



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

AVALIAÇÃO ECONÔMICA DO DIMENSIONAMENTO DE
CONDUTORES PARA ALIMENTAR MOTORES ELÉTRICOS DE
INDUÇÃO

LINDA MARIANA SILVA LOPES

Campina Grande, Paraíba
Outubro de 2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**AVALIAÇÃO ECONÔMICA DO DIMENSIONAMENTO DE CONDUTORES
PARA ALIMENTAR MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO**

LINDA MARIANA SILVA LOPES

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido
à Coordenação do Curso de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de
Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Orientador: Ronimack Trajano de Souza, D.Sc.

Campina Grande - PB
Outubro de 2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**AValiação EconôMica do Dimensionamento de Condutores
PARA ALIMENTAR MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO**

LINDA MARIANA SILVA LOPES

*Trabalho de Conclusão de Curso submetida à
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande como
parte dos requisitos necessários para a obtenção do
grau de Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Aprovado em 21 de outubro de 2021

Ronimack Trajano de Souza, D. Sc.
Orientador

Célio Anésio da Silva, D.Sc
Convidado

Campina Grande - PB
Outubro de 2021

RESUMO

No presente trabalho é apresentado o estudo comparativo entre os critérios técnico e econômico para dimensionamento de condutores em três instalações, além de um dimensionamento alternativo, que considera seções superiores ao dimensionado segundo a norma técnica e inferiores ao limite de 120 mm². A instalação 1, apresenta como cargas quatro motores de 125 cv e é ligada ao transformador pelo ramal 1, a instalação 2 apresenta como cargas três motores de 20 cv, sendo ligada ao transformador pelo ramal 2 e a instalação 3 apresenta como cargas dois motores de 40 cv e dois motores de 500 cv, sendo o ramal 3 sendo condutor alimentador. Para realizar a comparação utilizou-se ferramentas de análises financeiras afim de avaliar a rentabilidade dos investimentos. A partir dos resultados, constatou-se que o dimensionamento econômico é uma ferramenta viável para se obter projetos cada vez mais eficientes, entretanto não se caracteriza como uma boa alternativa de investimento para os casos das instalações de médio de grande porte, dado o elevado investimento inicial. Em contra partida, o dimensionamento alternativo proposto apresenta ganhos associados ao investimento em todas as instalações avaliadas.

Palavras-chaves: Instalações Elétricas; Dimensionamento de Condutores; Método Técnico; Método Econômico.

ABSTRACT (ATUALIZAR!!)

This paper presents a comparative study between the technical and economic criteria for dimensioning conductors in three installations, as well as an alternative dimensioning, which is considered important when dimensioned according to the technical standard and below the limit of 120 mm². Installation 1 has four 125 hp motors as loads and is connected to the transformer by branch 1, installation 2 has three 20 hp motors as loads, being connected to the transformer by branch 2 and installation 3 has two motors as loads. 40 hp and two 500 hp engines, with branch 3 being the feeder conductor. To perform a comparison, using financial analysis tools, to assess the profitability of investments. From the results, it can be seen that the economic dimensioning is a viable tool to obtain increasingly efficient projects, although it does not stand out as a good investment alternative for the cases of medium-large installations, given the high initial investment. On the other hand, the proposed alternative dimensioning presents gains associated with the investment in all the evaluated installations.

Keywords: Electrical Installations; Conductor Dimensioning; Technical Method; Economic Method.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resistividade de materiais condutores a 20 °C.....	13
Tabela 2 – Temperaturas características nos condutores para três situações distintas.....	15
Tabela 3 – Algumas configurações de cabo de potência.....	19
Tabela 4 – Resistividade elétrica e coeficiente de temperatura do cobre.....	30
Tabela 5 – Definição do parâmetro A.	30
Tabela 6 – Instalações a serem avaliadas.	35
Tabela 7 – Correntes dos ramais de alimentação de cada quadro.	37
Tabela 8 – Corrente por condutor.....	39
Tabela 9 – Seções determinadas pelo critério C2.....	40
Tabela 10 – Queda de tensão.....	40
Tabela 11 – Queda de tensão na partida.	41
Tabela 12 – Proteção conta sobrecarga.	41
Tabela 13 – Proteção contra sobrecarga – Ramal 1	42
Tabela 14 – Proteção contra curto-circuito.....	42
Tabela 15 – Proteção contra choques elétricos.....	43
Tabela 16 – Seção Técnica.	43
Tabela 17 – Valores da variável "A"	45
Tabela 18 – Histórico do IGP-M acumulado nos últimos 5 anos.....	46
Tabela 19 – Histórico do rendimento anual da poupança nos últimos 5 anos.....	46
Tabela 20 – Parâmetros do dimensionamento econômico.	47
Tabela 21 – Seção Econômica.....	49
Tabela 22 – Custo Inicial por metro.	50
Tabela 23 – Custo Inicial.....	50
Tabela 24 – Custo total.....	51
Tabela 25 – Análise Financeira.	52
Tabela 26 – Análise Financeira - Ramal 1.	55
Tabela 27 – Análise Financeira - Ramal 2.	55
Tabela 28 - Análise Financeira - Ramal 3.	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Condutores nus: fio (a) e cabo (b).	12
Figura 2 - Condutores isolados: fio (a) e cabo (b).....	12
Figura 3 - Condutor dotado de isolamento e cobertura.....	18
Figura 4 - Detalhe cabo multipolar.....	19
Figura 5 - Canaleta de PVC.....	20
Figura 6 - Eletroduto rígido (a) e corrugado (b).....	20
Figura 7 - Limites de queda de tensão.....	25
Figura 8 - Instalações Avaliadas.....	35
Figura 9 – Payback.	53
Figura 10 – Valores Financeiros: Instalação 1.	54
Figura 11 – Valores Financeiros: Instalação 2.	54
Figura 12 – Valores Financeiros: Instalação 3.	55

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. OBJETIVOS	11
1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO	11
2. REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 FIOS E CABOS.....	12
2.1.1 CONDUTORES	12
2.1.2 ISOLAÇÃO	15
2.1.3 BLINDAGEM	18
2.1.4 COBERTURA	18
2.1.5 CABO DE POTÊNCIA	19
2.1.6 INSTALAÇÃO DOS CONDUTORES.....	20
2.2 DIMENSIONAMENTO TÉCNICO	22
2.2.1 CAPACIDADE DE CONDUÇÃO DE CORRENTE	23
2.2.2 QUEDA DE TENSÃO	24
2.2.3 DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO	26
2.3 PERDAS POR EFEITO JOULE	28
2.4 DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO.....	29
2.5 LIMITAÇÃO DOS CONDUTORES	33
2.6 ANÁLISE ECONÔMICA	33
3. METODOLOGIA	34
4. DIMENSIONAMENTO DOS CONDUTORES DOS CIRCUITOS	39
4.1 CRITÉRIO TÉCNICO.....	39
4.1.1 Critério C1 – Seção Mínima	39
4.1.2 Critério C2 – Capacidade de Condução de Corrente.....	39
4.1.3 Critério C3 – Limites de Queda de Tensão	40
4.2 CRITÉRIO ECONÔMICO.....	43
4.2.1 Tempo de vida útil – N	43
4.2.2 Custo de energia elétrica – P	43
4.2.3 Variação anual de demanda – D	44
4.2.4 Tempo de operação com perdas Joule – T.....	45
4.2.5 Custo de Instalação – A	45
4.2.6 Aumento Anual de Carga – a	45
4.2.7 Aumento Anual do Custo de Energia - b.....	46
4.2.8 Taxa de Capitalização – i.....	46
5. AVALIAÇÃO ECONÔMICA	49

5.1	ABNT NBR 5410:2004 EM COMPARAÇÃO A ABNT NBR 15920:2011	49
5.2	ABNT NBR 5410:2004 EM COMPARAÇÃO A SEÇÕES SUPERIORES	52
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
7.	REFERÊNCIAS.....	58
8.	APÊNDICE.....	60
	APÊNDICE A – CORRENTES DAS INSTALAÇÕES	60
	A.1 RAMAL 1	60
	A.2 RAMAL 2	60
	A.3 RAMAL 3	61
9.	ANEXOS.....	63
	ANEXO A – QUEDA DE TENSÃO CABOS DA PRYSMIAN.....	63
	ANEXO B – RESISTÊNCIAS E REATÂNCIAS DE CABOS GSETTE DA PRYSMIAN	63
	63	
	ANEXO C – TABELA DE PREÇOS PRYSMIAN, JULHO DE 2021	64
	ANEXO D – DADOS ELÉTRICOS MOTORES W22 IR3 PREMIUM, IV POLOS....	64

1. INTRODUÇÃO

O dimensionamento de condutores elétricos de baixa tensão é realizado segundo as premissas da ABNT NBR 5410:2004 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão. No item 6.2.6.1.2, da referida norma define-se critérios mínimos para o dimensionamento de condutores com objetivo de “garantir a segurança de pessoas e animais, o funcionamento adequado da instalação e a conservação dos bens”. A seção dos condutores deve ser determinada de forma a que sejam atendidos, no mínimo, todos os seguintes critérios:

- Seção mínima - C1;
- Capacidade de condução de corrente - C2;
- Limites de queda de tensão - C3;
- Proteção contra sobrecarga - C4;
- Proteção contra curto-circuito - C5;
- Proteção contrachoque elétricos por seccionamento automático da alimentação em esquemas TN e IT –C6.

Os critérios devem garantir que o condutor dimensionado seja capaz de permitir a passagem da corrente sem aquecimento excessivo, com uma queda de tensão dentro do limite aceitável e permitindo a atuação adequada dos dispositivos de proteção contra sobrecargas e curtos-circuitos.

No critério C1 são estabelecidos valores mínimos para seção dos condutores dependendo da aplicação do circuito.

No critério C2 discorre-se que a capacidade de condução de corrente dos condutores deve ser igual ou superior à corrente de projeto do circuito, considerando os fatores de correção de corrente aplicáveis. Esse critério é destinado a garantir uma vida satisfatória a condutores submetidos aos efeitos térmicos produzidos pela circulação de correntes em condições especificadas, sem que a sua temperatura em regime permanente ultrapasse a temperatura máxima para serviço contínuo.

No critério C3 define-se que a queda de tensão provocada pela passagem de corrente nos condutores dos circuitos de uma instalação deve estar dentro de limites pré-fixados. Esses limites têm por objetivo não prejudicar o funcionamento dos equipamentos ligados a estes circuitos.

No critério C4 apresentam-se premissas que devem ser atendidas para que o aquecimento provocado pela corrente de sobrecarga não danifique o condutor.

Já no critério C5 trata-se do caso de ocorrer um curto-circuito na instalação, trazendo premissas para que a proteção dos condutores fique assegurada nessa situação.

Por sua vez, no critério C6 tem-se como objetivo prover as medidas de proteção contra choques elétricos, estabelecendo que partes vivas perigosas não devem ser acessíveis e massas ou partes condutivas acessíveis não devem oferecer perigo de choque elétrico, em qualquer situação.

A respeito do dimensionamento de condutores de instalações para motores a NBR 5410:2004 traz algumas ressalvas, como o item 6.2.7.3, que diz que quedas de tensão maiores que as indicadas pelo critério C3 são permitidas para equipamentos com corrente de partida elevada (que é o caso dos motores), durante o período de partida. Tem-se também, no item 6.5.1.3.1, que no dimensionamento dos condutores do circuito terminal que alimenta exclusivamente um motor, deve ser considerada uma corrente de projeto no mínimo igual à corrente nominal do motor, nas condições de utilização.

As ressalvas são para a partida, mas em regime permanente as quedas de tensão nos terminais do motor não devem ultrapassar os limites estabelecidos pelo critério C3, como apresentado no item 6.5.1.3.2. Na partida do motor tem-se que a queda de tensão em seus terminais não deve ultrapassar 10% da respectiva tensão nominal, conforme o item 6.5.1.3.3.

A seção dos condutores determinada atendendo todos os critérios da NBR 5410:2004 reduz ao mínimo o investimento inicial, mas não considera o custo das perdas de energia ao longo da vida útil da instalação.

O dimensionamento econômico, estabelecido pela NBR 15920 – Cabos elétricos – Cálculo da corrente nominal – Condições de operação – Otimização econômica das seções dos cabos de potência, visa encontrar áreas de seção dos condutores que reduzam o custo operacional sem gerar custos iniciais altos, de forma que, a soma do custo inicial, de compra e instalação, com custos operacionais, da perda de energia, seja minimizada.

Existem alguns circuitos onde o emprego dos critérios econômicos é particularmente mais interessante, como aqueles que funcionam por longos períodos de tempo ou que envolvem cargas relativamente elevadas, como por exemplo circuitos de alimentação de motores elétricos (PROCOBRE, 2016).

Para analisar a viabilidade econômica de utilizar-se uma alternativa proposta, em substituição da NBR 5410:2004, além do custo total, utiliza-se métodos de análise de investimento que nos permitem saber o tempo de retorno aproximado, o lucro ou prejuízo que o projeto proporcionará, em termos de valores presentes, e a taxa de lucratividade

esperada desse investimento. Alguns desse métodos são: TIR – Taxa Interna de Retorno; VPL – Valor Presente Líquido; e *Payback*.

Considera-se o investimento inicial sendo a diferença entre os custos iniciais de aquisição e instalação dos condutores dimensionado por cada norma, as entradas de caixa serão as reduções dos custos operacionais e o tempo máximo de retorno será o tempo de vida útil da instalação, em média 30 anos.

1.1. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho de conclusão de curso é analisar a viabilidade econômica do dimensionamento de condutores segundo o método econômico, que respeita a NBR 15920:2011, em detrimento do método técnico, que segue a NBR 5410:2004.

Como objetivos específicos tem-se:

- dimensionar os condutores segundo método técnico;
- dimensionar os condutores segundo método econômico;
- estimar os custos das perdas ao longo da vida útil da instalação, segundo cada dimensionamento;
- estimar os custos das perdas ao longo da vida útil da instalação considerando seções maiores intermediárias; e
- analisar a viabilidade econômica de cada dimensionamento, considerando o custo de instalação e o custo das perdas ao longo do tempo estimado.

1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

Para o desenvolvimento desse trabalho, será feita a divisão em três etapas essencialmente. A primeira será dedicada a revisão do estado da arte e a aquisição de conhecimentos inerentes ao projeto. A partir dos conhecimentos adquiridos com as revisões e os estudos, será possível realizar o dimensionamento dos condutores das instalações, segundo os critérios técnico e econômico, além de um dimensionamento alternativo, que considera seções superiores ao dimensionado segundo a norma técnica e inferiores ao limite de 120 mm².

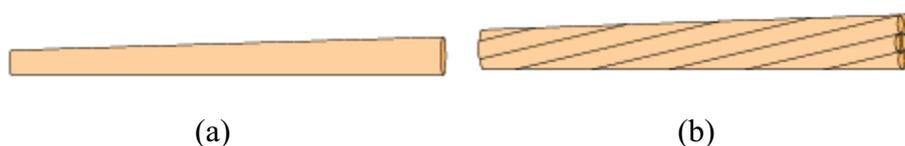
Por fim, será realizado a análise econômica de investimento considerando todas as alternativas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 FIOS E CABOS

Segundo COTRIM (2009), pode-se definir um fio como um condutor metálico, maciço, podendo ser flexível ou rígido, de formato cilíndrico, com seção transversal invariável e de comprimento muito maior que a sua seção transversal. Os fios podem ser usados diretamente como condutores elétricos ou para a fabricação de “condutores encordoados”, estes por sua vez são condutores constituídos por um conjunto de fios dispostos helicoidalmente. Essa construção confere ao condutor maior flexibilidade em relação ao condutor sólido (fio) e é conhecido como cabo. Os fios que formam os cabos podem ser isolados ou não entre si, podendo ainda o conjunto ser isolado ou não, nas Figuras 1 e 2 ilustra-se as configurações citadas.

Figura 1 - Condutores nus: (a) fio e (b) cabo.



Fonte: Prysmian, 2010.

Figura 2 - Condutores isolados: (a) fio e (b) cabo.



Fonte: Prysmian, 2010.

COTRIM (2009) traz ainda que os cabos de potência são cabos que englobam desde os cabos de linhas de transmissão até os cordões usados na ligação de aparelhos às tomadas de corrente, podem ser condutores nus, condutores cobertos, condutores isolados, cabos uni ou multipolares, cabos multiplexados ou cordões, como apresentados adiante.

2.1.1 CONDUTORES

Os condutores elétricos podem ser definidos como materiais com baixa resistência à passagem da corrente elétrica que, devido a essa característica, são capazes de transmitir quase em sua totalidade a energia elétrica conduzida por eles.

Os melhores materiais condutores de eletricidade são os metais, como: cobre, ouro, ferro, prata e alumínio, e suas ligas, embora existam outros materiais não metálicos que

também têm a propriedade de conduzir a corrente elétrica, como grafite ou soluções salinas, por exemplo, água do mar, (PEREIRA *et al.*, 2016).

A distribuição de carga nos materiais condutores é o resultado do movimento dos elétrons. Os materiais eletricamente condutores permitem que os elétrons sejam transportados de uma partícula para outra, uma vez que um objeto carregado sempre distribuirá sua carga até que as forças repulsivas gerais entre os elétrons em excesso sejam minimizadas. Desta forma, se um condutor carregado toca em outro condutor, o primeiro pode transferir sua carga para o segundo (NASCIMENTO, 2016). Condutores, então, são aqueles materiais que possuem um grande número de elétrons livres que se movem transmitindo mais facilmente a carga de um objeto para outro.

É sabido que, quanto menor a resistência de um material em conduzir a corrente elétrica, menor o nível de queda de tensão ao longo do comprimento do condutor, conseqüentemente, menor as perdas de energia. Na equação (1) mostra-se que a resistência de um condutor depende de seu comprimento (l), da sua área de seção transversal (S) e da resistividade do material utilizado (ρ).

$$R = \frac{\rho \times l}{S} \quad (1)$$

Nos casos em que a distância entre o ponto de alimentação e o circuito a ser ligado é fixo, ou seja, o comprimento do condutor é um dado fixo da instalação, apenas a resistividade e a área de seção transversal podem ser modificadas a fim de se encontrar um determinado valor de resistência.

Analisando a equação (1) observa-se que o aumento da área de seção transversal diminui a resistência do condutor, entretanto, demanda mais material para um mesmo trecho de instalação, portanto aumenta o custo da instalação, essa variável em específico será o objeto de estudo principal desse trabalho.

A resistividade por sua vez é uma propriedade inerente a cada material. Na Tabela 1 apresenta-se a resistividade de alguns dos materiais condutores na condição de 20 °C.

Tabela 1 – Resistividade de materiais condutores a 20 °C.

Material	Resistividade ($\Omega \cdot m$)
Prata	$16,45 \times 10^{-9}$
Cobre	$17,23 \times 10^{-9}$

Ouro	$24,43 \times 10^{-9}$
Alumínio	$24,25 \times 10^{-9}$

Fonte: Adaptado de BOYLESTAD (2012).

Como pode ser observado na Tabela 1, devido a menor resistividade, a prata é o melhor condutor de eletricidade, porém possui um alto custo, o que faz com que seu uso industrial e doméstico seja reduzido em comparação com outros condutores metálicos. É usado em fusíveis de curto-circuito e instrumentos médicos elétricos, por exemplo.

O cobre por sua vez possui excelentes propriedades elétricas, mecânicas e um baixo custo, isso faz com que seja o condutor mais utilizado em instalações de baixa tensão. É altamente maleável e pode ser encontrado principalmente em componentes elétricos e de fiação. O tipo de cobre mais utilizado como condutor elétrico é o eletrolítico, ou seja, refinado por eletrólise, de pureza de até 99,9% (POLOSE, 2017).

O ouro é inalterável pelo ar, calor, umidade e a maioria dos agentes químicos, e embora possua uma baixa resistividade elétrica, um pouco maior que o cobre, tem elevado custo, assim tem seu uso limitado. É encontrado em conectores elétricos e terminais de bateria.

O segundo condutor mais utilizado é o alumínio, devido principalmente a excelente relação de custo/condutividade, além de ser mais leve que os materiais já citados, isso faz com que seja exigido menores esforços físicos das estruturas que suportam os condutores, como postes e torres de linhas de transmissão, dessa forma sua aplicação é muito mais voltada às redes aéreas de distribuição e transmissão de energia.

A maior limitação do uso do alumínio para o fim de condução de energia é a dificuldade de confecção de acessórios para conexão dos condutores aos equipamentos da instalação, em face da rápida oxidação do metal quando em contato com o ar, fato que gera perdas em forma de calor nos pontos de ligação (COTRIM, 2009).

Ressalta-se aqui que o termo “condutor elétrico” na prática é usado não só para designar o condutor como definido anteriormente, mas também os condutores isolados, os cabos uni e multipolares, os fios e os cabos nus, os fios e os cabos cobertos, as barras e os barramentos blindados. Dito isso tem-se que, em condutores elétricos, a isolamento é aplicada sobre o condutor, para isolá-lo eletricamente do ambiente que o circunda e dos outros condutores que estão próximos (COTRIM, 2009).

2.1.2 ISOLAÇÃO

Os materiais isolantes, em contraste com os materiais eletricamente condutores, impedem o fluxo livre de elétrons de átomo a átomo e de molécula a molécula. Se uma carga for transferida para um material isolador em determinado local, essa carga raramente será distribuída uniformemente sobre a superfície do material, assim, o excesso de carga ficará na posição inicial da carga pois as partículas isolantes não permitem o livre fluxo de elétrons, (GOUVEIA *et al.*, 2010).

Embora os isoladores não sejam úteis para transferência de carga, eles desempenham um papel crucial em instalações elétricas pois, por limitação de espaço físico, os condutores com diferentes potenciais são dispostos juntos nas mesmas canaletas, eletrodutos e eletrocalhas, então os materiais condutores são revestidos por materiais isolantes, com o objetivo de evitar curto-circuito ou eletrocussão na instalação elétrica. Este arranjo permite a manipulação de um objeto condutor, sem tocá-lo (OLIVEIRA, 2017).

Deve ser entendido que nem todos os materiais eletricamente condutores têm o mesmo nível de condutividade e nem todos os isoladores são igualmente resistentes ao movimento do elétron. A condutividade elétrica é análoga à transparência de certos materiais à luz: os materiais que facilmente "passam" pela luz são chamados de "transparentes", enquanto os que não passam são chamados de "opacos". No entanto, nem todos os materiais transparentes são igualmente condutores à luz. O mesmo se aplica aos condutores e aos isolantes elétricos, alguns são melhores do que outros (OLIVEIRA, 2009).

A determinação do material de isolamento altera importantes parâmetros de serviço nos condutores. Na Tabela 2 extraída da NBR 5410:2004, mostra-se quais as temperaturas máximas de operação medidas nos condutores de acordo com o tipo de isolamento para três situações: regime permanente, em que as condições de funcionamento estão estáveis, em regime de sobrecarga e em regime de curto-circuito.

Tabela 2 – Temperaturas características nos condutores para três situações distintas.

Material de Isolação	Temperatura máxima para serviço contínuo [°C]	Temperatura limite de sobrecarga [°C]	Temperatura limite de curto-circuito [°C]
Cloreto de polivilina (PVC)	70	100	160
Borracha de etileno-propileno (EPR)	90	130	250

Polietileno reticulado (XLPE)	90	130	250
-------------------------------	----	-----	-----

Fonte: NBR 5410:2004.

Para manter as temperaturas máximas especificadas, em função da isolação, estabelece-se que os cabos de potência não podem operar em regime de sobrecarga por mais 100 horas durante doze meses consecutivos ou mais 500 horas durante a vida do condutor. O tempo de operação máxima em regime de curto-circuito, no qual o condutor pode manter as temperaturas máximas especificadas em função da isolação é de 5 segundos (NBR 5410, 2004).

Quanto aos materiais de isolação apresentados, COTRIM (2009) traz que eles possuem algumas características comuns, como por exemplo a homogeneidade da isolação e boa resistência ao envelhecimento em serviço, ou seja, mesmo com o passar do tempo de operação do condutor, o nível de isolamento permanece muito próximo do seu valor inicial, em todas as suas regiões. Ou ainda, o bom comportamento ao fogo garantindo resistência à propagação do fogo por meio de composições adequadas de isolantes sólidos.

O mesmo autor destaca também algumas características específicas dos três materiais isolantes citados – o PVC (cloreto de polivinila), termoplástico, o EPR (Borracha etileno-propileno) e o XLPE (polietileno reticulado), ambos termofixos –, sendo esses os materiais mais empregados para isolação de condutores.

As principais características PVC são:

- Possui rigidez dielétrica elevada, entretanto tem seu emprego limitado a sistemas de até 10 kV, pois acima desse valor as perdas dielétricas são elevadas;
- Transmite mal o fogo, contendo sua propagação, mas sua combustão provoca emissão de gases corrosivos e tóxicos, principalmente o clorídrico. Contudo, a quantidade desses tóxicos pode ser reduzida pela utilização de uma mistura de formulação adequada;
- O envelhecimento térmico no PVC pode ser eficazmente combatido por estabilizantes apropriados, devido ao fato de ser essencialmente uma mistura de cloreto de polivinila puro, plastificante, cargas e estabilizantes;
- É facilmente colorido com cores vivas, o que faz com que o PVC também seja empregado na cobertura dos cabos unipolares e multipolares.

Dados essas características, considera-se o PVC um isolante muito bom para os cabos de potência, cuja sua principal característica é que, de modo geral, o fabricante pode manipular a composição da mistura para satisfazer às mais variadas exigências, determinando quais características químicas, mecânicas e elétricas o material terá.

Como principais características do isolamento de EPR pode-se destacar:

- Possui boa resistência no que diz respeito ao envelhecimento térmico, permitindo conservar densidades de corrente aceitáveis quando os cabos operam em temperatura elevada;
- Possui também alta resistência à deformação térmica, permitindo temperaturas de 250°C durante os curtos-circuitos;
- Apresenta baixa dispersão da rigidez dielétrica, o que permite utilizar essa isolamento até em cabos de alta tensão;
- É muito flexível, mesmo a temperaturas inferiores a 0°C;
- Apresenta alta absorção de umidade, nesse caso, faz-se necessário as capas metálicas de proteção em muitos cabos.

De mão do exposto, e apesar da sensibilidade a umidade, pode-se considerar o EPR é um ótimo isolante sólido, dado que essa característica indesejada pode ser reduzida por meio da formulação adequada.

Por último, destaca-se as principais características do isolamento de XLPE que se somam as já citadas para EPR:

- Maior dispersão da rigidez dielétrica, o que exige cuidados especiais quando o material é aplicado em tensões superiores à 15 kV;
- Melhor comportamento mecânico, maior a resistência intempéries e, sobretudo, o melhor comportamento ao fogo;
- A reticulação não modifica sensivelmente o bom comportamento do polietileno a baixas temperaturas e, por outro lado, reforça a estabilidade química.
- O XLPE é utilizado em cabos de baixa e de média tensões.

Dado que os condutores com isolamento de EPR/XLPE suportam temperaturas mais elevadas do que os com isolamento em PVC para a mesma área de seção, tem-se que um cabo

isolado com EPR ou XLPE pode conduzir uma corrente elétrica de maior magnitude que um cabo isolado com PVC.

2.1.3 BLINDAGEM

Blindagem é o envoltório condutor ou semicondutor, aplicado sobre um condutor ou conjunto de condutores, isolados ou não, com a finalidade de reduzir os efeitos da interferência eletromagnética.

A concentração de esforços elétricos em determinados pontos da isolação, provocada pela distorção do campo elétrico nos condutores sem blindagem, pode exceder os limites permissíveis da isolação, ocasionando uma depreciação na vida do cabo. Com a interposição de uma camada semicondutora, seja entre o condutor e a isolação – blindagem interna – ou entre a isolação e a cobertura – blindagem externa –, o campo elétrico torna-se uniforme minimizando ou até mesmo eliminando o problema da interferência eletromagnética (COTRIM, 2009).

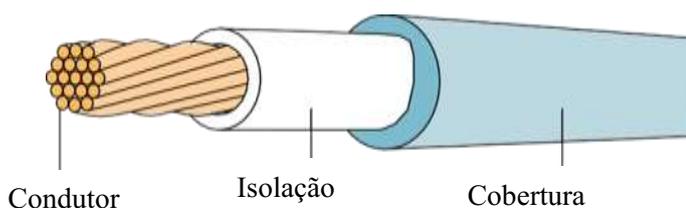
2.1.4 COBERTURA

A fim de se obter uma maior proteção do fio ou cabo contra influências externas, tais como condições ambientais e atrito, um invólucro externo não metálico, contínuo e sem função de isolação é adicionado.

Dependendo dos fatores que o fio ou cabo será exposto, o material de cobertura é escolhido. Geralmente é utilizado PVC, por ser um material bastante resistente e econômico. O polietileno e o Neoprene são bastante utilizados, o primeiro em instalações em ambientes com alto teor de ácidos, bases ou solventes. O segundo é utilizado em instalações que necessitam de boa flexibilidade e grande resistência ao resgaste (COTRIM, 2009).

Na figura 3 apresenta-se a ilustração de um cabo dotado de isolação e cobertura.

Figura 3 - Condutor dotado de isolação e cobertura.



Fonte: Prysmian, 2010.

2.1.5 CABO DE POTÊNCIA

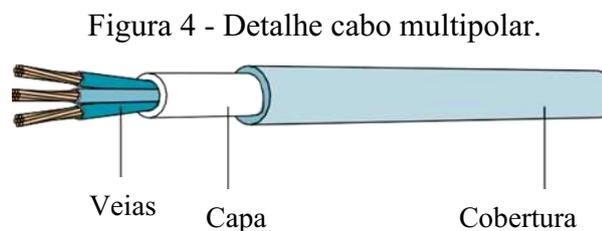
A utilização de cobertura para proteção dos condutores adiciona novas possibilidades de configuração aos cabos de potência, COTRIM (2009) na Tabela 3 é apresentada a definição de alguns desses tipos de cabos.

Tabela 3 – Algumas configurações de cabo de potência.

Tipo	Definição	Exemplos
Condutor Isolado (cabo ou fio)	Cabo ou fio dotado apenas de isolação	
Cabo unipolar	Cabo isolado dotado de cobertura	
Cabo multipolar	Dois ou mais cabos isolados sob a mesma cobertura	
Cabo multiplexado	Dois ou mais condutores isolados entre si, dispostos helicoidalmente, sem cobertura	
Cordões	É um cabo de pequena seção transversal, com reduzido número de condutores isolados, torcidos ou dispostos em paralelo	

Fonte: Adaptado de COTRIM (2009).

COTRIM (2009) diz que os cabos multipolares são utilizados em circuitos terminais, circuitos de distribuição e ligações de equipamentos móveis, são cabos flexíveis e que proporcionam a economia de espaço ao longo da sua instalação. Além da cobertura, os cabos multipolares podem ser dotados de capa, que é uma camada interna aplicada sobre uma veia ou sobre um conjunto de veias de um cabo. As capas podem ser metálicas ou não, no primeiro caso, a capa exerce função mecânica, e no caso de ser não metálica, a finalidade principal é dar ao cabo uma forma cilíndrica. Na Figura 4 detalha-se o condutor com as configurações citadas.



Fonte: Prysmian, 2010.

Outras aplicações para cabos de potência em instalações de baixa tensão são (COTRIM, 2009):

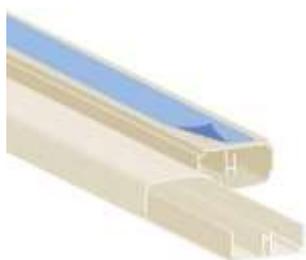
- Condutores isolados: circuitos terminais, circuitos de distribuição e ligações internas de quadros de distribuição;
- Cabos unipolares: circuitos terminais e circuitos de distribuição;
- Cabos multiplexados: circuitos de distribuição;
- Cordões: ligações de equipamentos móveis ou portáteis.

2.1.6 INSTALAÇÃO DOS CONDUTORES

Uma linha elétrica de uma determinada instalação engloba, além dos cabos de potência, acessórios para devida proteção, suporte e fixação. Um dos elementos que se pode destacar é o conduto elétrico, que é um elemento destinado a conter condutores elétricos, providos de isolamento. Nas instalações elétricas prediais os condutos mais utilizados são eletrodutos e canaletas.

Uma canaleta é um conduto fechado com tampas removíveis e instaladas em toda sua extensão, permitindo o acesso aos condutores nela instalados durante e após a instalação, geralmente são fabricadas em PVC ou alumínio. Enquanto um eletroduto pode ser usado em linhas elétricas embutidas, subterrâneas ou aparentes, podendo ser seção circular ou não, destinado a conter condutores elétricos providos de isolamento, permitindo tanto a enfição como a retirada destes. Os eletrodutos podem ser metálicos (aço, alumínio) ou de material isolante (PVC, polietileno, fibrocimento).

Figura 5 - Canaleta de PVC.



Fonte: Prysmian, 2010.

Figura 6 - (a) Eletroduto rígido e (b) corrugado.



Fonte: Prysmian, 2010.

O item 6.2.10 da NBR 5410:2004 discorre sobre a disposição dos condutores nos condutos, nesse ponto admite-se que os condutos fechados contenham condutores de mais de um circuito nos seguintes casos:

- a) quando as quatro condições seguintes forem simultaneamente atendidas:
 - i. os circuitos pertencerem à mesma instalação, isto é, se originarem do mesmo dispositivo geral de manobra e proteção;
 - ii. as seções nominais dos condutores de fase estiverem contidas dentro de um intervalo de três valores normalizados sucessivos;
 - iii. todos os condutores tiverem à mesma temperatura máxima para serviço contínuo; e
 - iv. todos os condutores forem isolados para a mais alta tensão nominal presente; ou
- b) no caso dos circuitos de força, de comando e/ou sinalização de um mesmo equipamento.

Como já citada, a principal função do eletroduto é conter o caminho da fiação elétrica e protegê-los de influências externas como choques mecânicos, agentes químicos, mas podem também proteger o meio ambiente contra danos resultantes de curto-circuito envolvendo condutores. Quanto a isso a NBR 5410:2004 apresenta condições para o uso de eletrodutos nas instalações, algumas delas são:

- i. só são admitidos eletrodutos não-propagantes de chama.
- ii. em qualquer situação, os eletrodutos devem suportar as solicitações mecânicas, químicas, elétricas e térmicas a que forem submetidos nas condições da instalação.
- iii. nos eletrodutos só devem ser instalados condutores isolados, cabos unipolares ou cabos multipolares.

Com objetivo de garantir que, após montagem da linha, os condutores possam ser instalados e retirados com facilidade, a norma discorre também sobre a taxa de ocupação e o comprimento dos eletrodutos. A taxa de ocupação do eletroduto não deve ser superior a 53% no caso de um condutor, 31% no caso de dois condutores ou 40% no caso de três ou mais condutores instalados.

Para garantir uma vida satisfatória a condutores e isolações submetidos aos efeitos térmicos produzidos pela circulação de corrente são prescritos, entre outros itens, métodos

de referência de instalação. Esses métodos tiveram a capacidade de condução de corrente determinada por ensaio ou por cálculo e são indicados na IEC 60364-5-52. São eles:

A1: condutores isolados em eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolante;

A2: cabo multipolar em eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolante;

B1: condutores isolados em eletroduto de seção circular sobre parede;

B2: cabo multipolar em eletroduto de seção circular sobre parede;

C: cabos unipolares ou cabo multipolar sobre parede;

D: cabo multipolar em eletroduto enterrado no solo;

E: cabo multipolar ao ar livre;

F: cabos unipolares justapostos (na horizontal, na vertical ou em trifólio) ao ar livre;

G: cabos unipolares espaçados ao ar livre.

2.2 DIMENSIONAMENTO TÉCNICO

Dimensionamento técnico é aquele que aplica os requisitos das normas ABNT NBR 5410 – Instalações elétricas de baixa tensão. Tais requisitos consideram a menor seção possível do condutor para que não comprometa a segurança, a qualidade e a durabilidade da instalação elétrica.

Para se iniciar o dimensionamento dos condutores deve definir:

- A corrente de projeto, I_B ;
- O fator de potência da corrente;
- O tipo de condutor, como citado: fio, cabo, cabos multipolares, entre outros;
- O material do condutor, geralmente cobre ou alumínio;
- O material isolante do condutor, geralmente PVC, EPR ou XLPE; e
- O método de instalação dos condutores (tipo de linha elétrica), conforme Tabela 33 da NBR 5410:2004, que segue os métodos de referência indicados pela IEC 60364-5-52 e citados anteriormente.

De mão dessas informações pode-se fazer o dimensionamento seguindo as etapas conforme apresentado:

- i. determinação da seção pelo critério da seção mínima;
- ii. determinação da seção pelo critério da capacidade de condução de corrente;
- iii. verificação da seção pelo critério da queda de tensão, seguindo os limites estabelecidos pela NBR 5410:2004;
- iv. escolha da proteção contra correntes de sobrecarga e aplicação dos critérios de coordenação entre condutores e proteção contra correntes de sobrecargas;
- v. escolha da proteção contra correntes de curto-circuito e aplicação dos critérios de coordenação entre condutores e proteção contra correntes de curtos-circuitos.
- vi. proteção contra choques elétricos por seccionamento automático da alimentação em esquemas TN e IT.

O primeiro passo citado é determinar a seção mínima do condutor de acordo com a aplicação do circuito, esses valores são apresentados na tabela 47 da NBR 5410:2004. Tem-se, por exemplo, o valor mínimo de 1,5 mm² para condutores de cobre destinados a iluminação e 2,5 mm² para condutores de cobre destinados a circuitos de força. Os valores de seção dos condutores não devem ser inferiores aos estabelecidos na tabela 47.

2.2.1 CAPACIDADE DE CONDUÇÃO DE CORRENTE

Para determinar a seção pelo critério de condução de corrente considera-se a situação de plena carga e calcula-se a corrente corrigida (I'_B) de um condutor. I'_B é a corrente máxima que pode ser conduzida, continuamente, em condições especificadas, sem que a sua temperatura em regime permanente ultrapasse a temperatura máxima para serviço contínuo.

Nos fios e cabos providos de isolamento, a capacidade de condução de corrente depende de diversos fatores, como:

- método de instalação;
- material da isolamento, que determina a temperatura máxima para serviço contínuo;
- temperatura ambiente ou, no caso de cabos em eletrodutos enterrados, temperatura do solo;
- resistividade térmica do solo (para cabos em eletrodutos enterrados); e
- agrupamento de fios e cabos.

Sabendo os fatores acima, consulta-se a NBR 5410:2004 para se obter os fatores de correção adequados para a condição especificada do circuito. O material de isolamento e a temperatura ambiente são usados para consultar a tabela 40 da norma citada e obter-se k_1 , fator de correção para temperaturas ambientes diferentes da referenciada. A resistividade térmica do solo é usada para se obter o fator de correção para linhas subterrâneas em solo com resistividade térmica diferente de 2,5 K.m/W (k_2), na tabela 41.

O agrupamento dos fios/cabos refere-se ao agrupamento de mais de um circuito em um mesmo eletroduto. Sabendo o método de instalação e o agrupamento dos circuitos, consulta-se uma das tabelas de fator de correção de agrupamento (k_3) para se obter esse parâmetro. A tabela 42 aplica-se a condutores agrupados em feixe (em linhas abertas ou fechadas) e a condutores agrupados num mesmo plano, as tabelas 43, 44 e 45 aplicam-se a agrupamentos consistindo em mais de uma camada de condutores, agrupamento para linhas com cabos diretamente enterrados e agrupamento para linhas em eletrodutos enterrados, respectivamente.

De mão dos fatores de correção adequados pode-se calcular a corrente corrigida a partir da corrente de projeto do circuito, I_B , aplicando a equação a seguir:

$$I'_B = \frac{I_B}{k_1 \times k_2 \times k_3} \quad (2)$$

A NBR 5410:2004 prescreve 4 tabelas de capacidade de condução de corrente (tabelas 36 a 39), cujos valores variam dependendo do método de referência de instalação usado e do tipo de isolamento. Além disso, estabelece que número de condutores carregados a ser considerado é aquele indicado na tabela 46, de acordo com o esquema de condutores vivos do circuito. Então, de mão do valor da corrente corrigida e da quantidade de condutores carregados a ser considerados, consulta-se uma das tabelas de capacidade de condução de corrente prescritas e verifica-se a seção do condutor que suporta a corrente calculada.

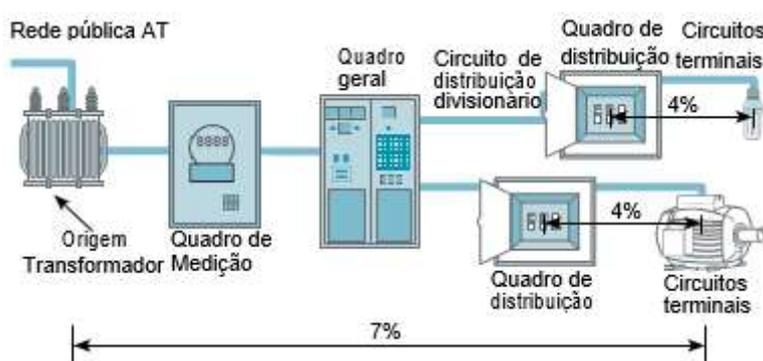
2.2.2 QUEDA DE TENSÃO

Em uma instalação elétrica, a tensão nos terminais de um equipamento de utilização deve ser igual à sua tensão nominal, adicionada de uma pequena variação, para mais ou para menos, com limites fixados, conforme Figura 7. Para verificação da seção do condutor pelo critério da queda de tensão, segue-se os limites de variação de tensão estabelecidos pela NBR 5410:2004, a fim de não prejudicar o funcionamento dos equipamentos, seja na diminuição

da vida útil, no aumento de perdas ou até mesmo no desempenho do equipamento. Apresentados nos itens 6.2.7.1 e 6.2.7.2, esses limites são:

- 7%, calculados a partir dos terminais secundários do transformador MT/BT;
- 5%, calculados a partir do ponto de entrega;
- 7%, calculados a partir dos terminais de saída do gerador, no caso de gerador próprio.
- Em nenhum caso a queda de tensão nos circuitos terminais pode ser superior a 4%.

Figura 7 - Limites de queda de tensão.



Fonte: Prysmian.

Determinada a seção do condutor pelos critérios até aqui apresentados, a queda de tensão em um circuito terminal (ΔU) pode ser calculada pela equação a seguir:

$$\Delta U = \overline{\Delta U} \times I_B \times l \quad (3)$$

Em que $\overline{\Delta U}$ é a queda de tensão unitária no condutor em V/A.km, fornecida pelos fabricantes. l é o comprimento do circuito em km e I_B é a corrente de projeto. Partindo do valor obtido de ΔU , calcula-se a porcentagem dessa queda em relação a tensão nominal do circuito (U_N),

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_N} \times 100 \quad (4)$$

Caso a porcentagem ultrapasse os limites estabelecidos pela NBR 5410:2004, deve-se limitar o valor de ΔU dentro do normatizado e calcular a queda de tensão unitária limite no condutor, $\overline{\Delta U}$, em V/A.km. A equação de queda de tensão então é reescrita da seguinte forma:

$$\overline{\Delta U} = \frac{\Delta U}{I_B \times l} \quad (5)$$

Por fim, a seção do condutor escolhido deve apresentar uma queda de tensão unitária inferior ao determinado na equação 5.

A respeito da queda de tensão em instalações para motores, a NBR 5410:2004 traz que, durante a partida, a queda de tensão em seus terminais não deve ultrapassar 10% da respectiva tensão nominal, conforme o item 6.5.1.3.3, entretanto, em regime permanente, a queda de tensão nos terminais do motor não deve ultrapassar os limites indicados nos itens 6.2.7.1 e 6.2.7.2, apresentados anteriormente.

A norma diz, no item 6.5.1.3.1, que no dimensionamento dos condutores do circuito terminal que alimenta exclusivamente um motor, deve ser considerada uma corrente de projeto no mínimo igual à corrente nominal do motor. No caso de instalações contendo diversos motores, deve-se considerar a possibilidade de partida simultânea de dois ou mais motores, segundo o item 6.5.1.2.2.

2.2.3 DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

O dimensionamento dos condutores estará completo após a escolha dos dispositivos de proteção contra correntes de sobrecarga, proteção contra correntes de curto-circuito e proteção contra choques elétricos.

Para que a proteção dos condutores contra sobrecargas seja assegurada, deve-se conhecer a corrente de projeto do circuito (I_B), a capacidade de condição de corrente do condutor (I_Z), bem como a corrente nominal (I_N) e a corrente de atuação (I_2) do dispositivo destinado a prover proteção. Tais características devem atender aos seguintes critérios:

$$I_B \leq I_N \leq I_Z \quad (6)$$

$$I_2 \leq 1,45 \times I_Z \quad (7)$$

Caso não atenda algum dos critérios, um condutor de seção maior deve ser considerado, alterando o valor de I_Z . É importante ressaltar que o segundo critério é aplicável somente quando for possível assumir que o circuito não operou em regime de sobrecarga por mais 100 horas durante doze meses consecutivos ou mais 500 horas durante a vida do condutor. Quando isso não ocorrer, a condição a ser adotada é:

$$I_2 \leq I_Z \quad (8)$$

Para a aplicação do critério da proteção contra correntes de curto-circuito deve-se conhecer, a corrente de curto-circuito (I_{CC}) no ponto em que vai ser instalado o dispositivo de proteção, a capacidade de interrupção nominal do dispositivo (I_{CN}), o material isolante, a seção transversal do condutor (S) e a duração do curto-circuito (t). Tais características devem atender aos seguintes critérios:

$$I_{CC}^2 \times t \leq K^2 \times S^2 \quad (9)$$

$$I_{CC} \leq I_{CN} \quad (10)$$

Aqui, K é um fator que depende do tipo de isolamento usado no condutor, sendo estabelecido pela NBR 5410:2004 um valor de 115 para condutores com isolamento em PVC e 143 para condutores com isolamento em EPR/XLPE. Os valores de K não são normatizados para condutores com seções inferiores a 10 mm² e curtos-circuitos com duração superior a 5 s.

A sexta etapa é dimensionar os condutores com proteção contra choques elétricos por seccionamento automático da alimentação em esquemas de aterramento TN e IT, provendo assim, mecanismos para a segurança operacional dos usuários e da instalação elétrica.

O esquema TN possui um ponto de alimentação diretamente aterrado, sendo as massas ligadas a esse ponto através do condutor de proteção. O esquema IT é implementado com o neutro isolado ou aterrado por meio de uma impedância grande o bastante para que a corrente de falta não seja suficiente para provocar o aparecimento de uma tensão de contato que ultrapasse o valor limite, nesse esquema as massas estão ligadas diretamente a terra.

O item 5.1.2.2.4 da NBR 5410:2004 diz que um dispositivo de proteção deve seccionar automaticamente a alimentação do circuito ou equipamento sempre que uma tensão de contato superior ao valor permitido seja estabelecida. No esquema de aterramento TN, considera-se que o dispositivo de proteção irá proteger o usuário se a seguinte condição for satisfeita:

$$Z_s \times I_a \leq U_0 \quad (11)$$

Sendo Z_s é a impedância, em ohms, do percurso da corrente de falta. Esse percurso é composto da fonte, do condutor vivo, até o ponto de ocorrência da falta, e do condutor de proteção, do ponto de ocorrência da falta até a fonte. I_a é a corrente, em ampères, que

assegura a atuação do dispositivo de proteção num tempo no máximo igual ao especificado na tabela 25 da NBR 5410:2004, ou a 5 s (condutor PEN) e U_0 é a tensão nominal, em volts, entre fase e neutro.

A corrente I_a é obtida fazendo-se:

$$I_a = I_n \times I_g \quad (12)$$

Sendo que I_n é a corrente nominal do dispositivo de proteção e I_g é o fator de multiplicação da corrente nominal, obtida a partir da curva de atuação do dispositivo selecionado, fornecida pelo fabricante, no tempo determinado pela tabela 25. Caso a condição não seja atendida, dever ser considerado um condutor de seção transversal superior, para diminuir o valor de Z_s .

O circuito é considerado corretamente dimensionando quando atende a todos os critérios descritos até aqui, apesar de poder apresentar uma seção nominal diferente para cada caso, considera-se como seção final a maior dentre todas obtidas, pois essa é a menor seção possível para atende todos os critérios.

A seção escolhida pelos critérios apresentados garante a segurança e a funcionalidade do circuito, mas, sem levar em conta o custo das perdas que acontecerão durante a vida do fio ou cabo, dado que quanto menor a seção do condutor, maior sua resistência elétrica e, conseqüentemente, maior a perda de energia ao longo do circuito.

2.3 PERDAS POR EFEITO JOULE

Ao conduzir uma corrente, os cabos de uma linha consomem parte da energia transportada. Esse consumo ocorre devido a resistência elétrica dos condutores, que faz com que parte da energia transportada seja convertida em energia térmica e dissipada para o ambiente. Esse consumo de energia em forma de calor é chamado de perdas por efeito Joule, e pode ser calculado pela seguinte equação:

$$E = R \times I_{max}^2 \times \Delta t \quad (13)$$

Sendo, I_{max} é a corrente de projeto máxima do circuito, Δt é o intervalo de tempo de circulação da corrente e R é a resistência elétrica do condutor calculada pela equação (1). Pode-se reescrever a energia consumida por efeito Joule em função da seção transversal do condutor:

$$E(S) = \frac{\rho \times l}{S} \times I_{max}^2 \times \Delta t \quad (14)$$

observa-se que o consumo de energia é inversamente proporcional à seção dos condutores, ou seja, quanto maior a seção do condutor menor a perda de energia por efeito Joule.

Como visto, a seção técnica, reduz ao mínimo o investimento inicial da instalação, mas não considera o custo das perdas de energia ao longo da sua vida útil, que podem ser bastante significativos, é nesse contexto que surge o critério econômico apresentado a seguir.

2.4 DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO

De acordo com o dimensionamento proposto na NBR 15920:2011, deve-se combinar os custos iniciais de aquisição e instalação dos condutores com os custos de perdas de energia que surgem durante sua vida econômica. Partindo do fato que, quanto menor a seção nominal do condutor elétrico, menor é o seu custo inicial e maior é o seu custo operacional, tem-se que a seção mais econômica de um condutor é aquela cuja soma desses custos resulta no menor valor. Para combinar esses custos, é necessário expressá-los em valores econômicos comparáveis, ou seja, valores que se referem ao mesmo ponto no tempo. Deste modo, o custo total (CT), em reais, de instalação e operação um condutor durante sua vida econômica, expresso em valores presentes, é dado por (PROCOBRE, 2016):

$$CT = CI + CJ \quad (15)$$

sendo, CI é custo de aquisição e instalação do condutor e CJ é o custo equivalente das perdas Joule no condutor ao longo de um período de N anos.

A seção econômica ótima de um condutor elétrico para a carga exigida em um determinado circuito é calculada, segundo a NBR 15920:2011, por:

$$S_{ec} = 1000 \times \left[\frac{I_{max}^2 \times F \times \rho_{20} \times B \times [1 + \alpha_{20}(\theta_m - 20)]}{A} \right]^{0,5} \quad (16)$$

Em que as constantes apresentadas são:

I_{max} : corrente de projeto máxima prevista para o circuito no primeiro ano (A);

ρ_{20} : resistividade elétrica do material condutor a 20°C ($\Omega.m$);

α_{20} : coeficiente de temperatura para a resistência do condutor a 20°C (K^{-1});

θ_m : temperatura média de operação do condutor (°C);

A : custo por unidade de comprimento, conforme seção do condutor (R\$/m.mm²); e

B : parâmetro auxiliar definido por (18); e

F : parâmetro auxiliar definido por (21).

I_{max} pode ser definida levantando-se os períodos de máxima demanda de energia das cargas do circuito analisado. A resistividade elétrica e o coeficiente de temperatura, por sua vez, são valores inerentes ao material do condutor. Para o cobre, BOYLESTAD (2012) traz os seguintes valores:

Tabela 4 – Resistividade elétrica e coeficiente de temperatura do cobre.

Variável	Valor
ρ_{20}	$18,35 \times 10^{-9} \Omega \cdot m$
α_{20}	$0,0068 K^{-1}$

Fonte: (NBR 15920, 2011).

Para determinação da temperatura média de operação do condutor (θ_m) a NBR 15920:2011 apresenta uma fórmula simples que relaciona a temperatura máxima de operação do condutor (θ), determinada pelo material de isolamento, com a temperatura ambiente onde o condutor está instalado (θ_a).

$$\theta_m = \frac{\theta - \theta_a}{3} + \theta_a \quad (17)$$

O parâmetro A é a componente variável do custo, relacionado à seção do condutor. Para obter seu valor deve-se considerar o custo total de instalação de um condutor ($CUSTO_N$), em que N representa a seção nominal do condutor. $CUSTO_N$ corresponde ao custo do próprio cabo (CB_N), que varia conforme o tipo escolhido, somado aos custos de instalação ($INST_N$), que dependem da maneira de instalar escolhida e dos custos com a mão de obra de montagem, portanto é necessário que sejam preparadas tabelas de custos totais de instalação que considerem essas alternativas, como o exemplo apresentado na Tabela 5 (PROCOBRE, 2016):

Tabela 5 – Definição do parâmetro A .

Seção Nominal (mm ²)	Custo inicial (R\$/m)			A (R\$/m.mm ²)
	Aquisição	Instalação	Total	
25	CB25	INST25	CB25+INST25=CUSTO25	–

35	CB35	INST35	CB35+INST35=CUSTO35	$\frac{CUSTO35 - CUSTO25}{35 - 25}$
50	CB50	INST50	CB50+INST50=CUSTO50	$\frac{CUSTO50 - CUSTO35}{50 - 35}$
70	CB70	INST70	CB70+INST25=CUSTO70	$\frac{CUSTO70 - CUSTO50}{70 - 50}$
95	CB95	INST95	CB95+INST95=CUSTO95	$\frac{CUSTO95 - CUSTO70}{95 - 70}$
120	CB120	INST120	CB120+INST120=CUSTO120	$\frac{CUSTO120 - CUSTO95}{120 - 95}$
150	CB150	INST150	CB150+INST150=CUSTO150	$\frac{CUSTO150 - CUSTO120}{150 - 120}$
185	CB185	INST185	CB185+INST185=CUSTO185	$\frac{CUSTO185 - CUSTO150}{185 - 150}$
240	CB240	INST240	CB240+INST240=CUSTO240	$\frac{CUSTO240 - CUSTO185}{240 - 185}$
300	CB300	INST300	CB300+INST300=CUSTO300	$\frac{CUSTO300 - CUSTO240}{300 - 240}$
400	CB400	INST400	CB400+INST400=CUSTO400	$\frac{CUSTO400 - CUSTO300}{400 - 300}$
Média				-

Fonte: (PROCOBRE, 2016).

O valor utilizado é a média para as combinações de seções conforme apresentado.

O parâmetro auxiliar B relaciona fatores construtivos dos condutores, como isolações e coberturas, com suas disposições físicas nas instalações, este parâmetro pode ser calculado por:

$$B = (1 + \gamma_p + \gamma_s) \times (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \quad (18)$$

sendo,

γ_p, γ_s = fatores de proximidade e de efeito pelicular;

λ_1, λ_2 = fatores de perda da cobertura e de perda da armação;

Deve-se salientar aqui que, de modo geral, para determinação da seção econômica de cabos de baixa tensão (≤ 1 kV) e média tensão ($\leq 36,2$ kV), as grandezas $\gamma_p, \gamma_s, \lambda_1$ e λ_2 podem ser desprezadas, considerando a variável auxiliar que relaciona esses fatores (B) igual a 1.

O parâmetro F é utilizado para agrupar vários coeficientes relacionados aos custos de energia e previsão de aumento de cargas, para determiná-lo precisa-se primeiramente calcular r , que relaciona o aumento anual da carga (a) e do custo da energia (b), sem incluir efeitos da inflação, com a taxa de capitalização (i).

$$r = \frac{(1 + a/100)^2 \times (1 + b/100)}{(1 + i/100)} \quad (19)$$

Em seguida, utiliza-se o parâmetro auxiliar Q para relacionar r com o período de vida útil da instalação (N) através da equação a seguir:

$$Q = \sum_{n=1}^N (r^{n-1}) = \frac{1 - r^N}{1 - r} \quad (20)$$

Por fim, definidos o número de fase por circuito (N_p), o número de circuitos que levam o mesmo tipo e valor de carga (N_c), o tempo de operação com perda joule máxima, ou seja, o período com máxima corrente (T), em horas/ano, o custo de um watt-hora (P), em R\$/W.h, e a variação anual da demanda (D), em R\$/W.ano, pode-se calcular o parâmetro F e resolver a equação (16).

$$F = N_p \times N_c \times (T \times P + D) \times \frac{Q}{(1 + i/100)} \quad (21)$$

Ainda de acordo com a NBR 15920:2011, o custo equivalente das perdas Joule no condutor (CJ) pode ser expressor por:

$$CJ = I_{max}^2 \times R \times l \times F \quad (22)$$

sendo, l e R representam, respectivamente, o comprimento do condutor, em metros, e a resistência aparente por unidade de comprimento do condutor selecionado.

É pouco provável que o cálculo da seção econômica (S_{ec}) pela equação (16) resulte em uma seção padronizada no mercado, sendo assim, o custo CJ deverá ser calculado para os valores de seções nominais adjacentes padronizadas, para então, escolher-se a seção mais econômica entre as analisadas. Calcula-se R em função da seção (S), considerando a temperatura média de operação do condutor (θ_m), por:

$$R(S) = \frac{\rho_{20} \times B \times [1 + \alpha_{20}(\theta_m - 20)]}{S} \times 10^6 \text{ (}\Omega/m\text{)} \quad (23)$$

Dessa forma, o custo total é reescrito da seguinte maneira:

$$CT = CI + I_{max}^2 + R + l + F \quad (24)$$

2.5 LIMITAÇÃO DOS CONDUTORES

Condutores rígidos e flexíveis possuem a mesma função, sendo que a diferença mais importante entre os dois é a flexibilidade dos cabos elétricos, que permite uma instalação mais simples e rápida, resultando na redução com o tempo da mão de obra da instalação, segundo explica o engenheiro eletricitista Hilton Moreno no artigo Diferenças entre os Fios Rígidos e os Cabos Flexíveis, publicado no programa Eletricista Consciente da Revista Potência, 2021.

A adoção de condutores de seções muito altas, como é o caso dos condutores de 150 mm², 185 mm² e 240 mm², ou superior, é um fator que dificulta a execução de uma instalação elétrica. Estes condutores apresentam menor flexibilidade em função do aumento da seção, bem como são menos comerciais, o que dificulta a substituição em caso de avarias. Assim, para as situações em que o dimensionamento resulte em cabos com seção superior a 120 mm², é comum adotar-se mais de um cabo por fase, de forma que soma dos cabos por fase se aproxime da seção dimensionada previamente.

2.6 ANÁLISE ECONÔMICA

O valor econômico de um projeto é baseado em sua capacidade de gerar fluxo de caixa futuro, ou seja, na capacidade de gerar renda econômica ou economia. No caso das alternativas de dimensionamento dos condutores apresentadas neste trabalho, deseja-se saber os fluxos de caixa (FC_t) mensais ou anuais ao longo de sua vida útil, que nesse caso são os valores economizados mensalmente ou anualmente pela utilização da alternativa proposta.

Payback (PB) é o período de tempo necessário para que se obtenha retorno do investimento inicial (I) feito em alguma aplicação. Ou seja, é o tempo em que o lucro líquido se iguala ao valor aplicado no investimento analisado. FC_t são as receitas fixas obtidas em períodos fixos. O PB pode ser calculado pela equação a seguir:

$$PB = \frac{I}{FC_t} \quad (25)$$

Como se trata de um investimento de longo prazo, deve-se considerar o valor do capital no tempo por meio do custo de oportunidade (k), esse termo é usado em economia para se referir ao custo de algo em função de outra oportunidade renunciada, ou seja, corresponde ao que se deixa de ganhar com uma proposta de investimento por se escolher a outra. O custo de oportunidade é usado também para se determinar o valor presente das futuras entradas de fluxo de caixa.

Como o *payback* não considera correção monetária ou financiamento, outras técnicas de análise econômica de investimentos que podem ser usadas para avaliar as alternativas apresentadas neste projeto, uma delas é o Valor Presente Líquido – VPL, que o impacto de rendimentos futuros com base no valor presente do capital e pode ser calculado pela equação (26). De maneira geral, o VPL desloca as entradas do fluxo de caixa para a data de investimento do projeto por uma taxa de juros presumida, para, com isso, compará-las com o valor do investimento. Caso o valor do investimento seja inferior ao valor atual dos fluxos de caixa, o VPL é positivo, significando rentabilidade positiva para o investimento.

$$VPL = -I + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+k)^t} \quad (26)$$

Outro parâmetro que pode ser considerado na análise econômica de investimentos é a Taxa Interna de Retorno – TIR. Esta é a taxa de retorno esperada de um projeto de investimento e pode ser obtida pela equação (27). O TIR não apresenta uma avaliação absoluta da rentabilidade como o VPL, mas sim a taxa intrínseca de rendimento. O projeto criará valor se o TIR for maior que o custo de oportunidade de capital.

$$-I + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} = 0 \quad (27)$$

Após ser apresentado os conceitos teóricos relevantes aos condutores e aos métodos de dimensionamento considerados, é apresentado as instalações adotadas como estudo de caso deste trabalho.

3. METODOLOGIA

Serão analisadas três instalações: uma de grande porte, uma de médio porte e uma de pequeno porte, como apresentadas na Tabela 6. Todos os motores possuem sistema de

acionamento com soft-starter e corrente de partida máxima de 300% da corrente nominal, além disso é considerado que os quadros de comando estão a 30 metros do transformador.

Tabela 6 – Instalações a serem avaliadas.

Instalação 1	Instalação 2	Instalação 3	
4 motores	3 motores	2 motores	2 motores
1780 RPM	1780 RPM	3500 RPM	
125 cv	20 cv	500 cv	40 cv
Fator de demanda = 75%	Fator de demanda = 67%	Fator de demanda = 50%	

Fonte: Autoria própria, 2021.

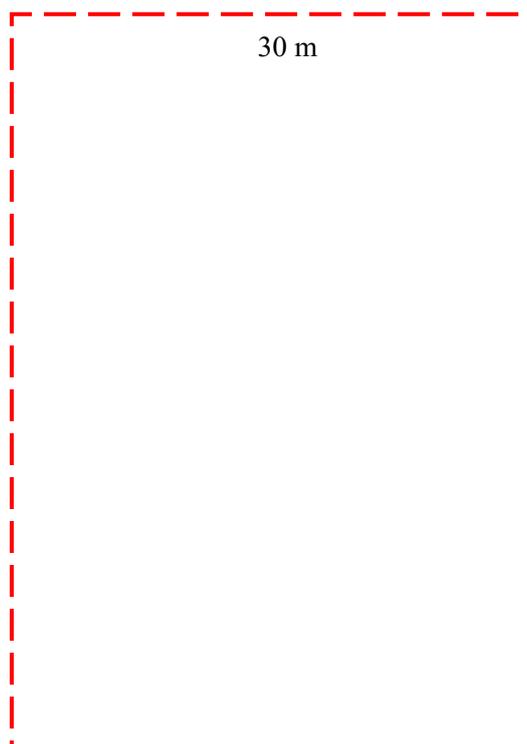
Por fim, os resultados obtidos serão comparados para avaliar qual o melhor dimensionamento, do ponto de vista econômico, para as instalações.

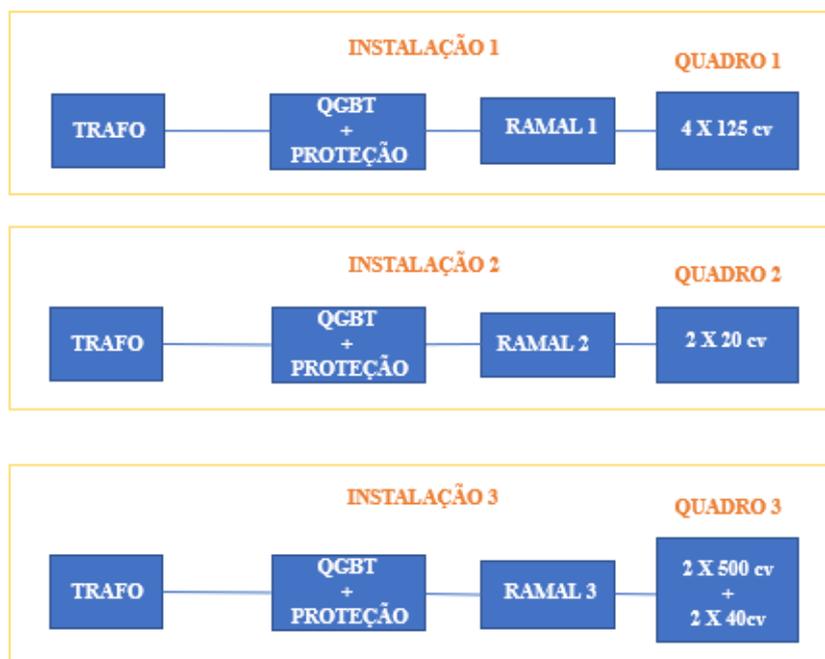
3.1 INSTALAÇÕES AVALIADAS

As instalações apresentadas na Tabela 6 servirão como base para a comparação entre o dimensionamento técnico e o dimensionamento econômico. Nesse estudo será analisado cada instalação individualmente, como sendo a única existente, como mostrado na

Figura 8 Dado que o objetivo é dimensionar os ramais alimentadores entre o transformador e os quadros de comando, o comprimento do condutor a ser dimensionado será de 30 m.

Figura 8 - Instalações Avaliadas.





Fonte: Autoria própria, 2021.

Para realizar o dimensionamento de cada ramal, além do comprimento, precisa-se definir seus aspectos construtivos, como: material condutor, tipo de isolamento, tipo de cabo e método de referência de instalação.

Para os três quadros de comando, foi considerada a tensão de operação de 220/380 V, 60 Hz, motor trifásico e temperatura média ambiente de 35 °C. Os circuitos considerados são constituídos por cabo unipolar, com condutor de cobre em isolamento de EPR instalados usando método de referência B1. Foi adotado que os circuitos seguem em operação 20 horas por dia, 265 dias por ano.

Para se determinar a corrente de projeto de cada ramal alimentador deve-se calcular:

1º A potência de cada motor ligado ao quadro $P(VA)$:

Calcula-se a potência de cada motor a partir da potência do eixo fornecida na Tabela 6, $P(CV)$, e considerando o fator de potência (fp) apresentado do catálogo de Motor Elétrico Trifásico da WEG, para a linha W22 IR3 Premium de IV polos, como apresentado no Anexo D.

$$P(VA) = \frac{P(W)}{FP} = \frac{735 \times P(CV)}{FP} \quad (28)$$

2º A corrente de cada motor (I_n):

De mão da potência de cada motor ($P(VA)$), da tensão de linha que alimenta o circuito (V_L) e do rendimento (η) obtido do catálogo da WEG, usa-se a equação (29) para calcular-se as correntes nominais de cada motor (I_n) ligado ao quadro.

$$I_n = \frac{P(VA)}{\sqrt{3} \times V_L \times \eta} \quad (29)$$

3º A corrente nominal do alimentador (I_N):

Calcula-se a corrente nominal do condutor alimentador (I_N) fazendo a soma das correntes dos motores, como na equação (30).

$$I_N = \sum_{i=1}^M I_{nM} \quad (30)$$

Sendo M é a quantidade de motores ligados ao quadro.

4º Corrente de projeto do condutor alimentador (I_B):

Levando em consideração a corrente nominal (I_N) calculada anteriormente e o fator de demanda (fd) fornecido na Tabela 6, calcula-se a corrente de projeto (I_B) de cada alimentador como segue:

$$I_B = I_N \times fd \quad (31)$$

O cálculo da corrente de projeto de cada ramal é apresentado no Apêndice A, e os resultados são representados a seguir:

Tabela 7 – Correntes dos ramais de alimentação de cada quadro.

Grandezas Elétricas	Ramal 1	Ramal 2	Ramal 3	
	4 motores de 125 cv	3 motores de 20 cv	2 motores de 40 cv	2 motores de 500 cv
Potência de cada motor – $P(kVA)$	106,83	18,15	35	427,33
Corrente de cada motor – $I_n(A)$	170,14	29,65	56,33	671,41
Corrente em cada ramal – $I_N(A)$	680,56	88,95	1.455,50	
Corrente de Projeto – $I_B(A)$	510,42	59,60	727,74	
Corrente máxima – $I_{max}(A)$	850,70	118,60	2.070,56	

Fonte: Autoria própria, 2021.

Em dimensionamento prévio, verificou-se que as seções calculadas para circuitos de grande e médio porte (instalações 1 e 3) são superiores ao limite convencional de 120 mm^2 , por esse motivo será considerado mais de um condutor por fase no dimensionado dos ramais alimentadores das instalações 1 e 3, a fim de se obter condutores de menor seção.

Para o ramal 1 será considerado 5 condutores por fase, logo a corrente em cada condutor será $1/5$ da corrente de projeto do ramal: $102,08 \text{ A}$. Assim como a corrente de projeto, corrente máxima será dividida para os cinco condutores de cada fase, ou seja, $I_{max} = 170,14 \text{ A}$. Para o ramal 3 será considerado 6 condutores por fase, portando a corrente em cada condutor a ser dimensionado é de $I_B = 121,29 \text{ A}$. Nesse ramal, em cada condutor tem-se que essa corrente máxima vale $I_{max} = 345,09 \text{ A}$.

De forma resumida tem-se:

Tabela 8 – Corrente por condutor.

	Ramal 1	Ramal 2	Ramal 3
Nº de condutor por fase	5	1	6
Corrente de projeto por condutor – $I_B(A)$	102,08	59,60	121,29
Corrente Máxima por condutor – $I_{m\acute{a}x}(A)$	170,14	118,60	345,09

4. DIMENSIONAMENTO DOS CONDUTORES DOS CIRCUITOS

4.1 CRITÉRIO TÉCNICO

4.1.1 Critério C1 – Seção Mínima

Dado que nas três instalações analisadas tem-se circuitos de força, o critério C1 – Seção mínima define $S = 2,5 \text{ mm}^2$, baseado na tabela 47 da NBR 5410:2004.

4.1.2 Critério C2 – Capacidade de Condução de Corrente

Sabendo o material de isolamento (EPR) e a temperatura ambiente (35°C) consulta-se a tabela 40 da NBR 5410:2004 e obtém-se o fator de correção para temperaturas ambientes, nesse caso, para os 3 circuitos, analisados tem-se $k_1 = 0,96$. A resistividade térmica do solo é usada para se obter o fator de correção para linhas subterrâneas, neste caso, foi considerada que a resistividade térmica é de $2,5 \text{ K.m/W}$, com isso, $k_2 = 1$, segundo a tabela 41 da NBR 5410:2004, para os três circuitos analisados.

Como citado, o agrupamento dos fios/cabos refere-se ao agrupamento de mais de um circuito em um mesmo eletroduto, porém nesse estudo será considerado que cada circuito está instalado em eletroduto exclusivo, logo $k_3 = 1$, de acordo com a tabela 42 da NBR 5410:2004.

Assim, pode-se calcular a corrente corrigida (I'_{BN}) de cada um dos ramais:

$$I'_{B1} = \frac{I_{B1}}{k_1 \times k_2 \times k_3} = \frac{102,08}{1 \times 0,96 \times 1} = 106,33 \text{ A} \quad (32)$$

$$I'_{B2} = \frac{I_{B2}}{k_1 \times k_2 \times k_3} = \frac{59,60}{1 \times 0,96 \times 1} = 62,08 \text{ A} \quad (33)$$

$$I'_{B3} = \frac{I_{B3}}{k_1 \times k_2 \times k_3} = \frac{121,29}{1 \times 0,96 \times 1} = 126,34 \text{ A} \quad (34)$$

Agora, consultando a tabela de capacidade de corrente para condutores com isolamento de EPR (Tabela 36 da NBR 5410:2004) e considerando o método de referência B1 pode-se definir as seções de cada condutor pelo critério C2:

Tabela 9 – Seções determinadas pelo critério C2.

	Ramal 1	Ramal 2	Ramal 3
Seção por condutor (mm ²)	35	10	50
Capacidade de condução (A)	110	66	171

Fonte: Autoria própria, 2021.

4.1.3 Critério C3 – Limites de Queda de Tensão

Como estabelecido, $l = 30$ m. Usando a seção calculada anteriormente, obtém-se a queda de tensão unitária do condutor consultando o valor fornecido pelo fabricante, nesse caso é considerado cabos da Prysmian e utilizado o Manual Prysmian de Instalações Elétricas, 2010, os valores são apresentados Anexo A. Usando a corrente de projeto calculada e aplicando a equação (3), obtive-se os seguintes resultados:

Tabela 10 – Queda de tensão.

	Ramal 1	Ramal 2	Ramal 3
Seção por condutor (mm ²)	35	10	70
Queda de tensão unitária (V/A.km)	0,98	3,2	0,54
Corrente no condutor (A)	102,08	59,60	121,29
Queda de tensão calculada (%)	0,79	1,51	0,51

Fonte: Autoria própria, 2021.

Os valores encontrados obedecem ao critério C3 do dimensionamento técnico, resultando em uma queda de tensão menor que 4% da tensão nominal. Entretanto, dado que o estudo é feito com motores e esses possuem corrente de partida elevada, é preciso verificar a queda de tensão durante a partida, para isso aplica-se a equação (3) com a corrente de partida apresentada na

Tabela 8, e obtém-se os seguintes resultados:

Tabela 11 – Queda de tensão na partida.

	Ramal 1	Ramal 2	Ramal 3
Seção por condutor (mm ²)	35	10	70
Queda de tensão unitária (V/A.km)	0,98	5,3	0,54
Corrente de partida (A)	170,14	118,60	345,09
Queda de tensão na partida (%)	1,47	3,38	1,31

Fonte: Autoria própria, 2021.

Como obtém-se queda de tensão inferior a 10% da tensão nominal (380 V) para os 3 circuitos analisados, verifica-se que as seções calculadas anteriormente atendem ao item 6.5.1.3.3 da NBR 5410:2004, obedecendo todos os quesitos do critério C3.

4.1.4 Critério C4 – Proteção Conta Sobrecarga

Conhecendo a corrente de projeto do circuito e a capacidade de condução de corrente de cada condutor (I_z), conforme apresentada na Tabela 9, determina-se os dispositivos de proteção que atenda aos critérios (6) e (7) ou, caso não seja possível assumir que o circuito não operou em regime de sobrecarga por mais 100 horas durante doze meses consecutivos ou mais 500 horas durante a vida do condutor, o dispositivo deve atender aos critérios (6) e (8). Nos casos considerados, deseja-se atender aos critérios (6) e (7).

Dado que se tem 5 condutores por fase no ramal 1 e 6 condutores por fase no ramal 3, precisa-se considerar a capacidade de condução total. Os valores obtidos são apresentados na tabela a seguir:

Tabela 12 – Proteção conta sobrecarga.

	Ramal 1	Ramal 2	Ramal 3
$I_z(A)$	$5 \times 110 = 550$	66	$6 \times 171 = 1.026$
$I_B(A)$	510,42	59,60	727,74
Disjuntor	Curva C $I_N = 600$	Curva C $I_n = 63$	Curva C $I_n = 800$
$I_2(A) = 1,45 \times I_N$	870	91,35	1.160,00
$1,45 \times I_z$	797,50	95,70	1.487,70

Fonte: Autoria própria, 2021.

Nos ramais 2 e 3, as premissas $I_B \leq I_N \leq I_z$ e $I_2 \leq 1,45 \times I_z$ são atendidas, portanto, verifica-se que as seções calculadas anteriormente atendem aos critérios de

proteção contra sobrecarga. Entretanto, para o ramal 1 ver-se a necessidade de aumentar a seção dos condutores para atender aos critérios. Assumindo uma seção de 50 mm² para os condutores das fases, obtém-se os valores registrados na Tabela 13:

Tabela 13 – Proteção contra sobrecarga – Ramal 1

$I_z(A)$	I_B	Disjuntor	$I_2 = 1,45 \times I_N$	$1,45 \times I_z$
$5 \times 134 = 670$	510,42	Curva C $I_N = 600$	870	971,50

Fonte: Autoria própria, 2021.

Para essa seção, ver-se que os critérios de proteção contra sobrecarga são atendidos.

4.1.5 Critério C5 – Proteção Contra Curto-Circuito

Aqui precisa-se definir a corrente de curto-circuito (I_{CC}) no ponto em que vai ser instalado o dispositivo de proteção, a capacidade de interrupção nominal do dispositivo (I_{CN}) e a duração do curto-circuito (t). Tais características devem atender aos critérios (9) e (10).

A corrente de curto-circuito no quadro de comando vale 3 kA, o tempo de seccionamento máximo, segundo a tabela 25 NBR 5410:2004, vale 0,2 s e K vale 143 para isolamento de EPR. Considerando disjuntores do fabricante WEG, foi consultado o valor de corrente de interrupção de cada um e os resultados estão dispostos na Tabela 14.

Tabela 14 – Proteção contra curto-circuito.

	Ramal 1	Ramal 2	Ramal 3
$I_{CC}(A)$	3.000	3.000	3.000
t (s)	0,2	0,2	0,2
K	143	143	143
$I_{CC}^2 \times t$	1.800.000	1.800.000	1.800.000
$S(mm^2)$	$5 \times 50 = 250$	10	$6 \times 70 = 420$
$S^2 \times K^2$	1.278.062.500	2.044.900	3.607.203.600
$I_{CN}(A)$	35.000	5.000	4.2000

Fonte: Autoria própria, 2021.

Como as premissas (9) e (10) são atendidas para todas os ramais consideradas, tem-se que as seções calculadas até aqui atendem ao critério de proteção contra curto-circuito.

4.1.6 Critério C6 – Proteção Contra Choques Elétricos

Conhecendo-se a impedância Z_s , em ohms, do percurso da corrente de falta, a corrente I_a que assegura a atuação do dispositivo de proteção num tempo no máximo igual

ao especificado na tabela 25 da NBR 5410:2004, ou a 5 s (condutor PEN) e a tensão nominal U_0 , em volts, entre fase e neutro, considera-se que o dispositivo de proteção irá proteger o usuário se a condição (11) for satisfeita.

Z_s é calculado considerando os condutores dimensionados até aqui e as resistências e impedâncias fornecidas pela Prysmian, os valores estão apresentados no Anexo B. Considera-se cada circuito por vez com uma distância de 30 m entre o transformador e o quadro de comando. Por fim, usa-se a equação (12) para obter I_a e chega-se aos resultados apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Proteção contra choques elétricos.

	Ramal 1	Ramal 2	Ramal 3
$Z_s(\Omega/km)$	0,10	2,44	0,084
I_N	600	63	800
I_g	10	10	10
I_a	6000	500	8000
$Z_s \times I_a$	18,16	46,12	14,8
U_0	220	220	220

Como a condição é (11) atendida, mantem-se as seções transversais calculadas até aqui e chega-se ao dimensionamento apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 – Seção Técnica.

	Ramal 1	Ramal 2	Ramal 3
Seção técnica calculada (mm ²)	50	10	70
Número de condutor por fase	5	1	6

Fonte: Autoria própria, 2021.

4.2 CRITÉRIO ECONÔMICO

Como discutido anteriormente, antes de iniciar os cálculos da seção econômica precisa-se definir alguns parâmetros financeiros inerentes aos circuitos.

4.2.1 Tempo de vida útil – N

Foi estipulado que o tempo de vida útil dos circuitos é de 30 anos.

4.2.2 Custo de energia elétrica – P

Esse parâmetro é fornecido pela concessionária de energia, de acordo com a tarifa inerente ao tipo de instalação. Para um empreendimento industrial com atendimento em 13,8 kV, horo sazonal com tarifa verde, a concessionária Energisa Paraíba cobra um valor de consumo de 0,30539 R\$/kWh logo, considerando uma taxa tributária de 1,39, tem-se:

$$P = 1,39 \times 0,00030539 = 0,00042449 \text{ R\$/Wh.}$$

4.2.3 Variação anual de demanda – D

Não se considerou o aumento da tarifa de demanda, logo $D = 0$.

4.2.4 Tempo de operação com perdas Joule – T

Conforme proposto, tem-se cada quadro operando 20 h por dia por 265 dias por ano, totalizando 5.300 h/ano.

4.2.5 Custo de Instalação – A

O cálculo do custo por unidade de comprimento (A) conforme a seção do condutor é definido na Tabela 17, usando como referência o exposto na Tabela 5. Os valores orçados foram obtidos da tabela de valores da Prysmian, de julho de 2021, referentes a cabos Gesette unipolar, como apresentados no Anexo C. Foi considerado cabos entre 6 e 120 mm² dado que este foi o limite estabelecido anteriormente. Nesse ponto, o custo inicial a ser considerado será apenas o custo de aquisição, dado que foi considerado o mesmo valor de instalação, independente da seção nominal do condutor, isso faz com que essa parcela não influencie na variável A.

Tabela 17 – Valores da variável "A"

Seção Nominal (mm ²)	Custo inicial (R\$/m)	A (R\$/m.mm ²)
	Aquisição	
6	7,45	-
10	12,12	1,1675
16	18,63	1,085
25	28,82	1,132222
35	39,69	1,087
50	57,188	1,166533
70	79,57	1,1191
95	104,31	0,9896
120	133,37	1,1624
Média		1,113669

Fonte: (PRYSMIAN, 2021).

Adota-se então o valor médio como sendo o parâmetro A, logo $A = 1,11$.

4.2.6 Aumento Anual de Carga – a

Como não é previsto adição de cargas a nenhum dos sistemas analisados, o aumento previsto é definido em 0%.

4.2.7 Aumento Anual do Custo de Energia - b

Dado que as tarifas de cobrança de energia elétrica influenciam nos custos de operação dos condutores, o aumento previsto dessas tarifas deve ser incluso no cálculo do dimensionamento dos condutores.

A ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica utiliza o Índice Geral de Preços Mercado – IGP-M como um dos componentes das fórmulas paramétricas para realizar os ajustes tarifários no custo de energia, segundo a Fundação Getúlio Vargas.

Como esse índice responde parcialmente pelos reajustes tarifários desse segmento, será utilizado como referência para o parâmetro “b” a média do IGP-M acumulado anualmente nos últimos 5 anos, conforme registro na Tabela 18.

Tabela 18 – Histórico do IGP-M acumulado nos últimos 5 anos.

Ano	Valor acumulado (%)
2020	23,14
2019	7,32
2018	7,55
2017	-0,53
2016	7,19
Media	8,93

Fonte: (Ideal Software, 2021).

Assim, tem-se a média do IGPM igual a 8,93%.

4.2.8 Taxa de Capitalização – i

Para o parâmetro taxa de capitalização, foi feita a média dos rendimentos anuais da caderneta de poupança nos últimos 5 anos, esse também será o custo de capital considerado nos métodos de análise econômica. Na Tabela 19 apresenta-se

Tabela 19 – Histórico do rendimento anual da poupança nos últimos 5 anos.

Ano	Valor acumulado (%)
2020	2,09
2019	4,18
2018	4,53
2017	6,42
2016	8,00
Media	5,05

Fonte: Adaptado de DEBIT, 2021.

Portanto, tem-se a taxa de capitalização igual a 5,05%.

4.2.9 Número de Circuito que Levam Mesma Carga – N_c

É importante ressaltar que nesse estudo será analisado cada circuito como sendo o único existente na instalação. Dessa forma, fatores de correção de agrupamento não serão considerados, logo para todos os casos, N_c vale um.

4.2.10 Número de Condutores de Fase por Circuito – N_p

Em cada uma das instalações analisadas tem-se um circuito trifásico, ou seja, neste trabalho N_p sempre será três.

Os parâmetros definidos, organizados no quadro abaixo, são comuns as três instalações. Partindo desses valores, pode-se calcular as variáveis auxiliares por meio das equações (17), (19), (20) e (21) e então resolver a equação (16) para obter a seção econômica de cada instalação. Na Tabela 20 pode-se observar....

Tabela 20 – Parâmetros do dimensionamento econômico.

Parâmetro	Descrição	Valor
a	Aumento anual de carga (%)	0
b	Aumento anual do custo de energia (%)	8,93
i	Taxa de capitalização (%)	5,05
N	Tempo de vida útil (anos)	30
A	Custo de instalação (R\$/m.mm ²)	1,11
T	Tempo de operação com perdas máximas (h/ano)	5.300
N_p	Nº de fases por circuito	3
N_c	Nº de circuitos agrupados	1
P	Custo de Watt-hora (R\$/Wh)	0,00042449
D	Varição anual de demanda (R\$/W.ano)	0
θ	Temperatura máxima do condutor (°C)	90
θ_m	Temperatura ambiente (°C)	35

$$\theta_m = \frac{90 - 35}{3} + 35 = 53,33 \quad (35)$$

$$r = \frac{(1 + a/100)^2 \times (1 + b/100)}{(1 + i/100)} = \frac{(1 + 0/100)^2 \times (1 + 8,93/100)}{(1 + 5,05/100)} = 1,04 \quad (36)$$

$$Q = \frac{1 - r^N}{1 - r} = \frac{1 - 1,04^{30}}{1 - 1,04} = 53,30 \quad (37)$$

$$\begin{aligned} F &= N_p \times N_c \times (T \times P + D) \times \frac{Q}{(1 + i/100)} = \\ &= 3 \times 1 \times (5300 \times 0,0004245 + 0) \times \frac{53,30}{(1 + 5,05/100)} \\ &= 357,84 \end{aligned} \quad (38)$$

Esses parâmetros não variam nas instalações consideradas, sendo a seção econômica calculada a seguir em função da corrente máxima de projeto de cada circuito.

Ramal 1:

$$\begin{aligned} S_{ec} &= 1000 \times \left[\frac{I_{max}^2 \times F \times \rho_{20} \times B \times [1 + \alpha_{20}(\theta_m - 20)]}{A} \right]^{0,5} \\ &= 1000 \times \left[\frac{102,08^2 \times 357,84 \times 18,210^{-9} \times 1 \times [1 + 0,0068(53,3 - 20)]}{1,11} \right]^{0,5} \\ &= 273,86 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (39)$$

Ramal 2:

$$\begin{aligned} S_{ec} &= 1000 \times \left[\frac{I_{max}^2 \times F \times \rho_{20} \times B \times [1 + \alpha_{20}(\theta_m - 20)]}{A} \right]^{0,5} \\ &= 1000 \times \left[\frac{59,60^2 \times 357,84 \times 18,210^{-9} \times 1 \times [1 + 0,0068(53,3 - 20)]}{1,11} \right]^{0,5} \\ &= 160,02 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (40)$$

Ramal 3:

$$\begin{aligned} S_{ec} &= 1000 \times \left[\frac{I_{max}^2 \times F \times \rho_{20} \times B \times [1 + \alpha_{20}(\theta_m - 20)]}{A} \right]^{0,5} \\ &= 1000 \times \left[\frac{121,29^2 \times 268,34 \times 18,210^{-9} \times 1 \times [1 + 0,0068(53,3 - 20)]}{1,11} \right]^{0,5} \\ &= 325,66 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (41)$$

Apesar de se considerar mais de um condutor por fase, os resultados das seções pelo dimensionamento econômico são valores não comerciais e superiores ao limite de 120 mm². Portanto, será realizado uma primeira análise financeira, considerando seções comerciais de valor adjacente ao calculado, como mostrado na Tabela 21 – Seção .

Tabela 21 – Seção Econômica.

	Ramal 1	Ramal 2	Ramal 3
Seção Econômica calculada (mm ²)	300	185	300
Número de condutores por fase	5	1	6

Fonte: Autoria própria, 2021.

Em seguida, será utilizado as equações de perdas e os parâmetros financeiros definidos no dimensionamento econômico para avaliar a viabilidade econômica de seções maiores que as encontradas no dimensionamento técnico e inferiores a 120 mm².

5. AVALIAÇÃO ECONÔMICA

5.1 ABNT NBR 5410:2004 EM COMPARAÇÃO A ABNT NBR 15920:2011

Após o dimensionamento dos condutores alimentadores segundo os critérios técnico e econômico, pode-se fazer a análise comparativa por meio da equação (15) e verificar qual método apresenta menor valor.

Para calcular o custo inicial precisa-se do comprimento do circuito e do custo da instalação por unidade de comprimento, tanto da seção técnica quando da seção econômica. Ficou estabelecido que o comprimento do circuito é $l = 30 \text{ m}$ e obtém-se os valores de aquisição a partir da tabela de valores da Prysmian, de julho de 2021, referentes a cabos Gesette unipolar.

Considera-se o custo de instalação sendo: o valor dos cabos, somado ao valor dos eletrodutos dimensionados e o custo da vala a ser construída, no presente estudo desconsiderou-se os custos adicionais para montagem dos quadros, disjuntores e respectivos barramentos para atender o critério econômico avaliado. Os valores dos eletrodutos e da escavação da vala foram obtidos a partir dos dados fornecido pelo SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil – em julho de 2021.

Para os casos em que é considerado mais de um condutor por fase (instalações 1 e 3), usa-se um eletroduto para cada fase. Os eletrodutos foram calculados considerando que a taxa de ocupação não deve ser superior a 40% para os casos com 3 ou mais condutores e

31% para os casos com 2 condutores, como citado. Os resultados foram registrados na Tabela 22.

Tabela 22 – Custo Inicial por metro.

Ramal 1				
	Seção Técnica		Seção Econômica	
	Dimensionado	Custo (R\$/m)	Dimensionado	Custo (R\$/m)
Cabo	3×(5×50) mm ²	3× (5×57,19)	3× (5×300 mm ²)	3× (5×356,48)
Eletroduto	3×50 mm	3×12,94	3×110 mm	3×48,28
Total (R\$/m)	897,67		5.492,10	
Ramal 2				
	Seção Técnica		Seção Econômica	
	Dimensionado	Custo (R\$/m)	Dimensionado	Custo (R\$/m)
Cabo	3×10 mm ²	3×12,12	3×185mm ²	3×201,75
Eletroduto	25 mm	10,26	75 mm	26,30
Total (R\$/m)	47,00		631,55	
Ramal 3				
	Seção Técnica		Seção Econômica	
	Dimensionado	Custo (R\$/m)	Dimensionado	Custo (R\$/m)
Cabo	3× (6×70 mm ²)	3× (6×79,57)	3× (6×300) mm ²	3× (6×356,48)
Eletroduto	3×60 mm	3×18,97	3×110 mm	3×48,28
Total (R\$/m)	1.489,17		6.561,55	

Fonte: Autoria própria, 2021.

A vala a ser construída tem referência em metros cúbicos, sendo necessário definir suas dimensões de largura e profundidade. Considerando uma escavação mecanizada de vala de 40×70 cm com profundidade de até 1,50 m e comprimento de 30 m, tem-se um volume de 8,4 m³, esse valor é multiplicado pelo custo de referência de 8,81 R\$/m³ e chega-se ao valor total de R\$ 74,00 para construção da vala, portanto, na Tabela 23 resume-se os resultados.

Tabela 23 – Custo Inicial.

Ramal 1		
	Seção Técnica	Seção Econômica
Custo de instalação (R\$/m)	897,67	5.492,10
$CI = Vala + C_{Inst} \times l$	26.974,10	164.837,00

Ramal 2		
	Seção Técnica	Seção Econômica
Custo de instalação (R\$/m)	47,00	631,55
$CI = Vala + CInst \times l$	1.473,00	19.020,50
Ramal 3		
	Seção Técnica	Seção Econômica
Custo de instalação (R\$/m)	1.489,17	6.561,55
$CI = Vala + CInst \times l$	44.749,92	196.920,56

Fonte: Autoria própria, 2021.

O custo operacional por sua vez é calculado sabendo-se a corrente máxima de projeto, o comprimento do circuito, a resistência por unidade de comprimento e o parâmetro auxiliar F. O único parâmetro ainda não definido é a resistência por unidade de comprimento, esta pode obtida por meio da equação (23) em função da seção de cada condutor.

Para os casos de mais um condutor por fase a corrente de projeto é dividida pela quantidade de condutor considerada. O custo operacional é então calculado para cada condutor, ou seja, deve ser multiplicado pela quantidade de condutores para se obter o real valor das perdas de tal circuito. Com todos os parâmetros definidos, calcula-se o custo operacional e obtém-se o custo total somando-o com o custo de instalação, conforme equação (15). Os resultados obtidos estão registrados na Tabela 24.

Tabela 24 – Custo total.

Ramal 1		
	Seção Técnica	Seção Econômica
Seção (mm ²)	50	300
Condutores por fase	5	5
$R(\Omega/m)$	0,000447243	7,45404e-05
$CJ = I_{max}^2 \times R \times l \times F$	50.031,09	8.325,45
$CJ \times N^o \text{ condutores}$	250.155,45	41.627,25
CI	26.974,10	164.837,00
$CT = CI + CJ_{total}$	277.129,55	206.464,25
Ramal 2		
	Seção Técnica	Seção Econômica
Seção (mm ²)	10	185
Condutores por fase	1	1
$R(\Omega/m)$	0,002236213	0,000120876

$CJ = I_{max}^2 \times R \times l \times F$	85.274,89	4.609,45
CI	1.473,00	19.020,50
$CT = CI + CJ_{total}$	86.747,49	23.629,95
Ramal 3		
	Seção Técnica	Seção Econômica
Seção (mm ²)	70	300
Condutores por fase	6	6
$R(\Omega/m)$	0,000319459	7,45404e-05
$CJ = I_{max}^2 \times R \times l \times F$	50.452,25	11.772,19
$CJ \times N^{\circ} \text{ Condutores}$	302.713,54	70.633,16
CI	44.749,92	196.920,56
$CT = CI + CJ_{total}$	347.462,64	267.553,72

Fonte: Autoria própria, 2021.

Em todas as instalações analisadas, seja ela de pequeno, médio ou grande porte, pode-se verificar um custo inicial menor para o caso de se utilizar o dimensionamento técnico, porém um custo total maior ao longo da vida útil da instalação.

Aplicando as ferramentas de análise de investimento encontra-se o valor da taxa interna de retorno de cada investimento, bem como os valores do fluxo de caixa trazidos para o tempo presente, como apresentados na tabela a seguir, sendo investimento inicial a diferença do custo inicial de se usar condutores de dimensionados segundo a ABNT NBR 15920:2011 em substituição das calculadas segundo a ABNT NBR 5410:2004 e o fluxo de caixa equivale a redução anual das perdas, ou seja, a média anual da redução dos custos operacionais.

Tabela 25 – Análise Financeira.

	VPL	TIR
Ramal 1	-R\$40.385,80	3%
Ramal 2	R\$23.551,73	15%
Ramal 3	-R\$33.924,79	3%

Fonte: Autoria própria, 2021.

5.2 ABNT NBR 5410:2004 EM COMPARAÇÃO A SEÇÕES SUPERIORES

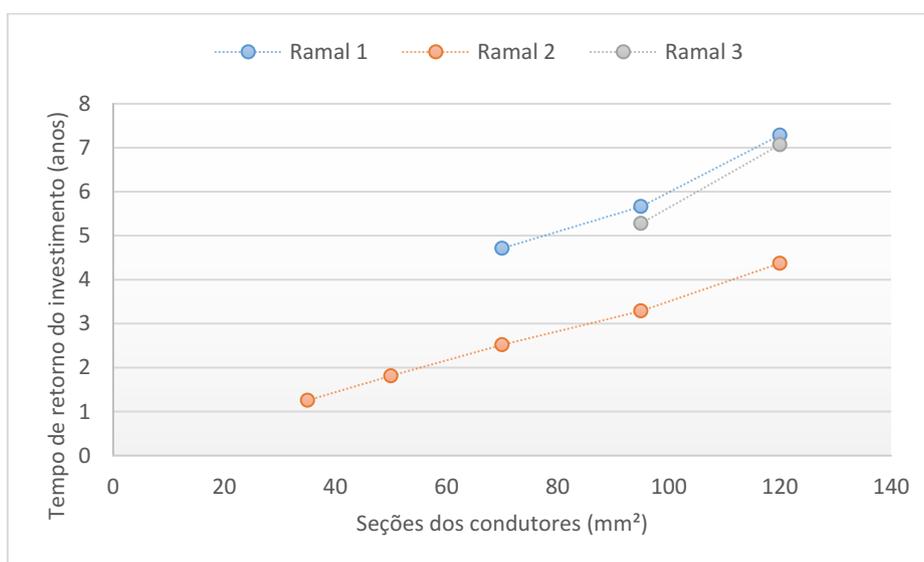
A análise feita a seguir considera seções superiores aquelas calculadas no dimensionamento segundo a ABNT NBR 5410:2004 e inferiores ao limite de 120 mm² por

condutor. Esta análise é realizada utilizando a equação (22) do dimensionamento econômico para calcular as perdas totais ao longo da vida do circuito considerado.

Aplicando a equação (25) calcula-se o tempo de retorno do investimento para cada condutor considerado. Segundo os resultados, expostos na

Figura 9, é possível constatar que em todos os ramais analisados o tempo de retorno do investimento é inferior ao tempo de vida útil da instalação em todos os casos considerados.

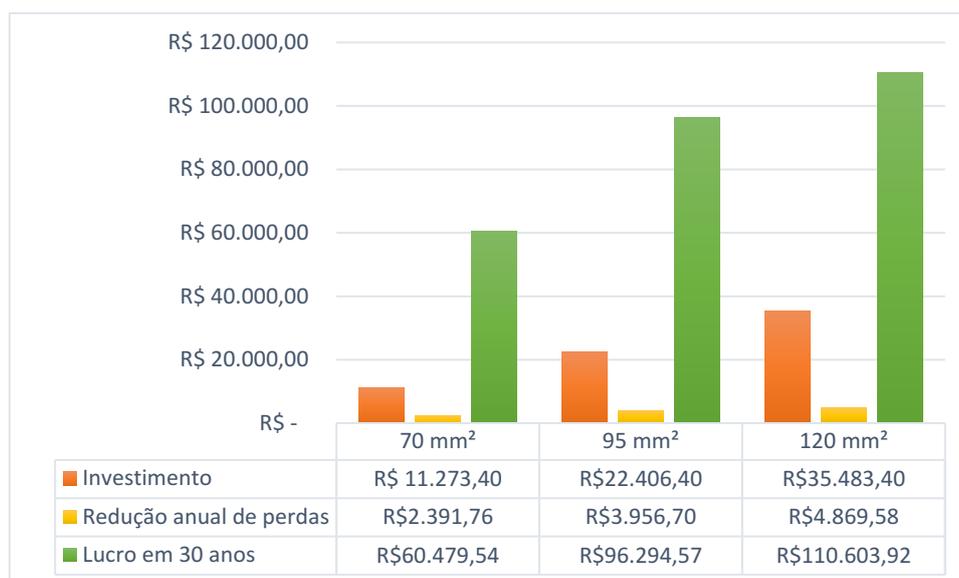
Figura 9 – *Payback*.



Fonte: Autoria própria, 2021.

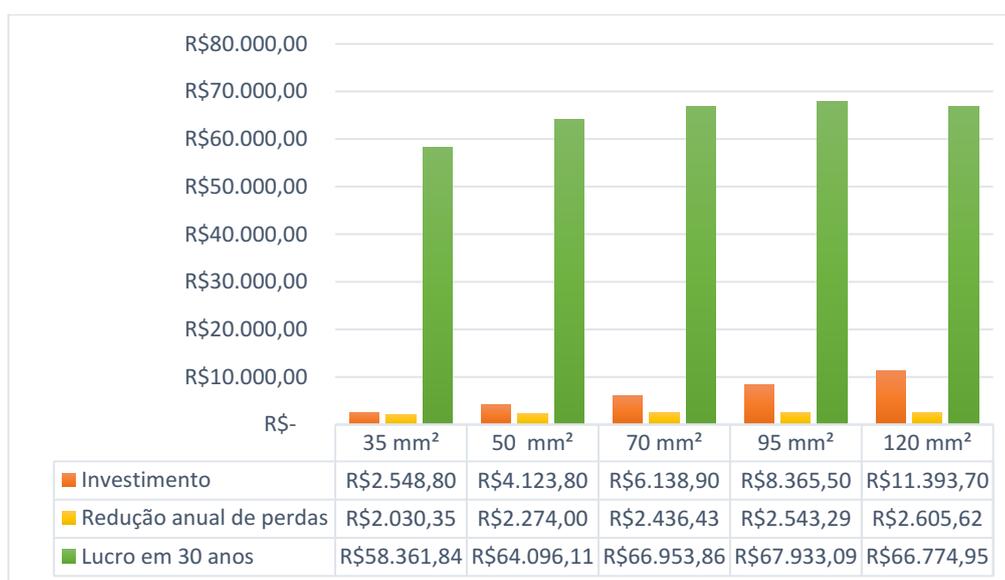
Nas Figuras 10, 11 e 12 é possível verificar o valor do investimento em se adotar condutores de seção maior que aquelas dimensionadas segundo a ABNT NBR 5410:2004, bem como as reduções anuais das perdas e o lucro obtido através da economia ao longo de 30 anos.

Figura 10 – Valores Financeiros: Instalação 1.



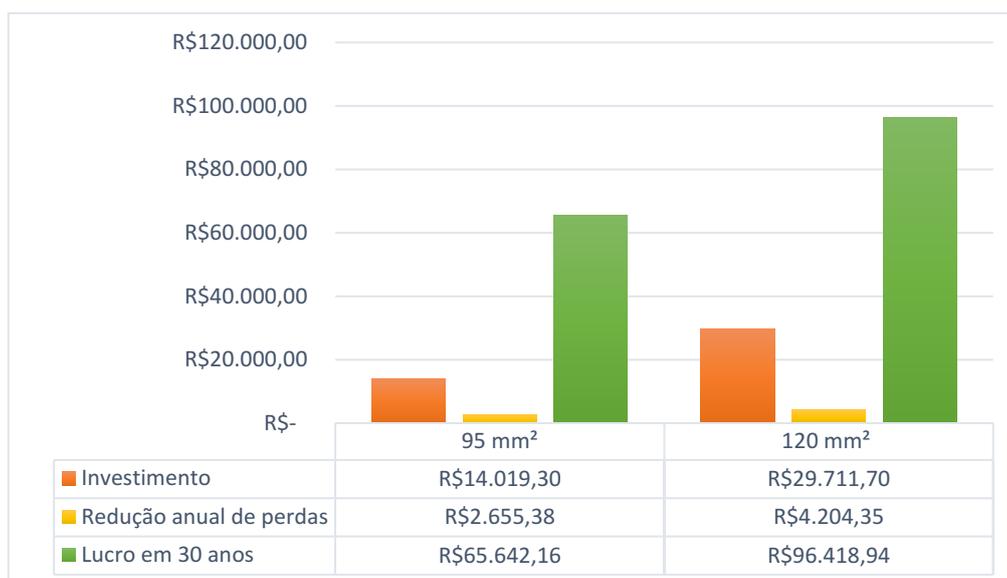
Fonte: Autoria própria, 2021.

Figura 11 – Valores Financeiros: Instalação 2.



Fonte: Autoria própria, 2021.

Figura 12 – Valores Financeiros: Instalação 3.



Fonte: Autoria própria, 2021.

Usando esses valores para calcular o TIR e o VPL de cada caso, obtém-se os resultados apresentados nas tabelas 26, 27 e 28.

Tabela 26 – Análise Financeira - Ramal 1.

Seção do condutor	VPL	TIR
70 mm ²	R\$22.267,72	21%
95 mm ²	R\$33.080,71	18%
120 mm ²	R\$32.805,54	13%

Fonte: Autoria própria, 2021.

Tabela 27 – Análise Financeira - Ramal 2.

Seção do condutor	VPL	TIR
35 mm ²	R\$28.485,62	88%
50 mm ²	R\$30.634,75	55%
70 mm ²	R\$31.102,40	31%
95 mm ²	R\$30.509,19	30%
120 mm ²	R\$28.433,80	23%

Fonte: Autoria própria, 2021.

Tabela 28 - Análise Financeira - Ramal 3.

Seção do condutor	VPL	TIR
95 mm ²	R\$34.552,79	14%
120 mm ²	R\$32.805,54	13%

Fonte: Autoria própria, 2021.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste estudo foi avaliar a viabilidade econômico-financeira do uso da ABNT NBR 15920:2011 no dimensionamento de condutores em detrimento da ABNT NBR 5410:2004. Para isso, foi feito o dimensionamento do ramal alimentador de três instalações com potências distintas, segundo cada uma das normas citadas. Em seguida, verificou-se o custo total de cada instalação, incluindo o custo inicial, de aquisição mais instalação, e o custo operacional, equivalente as perdas por efeito Joule ao longo de 30 anos.

Considerando o exposto na Tabela 24, o dimensionamento econômico se mostrou viável para todas as instalações, dado que em todos os casos o custo total foi menor quando comparado com o dimensionamento técnico. É válido destacar que em execução de instalações elétricas prediais e comerciais os custos com as montagens dos painéis elétricos são muito relevantes, porém, neste trabalho não foram considerados fatores como mudança de tipo de disjuntor, uso de disparadores, modificação de barramento, aumento de chaparia, e cálculo de carga mecânica resultante do aumento dos circuitos.

Entretanto, aplicando métodos de análise econômica de investimentos verifica-se que o uso do dimensionamento segundo a ABNT NBR 15920 não se mostra viável em duas instalações, uma vez que apresentaram VPL negativo e TIR abaixo do custo de oportunidade de 5,05% da poupança. Apenas a instalação de pequeno porte se mostrou viável com VPL positivo e igual a R\$ 23.551,73. As instalações de grande e médio porte (instalações 1 e 3) apresentaram rentabilidade negativa, o que pode ser associado ao alto custo do investimento inicial nessas instalações. Além de inviabilidade técnica.

Avaliando o uso de condutores de seção maiores que as dimensionadas segundo a ABNT NBR 5410:2004, constata-se um lucro que justifica a adoção desses condutores, dado que se obtém uma taxa interna de retorno maior que o custo de oportunidade e uma rentabilidade positiva para as todas instalações. Além disso, o uso de condutores com seção transversais maiores para uma mesma corrente possibilita que os circuitos operem com

temperaturas menores, evitando a degradação da isolamento e aumentando a seu tempo de vida útil.

Convém ressaltar que o cálculo rigoroso da seção econômica é dificultado na prática pela complexidade dos parâmetros a serem considerados e pela incerteza da evolução no tempo dos custos e hipóteses financeiras.

Através do trabalho foi possível verificar que uma grande quantidade de energia elétrica é desperdiçada na forma de calor, mas há uma considerável redução das perdas proporcionada pelo uso de condutores de seção superior, o que implica diretamente na redução do consumo de insumos necessários para gerar a energia perdida e, conseqüentemente, na redução da emissão de gases na atmosfera.

É importante citar que toda economia financeira obtida foi proporcionada devido a economia de energia elétrica, ou seja, análise realizada evidencia que é possível aumentar a eficiência energética das instalações aumentando as seções dos condutores. Diante do exposto, pode-se considerar que está é mais uma ferramenta para se obter projetos cada vez mais eficientes e viáveis financeiramente.

Convém destacar que uma forma técnica de reduzir as perdas em instalações elétricas de baixa tensão é optar pelo uso de níveis de tensões mais elevados para suprimentos dos motores, exemplo: 440 V (f-f) ou 660 V (f-f). Pois, essa é uma prática comum na indústria.

7. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15920: Cabos elétricos – Cálculo da corrente nominal – Condições de operação – Otimização econômica das seções dos cabos de potência. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2004.

BOYLESTAD, Robert L. Introdução à Análise de Circuitos. 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2012.

COTRIM, Ademaro A. M. B. Instalações Elétricas. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

DEBIT, Índice poupança. Disponível em <<https://www.debit.com.br/tabelas/tabela-completa.php?indice=poupanca>>. Acessado em 15 de agosto de 2021.

GOUVEIA, Rubia F. et al. Eletrização de dielétricos: novas propostas para resolver velhos problemas. Química Nova, v. 33, n. 1, p. 2103-2107, 2010.

IDEAL SOFTWARE, Índices Econômicos. Disponível em <<http://www.idealsoftwares.com.br/indices/indices.html>>. Acessado em 15 de agosto de 2021.

MORENO, Hilton; Diferenças entre os fios rígidos e os cabos flexíveis. Disponível em <<https://revistapotencia.com.br/eletricista-consciente/artigos-tecnicos/diferencas-entre-os-fios-rigidos-e-os-cabos-flexiveis/>>. Acessado em 20 de setembro de 2021.

NASCIMENTO, Cristhian. Utilização de supercondutores em máquinas e motores: aplicação e viabilidade. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha, 2016.

OLIVEIRA, J. G. S. M. Materiais usados na construção de motores elétricos. Seminário Técnico, PUCRS, 2009.

OLIVEIRA, Renata Garcia Dutra de et al. Equalização e segmentação de imagens termográficas aplicadas à metodologia de inspeção de isoladores poliméricos. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

PEREIRA, Paulo Rogério; PASSOS, Esdras Duarte; FERNANDES, João Carlos Lopes. Condutores elétricos de cobre e alumínio para instalações industriais até 1000 (Volts). Caleidoscópio, v. 8, n. 1, p. 1-6, 2016.

PROCOBRE. Dimensionamento econômico e ambiental de condutores elétricos. São Paulo, março de 2016. Disponível em < <http://docplayer.com.br/16366059-4-dimensionamento-economico-de-condutores-eletricos-conforme-a-norma-abnt-nbr-15920-11.html>>. Acessado em: 20 de junho de 2021.

POLOSE, Conrado. Estudo de Viabilidade de Cabos de Baixa Tensão pelo Critério Econômico. 2017. Monografia (Pós Graduação em Eficiência Energética aplicada aos Processos Produtivos) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

PRYSMIAN CABLES AND SYSTEMS. Manual Prysmian de Instalações Elétricas. São Paulo, 2010. Disponível em < https://br.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/Manual_Instalacoes_Eletricas.pdf>. Acessado em 29 de agosto de 2021.

_____. Guia de Dimensionamento de Cabos para Baixa Tensão. São Paulo, 2017. Disponível em < https://br.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/Guia_de_Dimensionamento-Baixa_Tensao_Rev9.pdf>. Acessado em 29 de agosto de 2021.

_____. Tabela de preços de julho. São Paulo, 2021. Disponível em < https://br.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/Guia_de_Dimensionamento-Baixa_Tensao_Rev9.pdf>. Acessado em 02 de setembro de 2021.

WEG MOTORES. Motor Elétrico Trifásico W22 – Catálogo Técnico Mercado Brasil, 2019. Disponível em < <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h7e/h5d/WEG-w22-motor-eletrico-trifasico-50023622-brochure-portuguese-web.pdf>>. Acessado em 15 de setembro de 2021.

8. APÊNDICE

APÊNDICE A – CORRENTES DAS INSTALAÇÕES

A.1 RAMAL 1

Com os dados da Tabela 6, o fator de potência (fp) e o rendimento (η) apresentados no catálogo de Motor Elétrico Trifásico da WEG, para a linha W22 IR3 Premium de IV polos, como apresentado no Anexo D, calcula-se a potência ($P(VA)$) e a corrente (I_n) de operação de cada motor:

$$P_1(VA) = \frac{P(W)}{FP} = \frac{735 \times 125 CV}{0,86} = 106,83 kVA \quad (A.142)$$

$$I_{n1} = \frac{P_1(VA)}{\sqrt{3} \times V_L \times \eta} = \frac{106,83 \times 1000}{\sqrt{3} \times 380 \times 0,954} = 170,14 A \quad (A.243)$$

Ainda de acordo com a Tabela 6, tem-se que a instalação 1 é composta por 4 motores iguais, de corrente I_{n1} , logo, a corrente nominal do ramal alimentador (I_1) dessa instalação será:

$$I_1 = 4 \times I_{n1} = 4 \times 170,14 = 680,56 A \quad (A.344)$$

Dado que o fator de demanda dessa instalação é 75%, a corrente demandada (I_{B1}) através de seu ramal alimentador é:

$$I_{B1} = 0,75 \times I_1 = 0,75 \times 680,56 = 510,42 A \quad (A.4)$$

I_{B1} é a corrente de projeto desse ramal.

Para o dimensionamento da corrente máxima em cada ramal, foi considerado que não há partida simultânea dos motores. Neste caso, com a demanda prevista, a corrente máxima ocorrerá quando dois motores estiverem em operação ($2 \times I_{n1}$) e for iniciado a partida de um terceiro motor. Dado que a corrente de partida do motor está limitada a $3 \times I_{n1}$, a corrente máxima no ramal será equivalente a $5 \times I_{n1} = 850,70 A$.

A.2 RAMAL 2

Para a instalação 2, a corrente de operação de cada motor (I_n) é calculada a seguir:

$$P_2(VA) = \frac{P(W)}{FP} = \frac{735 \times 20 CV}{0,81} = 18,15 kVA \quad (A.545)$$

$$I_{n2} = \frac{P_2(VA)}{\sqrt{3} \times V_L \times \eta} = \frac{18,15 \times 1000}{\sqrt{3} \times 380 \times 0,93} = 29,65 A \quad (A.6)$$

De maneira similar a instalação 1, esta instalação é composta por 3 motores iguais, de corrente I_{n2} , assim, a corrente de nominal do alimentador (I_2) dessa instalação será:

$$I_2 = 3 \times I_{n2} = 3 \times 29,65 = 88,95 A. \quad (A.746)$$

Aqui, a demanda apresentada é 67%, portanto, a corrente demanda (I_{B2}) através do ramal alimentador desse quadro é:

$$I_{B2} = 0,67 \times I_2 = 0,67 \times 88,95 = 59,60 A \quad (A.847)$$

I_{B2} é a corrente de projeto do ramal. Com essa demanda, sabe-se que a corrente máxima ocorrerá quando 1 motor estiver em operação e for iniciado a partida de um segundo motor. Dado que a corrente de partida do motor vale $3 \times I_{n2}$, a corrente máxima será equivalente a $4 \times I_{n2} = 118,60 A$.

A.3 RAMAL 3

A instalação 3 é uma instalação de grande porte, apresenta 2 motores de 500 CV e 2 motores de 40 CV, com fator de demanda de 50%.

Para o motor de 500 CV, tem-se:

$$P_3(VA) = \frac{P(W)}{FP} = \frac{735 \times 500 CV}{0,86} = 427,33 kVA \quad (A.948)$$

$$I_{n3} = \frac{P_3(VA)}{\sqrt{3} \times V_L \times \eta} = \frac{427,33 \times 1000}{\sqrt{3} \times 380 \times 0,967} = 671,41 A \quad (A.10)$$

Para o motor de 40 CV, tem-se:

$$P_4(VA) = \frac{P(W)}{FP} = \frac{735 \times 40 CV}{0,84} = 35 kA \quad (A.11)$$

$$I_{n4} = \frac{P_4(VA)}{\sqrt{3} \times V_L \times \eta} = \frac{35 \times 1000}{\sqrt{3} \times 380 \times 0,944} = 56,33 A \quad (A.1249)$$

Logo, calcula-se a corrente nominal (I_3) e corrente demandada (I_{b3}) através ramal alimentador desse circuito fazendo:

$$I_3 = 2 \times I_{n3} + 2 \times I_{n4} = 2 \times 671,41 + 2 \times 56,33 = 1.455,5 A \quad (A.1350)$$

$$I_{b3} = 0,5 \times 1.455,48 = 727,74 A \quad (A.1451)$$

I_{b3} é a corrente de projeto do ramal.

Com a demanda de 50%, tem-se que a corrente máxima ocorrerá quando 1 motor de 40 CV estiver em operação e for iniciado a partida de um de um motor de 500 CV. Dado que a corrente de partida do motor vale $3 \times I_{n3} = 2.014,23 A$, a corrente máxima será equivalente a $2.014,23 + I_{n4} = 2.070,56 A$.

9. ANEXOS

ANEXO A – QUEDA DE TENSÃO CABOS DA PRYSMIAN



TABELA 12
Queda de tensão em V/km

Seção Nominal (mm²)	Estrado e Eletrocabo (Material Magnético)		Estrado e Eletrocabo (Material não Magnético)		Instalação ao ar ¹⁾																			
	Alumex Plus, Separado e Sertado		Alumex Plus, Separado e Sertado (F)		Cabos Gsette e Alumex 18V												Cabos ari e tripolares		Cabos tri e tetrapolares					
	Circ. Monofásico e Trifásico		Circ. Monofásico		Circ. Trifásico		Circ. Monofásico			Circ. Trifásico			Circ. Trifásico ²⁾			Circ. Monofásico ³⁾		Circ. Trifásico						
	FP=0,8	FP=0,95	FP=0,8	FP=0,95	FP=0,8	FP=0,95	S = 10 cm	S = 20 cm	S = 20	S = 10 cm	S = 20 cm	S = 20	FP=0,8	FP=0,95	FP=0,8	FP=0,95	FP=0,8	FP=0,95						
1,50	23	27,4	23,3	27,6	20,2	25,9	23,8	28,9	23,9	28,0	23,6	27,9	20,7	24,3	20,5	24,1	20,4	24,1	20,4	24,1	23,5	27,8	20,3	24,1
2,50	14	16,8	14,3	16,9	12,4	14,7	14,9	17,4	15,8	17,5	14,7	17,3	12,9	15,1	13,8	15,1	12,8	15,0	12,7	15,2	14,8	17,3	12,7	15,0
4	9,3	11,5	9,88	11,6	7,79	9,15	9,4	11,8	9,5	11,9	9,2	10,8	8,2	9,5	8,2	9,5	8,0	9,4	7,9	9,3	8,1	10,8	7,9	9,3
6	5,87	7,08	6,03	7,07	5,25	6,14	6,4	7,3	6,4	7,3	6,2	7,2	5,5	6,3	5,8	6,3	5,4	6,2	5,3	6,2	6,1	7,1	5,3	6,2
10	3,54	4,28	3,63	4,23	3,17	3,67	3,8	4,4	4,0	4,4	3,7	4,3	3,4	3,8	3,5	3,8	3,3	3,7	3,2	3,7	3,6	4,2	3,2	3,7
16	2,27	2,79	2,32	2,68	2,03	2,33	2,58	2,83	2,64	2,86	2,42	2,74	2,25	2,46	2,31	2,48	2,12	2,36	2,05	2,35	2,34	2,79	2,03	2,34
25	1,58	1,72	1,51	1,71	1,33	1,48	1,74	1,85	1,81	1,88	1,61	1,77	1,53	1,61	1,58	1,64	1,41	1,55	1,34	1,51	1,52	1,73	1,32	1,58
35	1,12	1,25	1,12	1,25	0,98	1,09	1,34	1,37	1,48	1,41	1,21	1,30	1,18	1,20	1,23	1,23	1,06	1,14	0,98	1,10	1,15	1,28	0,98	1,09
50	0,86	0,95	0,86	0,94	0,76	0,82	1,06	1,05	1,12	1,09	0,94	0,99	0,94	0,92	0,99	0,98	0,83	0,87	0,78	0,83	0,86	0,95	0,75	0,82
70	0,64	0,67	0,62	0,67	0,55	0,59	0,81	0,77	0,88	0,80	0,70	0,71	0,72	0,66	0,71	0,70	0,63	0,63	0,56	0,59	0,63	0,67	0,54	0,59
95	0,50	0,51	0,48	0,50	0,43	0,44	0,66	0,59	0,72	0,62	0,56	0,54	0,59	0,52	0,64	0,58	0,50	0,48	0,45	0,44	0,48	0,50	0,42	0,44
125	0,42	0,42	0,40	0,41	0,36	0,36	0,57	0,49	0,61	0,53	0,48	0,45	0,51	0,44	0,56	0,46	0,43	0,40	0,36	0,36	0,40	0,41	0,35	0,36
150	0,37	0,38	0,35	0,34	0,31	0,30	0,50	0,42	0,57	0,46	0,42	0,38	0,45	0,38	0,51	0,41	0,39	0,34	0,32	0,31	0,35	0,35	0,30	0,30
165	0,32	0,33	0,30	0,29	0,27	0,25	0,44	0,36	0,51	0,34	0,30	0,32	0,40	0,32	0,46	0,35	0,34	0,29	0,27	0,26	0,30	0,29	0,28	0,25
240	0,28	0,25	0,26	0,24	0,23	0,21	0,39	0,38	0,45	0,33	0,33	0,27	0,35	0,27	0,41	0,30	0,30	0,24	0,23	0,21	0,25	0,24	0,22	0,21
300	0,27	0,22	0,23	0,20	0,21	0,18	0,35	0,38	0,41	0,29	0,30	0,24	0,32	0,24	0,37	0,28	0,28	0,21	0,21	0,18	0,23	0,20	0,20	0,18
400	0,24	0,20	0,21	0,17	0,19	0,15	0,31	0,33	0,38	0,28	0,27	0,21	0,28	0,21	0,34	0,23	0,25	0,19	0,19	0,16	-	-	-	-
500	0,23	0,19	0,19	0,16	0,17	0,14	0,28	0,29	0,34	0,23	0,25	0,18	0,26	0,18	0,32	0,21	0,24	0,17	0,17	0,14	-	-	-	-

ANEXO B – RESISTÊNCIAS E REATÂNCIAS DE CABOS GSETTE DA PRYSMIAN

Tabela 32 - Resistências Elétricas e Reatâncias Indutivas - GSette Easy (cobre) e Afumex Flex (cobre)

RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS E REATÂNCIAS INDUTIVAS

Condutor de Cobre

GSette Easy e Afumex Flex

Frequência: 60 Hz • Rca: Resistência elétrica máxima do condutor em corrente alternada na temperatura de operação • X_L: Reatância Indutiva

Seção nominal (mm²)												
					s = 2.D		s = 13 cm		s = 20 cm			
	Rca	X _L	Rca	X _L	Rca	X _L	Rca	X _L	Rca	X _L	Rca	X _L
(Ω/km)	(Ω/km)	(Ω/km)	(Ω/km)	(Ω/km)	(Ω/km)	(Ω/km)	(Ω/km)	(Ω/km)	(Ω/km)	(Ω/km)	(Ω/km)	(Ω/km)
1,5	17,00	0,15	17,00	0,12	17,00	0,21	17,00	0,40	17,00	0,44	17,00	0,17
2,5	10,18	0,14	10,18	0,11	10,18	0,20	10,20	0,39	10,20	0,42	10,20	0,16
4	6,31	0,13	6,31	0,10	6,31	0,19	6,31	0,37	6,31	0,40	6,31	0,15
6	4,21	0,12	4,21	0,10	4,21	0,18	4,21	0,35	4,21	0,39	4,21	0,14
10	2,44	0,12	2,44	0,10	2,44	0,17	2,44	0,34	2,44	0,37	2,44	0,14
16	1,54	0,11	1,54	0,09	1,54	0,16	1,54	0,32	1,54	0,35	1,54	0,13
25	1,00	0,11	1,00	0,09	1,00	0,16	1,00	0,30	1,00	0,34	1,00	0,13
35	0,71	0,11	0,71	0,09	0,71	0,16	0,71	0,29	0,71	0,32	0,71	0,12
50	0,49	0,10	0,49	0,09	0,49	0,16	0,49	0,28	0,49	0,31	0,49	0,12
70	0,35	0,10	0,35	0,09	0,35	0,15	0,35	0,27	0,35	0,30	0,35	0,12
95	0,26	0,10	0,26	0,08	0,26	0,15	0,26	0,25	0,26	0,29	0,26	0,12
120	0,21	0,10	0,21	0,08	0,21	0,15	0,21	0,25	0,21	0,28	0,21	0,11
150	0,17	0,10	0,17	0,08	0,17	0,15	0,17	0,24	0,17	0,27	0,17	0,11
185	0,14	0,10	0,14	0,09	0,14	0,15	0,14	0,23	0,14	0,26	0,14	0,11
240	0,11	0,09	0,11	0,08	0,10	0,15	0,10	0,22	0,10	0,25	0,11	0,11
300	0,09	0,09	-	-	0,08	0,15	0,08	0,21	0,08	0,24	0,09	0,11
400	0,07	0,09	-	-	0,06	0,14	0,06	0,20	0,06	0,24	0,07	0,11
500	0,06	0,09	-	-	0,05	0,14	0,05	0,19	0,05	0,22	0,06	0,11

ANEXO C – TABELA DE PREÇOS PRYSMIAN, JULHO DE 2021
TABELA DE PREÇOS ENERGIA
 JULHO 2021

LINHA BUILDING WIRE (450/750 V)	AFUMEX® GREEN		SUPERASTIC® FLEX		CORDPLAST				
	SEÇÃO	MULTIPOLAR		MULTIPOLAR					
		2	3	4	5	6	7	8	
1,0 mm²	-	-	R\$ 4,378	R\$ 5,810	R\$ 7,514	R\$ 11,205			
1,5 mm²	R\$ 2,061	R\$ 1,779	R\$ 5,522	R\$ 7,461	R\$ 9,754	R\$ 14,134			
2,5 mm²	R\$ 3,174	R\$ 2,797	R\$ 8,355	R\$ 11,560	R\$ 14,894	R\$ 20,491			
4 mm²	R\$ 4,957	R\$ 4,453	R\$ 12,299	R\$ 17,130	R\$ 22,588	R\$ 29,886			
6 mm²	R\$ 7,203	R\$ 6,539	R\$ 17,311	R\$ 24,457	R\$ 32,187	R\$ 42,197			
10 mm²	R\$ 12,028	R\$ 11,228	R\$ 28,759	R\$ 40,547	R\$ 54,099	R\$ 69,461			
16 mm²	R\$ 18,780	R\$ 17,718	-	-	-	-			

Podem ser comprados nas seguintes cores: Preto, Vermelho, Cinza, Verde, Azul, Amarelo, Amarelo/Verde e Branco. Demais cores sob consulta.

ATENÇÃO: Os produtos destacados em azul são fabricados em Poços de Caldas (MG). Os preços para o estado de SP possuem 12% de ICMS + 9,25% de PIS COFINS.

LINHA BAIXA TENSÃO 1KV	GSETTE® EASY 1KV				AFUMEX® 1KV				
	SEÇÃO	UNIPOLAR		MULTIPOLAR		UNIPOLAR		MULTIPOLAR	
		1	2	3	4	1	2	3	4
1,5 mm²	R\$ 2,558	R\$ 5,634	R\$ 7,349	R\$ 9,575	R\$ 2,988	R\$ 6,424	R\$ 7,999	R\$ 10,859	
2,5 mm²	R\$ 3,672	R\$ 8,341	R\$ 10,974	R\$ 14,373	R\$ 4,184	R\$ 9,043	R\$ 11,908	R\$ 15,814	
4 mm²	R\$ 5,430	R\$ 12,128	R\$ 16,424	R\$ 21,462	R\$ 5,975	R\$ 12,925	R\$ 17,523	R\$ 23,275	
6 mm²	R\$ 7,454	R\$ 16,340	R\$ 23,250	R\$ 30,288	R\$ 8,056	R\$ 18,041	R\$ 24,810	R\$ 32,456	
10 mm²	R\$ 12,125	R\$ 27,082	R\$ 38,180	R\$ 50,669	R\$ 12,735	R\$ 29,017	R\$ 40,493	R\$ 52,590	
16 mm²	R\$ 18,629	R\$ 43,705	R\$ 59,736	R\$ 80,388	R\$ 19,679	R\$ 46,924	R\$ 64,906	R\$ 84,486	
25 mm²	R\$ 28,871	R\$ 66,123	R\$ 92,361	R\$ 122,273	R\$ 30,261	R\$ 68,911	R\$ 97,848	R\$ 131,618	
35 mm²	R\$ 39,685	R\$ 91,464	R\$ 127,741	R\$ 170,311	R\$ 41,286	R\$ 94,332	R\$ 135,760	R\$ 176,059	
50 mm²	R\$ 57,188	R\$ 129,809	R\$ 185,403	R\$ 244,392	R\$ 59,350	-	R\$ 193,374	R\$ 264,774	
70 mm²	R\$ 79,569	R\$ 177,804	R\$ 257,937	R\$ 340,372	R\$ 82,698	-	R\$ 268,535	R\$ 368,541	
95 mm²	R\$ 104,312	R\$ 233,008	R\$ 337,284	R\$ 442,201	R\$ 108,207	-	R\$ 350,551	R\$ 477,200	
120 mm²	R\$ 133,370	-	R\$ 407,119	R\$ 538,314	R\$ 137,893	-	Sob Consulta	Sob Consulta	
150 mm²	R\$ 167,386	-	R\$ 512,086	R\$ 671,548	R\$ 172,913	-	Sob Consulta	Sob Consulta	
185 mm²	R\$ 201,745	-	R\$ 615,565	R\$ 814,749	R\$ 208,359	-	Sob Consulta	Sob Consulta	

ANEXO D – DADOS ELÉTRICOS MOTORES W22 IR3 PREMIUM, IV POLOS

Potência	Carcaça	Conjugado Nominal (kgfm)	Corrente com Rotor Bloqueado (Ip/In)	Conjugado de Partida Cp/Cn	Conjugado Máximo Cmax/Cn	Momento de Inércia J (kgm²)	Tempo máximo com rotor bloqueado (s)		Massa (kg)	Nível médio de pressão sonora dB(A)	Fator de Serviço	RPM	% de Carga						Tensão Nominal (V)	Corrente Nominal In (A)	
							Quente	Frio					Rendimento			Fator de Potência					
kW	HP												50	75	100	50	75	100			
N Polos																					
0,12	0,16	63	0,068	4,8	2,8	2,9	0,0005	28	62	8,3	48	1,25	1710	58,0	64,0	66,0	0,46	0,59	0,68	220	0,702
0,18	0,25	63	0,103	5,0	2,8	2,9	0,0006	39	86	8,5	48	1,25	1700	62,0	67,0	70,0	0,49	0,61	0,70	220	0,964
0,25	0,33	63	0,143	5,5	3,3	3,2	0,0007	30	66	8,8	48	1,25	1705	66,0	71,0	73,4	0,44	0,56	0,66	220	1,35
0,37	0,5	71	0,213	5,1	2,8	2,9	0,0007	52	114	11,2	47	1,25	1690	75,0	77,5	78,2	0,49	0,62	0,70	220	1,77
0,55	0,75	71	0,319	5,3	3	3	0,0008	14	31	12,4	47	1,25	1680	73,0	78,0	79,0	0,44	0,56	0,66	220	2,77
0,75	1	80	0,426	7,3	3	3	0,0029	16	35	15,5	48	1,25	1715	82,3	83,0	83,0	0,63	0,74	0,82	220	2,89
1,1	1,5	L80	0,621	7,4	3,4	3,4	0,0037	11	24	19,0	48	1,25	1725	79,5	82,5	84,0	0,58	0,71	0,80	220	4,3
1,5	2	L90S	0,835	7,7	2,7	3,3	0,0066	14	31	23,1	51	1,25	1750	84,0	86,0	86,5	0,59	0,72	0,80	220	5,69
2,2	3	L90L	1,23	7,4	2,8	3,1	0,0077	11	24	26,7	51	1,25	1745	86,0	86,5	87,5	0,61	0,74	0,81	220	8,15
3	4	L100L	1,67	9,1	4	4	0,0096	15	33	33,6	54	1,25	1745	87,4	88,5	89,5	0,57	0,69	0,77	440	5,71
3,7	5	L100L	2,07	8,3	4,2	4,2	0,0119	14	31	39,7	54	1,25	1740	87,5	88,5	89,5	0,56	0,69	0,77	440	7,04
4,5	6	L112M	2,51	7,0	2,4	3	0,0180	16	35	45,4	56	1,25	1745	88,7	89,5	89,5	0,61	0,74	0,80	440	8,25
5,5	7,5	L112M	3,06	7,3	2,5	3,2	0,0206	15	33	51,1	56	1,25	1750	89,7	90,3	91,0	0,58	0,70	0,78	440	10,2
7,5	10	L125S	4,14	8,2	2,3	3,5	0,0563	13	29	71,8	58	1,25	1765	90,8	91,6	92,0	0,66	0,78	0,84	440	12,7
9,2	12,5	L132M	5,08	8,5	2,4	3,5	0,0638	10	22	80,4	58	1,25	1765	91,8	92,4	92,4	0,66	0,78	0,84	440	15,6
11	15	L132M/L	6,09	8,3	2,5	3,5	0,0672	8	18	85,5	58	1,25	1760	90,6	91,5	92,4	0,63	0,76	0,83	440	18,8
15	20	L160M	8,23	9,0	3,2	3,4	0,1471	13	29	138	64	1,25	1775	91,6	93,0	93,0	0,64	0,75	0,81	440	26,1
18,5	25	L160L	10,2	7,3	3	3,2	0,1813	12	26	158	64	1,25	1772	92,4	93,6	93,8	0,64	0,75	0,81	440	31,9
22	30	L180M	12,1	8,0	3,4	3,2	0,1919	20	44	178	63	1,25	1770	93,0	93,8	94,0	0,66	0,76	0,81	440	37,9
30	40	L200M	16,4	7,0	2,8	2,8	0,3202	22	48	241	66	1,25	1778	93,6	94,2	94,4	0,70	0,79	0,84	440	49,6
37	50	L200L	20,3	6,4	2,5	2,7	0,3728	20	44	266	66	1,25	1775	94,0	94,5	94,6	0,70	0,80	0,84	440	61,1
45	60	L225S/M	24,6	7,5	2,7	3	0,6367	14	31	424	67	1,25	1780	93,0	94,7	95,1	0,71	0,80	0,85	440	73
55	75	L225S/M	30,1	7,5	2,6	2,8	0,7346	12	26	451	67	1,25	1780	94,5	95,0	95,4	0,74	0,83	0,87	440	87
75	100	L250S/M	41,0	8,5	3,4	3,6	1,01	12	26	551	68	1,25	1780	94,6	95,2	95,5	0,68	0,78	0,85	440	121
90	125	L280S/M	49,1	7,6	2,1	2,7	1,87	24	53	724	73	1,25	1785	94,7	95,3	95,4	0,75	0,83	0,86	440	144
110	150	L280S/M	60,0	7,9	2,4	2,7	2,33	20	44	803	73	1,25	1785	94,8	95,5	95,8	0,75	0,83	0,86	440	175
132	175	L315S/M	71,8	7,4	2,6	2,6	3,00	24	53	1001	75	1,25	1790	94,5	95,5	96,2	0,74	0,82	0,86	440	209
150	200	L315S/M	81,6	7,8	2,7	2,7	3,55	20	44	1107	75	1,25	1790	94,9	95,9	96,2	0,73	0,82	0,86	440	238
185	250	L315S/M	101	7,6	2,8	2,8	3,89	20	44	1152	75	1,25	1790	95,3	96,0	96,3	0,75	0,83	0,87	440	290
220	300	L355M/L	120	7,3	2,5	2,4	6,30	22	48	1438	78	1,15	1790	95,6	96,2	96,4	0,77	0,84	0,87	440	344
260	350	L355M/L	141	7,3	2,3	2,3	7,20	20	44	1624	78	1,15	1790	95,8	96,4	96,5	0,78	0,85	0,87	440	406
300	400	L355M/L	163	7,8	2,5	2,4	8,09	12	26	1615	78	1,15	1790	95,9	96,4	96,6	0,76	0,84	0,87	440	468
330	450	L355M/L	179	7,0	2,5	2,5	9,51	14	31	1751	78	1,15	1791	96,0	96,5	96,7	0,73	0,82	0,86	440	521
370	500	L355M/L	201	7,6	2,7	2,4	11,1	18	40	1916	78	1,15	1790	96,3	96,6	96,7	0,74	0,83	0,86	440	584
400	550	L355M/L	218	7,4	2,4	2,4	11,6	15	33	1966	78	1,15	1790	96,3	96,6	96,6	0,74	0,83	0,86	440	632