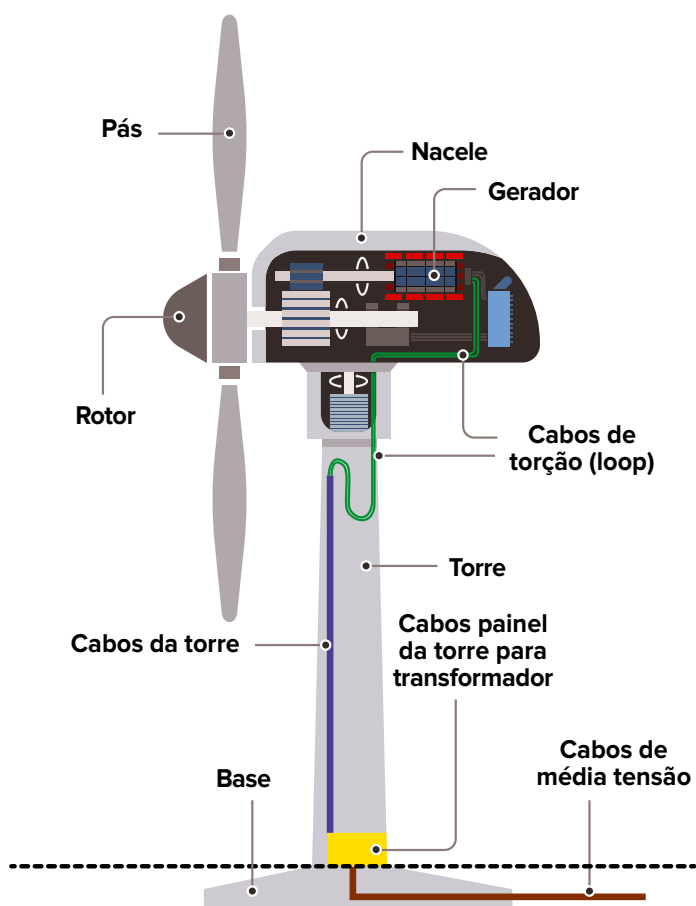
8.3 CABOS ELÉTRICOS PARA SISTEMAS EÓLICOS

Os cabos elétricos para parques eólicos dividem-se em duas grandes famílias, sendo a primeira para aplicação interna ao aerogerador e a segunda para aplicações externas, ou seja, entre as torres, que fará a conexão de um grupo de aerogeradores a uma subestação central e/ou disponibilizará a energia gerada no sistema interligado.

Os cabos para aplicação interna ao aerogerador são customizados, ou seja, desenvolvidos especificamente para o fabricante do aerogerador (projeto sob medida). São cabos para circuitos internos ao aerogerador (nacele e torre), constituídos por cabos de potência de baixa ou média tensão, com as características técnicas específicas de cada fabricante, e que normalmente seguem normas internacionais de qualificação (figura a seguir).

No caso das aplicações externas à torre – subestações e redes coletoras, centrais de comando e supervisão – os cabos poderão ser instalados em redes aéreas, subterrâneas ou submarinas, adotando-se especificações técnicas padronizadas no Brasil (Normas ABNT) e utilizadas pelas concessionárias de distribuição de energia.

Aplicações dos cabos elétricos eólicos



Cabos de alimentação especial, de dados, de controle e cabos de comunicação precisam ser considerados para a manutenção de parques eólicos existentes e em novos parques eólicos de grande escala, para garantir a qualidade de interconexão para a rede elétrica e sistema de comunicação.

Uma torre de 90 m com um aerogerador de 1,25 MW requer aproximadamente 1 km de cabo de alimentação. Sendo assim, 40 quilômetros de cabos seriam considerados necessários para um parque eólico com capacidade de 50 MW [18].

a) Condições de instalação e serviços

Geradores eólicos construídos em “fazendas” estão localizados em ambientes com variação muito grande de condições meteorológicas, incluindo o próprio vento, radiação ultravioleta e névoa salina, quando perto do mar ou no próprio mar.

Como consequência natural, o desempenho do cabo em aplicações de energia eólica também é crítico. As partes móveis da turbina eólica também aumentam a importância de uma seleção do cabo adequado com muita flexibilidade em relação à torção e flexão com possibilidade de operar em um raio de curvatura pequeno devido a limitações de espaço. O cabo também precisa ser resistente a produtos de refrigeração, óleo, produtos químicos corrosivos e à abrasão. Sempre que o parque eólico estiver localizado perto do mar ou no próprio mar, o cabo deve também ser resistente à água salgada. Requisitos especiais de retardância à chama, baixa emissão de fumaça, uso de compostos não halogenados, resistência à radiação UV e proteção eletromagnética também são necessários devido às considerações de segurança [18].

Dentro da nacela da turbina eólica devem ser utilizados cabos de controle e de dados sujeitos a flexão contínua, enquanto que cabos de potência resistentes à torção e flexão devem ser usados na torre de sustentação.

b) Construção

Os principais requisitos para a construção dos cabos eólicos são os seguintes [18]:

● **Condutor (1):** considerando-se os materiais metálicos do condutor, a fim de maximizar a flexibilidade, é recomendável especificar condutores de cobre recozido com características de encordoamento com:

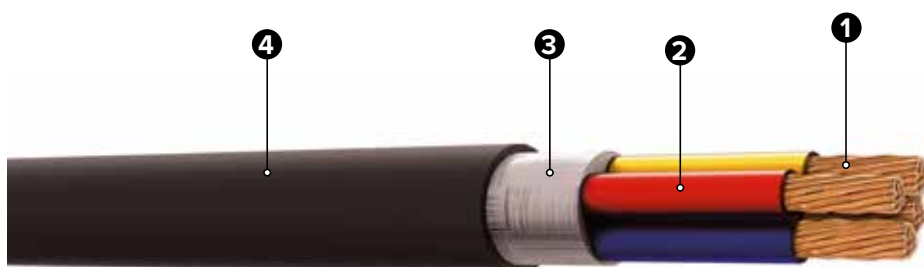
- ✓ Construções concêntricas com passos menores para aplicações mais flexíveis a curvas.
- ✓ Construções concêntricas com passos longos, para aplicações sujeitas a torção.

Basicamente, são especificados condutores nus flexíveis de classe 5, de acordo com as Normas DIN VDE 0295/HD 383 ou IEC 60228.

O uso de condutores de alumínio não é recomendado devido a tais condições especiais aplicadas à flexibilidade e torção, não havendo garantia de desempenho quando condutores de alumínio são usados.

- **Isolação (2):** para aumentar a flexibilidade em baixas temperaturas, polietileno termoplástico (TPE), borracha etileno-propileno (EPR, EPM ou EPDM) ou borracha de silicone (SIR) são escolhas comuns para material de isolamento para resistir à corrosão e ozônio e ao envelhecimento devido ao calor. PVC / nylon como isolação também é amplamente utilizado devido à sua alta rigidez dielétrica.
- **Capa (3):** pode ser em compostos resistentes ao ozônio, a UV e a óleo e resistentes ao frio, composto especial baseado em CM (polietileno clorado) ou CR (borracha de cloropreno).
- **Cobertura (4):** pode ser em compostos termofixos como polietileno clorado (CPE), policloropreno (Neoprene), polietileno clorossulfonado (CSPE), borracha sintética (SR) ou compostos termoplásticos como TPE, TPE-PVC e poliuretano (TPU). Estes materiais são resistentes a petróleo, combustíveis e solventes com flexibilidade superior sob baixas temperaturas. Tais propriedades tornam materiais de revestimento ideais para cabos de energia eólica.

Construção típica de cabo eólico



c) Normas técnicas para cabos de energia eólica

Até a publicação deste Guia, não há normalização técnica brasileira específica para cabos utilizados em geradores de energia eólica.

Para o condutor de cobre recozido nu ou revestido, muitos fabricantes seguem a Norma IEC 60228, classe 5 ou 6, o que atende a necessária flexibilidade. Essa Norma Técnica especifica somente as seções nominais e o número e diâmetro dos fios que formam o condutor. Por sua vez, a Norma UL 62 refere-se a várias Normas ASTM e especifica não apenas o diâmetro e a quantidade de fios do condutor, mas também as construções do condutor, como encordoamento concêntrico, condutores múltiplos e construções encordoadas gerais que são críticas para as características de flexão do cabo.

Para a isolamento e cobertura, muitos fabricantes seguem as Normas DIN VDE 0207-20 e DIN VDE 0207-21. HD 22.1, HD 22.4. As Normas UL 44 e UL 62 também são usadas como normas gerais para a produção de cabos, principalmente nos Estados Unidos.

Outras Normas, como a UL 758, UL 1581, UL 1277, UL 2277, IEC 60332 são frequentemente utilizadas para dar suporte a recursos extras e avaliações de inflamabilidade.

A Norma UL 1741:2005 - Inversores, conversores, controladores e equipamentos do sistema de interconexão para uso em fontes distribuídas de energia define requisitos para os componentes destinados ao uso em modo *stand-alone* (não conectadas à rede) ou no modo de conectado à rede (*grid connected*) de sistemas de energia. A seção 21 desta Norma abrange fiação interna que consiste dos cabos internos gerais ou cabos especiais para a temperatura, tensão e as condições de serviço a que o cabeamento é submetido.

Todas as partes desta Norma aplicadas a características de cabos consideram fios de cobre em construções flexíveis ou extra flexíveis devido às limitações de condutores de alumínio. As características de flexibilidade são as exigências limitantes que não recomendam o uso de alumínio [18].

Diante da ausência de normalização técnica específica para cabos eólicos, muitos fabricantes de cabos têm desenvolvido produtos específicos para serem usados em âmbitos de geração de energia eólica com características especiais, a fim de atender aos requisitos de desempenho quanto à flexibilidade, resistência à abrasão e flexão. Para tanto, são igualmente desenvolvidos pelos fabricantes ensaios específicos que visam simular, em condições controladas de laboratório, as situações reais a que estes cabos são submetidos.

Apesar de todas as condições severas não poderem ser duplicadas exatamente, os testes podem ser padronizados para simular as reais condições e criar métodos de ensaio definidos e replicáveis.





Durante a operação de turbinas eólicas, dependendo da direção do vento, o ângulo de turbinas eólicas precisa ser ajustado pelo controle de oscilação. Os cabos de energia, controle e comunicação tanto do-bram ao longo do eixo horizontal como giram ao longo do eixo vertical. Neste cenário, o esforço de torção é mais grave e exige maior atenção. Atualmente, não existe uma padronização única para ensaiar o esforço de torção e, por causa disso, alguns fornecedores desenvolveram seus próprios métodos, que devem ser informados por eles na especificação técnica do produto.

O uso de cabos comuns, não especificamente projetados para suportar as condições ambientais da geração de energia eólica (terrestres ou marítimas), pode constituir um risco, por causa da probabilidade considerável de falha, uma vez que não são projetados e construídos com projetos e materiais adequados.

Em particular, a adoção de condutores de alumínio, mesmo com características melhores do que poderia ser obtido em condutores regulares (por exemplo, para uso em cabos nus e cabos isolados regulares) é um risco grave para o comportamento da unidade de geração, porque [18]:

- Fios de alumínio submetidos ao esforço contínuo verificado nos aerogeradores, devido à flexão e à torção, podem apresentar ruptura por fadiga e deformação.
- Como consequência, a isolamento, a capa interna e a cobertura podem ser danificadas como resultado de problemas do condutor.
- Não há dados disponíveis suficientes sobre o desempenho de cabos de alumínio testados em situações de esforços significativos de flexão e torção.
- A mesma falta de informação se aplica ao desempenho dos cabos de alumínio submetidos a agentes químicos e ambientes offshore e do impacto nas conexões, corrosão e fragilidade.

- Uma falha em um gerador de energia eólica, ocasionada por rompimento dos cabos elétricos particularmente com condutores de alumínio, significa longos períodos sem geração de energia, manutenção complicada e altos custos. Assim, deve-se analisar o impacto dos custos relativos dos cabos utilizados na nacele e verticalmente na torre, em relação ao valor total da unidade geradora, de modo que pudesse ser determinado se a economia inicial usando cabos de alumínio em vez de cobre compensa os riscos apresentados. Além disso, uma análise do ciclo de vida completo deve ser realizada considerando-se também eventual perda de rendimentos devido à falha de cabos.

8.4 SELEÇÃO E DIMENSIONAMENTO DOS CABOS EÓLICOS

Os cabos do sistema eólico que operam em baixa tensão em corrente alternada na nacele ou na torre devem tomar como referência a capacidade de condução de corrente dos condutores conforme especificado na Norma ABNT NBR 5410 [7]. Fatores de redução da capacidade destes condutores devem levar em consideração a localização e o método de instalação, também de acordo com a NBR 5410.

Os cabos do sistema eólico que operam em média tensão em corrente alternada na nacele, na torre ou na rede de distribuição externa à torre devem tomar como referência a capacidade de condução de corrente dos condutores conforme especificado na Norma ABNT NBR 14039 [8]. Fatores de redução da capacidade destes condutores devem levar em consideração a localização e o método de instalação, também de acordo com a NBR 14039.

Por outro lado, em certos casos, alguns fabricantes indicam em seus catálogos técnicos tabelas de capacidade de corrente específicas para os seus cabos elétricos, que devem ser seguidas pelos projetistas e instaladores.



9. CONCLUSÃO

O ICA/Procobre espera que este Guia tenha enriquecido o conhecimento dos leitores sobre a aplicação de cabos elétricos em instalações de Energia Fotovoltaica e Energia Eólica.

No Brasil e no mundo, os segmentos de geração eólica e fotovoltaica têm registrado grande avanço, com crescimento robusto no número de instalações, tendência que deverá se manter nas próximas décadas.

O avanço dessas matrizes energéticas exige produtos e equipamentos de alto nível de performance, qualidade e segurança. Assim como a escolha e aplicação correta de cada item, como ocorre com os cabos elétricos.

Essa é a finalidade desse Guia, que foi elaborado para apresentar conceitos técnicos e características direcionadas ao projeto de cabos elétricos para instalações fotovoltaicas e eólicas. O trabalho oferece, de forma simples e didática, alguns caminhos para a correta escolha e aplicação dos condutores elétricos a serem utilizados nessas instalações.

Importante observar que as instalações fotovoltaicas e eólicas possuem necessidades específicas, que são plenamente atendidas pelos cabos elétricos de cobre. Entre elas podemos citar: a maior resistência à corrosão do condutor, maior resistência à torção e flexão, maior confiabilidade nas conexões elétricas e a possibilidade de utilizar cabos flexíveis para otimizar o espaço na instalação – qualidade que, além de facilitar o lançamento em longas distâncias em rotas não retilíneas, também visa aumentar a segurança e reduzir custos operacionais nas instalações.

Com o estudo, fica evidente o valor das características e dos benefícios do cobre, assim como sua importância no setor elétrico e na sustentabilidade do mundo moderno.

No que tange à segurança, o Guia também ressalta a importância da utilização de cabos com características de baixa emissão de fumaça, isentos de gases tóxicos e corrosivos e livres de halogênio nessas instalações, sobretudo para a preservação dos bens e segurança das pessoas.

O texto destaca ainda a importância da engenharia de aplicação e o cumprimento às Normas ABNT e outras aplicáveis, quando estas não existirem, indispensáveis para a correta elaboração do projeto e para a escolha adequada do produto e da instalação, objetivando eliminar falhas resultantes das divergências entre o projeto e as necessidades e particularidades da aplicação prática, em qualquer dos setores analisados.

BIBLIOGRAFIA

- [1] **Group, International Copper Study.** The World Copper Factbook 2015. 2015.
- [2] **E. W. Weisstein**, “Resistivity,” [Online]. Available: <http://scienceworld.wolfram.com/physics/Resistivity.html>. [Acesso em 23 01 2016].
- [3] **Georgia State University**, “Thermal Conductivity,” 2016. [Online]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/thercond.html>. [Acesso em 23 01 2016].
- [4] **International Copper Association**, “Meio ambiente e reciclagem,” 2015. [Online]. Available: <http://www.campanhacobresustentavel.com.br/index.php#blockrandom>. [Acesso em 23 01 2016].
- [5] **Cutri, Prof. Dr. Rodrigo.** O Portal da Eficiência Energética - Construções Sustentáveis. [Online] [Citado em: 23 01 2016] <http://leonardo-energy.org.br/wpdm-package/construcoes-sustentaveis/>
- [6] **Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (Eds.).** Climate Change 2007: Synthesis Report Synthesis Report. [Online] 2007. [Citado em: 23 01 2016] www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf
- [7] **ABNT.** NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão. 2004.
- [8] **ABNT.** NBR 14039 —. Instalações elétricas de média tensão 1,0 kV a 36,2 kV. 2005.
- [9] **ABNT.** NBR 15920 —. Cabos elétricos — Cálculo da corrente nominal — Condições em regime permanente — Otimização econômica das seções dos cabos de potência. 2011.
- [10] **Moreno, Hilton.** Dimensionamento Econômico e Ambiental de Condutores Elétricos. s.l. : Procobre, 2010.
- [11] **Copper Alliance**, “Physical properties for copper and aluminium in electrical applications,” 16 04 2015. [Online]. Available: <http://help.leonardo-energy.org/hc/en-us/articles/202671931-What-are-the-most-relevant-physical-properties-for-copper-and-aluminium-in-electrical-applications->. [Acesso em 23 01 2016].
- [12] **Tabarraee, Kamran.** Performance Comparison of Copper & Aluminum Wiring, Powertech, Canadá, abril de 2017
- [13] **ABNT**, ABNT NBR NM 280:2011 - Condutores de cabos isolados.

- [14] **ABNT**. NBR 5349:1997 - Cabos nus de cobre mole para fins elétricos - Especificação. 1997.
- [15] **Cotrim, Ademaro**. Instalações elétricas, 5ª edição. Pearson Prentice Hall. 2008
- [16] **IEC. IEC 62548** - Photovoltaic (PV) arrays - Design requirements, 2016
- [17] **ABNT**. ABNT NBR 16612 - Cabos de potência para sistemas fotovoltaicos, não halogenados, isolados, com cobertura, para tensão de até 1,8 kV C.C. entre condutores - Requisitos de desempenho, 2017
- [18] **MDJ**. O uso de cabos verticais na geração eólica: comparação entre cabos de cobre e alumínio, International Copper Association, outubro de 2011

Realização:



**International Copper
Association Brazil**
Copper Alliance

Apoio:

