

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

BRUNO LEONARDO SCHMITZ ZIMMERMANN

**CARACTERÍSTICAS E VANTAGENS DA APLICAÇÃO DO
BARRAMENTO BLINDADO EM COMPARAÇÃO AO SISTEMA DE
CABEAMENTOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2019

BRUNO LEONARDO SCHMITZ ZIMMERMANN

**CARACTERÍSTICAS E VANTAGENS DA APLICAÇÃO DO
BARRAMENTO BLINDADO EM COMPARAÇÃO AO SISTEMA DE
CABEAMENTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Me. Jeferson José Gomes

Coorientador: Prof. Me. Percio Luiz Karam de Miranda

PONTA GROSSA

2019



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Ponta Grossa
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Eletrônica
Engenharia Eletrônica



TERMO DE APROVAÇÃO

CARACTERÍSTICAS E VANTAGENS DA APLICAÇÃO DO BARRAMENTO BLINDADO EM COMPARAÇÃO AO SISTEMA DE CABEAMENTOS

por

**BRUNO LEONARDO SCHMITZ
ZIMMERMANN**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 17 de maio de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel(a) em Engenharia Eletrônica. O(A) candidato(a) foi arguido(a) pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Msc. Jeferson José Gomes
Orientador(a)

Prof(a). M.Eng.Percio Luiz Karam de Miranda
Coorientador

Prof(a). Dr. Josmar Ivanqui
Membro titular

Prof. Dr. Josmar Ivanqui
Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Sergio Okida
Coordenador do Curso

RESUMO

ZIMMERMANN, Bruno Leonardo Schmitz. **Características e vantagens da aplicação do barramento blindado em comparação ao sistema de cabamentos.** 2019. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

O sistema de barramento blindado para distribuição de energia elétrica em baixa tensão tem se mostrado como alternativa tecnicamente viável para substituição do sistema de cabamento de alumínio. Neste trabalho foram abordadas as características técnicas e financeiras dos dois sistemas, elucidando as vantagens e desvantagens da instalação do barramento blindado em relação ao cabamento. Foram analisadas as características técnicas de instalação, capacidade de condução de corrente, queda de tensão e capacidade de suportar corrente de curto-circuito para os sistemas de barramento blindado e cabos condutores de alumínio. A avaliação financeira foi realizada através de estudo de caso comparando custos de material e instalação para ambos os sistemas.

Palavras-chave: Barramento blindado. Cabos de alumínio. Distribuição de energia. Alta corrente. Baixa tensão.

ABSTRACT

ZIMMERMANN, Bruno Leonardo Schmitz. **Features and advantages of busbar application compared to cabling system**. 2019. 61 p. Work of Conclusion Course (Graduation in Electronic Engineering) - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2019.

The busbar system for low voltage power distribution has been a technically feasible alternative for the replacement of the aluminum wiring system. In this work were discussed about technical and financial characteristics of both systems, elucidating the advantages and disadvantages of the installation of the busbar in relation to the wiring. The technical characteristics of installation, current carrying capacity, voltage drop and short-circuit current withstand for busbar systems and aluminum conductor cables were analyzed. The financial evaluation was performed through a case study comparing material and installation costs for both systems.

Keywords: Busbar. Aluminum Cables. Energy Distribution. High Current. Low Tension.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cabo unipolar com isolamento e cobertura	13
Figura 2 – Método de instalação condutores isolados ou cabos unipolares em eletrocalha sobre parede em percurso horizontal ou vertical	13
Figura 3 - Componentes do barramento blindado: (a) Barras; (b) Tampas do barramento; (c) Conexões estanhadas; (d) Perfil “C”	16
Figura 4 - Conexões do barramento blindado: (a) montagem (b) conexão e porca cisalhante; (c) junta de dilatação	18
Figura 5 – (a) Caixa de redução. (b) caixa de derivação extraível	20
Figura 6 – Peças de conexão para barramento blindado	20
Figura 7 – Barreiras corta-fogo do barramento blindado	22
Figura 8 – Distância média geométrica para cálculo de indutância. D = diâmetro externo do cabo (mm)	31
Figura 9 – Circuito elétrico da queda de tensão	34
Figura 10 – Gráfico de tensão versus tempo	35
Figura 11 - Comparação da distância máxima para 2% de queda de tensão para 380 V entre condutores de alumínio e barramentos blindados	36
Figura 12 – Corrente de curto-circuito máxima suportável para um tempo de 1 segundo, em regime permanente	41
Figura 13 – Diagrama unifilar do estudo de caso	44
Figura 14 – Análise financeira dos custos de instalação de circuito com barramento blindado e cabeamentos de alumínio	50
Figura 15 – Relação de custos e número de conexões para instalação de cabos e barramento blindado.	51
Figura 16 – Relação de custos com material e mão de obra para (a) barramento blindado e (b) cabeamento conforme o número de ramificações	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Capacidades de condução de corrente para condutores de alumínio em temperatura ambiente de 35 °C.	24
Tabela 2 – Comparação da capacidade de condução de corrente dos modelos de barramento blindado e associações de cabos de alumínio	26
Tabela 3 – Parâmetros dos cabos de alumínio em regime permanente	32
Tabela 4 – Comparação da distância máxima em metros para 2% de queda de tensão em 380 V dos modelos de barramento blindado e associações de cabos de alumínio	37
Tabela 5 – Comparação da corrente de curto-circuito dos modelos de barramento blindado e associações de cabos de alumínio para tempo de 1 segundo	42
Tabela 6 – Valores de queda de tensão percentual e corrente de curto-circuito simétrico suportável em 1 segundo para o estudo de caso	45
Tabela 7 – Preços comerciais dos cabos de Alumínio	45
Tabela 8 – Custo estimado para instalação de circuito com comprimento de 100 metros e capacidade de condução de corrente de 2000 A.	49

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
EPR	Etilenopropileno
HEPR	Etileno propileno
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
MT	Média Tensão
NBR	Norma Brasileira
r.m.s.	<i>Root Medium Square</i>
PVC	Policloreto de vinila
XLPE	Polietileno Reticulado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA	10
1.2 OBJETIVOS.....	10
1.2.1 Objetivo Geral.....	10
1.2.2 Objetivos Específicos.....	10
1.3 JUSTIFICATIVA.....	11
2 DESENVOLVIMENTO.....	12
2.1 CARACTERÍSTICAS DE INSTALAÇÕES COM CONDUTORES.....	12
2.2 CARACTERÍSTICAS DE INSTALAÇÕES COM BARRAMENTO BLINDADO ..	14
2.3 CAPACIDADE DE CONDUÇÃO DE CORRENTE.....	23
2.3.1 Capacidade de condução de corrente do barramento blindado	23
2.3.2 Capacidade de condução de corrente do cabeamento de alumínio	24
2.4 QUEDA DE TENSÃO	27
2.4.1 Impedância do cabo de alumínio	28
2.4.2 Cálculo da queda de tensão no cabo de alumínio	32
2.5 CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO.....	37
2.5.1 Corrente de curto-circuito no cabo de alumínio	39
2.6 ANÁLISE FINANCEIRA	43
2.6.1 Dimensionamento	43
2.6.2 Custos de Implantação	45
2.6.3 Comparativo dos custos totais.....	49
3 CONCLUSÃO..	53
REFERÊNCIAS.....	54
ANEXO A - CATÁLOGO BARRAMENTO BLINDADO DO FABRICANTE WEG ..	59
ANEXO B - CAPACIDADES DE CONDUÇÃO DE CORRENTE, EM AMPERES, PARA OS MÉTODOS DE REFERÊNCIA A1, A2, B1, B2, C E D SEGUNDO ABNT NBR 5410 DE 2004.....	62
ANEXO C - CARACTERÍSTICAS CONDUTORES DE ALUMÍNIO CONFORME DADOS DO FABRICANTE.....	64
ANEXO D - VALORES PARA O FATOR K_L DOS CONDUTORES DE ALUMÍNIO SEGUNDO DADOS DO FABRICANTE.....	67

1 INTRODUÇÃO

O barramento blindado possui a finalidade de transmitir e distribuir energia elétrica de maneira eficiente e pode substituir, quando vantajoso, o sistema de cabos condutores comumente utilizados. O barramento blindado consiste em um conjunto modular de barras condutoras que permite maior mobilidade para a instalação elétrica. As barras condutoras utilizadas no barramento blindado são isoladas e protegidas por um invólucro. O invólucro do barramento blindado é constituído em alumínio de forma a evitar o aparecimento de correntes parasitas, corrente de Foucault, eliminando assim, o aquecimento excessivo do invólucro e aumentando a capacidade de condução corrente. As estruturas do barramento blindado são feitas em chapa de aço zincado com pintura posterior (a pó ou a base de poliéster), proporcionando resistência a intempéries e maior isolamento elétrica contra corpos estranhos. Essas características tornam o barramento blindado um sistema seguro, robusto, compacto e flexível. Além disso, custos de mão de obra reduzidos e menor espaço requerido para a instalação são atrativos deste sistema.

Os barramentos blindados podem ser reaproveitados em mudanças de layout sem a necessidade de emendas ou desperdício de materiais, além disso, promove uma redução do desperdício de material, que é praticamente zero em sua instalação. O barramento blindado proporciona maior segurança em casos de incêndios e curtos-circuitos, pois não há liberação de gases tóxicos.

Para verificar as situações em que a utilização de barramento blindado mostra-se vantajosa em relação a instalações com cabeamento faz-se necessária uma análise criteriosa. Alguns aspectos importantes para a tomada de decisão do melhor sistema a ser utilizado são as características construtivas, instalação, custos, capacidade de condução de corrente, queda de tensão e capacidade de corrente de curto-circuito suportável. Esse tipo de comparação permite avaliar vantagens e desvantagens da instalação do sistema de barramento blindado frente ao sistema de cabeamentos.

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Estudo da aplicação industrial do sistema de barramento blindado de alumínio para distribuição de energia em baixa tensão na faixa de 700 a 3450 A em comparação ao sistema de cabeamentos em alumínio. Análise de características construtivas, instalação, capacidade de condução de corrente, queda de tensão, corrente de curto-circuito suportável e análise econômica de ambos os sistemas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Comparar as características técnicas e econômicas do barramento blindado e cabeamentos em alumínio para sistemas de distribuição de energia para aplicação industrial em baixa tensão na faixa de 700 a 3450 A.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Comparar a capacidade de condução de corrente de cabos condutores e barramento blindado;
- Comparar a queda de tensão de cabos condutores e barramento blindado;
- Comparar a corrente de curto-circuito de cabos condutores e barramento blindado;
- Comparar através de estudo de caso os custos de mão de obra e material para implantação de um ramal de alimentação, com capacidade de condução de corrente de 2000 A e 100 m de comprimento, utilizando barramento blindado e cabos condutores.

1.3 JUSTIFICATIVA

Nos últimos anos, a aplicação de sistemas de barramentos blindados em instalações elétricas de baixa tensão que demandem médias e altas potências têm apresentado considerável aumento. Características como baixa manutenção, redução do desperdício de material, menor tempo e espaço para instalação quando comparado ao sistema convencional são responsáveis pelo crescimento na utilização dessa tecnologia. Apesar disso, os estudos sobre a utilização do barramento blindado ainda são escassos. Sendo assim, identificou-se a necessidade de avaliar situações em que a utilização de barramento blindado mostra-se vantajosa em relação a instalações com cabeamento. Este estudo foi desenvolvido mediante a análise de aspectos importantes para comparação entre os sistemas de barramento blindado de alumínio e cabeamentos de alumínio, tais como, características construtivas, instalação, custos, capacidade de condução de corrente, queda de tensão e capacidade de corrente de curto-circuito suportável. Assim, este trabalho tem o intuito analisar o sistema de barramento blindado elucidando suas vantagens e desvantagens frente a tecnologia já consolidada de cabos condutores.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 CARACTERÍSTICAS DE INSTALAÇÕES COM CONDUTORES

Atualmente, o sistema de distribuição de energia em baixa tensão consolidado é através de cabos condutores, tanto para distribuição industrial quanto residencial. A norma brasileira que regulamenta as Instalações elétricas de baixa tensão é a ABNT NBR 5410 de 2004 (ABNT, 2004a), que estabelece condições para garantia da segurança de pessoas e animais, funcionamento da instalação e conservação de bens. Segundo esta norma, caracteriza-se como baixa tensão os circuitos elétricos alimentados com tensão igual ou inferior a 1000 V em corrente alternada (CA) ou 1500 V em corrente contínua (CC).

O sistema de distribuição de energia por cabos condutores inicia-se no quadro de distribuição principal, que é localizado próximo à entrada da linha elétrica na edificação. Algumas instalações possuem mais de um quadro de distribuição, atendendo a necessidade de demanda, mas todos conectados com o quadro de distribuição principal (ABNT, 2004a; PRYSMIAN, 2018).

A energia é distribuída a partir do quadro de distribuição principal para a edificação por cabos condutores, os quais devem possuir como requisito mínimo a isolação. A isolação pode ser de diferentes materiais (PVC, EPR e XLPE) que são utilizados para isolar eletricamente o condutor. Somente quando claramente especificado poderão ser utilizados condutores nus ou apenas com cobertura. A cobertura não possui a função de isolação, sendo um invólucro externo que protege o fio ou cabo contra fatores ambientes (Figura 1). Os cabos nus, por sua vez, não contam com nenhum tipo de revestimento ou proteção. Os cabos podem ter ainda um único condutor (unipolar) ou dois ou mais condutores (multipolar). O cabo multipolar pode apresentar condutores isolados (veias) ou não entre si (ABNT, 2004a; PRYSMIAN, 2018; SANTOS, 2005).

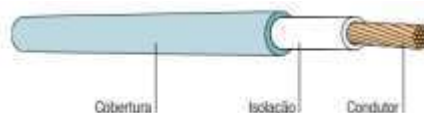


Figura 1 – Cabo unipolar com isolamento e cobertura

Fonte: PRYSMIAN (2018).

O material utilizado para os condutores pode ser cobre ou alumínio. Neste trabalho serão utilizados dados dos condutores de alumínio para comparação destes com o barramento blindado de alumínio. Admite-se o uso de condutores de alumínio em instalações industriais desde que sejam atendidos os seguintes critérios: seção nominal dos condutores igual ou maior que 16 mm^2 ; alimentação diretamente por subestação de transformação ou transformador, a partir de uma rede de média tensão ou fonte própria; e instalação e manutenção realizadas somente por pessoas qualificadas, conforme especificado pela normativa (ABNT, 2004a).

Os condutores podem ainda ser rígidos ou flexíveis. Normalmente, em distribuições de baixa tensão utiliza-se condutores flexíveis que facilitam a instalação, pois favorecem trabalhos de emendas, dobras e ligações em tomadas e interruptores (ABNT, 2004a; PRYSMIAN, 2018).

A distribuição da energia na edificação é realizada passando estes cabos condutores por condutos elétricos. Sendo que, existem diferentes métodos de instalação para o cabeamento. Destaca-se aqui o método com condutores isolados ou cabos unipolares em eletrocalha sobre parede em percurso horizontal ou vertical, pois se assemelha a forma de instalação do sistema de barramento blindado. A capacidade de condução de corrente para este método de instalação segue o método de referência B1 (ABNT, 2004a).

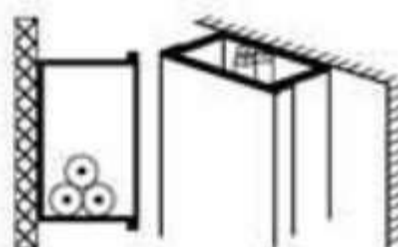


Figura 2 – Método de instalação condutores isolados ou cabos unipolares em eletrocalha sobre parede em percurso horizontal ou vertical

Fonte: NBR 5410 (ABNT, 2004a)

Para este tipo de instalação em que os suportes são fixados nas paredes são admitidos apenas o uso de cabos unipolares. Os meios utilizados para fixação do suporte dos cabos na parede não podem comprometer seu desempenho ou danificar os cabos. Além disso, o material desses suportes deve resistir os esforços a que forem submetidos. O esforço de tração ao qual os cabos são submetidos na posição vertical não deve comprometer a instalação, oferecendo risco de romper os cabos ou forçando as conexões (ABNT, 2004a; PRYSMIAN, 2018). A distribuição dos condutores deve ser otimizada de maneira que os cabos sejam dispostos em camada única, sendo permitido o uso de mais camadas de acordo com o volume de material combustível representado pelos cabos (isolações, capas e coberturas) (ABNT, 2004a).

Os condutores com isolação são caracterizados por três temperaturas, as quais para condutores com isolação de XLPE são: temperatura máxima para serviço contínuo de 90°C, temperatura limite de sobrecarga de 130°C e temperatura em regime de curto-circuito de 250°C, segundo ABNT NBR 5410 (ABNT, 2004a).

Em alguns casos pode ser necessária a adaptação da instalação para novos equipamentos ou mudanças de *layout* industrial, para isso, utiliza-se canaletas para que os cabos não fiquem expostos. As canaletas são esteticamente melhores que a fixação de fios visivelmente, sendo estas canalizações protegidas por condutas que, por sua vez, são fixadas na parede da maneira mais discreta possível (ABNT, 2004a; PRYSMIAN, 2018; SANTOS, 2005).

A manutenção preventiva de cabos condutores exige que a isolação destes seja inspecionada periodicamente, além de conexões, fixação e suportes. Essa verificação tem como objetivo detectar sinais de aquecimento excessivo, rachaduras e ressecamentos. Para segurança também é recomendado o uso de materiais anti-chamas, livres de halogênio e com baixa emissão de fumaça e gases tóxicos. Dessa maneira, em caso de incêndio haverá maior segurança com relação a sua propagação ou liberação de fumaças tóxicas e gases tóxicos (ABNT, 2004a; PRYSMIAN, 2018).

2.2 CARACTERÍSTICAS DE INSTALAÇÕES COM BARRAMENTO BLINDADO

O sistema de distribuição de energia com barramento blindado para baixa tensão é regulamentado pela norma brasileira ABNT NBR 16019 de 2011 (ABNT,

2011) e também segue as condições estabelecidas pela ABNT NBR 5410 de 2014 (ABNT, 2004a) para instalações elétricas de baixa tensão. Além disso, para aplicação do sistema de barramento blindado deve-se consultar também a NBR IEC 60439-2/1 (ABNT, 2004b) e IEC 61439-6/1 (IEC, 2012).

O barramento blindado consiste em um conjunto modular de barras condutoras, isoladas e protegidas por invólucro. As barras condutoras (Figura 3a), principais componentes do barramento blindado, podem ser constituídas de cobre ou alumínio. O cobre (*cuprum*, Cu) é um metal com número atômico 29 e massa atômica de 63,55 g/mol. O cobre possui como características de maleabilidade e ductilidade devido a sua estrutura de empacotamento cúbico de face centrada. Seu ponto de fusão é 1083 °C, densidade de 8,95 g/cm³, resistividade elétrica de 1,673 μΩ.cm (à 20°C), calor específico de 420 J/kg.K (à 25°C) e coeficiente linear de expansão térmica de 17 x 10⁻⁶ °C⁻¹ (à 25°C). Este metal possui boas propriedades para condutividade térmica e elétrica, sendo bastante utilizado em condutores (CALLISTER, 2002; LEE, 2008; RUSSEL, 2004; RODRIGUES *et al.*, 2012).

Neste trabalho, serão analisados barramentos blindados de alumínio (Figura 3) devido a capacidade de condução de corrente destes. O Alumínio (*Alumen*, Al) é um metal representativo com número atômico 13 e massa atômica 26,98 g/mol. O alumínio apresenta ponto de fusão de 660°C, resistividade elétrica de 2,655 μΩ.cm (à 20°C), calor específico de 900 J/kg.K (à 25°C) e coeficiente linear de expansão térmica de 23 x 10⁻⁶ °C⁻¹ (à 25°C). O alumínio é o elemento metálico mais abundante na crosta terrestre e encontra-se sólido à temperatura ambiente. Além disso, é um metal dúctil, maleável e bastante utilizado também para condutores elétricos. Possui como vantagem principal a baixa densidade de 2,73 g/cm³ (CALLISTER, 2002; LEE, 2008; PEIXOTO, 2001).



Figura 3 - Componentes do barramento blindado: (a) Barras; (b) Tampas do barramento; (c) Conexões estanhadas; (d) Perfil "C".

Fonte: Adaptado de WEG (2018)

Algumas comparações importantes devem ser feitas entre o alumínio e o cobre para justificar o uso destes nos sistemas de barramento blindado. Observa-se que a condutividade elétrica do cobre é de $61,7 \text{ S.m/mm}^2$, sendo a segunda maior condutividade dos metais, ficando atrás apenas da prata ($62,5 \text{ S.m/mm}^2$). O alumínio, por sua vez, possui a quarta maior condutividade ($34,2 \text{ S.m/mm}^2$). Portanto, o alumínio possui 55,43% da condutividade do cobre, no entanto, ligas de alumínio são consideravelmente menos densas que o cobre. A relação da densidade do alumínio e do cobre é de 30,37%. Conseqüentemente, o uso de alumínio implica em menor peso e material por corrente conduzida (PEIXOTO, 2001; RUSSEL, 2004).

Com relação ao calor específico, conforme dados apresentados anteriormente, o cobre possui 42,97% do valor de calor específico do alumínio. Assim, é necessária uma quantidade maior de energia para aquecer uma mesma massa de alumínio, quando comparado com cobre. Além disso, como a quantidade de alumínio utilizada para conduzir uma mesma corrente é maior que a do cobre, a área de superfície para a troca de calor também é maior, assim facilitando o arrefecimento e diminuindo as perdas por sobreaquecimento. O uso de alumínio também se justifica pelo custo de tal material. Segundo *London Metal Exchange* (2018), maior centro de comercialização de metais industriais, a cotação do alumínio é aproximadamente um terço da cotação do cobre. Sendo assim, o custo benefício do alumínio reforça as vantagens da sua utilização.

No barramento blindado, as tampas em alumínio (Figura 3b) utilizadas no sistema de barramento blindado possuem a função de aterrar o barramento e de condutor de proteção, também oferecendo blindagem eletromagnética e assim

eliminando as correntes de Foucault. Isto favorece a eliminação do aquecimento excessivo do invólucro, aumenta sua capacidade de condução de corrente e atenua-se as interferências eletromagnéticas causadas pelas correntes presentes nos condutores nos sistemas de comunicação (CASSIOLATO, 2018; CATTANI; VANNUCCI, 2013; WEG, 2018a).

No barramento blindado é importante que os processos de corrosão sejam evitados para garantir bom desempenho do sistema de distribuição de energia. Os metais, com exceção de ouro, platina, prata, mercúrio e cobre, apresentam-se na natureza na forma de óxidos, hidróxidos ou sais. Sendo estas suas formas mais estáveis termodinamicamente, assim, os metais tendem a reagir com o ambiente espontaneamente para retornar a forma de menor energia (GENTIL, 1982; RAMANATHAN, 1977). Portanto, a corrosão é um processo espontâneo que deve ser atenuado ou evitado. Este processo indesejável transforma materiais metálicos prejudicando sua durabilidade e desempenho. Pode-se considerar o processo de corrosão como reações de oxidação dos metais, sendo um modo de destruição do metal progredindo a partir da sua superfície, uma vez que os meios corrosivos mais frequentes são atmosfera, águas naturais, solo e produtos químicos (GENTIL, 1982; VIANA, 2015).

Sendo assim, faz-se necessário o uso de invólucros e revestimentos que ajudam a evitar que os materiais do barramento blindado sofram os efeitos da corrosão. Os invólucros dos barramentos blindados são revestidos com pintura a pó a base de epóxi ou poliéster, isto proporciona maior isolamento elétrica contra corpos estranhos e intemperismo (WEG, 2018a). A aplicação de camadas de tinta sobre materiais metálicos é o revestimento de mais fácil aplicação e mais econômico. Por isso, este é o método mais difundido para combate à corrosão por revestimentos (GENTIL, 1982).

As áreas de conexões dos barramentos blindados, conforme indicado na Figura 3c, são estanhadas para melhor condutibilidade sem geração de calor excessivo e sem corrosão galvânica entre as partes condutoras (WEG, 2018a). O revestimento com estanho é aplicável devido à sua moderada resistência à corrosão, que pode ocorrer em meios fortemente ácidos ou alcalinos. Além disso, o estanho é não-tóxico e seus produtos de corrosão não possuem atividade catalítica (RAMANATHAN, 1977). As conexões utilizadas entre os barramentos são de cobre com revestimento de prata (WEG, 2018a). Os revestimentos com metais nobres,

como a prata, são largamente utilizados em indústrias elétricas e eletrônicas em contatos e condutores, devido à suas propriedades condutoras e estabilidade (GENTIL, 1982; RAMANATHAN, 1977). O perfil “C” da chapa (Figura 3d) é constituído em aço galvanizado e pintura de acabamento, garantindo maior durabilidade e proteção mecânica (WEG, 2018a).

As conexões utilizadas no sistema de barramento blindado devem ser instaladas após a fixação dos trechos retos e possuem parâmetros específicos para distância de instalação e torque. A Figura 4 apresenta as conexões do sistema de barramento blindado e suas características. Existem dois tipos de conexão rápida: fixa e móvel. Para montagem, a conexão rápida deve ser inserida alinhada com as barras e perfis laterais, conforme Figura 4a, com a lateral da conexão para o lado externo do perfil da lateral do barramento (detalhe A). A porca cisalhante utilizada nas conexões possui indicação de torque, o que assegura o uso do torque adequado para fixação (Figura 4b). A junta de dilatação absorve os efeitos da dilatação das barras e deve ser utilizada em conjunto com as conexões do tipo móvel em trajetórias horizontais com mais de 30 metros contínuos (Figura 4c).

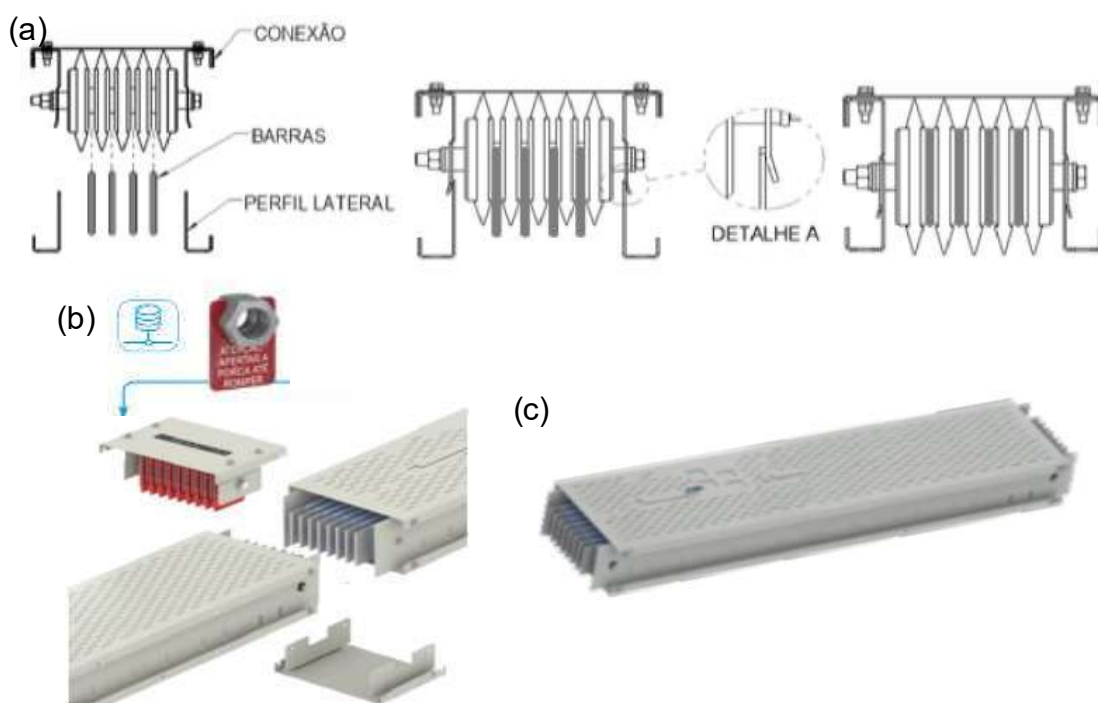


Figura 4 - Conexões do barramento blindado: (a) montagem; (b) conexão e porca cisalhante; (c) junta de dilatação.

Fonte: Adaptado WEG (2018)

O modelo de barramento blindado utilizado para análise neste trabalho é retirado de catálogos da empresa WEG, mas empresas como Megabarre, Beghim, Gimi, Flexmaster, Schneider Electric, Siemens, dentre outras, também possuem modelos comercializáveis que, por sua vez, possuem as mesmas características básicas diferindo apenas no range aplicável.

A instalação do barramento blindado é padronizada e projetada de maneira a evitar o desperdício de material. Além disso, o sistema de barramento blindado permite a alteração do layout com maior flexibilidade sem a perda de peças, pois estas podem ser rearranjadas e reaproveitadas. Na instalação as barras devem ser fixadas nas paredes rigorosamente alinhadas e niveladas, semelhante à montagem de eletrocalhas para cabeamentos. Caso sejam utilizados barramentos verticais e horizontais, primeiro devem ser fixados os trechos verticais. Industrialmente utiliza-se principalmente barramento na horizontal para distribuir a energia do quadro de proteção até a base da prumada (ABNT, 2011; FISCHMANN; BOMEISEL, 2000; GRAZIANO; KRUGER, 2018).

Os barramentos blindados são projetados sob medida, os trechos retos são fixados por suportes metálicos, mão-francesa, travessa ou suporte apropriado que por sua vez é parafusado ou chumbado na edificação. As distâncias adequadas entre os suportes são determinadas pelo fabricante. Além disso, não devem ser colocados suportes nos pontos de junção ou emendas. Caixa de redução são utilizadas nos pontos onde temos redução de corrente entre barramentos (Figura 5a). Para proteção do lado de menor corrente a caixa é fornecida com um disjuntor termomagnético. Caixas de derivação, fixas ou extraíveis, são utilizadas para distribuir a energia para os diferentes equipamentos. Essas caixas possuem dispositivos de proteção e manobra para que seja possível a interrupção da energia (desenergização) quando necessário. Estas podem ser conectadas no início ou no final do barramento blindado (ABNT, 2011; FISCHMANN; BOMEISEL, 2000; GRAZIANO; KRUGER, 2018). A caixa de derivação extraível (*plug-in*) são utilizadas nos trechos onde são necessários pontos de alimentação de cargas (Figura 5b). A caixa de derivação fixa é utilizada para derivações com corrente acima de 400 A, disponível de 500 a 1000 A com disjuntores em caixa moldada ou chaves seccionadoras rotativas com fusíveis (Figura 5c). A caixa de alimentação fixa sem proteção é utilizada para alimentação do barramento por cabos (Figura 5d), com modelos diferentes para cada faixa de corrente do barramento blindado (WEG, 2018b).

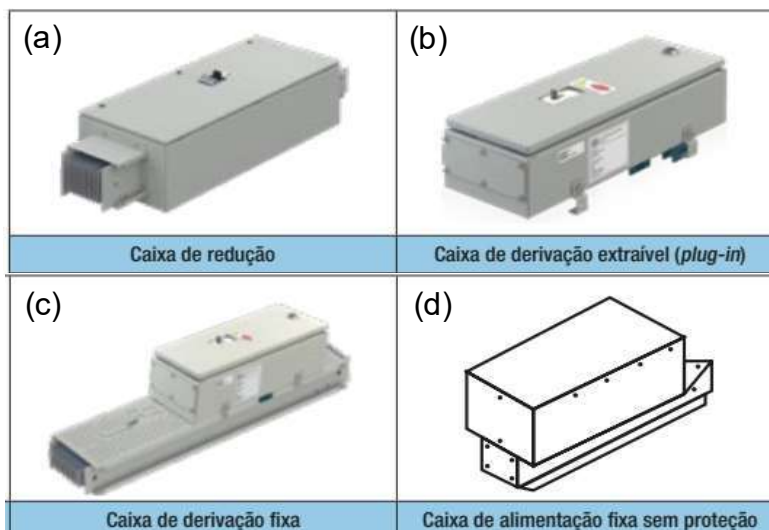


Figura 5 – (a) Caixa de redução; (b) caixa de derivação extraível.

Fonte: WEG (2018b)

Outros elementos também compõem, conforme necessidade, o sistema de barramento blindado, como por exemplo, cotovelos e tês. A Figura 6 apresenta peças de derivação para barramento blindado que permitem as mudanças direcionais para o sistema de barramento blindado em uma instalação. As curvas e tês permitem as mudanças direcionais horizontais e verticais, sendo que as curvas duplas permitem mudanças em ambas as direções. A flange de painel permite a conexão do barramento blindado nos painéis elétricos (WEG, 2018b).

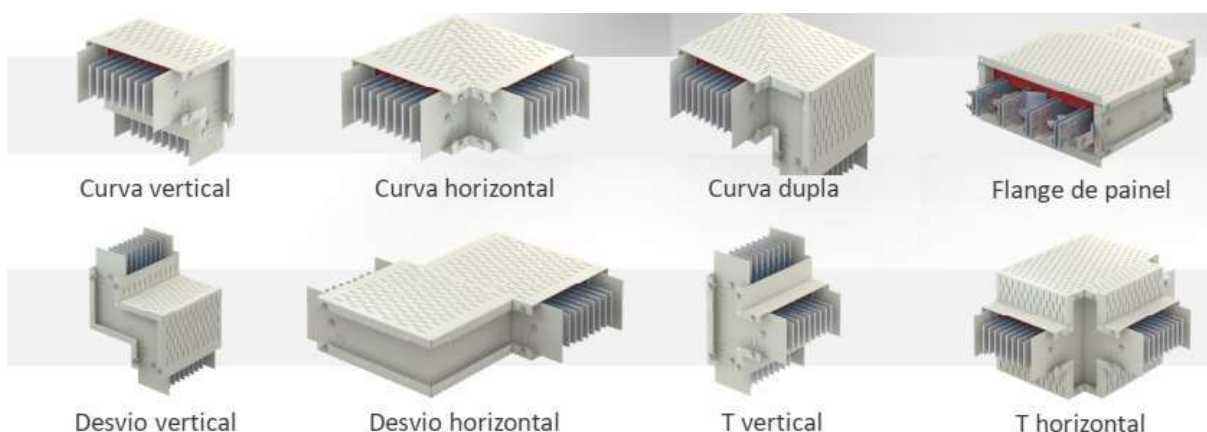


Figura 6 – Peças de conexão para barramento blindado

Fonte: WEG (2018b)

Comercialmente existem ainda barramento com as barras separadas ou coladas. As barras separadas podem utilizar o ar que passa entre elas como isolante, quando barras nuas, ou podem ser cobertas com material isolante. As barras coladas são recobertas com filmes plásticos ou resinas isolantes, pois estas estão praticamente encostadas entre si. O modelo estudado neste trabalho é composto por barras separadas utilizando ar como isolante (ABNT, 2011; FISCHMANN; BOMEISEL, 2000; GRAZIANO; KRUGER, 2018).

Para instalação do barramento blindado, a edificação deve estar livre de sujeiras de construção, visando evitar a contaminação deste por materiais que podem vir a danificar a isolação ou proteção do mesmo, comprometendo seu funcionamento. Comparativamente, para o barramento blindado o tempo de instalação pode ser reduzido em 80% com relação a instalação do sistema de cabeamento. Além disso, a manutenção requerida para o sistema de barramento blindado é menor e podem ser realizadas substituições apenas dos módulos com defeito. No caso de um defeito no cabo, todo o cabo deve ser trocado, mas no barramento apenas a seção com defeito é substituída. Consequentemente, os custos de mão de obra reduzem consideravelmente. O espaço requerido para instalação do barramento blindado também é consideravelmente menor em comparação com o espaço para a instalação com cabos condutores (FISCHMANN; BOMEISEL, 2000; GRAZIANO; KRUGER, 2018).

Com relação à segurança, em casos de incêndios e curtos-circuitos o barramento blindado não libera gases tóxicos ou fumaça, diferente do que acontece com cabos que tem a isolação polimérica. Além disso, as barreiras corta-fogo impedem a passagem de fogo e fumaça, para que o barramento blindado não funcione como propagador de chamas entre ambientes ou de fumaça (ABNT, 2004a; ABNT, 2004b; FISCHMANN; BOMEISEL, 2000; GRAZIANO; KRUGER, 2018). Nos barramentos do fabricante WEG a barreira corta-fogo oferece proteção passiva corta fogo e fumaça por até 240 minutos (Figura 7a). A barreira corta-fogo deve ser posicionada na linha mediana da parede. A Figura 7b representa o corte da barreira corta fogo (WEG, 2018b).

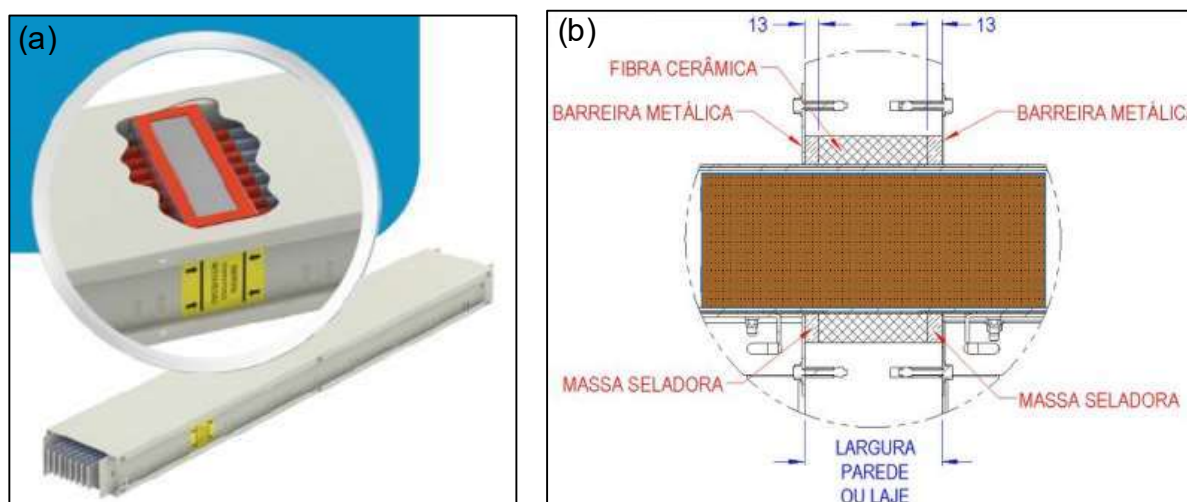


Figura 7 – Barreiras corta-fogo do barramento blindado

Fonte: WEG (2018b)

Com relação às correntes de curto-circuito, o barramento blindado suporta um maior tempo de exposição a altas correntes de curto-circuito, pois o mesmo é isolado a ar e não em contato com polímero. Essa mesma característica possibilita ao condutor maior troca de calor, evitando o superaquecimento do mesmo.

O grau de proteção mínimo exigido pela ABNT NBR 16019 (ABNT, 2011) é o IP31, no entanto, outros níveis de proteção podem ser necessários em função das condições ambientes existentes. O grau de proteção segundo NBR IEC 60529 (2004c) corresponde ao nível de proteção provido por um invólucro contra o acesso às partes perigosas, contra o ingresso de objetos sólidos estranhos e ingresso de água, verificado por meio de métodos de ensaios normalizados. O grau de proteção IP31 significa que o invólucro do barramento protege pessoas contra o acesso às partes perigosas manuseando ferramentas com diâmetro de 2,5 mm ou maior. E as partes condutoras internas do barramento contra corpos sólidos estranhos (\varnothing 2,5 mm). Além disso, as partes condutoras internas do barramento também estão protegidas contra gotas d'água caindo verticalmente, sendo assim, essas gotas não podem provocar efeitos prejudiciais ao funcionamento do sistema (ABNT, 2004c).

O grau de proteção IP54, também apresentado pelo fabricante WEG, significa que o invólucro do barramento protege pessoas contra o acesso às partes perigosas manuseando um fio de diâmetro de 1 mm ou maior. O barramento está protegido contra poeira, que não pode ingressar em quantidade significativa a ponto de interferir na operação do equipamento ou na sua segurança. E o invólucro protege o

barramento contra jatos projeção d'água, sendo assim, a água esguichada contra o invólucro em qualquer direção não pode provocar efeitos prejudiciais (ABNT, 2004c).

2.3 CAPACIDADE DE CONDUÇÃO DE CORRENTE

Para realizar uma comparação da capacidade de condução de corrente entre sistemas de cabos condutores e barramento blindado foram utilizados dados de catálogos dos fornecedores.

2.3.1 Capacidade de condução de corrente do barramento blindado

O Anexo A dispõe os dados de corrente nominal a temperatura ambiente de 35 °C para barramento blindado fornecido por catálogo do fabricante (WEG, 2018a). Nos diferentes modelos de barramento blindado (Anexo A), o grau de proteção do invólucro influencia diretamente na capacidade de condução de corrente do barramento. O menor grau de proteção, neste caso o IP31, possibilita uma maior condução de corrente devido a maior arrefecimento acarretado pela convecção de ar entre os condutores, permitida pelos orifícios presentes neste modelo. Consequentemente, no invólucro dos barramentos ventilados IP31 há maior troca de calor com o ambiente em relação aos barramentos não ventilados IP54. O barramento com grau de proteção IP54 pode ser comparado com maior fidelidade aos cabos condutores isolados e, por este motivo, a análise comparativa realizada será com esses modelos.

A posição de instalação dos barramentos é apresentada na trajetória horizontal, com barras na vertical ou com barras na horizontal, e na trajetória vertical. Este posicionamento dos barramentos influencia o arrefecimento dessas barras devido a sua geometria. O barramento na trajetória horizontal com barras posicionadas na vertical apresenta melhor troca de calor com o meio que aquelas posicionadas horizontalmente, devido a barreira que as barras na horizontal oferecem a circulação de ar. O barramento na trajetória vertical apresenta menor troca de calor ocasionado também pela dificuldade de circulação do ar para arrefecimento.

2.3.2 Capacidade de condução de corrente do cabeamento de alumínio

As correntes nominais utilizadas para os cabos condutores de alumínio foram obtidas da norma ABNT NBR 5410, conforme tabela disponibilizada no Anexo B (ABNT, 2004a). Os dados de condução de corrente para o condutor de alumínio são normatizados para uma temperatura ambiente de 30 °C. Para permitir uma comparação em condições operacionais equivalentes esses dados foram corrigidos para temperatura ambiente de 35 °C, uma vez que esta é utilizada para o sistema de barramento blindado. O fator de correção para temperatura de 35 °C e isolamento XLPE segundo a ABNT NBR 5410 é 0,96. A Tabela 1 apresenta os valores para capacidade de condução de corrente para condutores de alumínio a temperatura de 35 °C.

Tabela 1 – Capacidades de condução de corrente para condutores de alumínio em temperatura ambiente de 35 °C.

Seção nominal (mm ²)	Capacidade de condução de corrente (A)
16	68,16
25	89,28
35	111,36
50	134,40
70	171,84
95	208,32
120	240,96
150	277,44
185	316,80
240	373,44
300	429,12
400	514,56
500	592,32

Nota: Método de instalação condutores isolados ou cabos unipolares em eletrocalha sobre parede em percurso horizontal ou vertical (método de referência B1) e temperatura de operação 90°C.

Fonte: Adaptado de NBR 5410 (ABNT, 2004a).

Para comparar a capacidade de condução de corrente dos cabos de alumínio com os modelos de barramento blindado (Anexo A) foram realizados cálculos da utilização desses condutores em paralelo. A associação em paralelo foi necessária

devido a capacidade de condução de corrente dos cabos de alumínio comerciais não atingirem a capacidade de condução de corrente dos modelos de barramento blindado abordados neste trabalho. Os condutores em paralelo devem ser de mesma seção nominal, mesmo comprimento e mesma maneira de instalação para assim apresentarem impedâncias e capacidades de condução de corrente semelhantes. Arranjos mais complexos passam pelos casos de divisão desigual de corrente entre os condutores e de corrente de falta fluindo por múltiplos percursos (ABNT, 2004a).

Os valores das associações em paralelo de condutores de alumínio e sua relação com os modelos de barramento blindado, conforme capacidade de condução de corrente, são apresentados na Tabela 2. Para esta comparação, foram utilizados condutores com seção transversal máxima de 120 mm^2 porque possuem a máxima seção nominal de condutores comumente comercializados e proporcionam o número mínimo de cabos em paralelo para atingir magnitude de corrente similar aos modelos de barramento blindado. Além disso, na maioria das concessionárias, como por exemplo a COPEL (Companhia Paranaense de Energia), são ensaiados e normatizados cabos de seção máxima de 120 mm^2 para baixa tensão (COPEL, 2012).

Observa-se na Tabela 2 que o modelo de barramento com menor capacidade de condução de corrente (700 A) é equivalente a no mínimo a associação em paralelo de três condutores de alumínio de seção nominal de 120 mm^2 . O barramento com capacidade de condução de corrente de 3450 A mostra-se equivalente a utilização de 14 condutores de alumínio de seção nominal de 120 mm^2 associados em paralelo. Portanto, o uso de barramento blindado permite uma condução de corrente significativamente maior que o cabeamento, sendo necessário um número muito maior de cabos para a mesma capacidade condução de corrente. Dessa maneira, o número de barramento blindado necessário para a mesma condução de corrente é menor que de cabos de alumínio.

Tabela 2 – Comparação da capacidade de condução de corrente dos modelos de barramento blindado e associações de cabos de alumínio

Modelo Barramento	Capacidade de condução de corrente do barramento (A)	Seção nominal do condutor (mm ²)	Número de condutores em paralelo	Capacidade de condução de corrente do conjunto de condutores (A)
BWW01-CA700N-54	700	70	4	716
		95	4	868
		120	3	753
BWW01-CA800M-54	800	70	5	895
		95	4	868
		120	4	1004
BWW01-CA1000S-54	1000	70	6	1074
		95	5	1085
		120	4	1004
BWW01-CA1250E-54 BWW01-CA1250H-54	1250	70	7	1253
		95	6	1302
		120	5	1255
BWW01-CA1500H-54	1500	70	9	1611
		95	7	1519
		120	6	1506
BWW01-CA2000H-54	2000	70	12	2148
		95	10	2170
		120	8	2008
BWW01-CA-2800H-54	2800	70	16	2864
		95	13	2821
		120	12	3012
BWW01-CA3450H-54	3450	70	20	3580
		95	17	3689
		120	14	3514

Nota: Método de instalação condutores isolados ou cabos unipolares em eletrocalha sobre parede em percurso horizontal ou vertical (método de referência B1) e temperatura de operação 90°C. Cada eletrocalha contendo um cabo quadruplex multiplexado (três cabos fase e um neutro).

Fonte: Adaptado de NBR 5410 (ABNT, 2004a); Adaptado de WEG (2018).

Portanto, com relação a capacidade de condução de corrente o sistema de barramento blindado pode substituir os condutores de alumínio. Tratando-se de correntes de 800 A, ou maiores, obrigatoriamente a entrada de energia precisa ser feita em média tensão. Nestes casos, o barramento apresenta vantagens na alimentação de potências maiores que demandem correntes acima de 240 A,

considerando um único cabo de alumínio por fase. Pois, para correntes maiores são necessários condutores de seções nominais não usuais. Assim, é preciso utilizar condutores de seções nominais menores em paralelo, todos com mesma seção transversal, para atingir a capacidade de corrente requerida. Dessa forma, o número de condutores acaba multiplicando-se, por consequência o número de eletrodutos ou bandejas de instalação, aumentando os custos, tempo de instalação e espaço ocupado.

2.4 QUEDA DE TENSÃO

Segundo a ABNT NBR 5410 (ABNT, 2004a) a queda de tensão é um dos critérios adotados para o dimensionamento de circuitos elétricos de baixa tensão. De modo que, em qualquer ponto de utilização da instalação, não deve ser superior aos seguintes valores, dados em relação ao valor da tensão nominal da instalação (ABNT, 2004a):

- a) 7%, calculados a partir dos terminais secundários do transformador MT/BT, no caso de transformador de propriedade da(s) unidade(s) consumidora(s);
- b) 7%, calculados a partir dos terminais secundários do transformador MT/BT da empresa distribuidora de eletricidade, quando o ponto de entrega for aí localizado;
- c) 5%, calculados a partir do ponto de entrega, nos demais casos de ponto de entrega com fornecimento em tensão secundária de distribuição;
- d) 7%, calculado a partir dos terminais de saída do gerador, no caso de grupo gerador próprio.

Notas

1 Estes limites de queda de tensão são válidos quando a tensão nominal dos equipamentos de utilização previstos for coincidente com a tensão nominal de instalação.

2 Ver definições de “ponto de entrega” (3.4.3).

3 Nos casos das alíneas a), b) e d), quando as linhas principais da instalação tiverem um comprimento superior a 100 m, as quedas de tensão podem ser aumentadas de 0,005% por metro de linha superior a 100 m, sem que, no entanto, essa suplementação seja superior a 0,5%.

Além disso, a ABNT NBR 5410 (ABNT, 2004a) determina que em nenhum caso a queda de tensão nos circuitos terminais pode ser superior a 4% e quedas de tensão maiores que as indicadas são permitidas para equipamentos de corrente de partida elevada, durante período de partida desde que dentro dos limites permitidos

em suas normas respectivas. Para o cálculo de queda de tensão num circuito deve ser utilizada a corrente de projeto do circuito (ABNT, 2004a).

A impedância do condutor (no cabo ou barramento) é importante, principalmente para a determinação de queda de tensão e corrente de curto-circuito. As principais características elétricas do circuito equivalente correspondente ao condutor são representadas pela impedância (Z).

A impedância está relacionada com a dissipação de energia e corrente de curto-circuito da seguinte maneira: quanto maior o valor de impedância obtido, maior a dissipação de energia e menor a corrente de curto-circuito. Este comportamento pode ser explicado pela primeira lei de Ohm (JOHNSON et al., 1994).

Nota-se que para tensão constante, como a de alimentação da rede elétrica, a impedância e a corrente são inversamente proporcionais. Sendo que, se analisada uma impedância tendendo a zero, a corrente tende ao infinito e uma impedância tendendo ao infinito, a corrente tende a zero (JOHNSON et al., 1994).

Os dados de impedância (Z), resistência em corrente alternada (R_{ca}) e reatância indutiva (X_L) para os modelos de barramento blindado estudados neste trabalho são apresentados no Anexo A, conforme catálogo fornecido pelo fabricante (WEG, 2018a). Para os condutores de alumínio esses valores foram calculados segundo método indicado pelo fabricante (GENERAL CABLE, 2018).

2.4.1 Impedância do cabo de alumínio

Para os cabos de alumínio os dados utilizados no cálculo de impedância, e subsequentes, são fornecidos em catálogo do fabricante disponibilizado no Anexo C. O valor da resistência em corrente contínua do condutor (R_{cct}) é disponibilizado à temperatura de 20 °C pelo catálogo. Primeiramente, esse valor foi corrigido para a temperatura de operação do condutor, sendo esta 90 °C. Esta correção foi realizada utilizando a equação a seguir (GENERAL CABLE, 2018):

$$R_{cct} = R_{cc20}[1 + \alpha_{20}(t - 20)] \quad (1)$$

Onde,

R_{cct} = resistência em corrente contínua do condutor à temperatura de operação (Ω/km);

R_{cc20} = resistência em corrente contínua a 20 °C do condutor (Ω/km);

α_{20} = 0,00403 para o alumínio;

t = temperatura do condutor (°C);

Em seguida, para determinar o valor da resistência do condutor em corrente alternada (R_{ca}) aplicou-se a equação 2 (GENERAL CABLE, 2018):

$$R_{ca} = R_{cct} (1 + Y_s + Y_p) \quad (2)$$

Onde,

R_{ca} = resistência em corrente alternada do condutor (Ω/km);

R_{cct} = resistência em corrente contínua do condutor à temperatura de operação (Ω/km);

Y_s = fator devido ao efeito peculiar;

Y_p = fator devido ao efeito de proximidade;

O fator devido ao efeito peculiar (Y_s) é obtido conforme a seguinte equação a seguir (GENERAL CABLE, 2018):

$$Y_s = \frac{X_s^4}{192 + 0,8X_s^4} \quad (3)$$

Sendo, X_s^2 definido como (GENERAL CABLE, 2018):

$$X_s^2 = \frac{8\pi f}{R_{cct}} 10^{-4} K_s \quad (4)$$

Onde,

R_{cct} = resistência em corrente contínua do condutor à temperatura de operação (Ω/km);

f = frequência (Hz);

$K_s = 1$, para cabos com condutores de seção circular isolamento sólida.

Para os cálculos utilizou-se a frequência (f) padrão da rede elétrica brasileira: 60 Hz. O cálculo para cabos unipolares ou cabos com três condutores é realizado utilizando-se a equação 5 (GENERAL CABLE, 2018):

$$Y_p = \frac{X_p^4}{192 + 0,8X_p^4} \left(\frac{d_c}{S}\right)^2 \left[0,312 \left(\frac{dc}{S}\right)^2 + \frac{1,18}{\frac{X_p^4}{192 + 0,8X_p^4} + 0,27} \right] \quad (5)$$

Sendo, X_p^2 definido como (GENERAL CABLE, 2018):

$$X_p^2 = \frac{8\pi f}{R_{cct}} 10^{-4} K_p \quad (6)$$

Onde,

Y_p = fator devido ao efeito de proximidade;

d_c = diâmetro do condutor (mm);

S = distância entre eixos dos condutores (mm);

R_{cct} = resistência em corrente contínua do condutor à temperatura de operação (Ω/km);

f = frequência (Hz);

$K_p = 1$, para cabos com condutores de seção circular isolamento sólida.

A reatância indutiva (X_L) para os condutores de alumínio foi obtida calculando-se a indutância conforme a fórmula fornecida pelo fabricante (GENERAL CABLE, 2018):

$$L = K_L + 0,46 \log \frac{2DMG}{d_c} \quad (7)$$

Onde,

L = indutância (mH/km);

K_L = fator que depende do número de fios elementares que formam o condutor (Anexo D);

DMG = distância média geométrica (mm);

D_c = diâmetro do condutor (mm);

A distância média geométrica (DMG) foi utilizada conforme padrão fornecido pelo catálogo do fabricante e geometria apresentada na Figura 8.

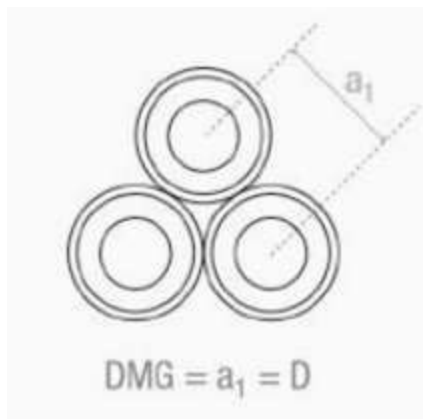


Figura 8 – Distância média geométrica para cálculo de indutância. D = diâmetro externo do cabo (mm)

Fonte: GENERAL CABLE (2018).

Os valores obtidos na equação 7 foram utilizados para cálculo da reatância indutiva conforme a equação 8 (GENERAL CABLE, 2018):

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \cdot 10^{-3} \quad (8)$$

Onde,

X_L = reatância indutiva (Ω/km);

f = frequência do sistema (Hz);

L = indutância (mH/km).

Uma vez calculados os valores de resistência do condutor em corrente alternada (R_{ca}) e reatância indutiva (X_L), utilizou-se esses dados para o cálculo de impedância (Z) dos condutores de alumínio selecionados. O fator de potência utilizado ($\cos \phi$) é de 0,92, conforme estabelecido pela NTC 901111 para barramentos blindados (COPEL, 2014). Este valor foi utilizado para os cálculos de impedância dos cabos condutores para comparação em características operacionais semelhantes ao barramento blindado. Os valores obtidos de impedância (Z), resistência em corrente alternada (R_{ca}) e reatância indutiva (X_L) para os condutores em alumínio estão dispostos na Tabela 3. Os dados do fabricante de condutores de alumínio foram fornecidos em Ω/km e do barramento blindado em $\mu\Omega/\text{m}$, assim, as conversões necessárias para comparação desses valores foram realizadas.

Tabela 3 – Parâmetros dos cabos de alumínio em regime permanente

Seção nominal (mm ²)	R _{ca} (Ω/km)	X _L (Ω/km)	K _L	DMG (mm)	Diâmetro do condutor (mm)
16	2,449	0,1164	0,064	8,0	4,7
25	1,539	0,1098	0,064	9,2	5,9
35	1,103	0,1058	0,064	10,2	6,9
50	0,821	0,1033	0,0554	12,1	8,1
70	0,565	0,0991	0,0554	13,7	9,7
95	0,411	0,0964	0,0554	15,4	11,3
120	0,322	0,0973	0,0528	17,6	12,6
150	0,258	0,0947	0,0528	18,9	14,0
185	0,207	0,0893	0,0528	20,1	16,0
240	0,157	0,0901	0,0515	23	18,0
300	0,132	0,0903	0,0515	26,4	20,6
400	0,095	0,0884	0,0515	29,1	23,3
500	0,083	0,0865	0,0515	32,3	26,5

Nota: Método de instalação condutores isolados ou cabos unipolares em eletrocalha sobre parede em percurso horizontal ou vertical (método de referência B1) e temperatura de operação 90°C. Cada eletrocalha contendo um cabo quadruplex multiplexado (três cabos fase e um neutro).

Fonte: Autoria própria.

2.4.2 Cálculo da queda de tensão no cabo de alumínio

Para o cálculo da queda de tensão, utiliza-se as equações obtidas a partir da primeira Lei de Ohm (JOHNSON et al., 1994):

$$\vec{U} = \vec{Z} \cdot \vec{I} \quad (9)$$

Sendo,

U = tensão (V);

Z = impedância (Ω);

I = corrente (A).

Para facilitar, utiliza-se a equação 10 para cálculo da queda de tensão percentual (MAMEDE FILHO, 2010). Nesta fórmula são considerados o número de

cabos em paralelo por fase (N_{cp}) e a corrente total desses cabos. Transformando a queda de tensão unitária para queda de tensão percentual a equação é dividida pela tensão de linha (V_L).

$$\Delta V_c = \frac{\sqrt{3} \cdot I_c \cdot L_c \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \sin \varphi)}{10 \cdot N_{cp} \cdot V_L} \quad (10)$$

Sendo,

ΔV_c = queda de tensão máxima admitida em projeto (%);

N_{cp} = número de condutores em paralelo por fase;

I_c = corrente do circuito (A);

L_c = comprimento do circuito (km);

R_{ca} = resistência do condutor (Ω/km);

X_L = reatância do condutor (Ω/km);

φ = ângulo de defasagem entre corrente e tensão;

V_L = tensão de linha (V).

Pode-se exemplificar de forma elementar pela lei de Kirchhoff das tensões (LKT), a qual estabelece que a soma algébrica das tensões ao longo de qualquer percurso fechado é zero (JOHNSON et al., 1994):

$$\sum_{n=1}^N v_n = 0$$

(11)

Onde v_n é a enésima tensão no laço de N tensões.

Para elucidar esta análise utiliza-se o circuito representado na Figura 9, no qual foi considerada uma tensão de 1000 V, impedância do condutor de 400 m Ω e impedância da carga de 600 m Ω . Esse circuito é utilizado para exemplificar a queda de tensão no condutor e a tensão entregue a carga. Para simulação do circuito utilizou-se software online *easyeda* (EASYEDA, 2018).

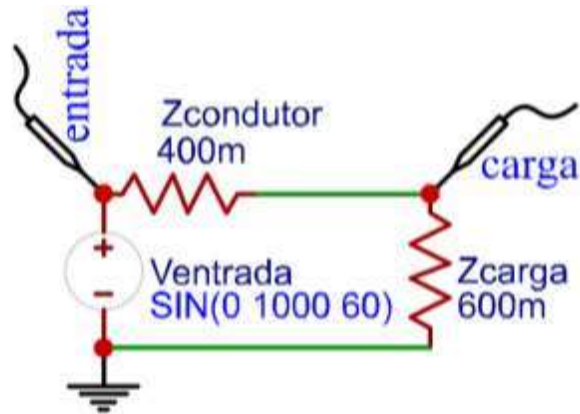


Figura 9 – Circuito elétrico da queda de tensão
Fonte: Autoria própria.

A impedância em série (Z_s) do circuito é calculada conforme fórmula a seguir (JOHNSON et al., 1994):

$$Z_s = Z_1 + Z_2 \quad (12)$$

Onde,

Z_s é a impedância em série (Ω);

Z_1 é a impedância do condutor (Ω);

Z_2 é a impedância da carga (Ω).

Sendo assim, para o circuito apresentado na Figura 9, o desenvolvimento do cálculo de queda de tensão é realizado da seguinte maneira:

$$R_s = 400 \text{ m}\Omega + 600 \text{ m}\Omega = 1 \Omega$$

Aplicando-se a primeira lei de Ohm (equação 9), têm-se:

$$I = \frac{1000 \text{ V}}{1 \Omega} = 1000 \text{ A}$$

Dessa forma, têm-se a corrente que percorre o circuito e, assim, pode-se calcular as tensões nas duas impedâncias, conforme segue:

$$V_{condutor} = 1000 \cdot 0,4 = 400 \text{ V}$$

$$V_{carga} = 1000 \cdot 0,6 = 600 \text{ V}$$

$$V_{entrada} = 400 + 600 = 1000 \text{ V}$$

$$V_{\%} = \frac{V_{condutor}}{V_{entrada}} \cdot 100 = \frac{400}{1000} \cdot 100 = 40\%$$

A queda de tensão também pode ser analisada no gráfico a seguir:

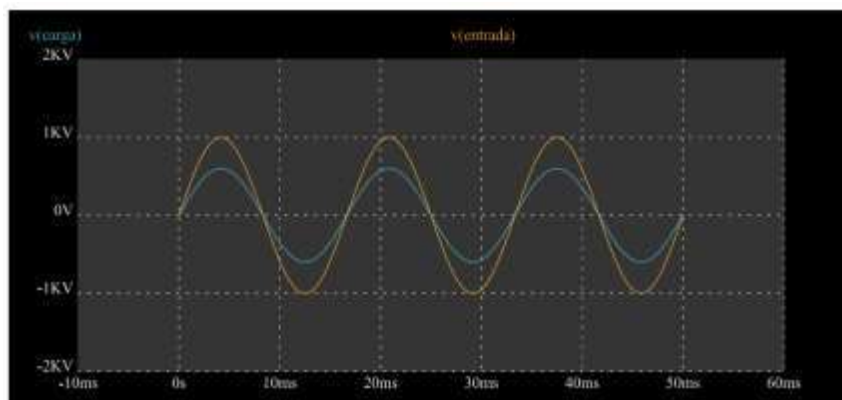


Figura 10 – Gráfico de tensão versus tempo

Fonte: Autoria própria.

Para os cálculos de queda de tensão, utilizando a equação 10, foram considerados os valores de capacidade de condução de corrente, R_{ca} e X_L para cabos de alumínio e barramento blindado, conforme apresentados anteriormente. Considerou-se um fator de potência de 0,92, que é o mínimo permitido para instalações industriais pela legislação vigente (ANEEL, 2010; COPEL, 2014). O número de condutores em paralelo por fases foi considerado 1.

A queda de tensão usualmente utilizada para sistemas distribuição de energia em baixa tensão é 2%. Segundo NTC 901111 (COPEL, 2014) a máxima queda de tensão admissível no trecho entre o ponto de entrega e o ponto de medição, considerando carga concentrada trecho a trecho, deverá ser de 2%. Dessa forma, fixou-se esse valor para queda de tensão e obteve-se a distância máxima em metros para 2% de queda de tensão.

Observa-se na Figura 11 que a relação de distância com a queda de tensão para os condutores de alumínio mantém-se aproximadamente constante em todo o range analisado. Este comportamento é observado porque as áreas das seções transversais dos condutores são próximas, ou iguais, e a capacidade máxima de condução de corrente por condutor ser sempre a mesma.

Todos os modelos de barramento blindado analisados são não ventilados e possuem a mesma capacidade de corrente devido as mesmas características de arrefecimento, conseqüentemente, apresentam também as mesmas características

de queda de tensão. Sendo assim, a forma de instalação não influi na queda de tensão e na capacidade de condução de corrente.

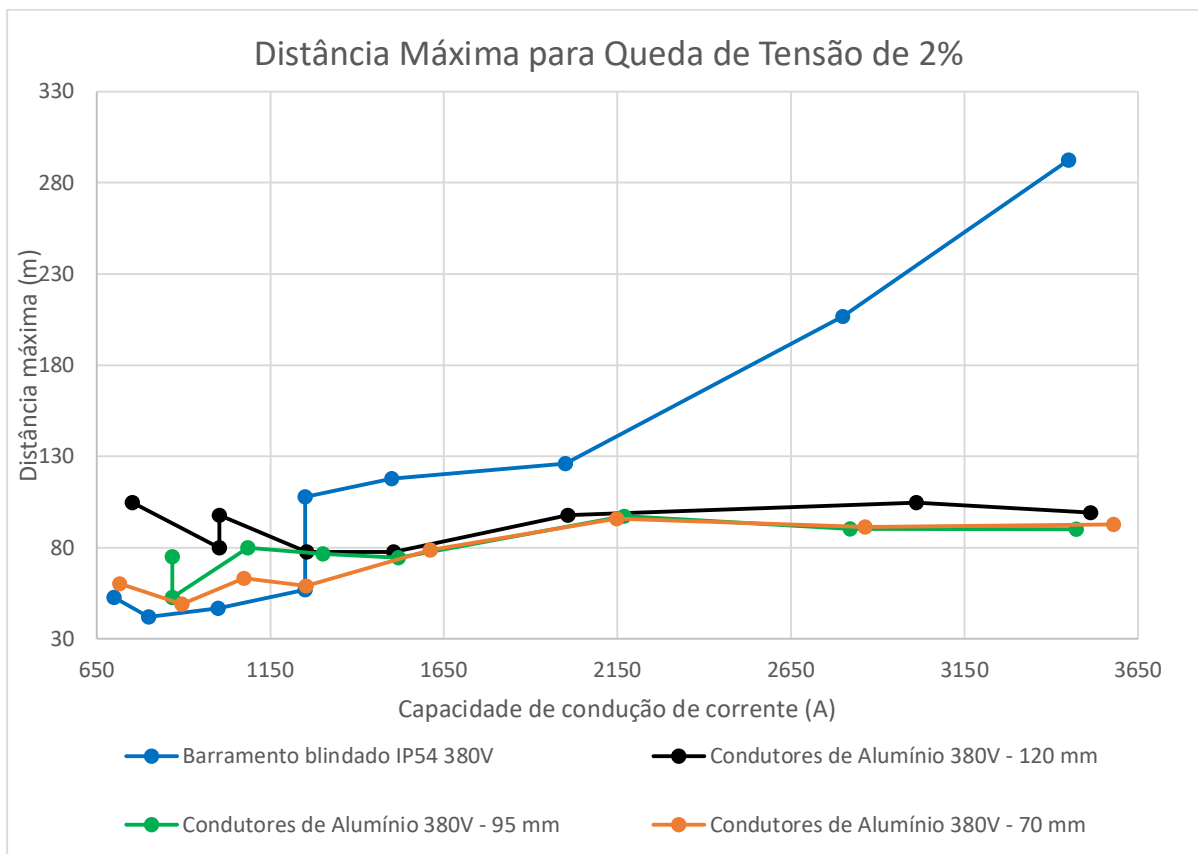


Figura 11 - Comparação da distância máxima para 2% de queda de tensão para 380 V entre condutores de alumínio e barramentos blindados

Fonte: Autoria própria.

Os valores de distância máxima em metros para 2% de queda de tensão em 380 V são comparados entre modelos de barramentos blindados e as associações de cabos equivalentes na Tabela 4. Observa-se menores quedas de tensão para os modelos de barramento blindado com capacidade de condução de corrente até 1250 A. A partir da capacidade de condução de corrente de 1250 A, a distância máxima para queda de tensão de 2% do barramento blindado é maior que a distância máxima para os condutores de alumínio. Portanto, quanto maior a potência conduzida, mais vantajoso o barramento blindado com relação a queda de tensão.

Tabela 4 – Comparação da distância máxima em metros para 2% de queda de tensão em 380 V dos modelos de barramento blindado e associações de cabos de alumínio

Corrente do circuito - I _c (A)	Modelo Barramento	Distância (m)	Seção nominal (mm ²)	Número de condutores em paralelo	Distância (m)
700	BWW01-CA700N-54	52,8	70	4	60,25
			95	4	75,04
			120	3	104,77
800	BWW01-CA800M-54	42,1	70	5	49,11
			95	4	52,72
			120	4	79,92
1000	BWW01-CA1000S-54	46,7	70	6	63,26
			95	5	79,92
			120	4	97,79
1250	BWW01-CA1250E-54 BWW01-CA1250H-54	57,0 107,9	70	7	59,05
			95	6	76,73
			120	5	77,74
1500	BWW01-CA1500H-54	117,9	70	9	78,79
			95	7	74,60
			120	6	77,74
2000	BWW01-CA2000H-54	126,0	70	12	95,91
			95	10	97,18
			120	8	97,79
2800	BWW01-CA-2800H-54	206,7	70	16	91,34
			95	13	90,24
			120	12	104,77
3450	BWW01-CA3450H-54	292,3	70	20	92,67
			95	17	90,13
			120	14	99,20

Nota: Método de instalação condutores isolados ou cabos unipolares em eletrocalha sobre parede em percurso horizontal ou vertical (método de referência B1) e temperatura de operação 90°C. Cada eletrocalha contendo um cabo quadruplex multiplexado (três cabos fase e um neutro).

Fonte: Adaptado de WEG (2018).

2.5 CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

A corrente suportável de curto-circuito é um dos critérios estabelecidos por normas na realização de projetos elétricos, essa corrente é relevante principalmente

para dimensionamento das proteções para que não ocorra a degradação da isolação do condutor. Para o barramento blindado, os valores suportados de corrente de curto-circuito são fornecidos pelo fabricante para um tempo de 1 segundo. Sendo assim, a comparação entre o barramento blindado e o condutor de alumínio foi realizada com base no valor máximo da corrente de curto-circuito simétrica para o tempo de 1 segundo. A corrente de curto-circuito é aquela que flui através do ponto de defeito, causado pela redução brusca da impedância do sistema, sendo uma corrente elétrica acima da nominal do circuito.

Os valores das correntes de curto-circuito são baseados no conhecimento das impedâncias, desde o ponto de defeito até a fonte geradora. Estas correntes têm valores de grande intensidade, mas duração de frações de segundos. Além disso, o curto-circuito em sistemas elétricos pode resultar em grandes danos, sendo uma das principais causas de incêndios em ambientes residenciais e industriais. Os três principais tipos de curto-circuito são: curto-circuito trifásico, onde as tensões nas três fases se anulam no ponto de defeito e geralmente possuem maior valor; curto-circuito bifásico, onde há o contato de duas fases; curto-circuito fase terra, que geralmente possui a menor intensidade e acontece quando há o contato de uma ou mais fases com terra (MAMEDE FILHO, 2010).

As correntes de curto-circuito são classificadas da seguinte maneira, de acordo com sua posição em relação ao eixo dos tempos (MAMEDE FILHO, 2010):

- a) Corrente simétrica de curto-circuito, com formação do componente senoidal da corrente simetricamente em relação ao eixo dos tempos, característica de correntes de curto-circuito permanente. Utilizada nos cálculos para determinar capacidade de suportar os efeitos térmicos correspondentes, uma vez que esta corrente se estabelece no sistema por longo período;
- b) Corrente assimétrica de curto-circuito, com componente senoidal da corrente formada de maneira assimétrica em relação ao eixo dos tempos. Neste caso a corrente pode ser: parcialmente assimétrica; totalmente assimétrica; inicialmente assimétrica (nos primeiros instantes de ocorrência do defeito) e posteriormente simétrica (devido aos efeitos atenuantes).

2.5.1 Corrente de curto-circuito no cabo de alumínio

A corrente de curto-circuito simétrica nos cabamentos de alumínio foi calculada utilizando a integral de Joule (ABNT, 2004a):

$$\int_0^t i_{cc}^2 dt \leq k^2 S^2 \quad (13)$$

Onde,

t = tempo de duração do curto-circuito (s);

i_{cc} = corrente de curto-circuito (A);

k = valor tabelado pela norma;

S = seção do condutor (mm²).

A integral de Joule ($\int_0^t i^2 dt$) representa a energia dissipada no condutor. Para curtos-circuitos de qualquer duração em que a assimetria da corrente não seja significativa, e para curtos-circuitos assimétricos de duração $0,1 \text{ s} \leq t \leq 5 \text{ s}$, temos a seguinte expressão:

$$I_{cc}^2 \cdot t \leq k^2 \cdot S^2 \quad (14)$$

Onde,

I_{cc} = corrente de curto-circuito presumida simétrica (A), valor eficaz;

t = tempo de duração do curto circuito (s);

S = seção do condutor (mm²).

Assim,

$$I_{cc} \leq N_{cp} \cdot \sqrt{\frac{k^2 \cdot S^2}{t}} \quad (15)$$

Onde,

I_{cc} = corrente de curto-circuito presumida simétrica (A), valor eficaz;

t = tempo de duração do curto circuito (s);

S = seção do condutor (mm^2).

N_{cp} = número de condutores em paralelo por fase.

O valor de k para condutores de alumínio com isolação do condutor em XLPE segundo NBR 5410 é de 94 (ABNT, 2004a). Para o barramento blindado, os valores suportados de corrente de curto-circuito são fornecidos pelo fabricante para um tempo de 1 segundo. Portanto, foram realizados cálculos para obter os valores máximos de corrente de curto-circuito quando o tempo é de 1 segundo. Permitindo assim, a comparação das condições de curto-circuito no barramento blindado com as calculadas para os cabeamentos de alumínio.

O barramento blindado possui tempo padrão de um segundo, pois os ensaios de corrente de curto-circuito nos laboratórios da empresa são desenvolvidos com valores máximos de 65 kA durante um segundo (SOMAVILLA; LINDNER; AGUIAR, 2012). A Figura 12 apresenta a comparação entre os valores máximos de corrente de curto-circuito para barramentos blindados e cabeamentos de alumínio, utilizando tempo padronizado de um segundo. Observa-se para os cabeamentos um aumento aproximadamente linear para a corrente de curto-circuito com o aumento da capacidade de condução de corrente. Para os modelos de barramento blindado nota-se um aumento até valores de corrente de curto-circuito de 65000 A. Isso se deve a limitação do laboratório de ensaios desse fabricante de barramentos blindados, que possui certificações para ensaios até esse limite (SOMAVILLA; LINDNER; AGUIAR, 2012).

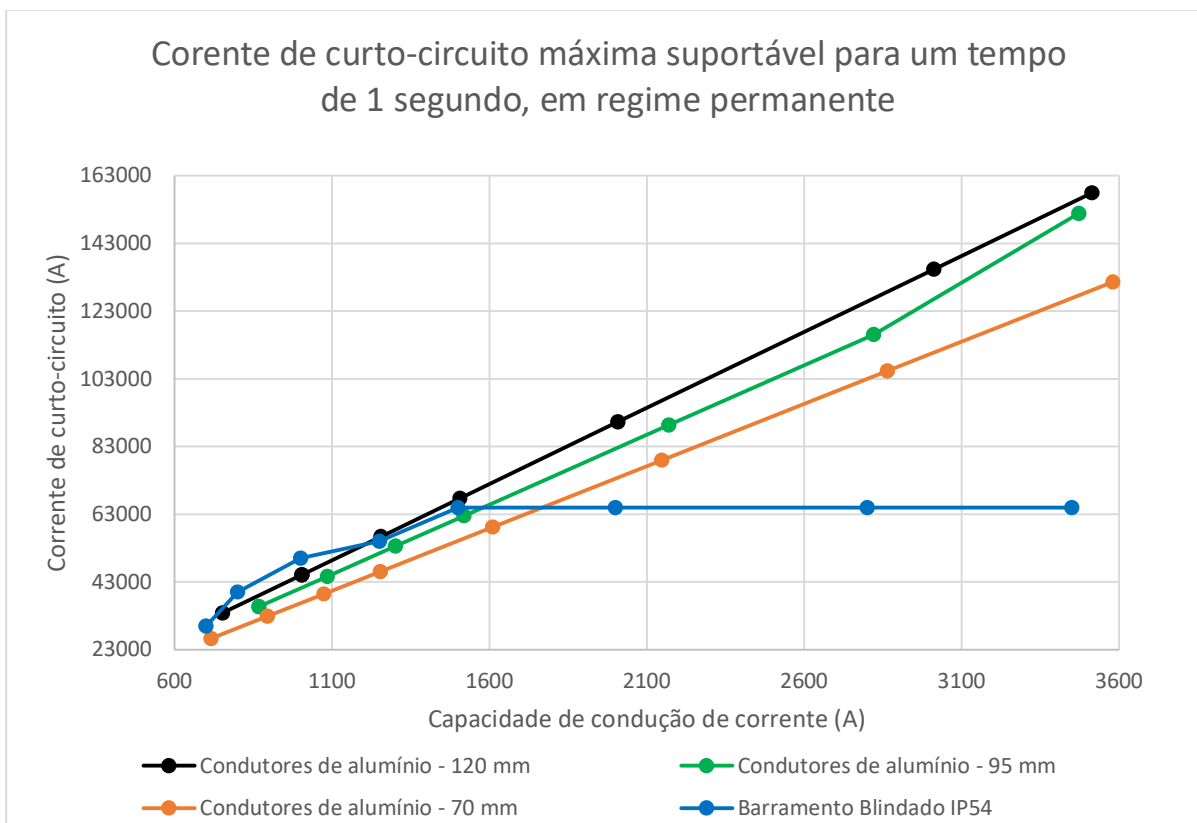


Figura 12 – Corrente de curto-circuito máxima suportável para um tempo de 1 segundo, em regime permanente

Fonte: Autoria própria.

As correntes de curto-circuito dos cabamentos de alumínio apresentaram-se similares ao barramento blindado até corrente de 65 kA. Caso houvesse a possibilidade de realizar ensaios com valores de corrente de curto-circuito maiores, provavelmente a tendência acompanharia a dos cabamentos, com aumento acima de 65 kA. Portanto, as correntes de curto-circuito suportáveis no tempo de 1 segundo podem ser consideradas equivalentes em ambos os casos.

Tabela 5 – Comparação da corrente de curto-circuito dos modelos de barramento blindado e associações de cabos de alumínio para tempo de 1 segundo

Capacidade de condução de corrente	Modelo Barramento	Icc do barramento blindado (kA)	Seção nominal (mm ²)	Número de condutores em paralelo	Icc dos cabos condutores (kA)
700	BWW01-CA700N-54	30	70	4	26,32
			95	4	35,72
			120	3	33,84
800	BWW01-CA800M-54	40	70	5	32,90
			95	4	35,72
			120	4	45,12
1000	BWW01-CA1000S-54	50	70	6	39,48
			95	5	44,65
			120	4	45,12
1250	BWW01-CA1250E-54 BWW01-CA1250H-54	55	70	7	46,06
			95	6	53,58
			120	5	56,40
1500	BWW01-CA1500H-54	65	70	9	59,22
			95	7	62,51
			120	6	67,68
2000	BWW01-CA2000H-54	65	70	12	78,96
			95	10	89,30
			120	8	90,24
2800	BWW01-CA-2800H-54	65	70	16	105,28
			95	13	116,09
			120	12	135,36
3450	BWW01-CA3450H-54	65	70	20	131,60
			95	17	151,81
			120	14	157,92

Nota: Método de instalação condutores isolados ou cabos unipolares em eletrocalha sobre parede em percurso horizontal ou vertical (método de referência B1) e temperatura de operação 90°C. Cada eletrocalha contendo um cabo quadruplex multiplexado (três cabos fase e um neutro). Tempo de curto-circuito para barramentos e cabos de 1 segundo.

Fonte: Adaptado de WEG (2018).

2.6 ANÁLISE FINANCEIRA

Na análise financeira foi desenvolvido um estudo de caso com circuito de 100 metros de comprimento com uma capacidade de corrente de 2000 A. Para o sistema de cabeamento foram considerados cabos de alumínio de 70, 95 e 120 mm² de seção transversal agrupados, conforme a seção transversal. Supondo diferentes casos de instalação, foram analisados agrupamentos de duas maneiras:

- a) Eletrocalhas individuais de 50 x 50 mm para cada grupo de cabos quadruplex, com objetivo de minimizar o número de cabos em paralelo necessários, pois, neste caso não faz-se necessário a utilização do fator de agrupamento;
- b) Cabos quadruplex agrupados em eletrocalha de 400 x 100 mm, com objetivo de minimizar o uso de eletrocalhas agrupando o máximo de circuitos em única eletrocalha. Devido ao fator de correção de agrupamento, o número de cabos neste caso é maior.

Todos os sistemas são compostos por cabos de mesma seção transversal associados em paralelo. Os custos totais de todos os sistemas de cabeamento estudados foram comparados com barramento blindado com capacidade de condução de corrente de 2000 A.

2.6.1 Dimensionamento

Primeiramente foram analisados os casos com instalação em eletrocalhas individuais, nos quais todos os conjuntos de condutores, formados por três cabos fase e um neutro, são alocados em uma eletrocalha para evitar o uso de fatores de agrupamento. Vale lembrar que se utilizam condutores de seções transversais equivalentes para que a distribuição de corrente dos mesmos seja homogênea e para simplificar os estudos de proteção do circuito. Para determinar a capacidade de condução de corrente, nesses casos, foram feitas associações em paralelo de cabos de mesma seção transversal, até atingirem os valores de condução de corrente de 2000 A. Conforme Tabela 2, para condutores de seção transversal de 120, 95 e 70 mm² necessita-se, respectivamente, de 8, 10 e 12 condutores em paralelo. A Figura

13 representa o circuito com eletrocalhas individuais para o cabo de seção transversal de 120 mm².

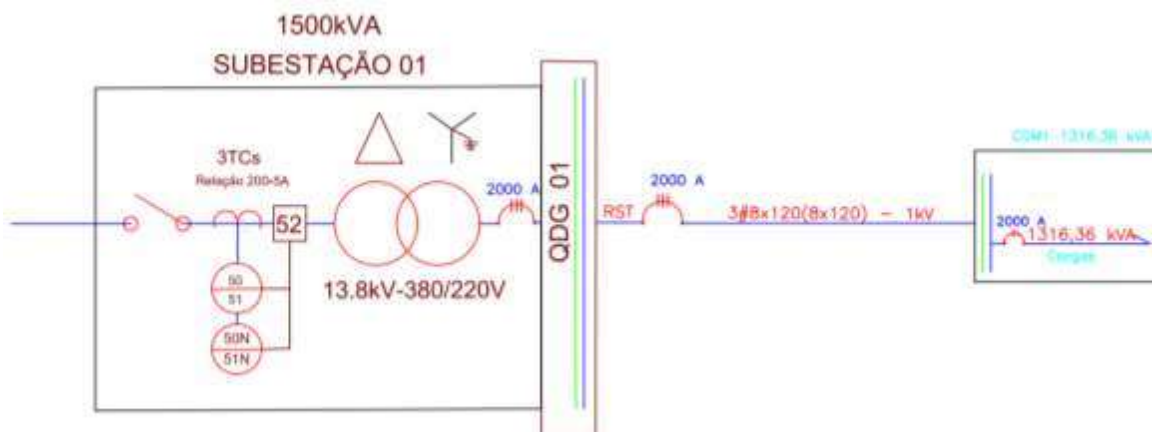


Figura 13 – Diagrama unifilar do estudo de caso

Fonte: Autoria própria.

No segundo método de agrupamento, foi utilizado menor número de eletrocalhas com maiores dimensões, nas quais os cabos foram agrupados em vários circuitos por eletrocalha. Desta forma foi necessário considerar fatores de agrupamento, conforme item 6.2.5.5 referente a agrupamento de circuito da ABNT NBT 5410 (ABNT, 2004a). Para todos os casos foram considerados fator de agrupamento de 0,38, pois é o aplicável para números de circuitos iguais ou superiores a 20. Após ajustado o fator de correção, foram necessários, respectivamente, 21, 25 e 30 circuitos em paralelo para condutores de seção transversal de 120, 95 e 70 mm². Nessa configuração os circuitos citados obtiveram 2002,98 A, 2061,50 A e 2040,60 A de capacidade de condução de corrente, respectivamente.

A queda de tensão para uma distância de 100 metros, em cada um dos casos analisados, foi calculada conforme Equação 10 e para cálculo de corrente de curto-circuito suportável em 1 segundo foi utilizada a Equação 15, os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores de queda de tensão percentual e corrente de curto-circuito simétrico suportável em 1 segundo para o estudo de caso

Seção nominal (mm ²)	Número de condutores em paralelo	Agrupamento	Capacidade de condução de corrente (A)	Queda de tensão %	Icc dos cabos condutores em 1 segundo (kA)
70	12	Eletrocalha	2148,00	2,085	78,96
95	10	individual para	2170,00	2,058	89,30
120	8	cada circuito	2008,00	2,045	90,24
70	30	Circuitos	2040,60	0,834	197,40
95	25	agrupados em	2061,50	0,823	223,25
120	21	única eletrocalha	2002,98	0,779	236,88
Barramento blindado BWV01-CA2000H-54			2000,00	1,588	65

Fonte: Autoria própria

2.6.2 Custos de Implantação

Os valores comerciais para os cabos de alumínio quadruplex, constituídos por três condutores fase isolados e um condutor neutro nu, com seções transversais de 70, 95 e 120 mm² estão dispostos na Tabela 7.

Tabela 7 – Preços comerciais dos cabos de Alumínio

Área da seção transversal (mm ²)	Preço por metro de cabo (R\$/m)
70	35,16
95	42,50
120	48,45

Fonte: REI DOS CABOS (2019).

Para o cálculo do custo de instalação para o sistema de cabos de alumínio foi utilizada a seguinte equação:

$$C_{ca} = C_{cam} \cdot L_c \cdot N_{cp}$$

(16)

Onde,

C_{ca} = custos cabos de alumínio (R\$);

C_{cam} = preço por metro do cabo de alumínio (R\$/m);

L_c = comprimento do circuito (m);

N_{cp} = número de condutores em paralelo por fase.

O custo de mão de obra foi estimado em R\$ 35,00 por metro para instalação de cada conjunto de cabos (SABER ELÉTRICA, 2019), sendo este valor multiplicado pelo número de cabos em paralelo. Assim, os cálculos dos custos mão de obra para instalação dos cabos de alumínio foram realizados conforme equação a seguir:

$$C_{moca} = C_{mom} \cdot N_{cp} \cdot L_c \quad (17)$$

Sendo,

C_{moca} = custos mão de obra para instalação dos cabos de alumínio (R\$);

C_{mom} = custo de mão de obra por metro (R\$/m);

L_c = comprimento do circuito (m);

N_{cp} = número de condutores em paralelo por fase.

Para instalação dos cabos de alumínio é necessário o uso de eletrocalhas. Nos casos em que foi considerado o agrupamento dos circuitos em uma única eletrocalha, o custo desta eletrocalha chapa 16 com dimensão de 400 x 100 mm é de R\$ 113,00 com 3 metros de comprimento (METARCOML, 2019a). Para o cálculo dos custos com eletrocalhas neste sistema foi utilizada a seguinte fórmula:

$$C_{ec} = C_{ecm} \cdot L_c \quad (18)$$

Sendo,

C_{ec1} = custos com eletrocalhas (R\$);

C_{ecm} = custo da eletrocalha por metro (R\$/m);

L_c = comprimento do circuito (m);

Para os casos em que foi considerado o uso de eletrocalhas individuais para cada circuito, foram utilizadas eletrocalhas chapa 16 com dimensão de 50 x 50 mm que custam R\$ 31,00 com 3 metros de comprimento (METARCOML, 2019b). Para estimar os custos com eletrocalhas nestes casos utilizou-se a fórmula:

$$C_{ec2} = C_{ecm} \cdot N_{cp} \cdot L_c \quad (19)$$

Sendo,

C_{ec2} = custos com eletrocalhas individuais (R\$);

C_{ecm} = custo da eletrocalha por metro (R\$/m);

L_c = comprimento do circuito (m);

N_{cp} = número de condutores em paralelo por fase.

Dessa maneira, os custos totais da instalação com cabos de alumínio podem ser calculados pela seguinte fórmula, para os estudos que utilizam eletrocalhas individuais:

$$C_{tca} = L_c \cdot N_{cp} (C_{cam} + C_{ecm} + C_{mom}) \quad (20)$$

E para os casos em que admite-se agrupamento dos circuitos em uma única eletrocalha, utiliza-se a seguinte equação para cálculo dos custos:

$$C_{tca} = L_c \cdot ((N_{cp} (C_{cam} + C_{mom})) + C_{ecm}) \quad (21)$$

Sendo,

C_{tca} = custo total dos cabos de alumínio (R\$);

C_{cam} = preço por metro do cabo de alumínio (R\$/m);

C_{ecm} = custo da eletrocalha por metro (R\$/m);

C_{mom} = custo de mão de obra por metro (R\$/m);

L_c = comprimento do circuito (m);

N_{cp} = número de condutores em paralelo por fase.

Para o cálculo de custo do sistema de barramento blindado utilizou-se um preço de custo do material de R\$ 0,95 para cada Ampére conduzido por metro de barramento blindado, conforme dados fornecidos pelo fabricante WEG. O cálculo do custo do barramento blindado foi realizado conforme equação a seguir:

$$C_{bb} = C_{bbmA} \cdot I_{bb} \cdot L_c \quad (22)$$

Sendo,

C_{bb} = custos do barramento blindado (R\$);

C_{bbmA} = preço do barramento blindado para cada Ampère conduzido em 1 metro (R\$/Am);

I_{bb} = corrente do barramento blindado (A);

L_c = comprimento do circuito (m).

Para a instalação do barramento blindado foi estimado um tempo 80% menor que para a instalação de cabos, dessa maneira, o custo foi estimado como 20% do custo de mão de obra para instalação de cabos (WEG, 2018a):

$$C_{mobb} = C_{moca} \cdot 0,2 \quad (23)$$

Sendo,

C_{mobb} = custos mão de obra para instalação do barramento blindado (R\$);

C_{moca} = custos mão de obra para instalação dos cabos de alumínio (R\$).

E os custos totais da instalação para barramento blindado podem ser calculados pela fórmula:

$$C_{tbb} = C_{bbmA} \cdot I_{bb} \cdot L_c + C_{mobb} \quad (24)$$

Sendo,

C_{tbb} = custo total do barramento blindado (R\$);

C_{bbmA} = custo do barramento blindado para cada Ampère conduzido em 1 metro (R\$/Am);

C_{mobb} = custos mão de obra para instalação do barramento blindado(R\$);

I_{bb} = corrente do barramento blindado (A);

L_c = comprimento do circuito (m).

2.6.3 Comparativo dos custos totais

A Tabela 8 apresenta a estimativa de custos totais, incluindo material e mão de obra, para instalação de um circuito com comprimento de 100 metros e capacidade de condução de corrente de 2000 A, utilizando cabos de alumínio de diferentes áreas de seção transversal e para barramento blindado.

Tabela 8 – Custo estimado para instalação de circuito com comprimento de 100 metros e capacidade de condução de corrente de 2000 A.

Cabos de alumínio separados em um conjunto de cabos por eletroduto					
Seção transversal (mm²)	Ncp	Custo cabos (R\$)	Custo eletrocalhas (R\$)	Custo mão de obra (R\$)	Custo total (R\$)
120	8	38.760,00	8.266,67	28.000,00	75.026,67
95	10	42.500,00	10.333,33	35.000,00	87.833,33
70	12	42.187,20	12.400,00	42.000,00	96.592,00
Cabos de alumínio agrupados em um eletroduto de 400 x 100 mm					
120	21	101.745,00	3.766,67	73.500,00	179.011,67
95	25	106.250,00	3.766,67	87.500,00	197.516,67
70	30	105.480,00	3.766,67	105.000,00	214.246,67
Barramento Blindado BWW01-CA2000H-54					
Preço por metro por ampere (R\$)	Corrente (A)	Comprimento do circuito (m)	Preço Barramento Blindado (R\$)	Custo mão de obra (R\$)	Custo total (R\$)
0,95	2000	100	190.000,00	5.600,00	195.600,00

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que a instalação com cabos de alumínio apresenta menor custo total para instalações com eletrocalhas individuais, sendo financeiramente mais viável que o sistema de barramento blindado. Além disso, quanto maior a seção transversal, mais viável é o projeto com os cabos de alumínio. Para agrupamento dos condutores em eletrocalha única, devido a necessidade de utilização de fator de correção por agrupamento, os custos totais do sistema de cabos de alumínio aumentam. Neste caso, para menores seções transversais dos condutores a margem de viabilidade dos

cabos com relação ao barramento blindado se reduz, a ponto de ser menos viável financeiramente quando considerado o cabo de seção transversal de 70 mm². Como pode ser visto na Figura 14, para cabos de seção transversal 120 mm², a diferença para o custo de instalação do barramento blindado é maior, sendo mais viável o sistema de cabeamento. No entanto, para cabos de seção transversal menores, como por exemplo 70 mm², devido ao uso de maior número de cabos, essa diferença entre o custo de instalação do sistema de barramento blindado e cabeamento diminui, sendo mais viável o barramento blindado quando instalado os circuitos agrupados em única eletrocalha.

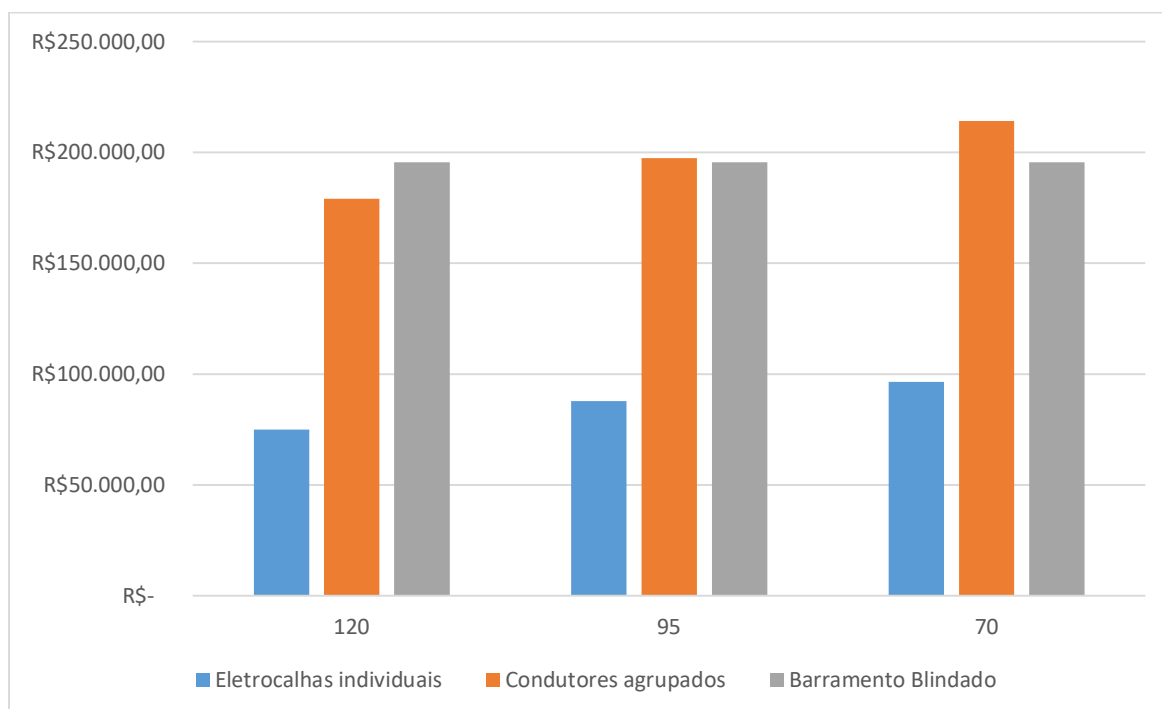


Figura 14 – Análise financeira dos custos de instalação de circuito com barramento blindado e cabeamentos de alumínio

Fonte: Autoria própria.

O sistema de barramento blindado pode suprir essa desvantagem financeira caso ocorra, nos próximos anos, aumento do preço da mão de obra ou caso a maior demanda por esse sistema resulte em redução do seu custo. Segundo a Schneider Electric (2018) a relação entre custos, incluído mão de obra e material, e o número de conexões do circuito (Figura 15) atinge o ponto de equilíbrio em 6 conexões, em países com elevado custo de mão de obra. Portanto, a partir desse número de conexões os custos do sistema de barramento blindado são menores.

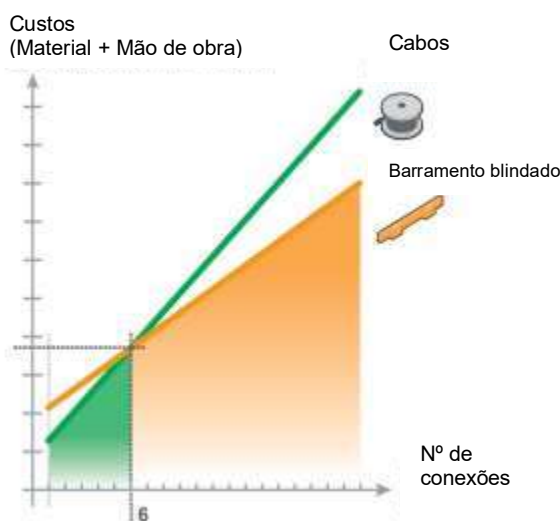


Figura 15 – Relação de custos e número de conexões para instalação de cabos e barramento blindado.

Fonte: Adaptado de Schneider Electric (2018).

Além disso, pode ser feita uma comparação entre o custo de mão de obra e o número de ramificações de um circuito, conforme Figura 16. Observa-se que quanto maior o número de ramificações, aumenta o custo de mão de obra tanto para o sistema de cabeamento quanto para o barramento blindado. No entanto, o aumento nos custos de mão de obra é maior no sistema de cabeamento, pois o custo de mão de obra do barramento é 20% do custo de mão de obra para instalação de cabeamentos.

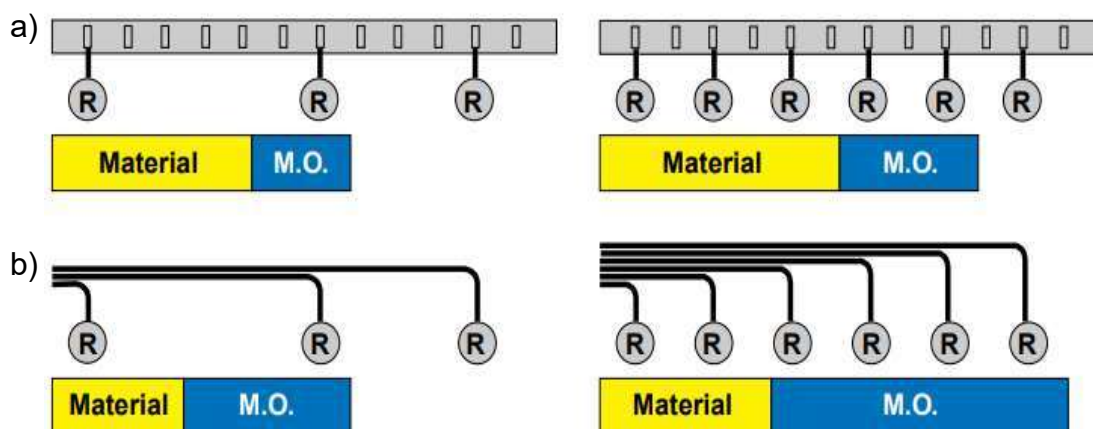


Figura 16 – Relação de custos com material e mão de obra para (a) barramento blindado e (b) cabeamento conforme o número de ramificações.

Fonte: Schneider Electric (2019).

No estudo de caso proposto, para a condução de uma corrente de 2000 A, as dimensões externas do barramento são de 202 x 290 mm, ocupando uma área de seção transversal de 0,0586 m². No sistema de cabos condutores com eletrocalhas individuais são utilizados de 8 a 12 eletrocalhas, sendo cada uma de 50 x 50 mm, dessa forma as áreas ocupadas são de 0,02 m² a 0,03 m², para o sistema estudado. Para os sistemas com circuitos agrupados em eletrocalha de 400 x 100 mm a área ocupada é de 0,04 m². As ramificações podem ser derivadas diretamente do barramento, sendo que a caixa com disjuntor é acoplada diretamente ao sistema. Portanto, para sistemas sem ramificações, como neste estudo de caso, a área ocupada por cabos é menor. No entanto, para um sistema ramificado com várias conexões o sistema de barramento ocupará menor área que o cabeamento.

3 CONCLUSÃO

O estudo das características técnicas de um sistema de distribuição de energia em baixa tensão utilizando barramento blindado apresentou vantagens e desvantagens quando comparado com o sistema de cabos de alumínio. Observou-se que são necessárias associações de cabos em paralelo para obter a mesma capacidade de condução de corrente do barramento blindado. Assim, nos casos em que os requisitos de espaço ocupado pela instalação elétrica são críticos no projeto, sistemas de barramento blindado apresentam considerável vantagem com relação ao sistema de cabos. As correntes de curto-circuito mostraram-se equivalentes entre o sistema de barramento blindado e cabos condutores, apresentando pouca variação no intervalo onde podem ser comparadas.

A queda de tensão, por sua vez, apresenta-se menor para o sistema de barramento blindado a partir de valores de capacidade de condução de corrente de 1250 A, aumentando consideravelmente após valores de 2000 A. Sendo assim, para uma mesma corrente e queda de tensão, o barramento blindado consegue conduzir a uma distância maior. E para uma mesma distância e corrente o barramento blindado apresenta menor queda de tensão que o cabeamento. Isto proporciona vantagem na aplicação do barramento blindado quando os valores de queda de tensão dos cabos estão criticamente próximos aos normatizados, principalmente em circuitos que demandem maiores correntes.

O estudo de caso realizado demonstrou que o sistema de barramento blindado possui custos mais elevados que o cabeamento, justificando a vasta utilização deste último. Futuramente, essa desvantagem financeira pode ser superada com o barateamento do barramento blindado quando houver maior demanda ou devido a possível elevação dos valores de mão de obra. Cabe ressaltar que os sistemas de barramento blindado possuem um menor custo de manutenção e uma maior facilidade para mudanças de layout.

Trabalhos futuros podem ser desenvolvidos nesta área com a realização de estudos comparativos do barramento blindado de cobre com o cabeamento de cobre com capacidade de condução de corrente de 6300 A, barramento blindado com ranges de corrente de 20 A a 700 A, estudo de caso com circuitos ramificados, além de aplicações comerciais, industriais e de infraestrutura.

REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 16019**: Linhas elétricas pré-fabricadas (barramentos blindados) de baixa tensão – Requisitos para instalação. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 5410**: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2004a.

_____. **NBR IEC 60439-2/1**: Conjuntos de manobra e controle de baixa tensão – Parte 2: Requisitos particulares para linhas elétricas pré-fabricadas (sistemas de barramentos blindados). Rio de Janeiro, 2004b.

_____. **NBR IEC 60529**: Graus de proteção para invólucros de equipamentos elétricos (código IP). Rio de Janeiro, 2004c.

ABRADEE (Associação Brasileira de Distribuição de Energia Elétrica). **A distribuição de energia**. Disponível em: < <http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia/>>. Acesso em: 04 dez. 2018.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Resolução Normativa N° 414**, de 9 de Setembro de 2010. Estabelece as condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada. Brasília, 2010.

CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 5. ed. Rio Janeiro: LTC, 2002. 589 p.

CASSIOLATO, César. **Interferência Eletromagnética**. 2018. Disponível em: <http://www.profibus.org.br/artigos/EMI_Interferencia_Eletromagnetica.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2018.

CATTANI, Mauro S. D.; VANNUCCI, Alvaro. Correntes de Foucault: Aspectos Básicos. **Publicação Instituto de Física**, São Paulo, n. 1681, p. 1-16, 2013. Disponível em: <<http://www.producao.usp.br/handle/BDPI/44403>>. Acesso em: 26 ago. 2018.

COPEL (Companhia Paranaense de Energia). **NTC 901111**: Barramentos blindados. 2014.

_____. **NTC 810020**: Cabos de cobre isolados com XLPE – 0,6/1kV. 2012.

CREDER, Hélio. **Instalações elétricas**. 16. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

EASYEDA. Disponível em: <easyeda.com>. Acesso em: 12 nov. 2018.

FISCHMANN, V. E.; BOMEISEL, E. **Instalações elétricas prediais com barramento blindado**. 2000. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/47/artigo286185-1.aspx>>. Acesso em: 29 out. 2018.

GENERAL CABLE. **Cabos de baixa tensão**. São Paulo: General Cable, 2018. 74 p. Disponível em: <<https://www.generalcable.com/assets/documents/LATAM%20Documents/Brazil%20Site/Catalogo-Cabos-de-Baixa-Tensao.pdf?ext=.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2018.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982. 453 p.

GRAZIANO, N.; KRUGER, P. **Conheça as vantagens das instalações elétricas com barramento blindado**. Disponível em: <<https://www.aecweb.com.br>>. Acesso em: 29 out. 2018.

IEC (International Electrotechnical Commission). **IEC 61439-6/1**: Low-voltage switchgear and controlgear assemblies – Part 6: Busbar trunking systems (busway). 2012.

JOHNSON, David E.; HILBURN, John L.; JOHNSON, Johnny R. **Fundamentos de análise de circuitos elétricos**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994.

LEE, J. D. **Química inorgânica não tão concisa**. São Paulo: Blucher, 2008. 527 p.

LME, London Metal Exchange. Disponível em: <www.LME.com>. Acesso em: 27 ago. 2018.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas industriais**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

METARCOML. **Curva Horizontal Interna Eletrocalha Lisa 400x100**. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1049633981-curva-horizontal-interna-eletrocalha-lisa-400x100-_JM>. Acesso em: 12 jan. 2019a.

METARCOML. **Eletrocalha Lisa 50x50**. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-690899999-eletrocalha-lisa-50x50-_JM>. Acesso em 24 fev. 2019b.

PEIXOTO, Eduardo M. A. Alumínio. **Química Nova na Escola**, n. 13, 2001. Disponível em: <<http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc13/13-aluminio.pdf>>. Acesso em: 25 ago. 2018.

PRYSMIAN. **Manual Prysmian de Instalações elétricas**. Santo André: Prysmian, 2018. 71 p. Disponível em:

<https://br.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/Manual_Instalacoes_Eletricas.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2018.

RAMANATHAN, Lalgudi V. **Corrosão e seu controle**. São Paulo: Hemus, 1977. 342 p.

REI DOS CABOS. **Cabo Alumínio Quadruplex 70 Milímetros 4x70mm 25 Metros**. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1048789633-cabo-aluminio-quadruplex-70-milimetros-4x70mm-25-metros-_JM?quantity=1>. Acesso em: 12 jan. 2019a.

REI DOS CABOS. **Cabo Alumínio Quadriplex 95 Milímetros Com 50 Metros Uv**. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-988926033-cabo-aluminio-quadriplex-95-milimetros-com-50-metros-uv-_JM?qua&quantity=1>. Acesso em: 12 jan. 2019b.

REI DOS CABOS. **Cabo Alumínio Quadriplex 120 Milímetros Com 20 Metros**. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1013604047-cabo-aluminio-quadriplex-120-milimetros-com-20-metros-_JM?quantity=1>. Acesso em: 12 jan. 2019c.

RODRIGUES, Mônica A. *et al.* Cobre. **Química Nova na Escola**, v. 34, n. 3, p. 161-162, 2012.

RUSSEL, John B. **Química geral**. São Paulo: Makron Books, 2004.

SABER ELÉTRICA. **Saiba como cobrar pelos serviços prestados seja em elétrica ou automação**. Disponível em: <<https://www.sabereletrica.com.br/orcamento-servicos-eletrica-ou-automacao/>>. Acesso em: 12 jan. 2019.

SANTOS, J. N. dos. **Condutores e cabos de energia**. Porto: Faculdade de engenharia Universidade do Porto, 2005. 119 p.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Canalis 800 to 5000 A**. 2018. Disponível em: <<https://www.schneider-electric.com/en/download/document/DEBU021EN/>>. Acesso em: 12 jan. 2019.

SCHNEIDER ELECTRIC. **A energia elétrica naturalmente distribuída**. Disponível em: <<https://www.se.com/br/pt/product-category/1300-barramentos-blindados-e-suporte-para-cabos/>> Acesso em: 24 fev. 2019.

SOMAVILLA, D.; LINDNER, G.; AGUIAR, L. Laboratório da automação é certificado. **WEG em revista**, n. 68, 2012. Disponível em: <<https://static.weg.net/news/weg-em-revista/WR-68.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2018.

VIANA, Felismino de B., **Estudo de problemas de corrosão em cabos de aço zincado**. 2015. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto, 2015.

WEG S. A. **Barramentos blindados de baixa tensão**. Jaraguá do Sul: Grupo WEG, 2018. 20 p. Disponível em: <www.weg.net>. Acesso em: 25 ago. 2018a.

_____. **Barramentos blindados WEG**. Jaraguá do Sul: Grupo WEG, 2018. 147 p. Disponível em: <www.weg.net>. Acesso em: 21 ago. 2018b.

ANEXO A - Catálogo barramento blindado do fabricante WEG

Especificação Elétrica

Modelo	Características elétricas				Corrente nominal à temperatura ambiente de 35 °C ¹⁾			Correntes de curto-circuito			Condutores elétricos									
	Tensão nominal de operação	Tensão nominal de isolamento	Tensão de impulso suportável nominal	Frequência nominal	Posição de instalação			Suportável nominal de curta duração (1s)	Suportável nominal de crista	Eficácia do circuito de proteção	Energia de máximo esforço térmico e dinâmico (1s)	Fases e neutro								
					Trajectoria horizontal, barras na vertical	Trajectoria horizontal, barras na horizontal	Trajectoria vertical					Geometria	Material condutor	Isolação	Tratamento superficial dos contatos	Seção circular equivalente	Seção equivalente em cobre	Qtd de barras de fase/ neutro ²⁾		
Parâmetro	U _e	U _i	U _{imp}	f	I _n			I _{cw}	I _{pk}	I _{ft}	-	-	-	-	mm ²	mm ²	-			
Unidade	V		kV	Hz				kA			GA ² s	-	-	-	-	mm ²	mm ²	-		
Barramentos ventilados (grau de proteção IP31)	BWW01-CA800N-31	690	1.000	12	50 / 60	800	700		30	63	18	900	Barras com seção retangular e cantos arredondados	Alumínio (Cobre sob consulta)	Resina epóxi/políéster, exceto nos pontos de contato elétrico	Revestimento com estanho nas partes não pintadas	1.716	243	1	
	BWW01-CA1000M-31					1.000	800		40	84	24	1.600					2.215	278		
	BWW01-CA1250S-31					1.250	1.000		50	105	30	2.500					4.095	384		
	BWW01-CA1600E-31					1.600	1.400	1.250	55	121	33	3.025					7.763	565		
	BWW01-CA1750H-31					1.750	1.400		65	143	39	4.225					4.430	557		
	BWW01-CA2000H-31					2.000	1.800		65	143	39	4.225					8.190	769		2
	BWW01-CA2500H-31					2.500	2.250		65	143	39	4.225					15.526	1.131		
	BWW01-CA4000H-31					4.000	3.600		65	143	39	4.225					23.290	1.696		3
	BWW01-CA4650H-31					4650	4150		65	143	39	4.225					31.055	2.261		4
	Barramentos não ventilados (grau de proteção IP54)					BWW01-CA700N-54	690	1.000	12	50 / 60	700							30		63
BWW01-CA800M-54		800			40	84					24	1.600	2.215	278						
BWW01-CA1000S-54		1.000			50	105					30	2.500	4.095	384						
BWW01-CA1250E-54		1.250			55	121					33	3.025	7.763	565						
BWW01-CA1250H-54		1.250			65	143					39	4.225	4.430	557						
BWW01-CA1500H-54		1.500			65	143					39	4.225	8.190	769	2					
BWW01-CA2000H-54		2.000			65	143					39	4.225	15.526	1.131						
BWW01-CA2800H-54		2.800			65	143					39	4.225	23.290	1.696	3					
BWW01-CA3450H-54		3.450			65 ³⁾	143					39	4.225	31.055	2.261	4					

Notas: 1) Para temperaturas ambientes diferentes de 35 °C utilizar o fator de ajuste de corrente por multiplicação: 20 °C = 1,109; 25 °C = 1,074; 30 °C = 1,037; 40 °C = 0,959; 45 °C = 0,918; 50 °C = 0,873; 55 °C = 0,826; 60 °C = 0,775.
 2) Opcionalmente podem ser fornecidos conjuntos com quantidade de barras de neutro diferente da quantidade de barras de fase ou ainda com barras dedicadas ao aterramento no lugar das barras de neutro.
 3) Para valores em 50 Hz, dividir os valores de reatância por 1,2 e recalcular as impedâncias.
 4) Valores para distribuição de cargas com $k = \frac{n+1}{2n}$ conforme NBR IEC 60.439-2 (Anexo J) e IEC 61.439-6 (Annex AA).
 5) Opcional em 110 kA.

Terra				Fatores de queda de tensão ⁴⁾						Impedâncias a 60 Hz ⁵⁾													
Geometria	Material condutor	Isolação	Seção retangular equivalente em cobre	Fator de potência (cos ϕ)						À temperatura de 20 °C			À temperatura de operação			Sistema "4 fios" em evento de falha (médias fase-fase conforme IEC 61.439-6)			De sequência zero em sistema "4 fios" (fase-terra conforme IEC 60.909)			Resistividade equivalente em cobre do condutor de proteção (terra)	
				Ø	0,7	0,8	0,9	0,92	0,95	1	Resistência	Reatância	Impedância cos(ϕ) = 0,92	Resistência	Reatância	Impedância cos(ϕ) = 0,92	Resistência	Reatância	Impedância cos(ϕ) = 0,92	Resistência	Reatância		Impedância
											R20	X20	Z20	R	X	Z	Rf	Xf	Zf	R0	X0		Z0
			mm ²	V/100m/A						µΩ/m													
Involúcro	Aço galvanizado (laterais) + Alumínio (fechamentos)	Resina epóxi/poliéster, exceto nos pontos de contato elétrico	508	0,01051	0,01061	0,01040	0,01028	0,01002	0,00843	76,4	74,5	99,5	97,4	74,5	118,8	156,4	138,2	198,1	655,0	608,9	1033,4	35,0	
			520	0,01187	0,01186	0,01145	0,01128	0,01092	0,00890	81,3	91,3	110,6	102,8	91,3	130,4	152,0	201,0	218,6	583,0	604,0	839,0	34,2	
			527	0,00850	0,00851	0,00824	0,00813	0,00788	0,00646	58,4	64,3	78,9	74,7	64,3	93,9	111,6	113,4	147,1	824,8	467,5	948,1	33,8	
			552	0,00569	0,00565	0,00542	0,00533	0,00514	0,00412	37,4	45,4	52,2	47,6	45,4	61,6	76,6	85,1	103,8	1061,0	476,9	1163,3	32,2	
			644	0,00595	0,00593	0,00572	0,00563	0,00544	0,00441	39,6	46,3	54,6	51,0	46,3	65,1	87,8	100,0	120,0	2140,0	927,0	2340,0	27,6	
			651	0,00466	0,00460	0,00437	0,00429	0,00412	0,00323	29,6	38,8	42,4	37,4	38,8	49,6	68,5	79,6	94,2	743,5	503,4	897,9	27,3	
			676	0,00321	0,00319	0,00306	0,00301	0,00291	0,00233	21,8	25,5	30,0	27,0	25,5	34,8	43,4	50,1	59,6	1640,0	710,0	1790,0	26,3	
			827	0,00236	0,00225	0,00203	0,00197	0,00184	0,00125	11,3	24,0	19,8	14,5	24,0	22,7	24,2	48,9	41,4	584,3	484,9	759,3	21,6	
			978	0,00172	0,00166	0,00154	0,00150	0,00142	0,00104	9,7	16,0	15,2	12,1	16,0	17,4	19,8	48,2	37,1	553,4	820,1	989,3	18,2	
			508	0,01051	0,01061	0,01040	0,01028	0,01002	0,00843	76,4	74,5	99,5	97,4	74,5	118,8	156,4	138,2	198,1	655,0	608,9	1033,4	35,0	
			520	0,01187	0,01186	0,01145	0,01128	0,01092	0,00890	81,3	91,3	110,6	102,8	91,3	130,4	152,0	201,0	218,6	583,0	604,0	839,0	34,2	
			527	0,00850	0,00851	0,00824	0,00813	0,00788	0,00646	58,4	64,3	78,9	74,7	64,3	93,9	111,6	113,4	147,1	824,8	467,5	948,1	33,8	
			552	0,00569	0,00565	0,00542	0,00533	0,00514	0,00412	37,4	45,4	52,2	47,6	45,4	61,6	76,6	85,1	103,8	1061,0	476,9	1163,3	32,2	
			644	0,00595	0,00593	0,00572	0,00563	0,00544	0,00441	39,6	46,3	54,6	51,0	46,3	65,1	87,8	100,0	120,0	2140,0	927,0	2340,0	27,6	
			651	0,00466	0,00460	0,00437	0,00429	0,00412	0,00323	29,6	38,8	42,4	37,4	38,8	49,6	68,5	79,6	94,2	743,5	503,4	897,9	27,3	
			676	0,00321	0,00319	0,00306	0,00301	0,00291	0,00233	21,8	25,5	30,0	27,0	25,5	34,8	43,4	50,1	59,6	1640,0	710,0	1790,0	26,3	
			827	0,00236	0,00225	0,00203	0,00197	0,00184	0,00125	11,3	24,0	19,8	14,5	24,0	22,7	24,2	48,9	41,4	584,3	484,9	759,3	21,6	
			978	0,00172	0,00166	0,00154	0,00150	0,00142	0,00104	9,7	16,0	15,2	12,1	16,0	17,4	19,8	48,2	37,1	553,4	820,1	989,3	18,2	

ANEXO B - Capacidades de condução de corrente, em àmperes, para os métodos de referência A1, A2, B1, B2, C e D segundo ABNT NBR 5410 de 2004

ABNT NBR 5410:2004

63

Tabela 37 — Capacidades de condução de corrente, em ampères, para os métodos de referência A1, A2, B1, B2, C e D

Condutores: cobre e alumínio

Isolação: EPR ou XLPE

Temperatura no condutor: 90°C

Temperaturas de referência do ambiente: 30°C (ar), 20°C (solo)

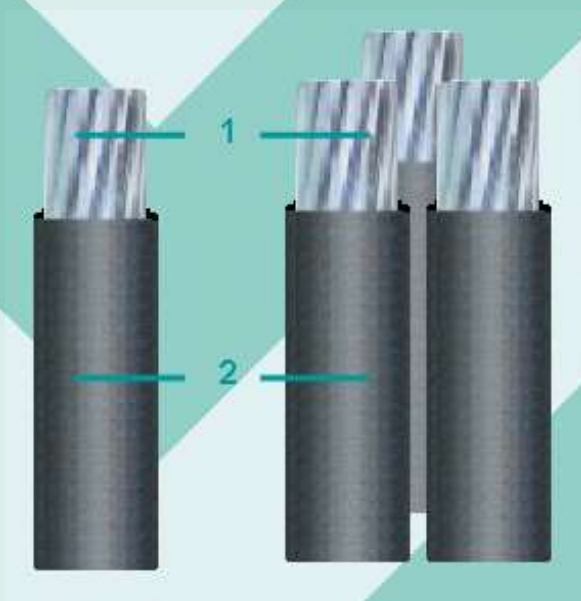
Seções nominais mm ²	Métodos de referência indicados na tabela 33											
	A1		A2		B1		B2		C		D	
	Número de condutores carregados											
	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Cobre												
0,5	10	9	10	9	12	10	11	10	12	11	14	12
0,75	12	11	12	11	15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

ANEXO C - Características condutores de alumínio conforme dados do fabricante

Baixa Tensão Uso Geral

Cabo Voltalene Alumínio 0,6/1kV

Construção:



> CONDUTOR

- [1] Metal: fio de alumínio nu, têmpera dura (H19).
Forma: redonda compacta
Encordoamento: classe 2

> ISOLAÇÃO

- [2] Composto termofixo de polietileno reticulado (XLPE)

Características:

- > Os cabos Voltalene possuem uma isolação reforçada em XLPE, o que lhes confere as mesmas características de um cabo com cobertura, podendo, deste modo, ser utilizados nas mesmas maneiras de instalar e aplicações que os cabos com cobertura.

Baixa Tensão

Uso Geral

Identificação:

Temperaturas máximas do condutor:

Normas aplicáveis:

> **Cobertura:** Preta.

> 90 C em serviço contínuo, 130 C em sobrecarga e 250 C em curto-circuito.

> **NBR NM 280**

Condutores de cabos isolados (IEC 60228, MOD)

> **NBR 7285**

Cabos de potência com isolamento extrudada de polietileno termofixo (XLPE) para tensão de 0,6/1 kV - Sem cobertura - Especificação

DADOS CONSTRUTIVOS

CABO VOLTALENE AI 0,6/1 kV

Seção (mm ²)	Diâmetro do condutor (mm)*	Rcc a 20°C (Ω/km)	Isolação		Peso (kg/km)*
			Espessura nominal (mm)	Diâmetro (mm)*	
10	3,7	3,08	1,6	6,9	55
16	4,7	1,91	1,6	8,0	75
25	5,9	1,20	1,6	9,2	105
35	6,9	0,86	1,6	10,2	135
50	8,1	0,64	2,0	12,1	190
70	9,7	0,44	2,0	13,7	255
95	11,3	0,32	2,0	15,4	330
120	12,6	0,25	2,4	17,6	425
150	14,0	0,20	2,4	18,9	510
185	16,0	0,16	2,4	20,1	620
240	18,0	0,12	2,4	23,0	785
300	20,6	0,10	2,8	26,4	985
400	23,3	0,07	2,8	29,1	1.240
500	26,5	0,0605	2,8	32,3	1.555

*Aproximado

A Prysmian reserva-se ao direito de modificar sem aviso prévio as características técnicas, pesos e dimensões apresentadas neste catálogo, sempre respeitando os valores previstos nas normas citadas. A Prysmian não se responsabiliza por danos pessoais ou materiais decorrentes do uso inadequado e/ou negligente das informações contidas neste catálogo.

ANEXO D - Valores para o fator K_L dos condutores de alumínio segundo dados do fabricante

Números de fios elementares que formam o condutor	k_L
Condutor Sólido ou Compactado	0,0500
7	0,064
11	0,0588
12	0,0581
14	0,0571
16	0,0563
19	0,0554
20	0,0551
24	0,0543
27	0,0539
28	0,0537
30	0,0535
32	0,0532
37	0,0528
42	0,0523
49	0,0519
50	0,0518
56	0,0516
61 ou mais	0,0515

OBS: D = diâmetro externo do cabo, em mm.

DV = diâmetro da veia isolada, em mm.