

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

GUILHERME AUGUSTO BECKER MICHELS

**DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE CONDUTORES ELÉTRICOS APLICADO
A ESTUDOS DE CASO**

JOINVILLE, SC

2015

GUILHERME AUGUSTO BECKER MICHELS

**DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE CONDUTORES ELÉTRICOS APLICADO
A ESTUDOS DE CASO**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito final para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: M.Eng. Marcos Fergütz

Co-orientador: M.Eng. Saimon Miranda
Fagundes

JOINVILLE, SC

2015

GUILHERME AUGUSTO BECKER MICHELS

**DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE CONDUTORES ELÉTRICOS APLICADO
A ESTUDOS DE CASO**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito final para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora

Orientador:

M.Eng. Marcos Fergütz
Universidade do Estado de Santa Catarina

Co-orientador:

M.Eng. Saimon Miranda Fagundes
Instituto Federal de Santa Catarina

Membro:

Dr.Eng. Fabiano Ferreira Andrade
Universidade do Estado de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado saúde e me encorajado a seguir e superar as dificuldades.

A minha família e esposa, por me fortalecer e apoiar na busca por esta conquista.

A Universidade do Estado de Santa Catarina, pela oportunidade de cursar Engenharia Elétrica.

Ao meu Orientador e Co-orientador, pelo empenho e auxílio na elaboração deste trabalho.

Aos verdadeiros amigos, por compartilharem muitos momentos juntos.

RESUMO

MICHELS, Guilherme Augusto Becker. **DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE CONDUTORES ELÉTRICOS APLICADO A ESTUDOS DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica – Área: Eletrotécnica) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, 2015.

Qualquer instalação elétrica deve ser provida de projeto e execução, assim, visando a etapa de projeto, este trabalho de conclusão de curso apresenta uma metodologia para a otimização de projeto elétricos aplicado a estudos de caso. Esta otimização refere-se a especificamente a uma abordagem técnica e econômica aplicada ao dimensionamento de condutores e condutos elétricos. Para que este objetivo resulte positivamente, consideram-se as perdas em forma de calor provenientes da passagem de corrente elétrica em um condutor (perda Joule), a caracterização destas perdas, em conjunto com a seleção de uma seção transversal de um condutor, que reduza os custos da instalação, estão dispostas na norma NBR 15920/2011- Otimização econômica das seções dos cabos de potência, que é uma das referências bibliográficas suporte para este trabalho. O dimensionamento econômico proposto aumenta os custos iniciais da instalação, devido a seleção de uma seção nominal maior do condutor, entretanto com esta escolha diminui-se o consumo de energia elétrica, portanto é necessário um ponto ótimo entre os custos iniciais e de operação deste circuito. Não obstante, é necessário seguir toda a normatização imposta pela NBR 5410/2004- Instalações elétricas em baixa tensão, para garantir o funcionamento adequado da instalação, a conservação dos bens e a segurança de pessoas e animais.

Palavras-chave: Condutores elétricos. Dimensionamento econômico. Projeto elétrico.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 – Cabo de cobre.....	27
Figura 3.2 – Fio de cobre.....	27
Figura 4.1 - Custos em função da seção do condutor	40
Figura 5.1- Gráfico dos custos em função da seção do condutor (caso 1).....	67
Figura 5.2- Gráfico dos custos em função da seção do condutor (caso 2).....	68
Figura 5.3- Gráfico dos custos em função da seção do condutor (caso 3).....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Seção mínima dos condutores elétricos.....	29
Tabela 3.2 – Temperaturas características dos condutores.	30
Tabela 4.1- Exemplo de determinação dos valores da variável A.....	44
Tabela 4.2-Definição dos parâmetros iniciais do estudo de caso 1.....	46
Tabela 4.3- Determinação dos valores da variável A para o caso 1.....	46
Tabela 4.4-Organização dos parâmetros do estudo de caso 1.....	50
Tabela 4.5-Definição dos parâmetros iniciais do estudo de caso 2.....	52
Tabela 4.6- Determinação dos valores da variável A para o caso 2.	53
Tabela 4.7-Organização dos parâmetros do estudo de caso 2.....	57
Tabela 4.8-Definição dos parâmetros iniciais do estudo de caso 3.....	60
Tabela 4.9- Determinação dos valores da variável A para o caso 3.....	60
Tabela 4.10-Organização dos parâmetros do estudo de caso 3.....	63
Tabela 5.1-Resultados econômicos (caso 1).....	66
Tabela 5.2- Resultados econômicos (caso 2).....	68
Tabela 5.3-Resultados econômicos (caso 3).....	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CGH	Central geradora hidrelétrica
EOL	Central geradora eólica
PCH	Pequena central hidrelétrica
UFV	Central geradora solar fotovoltaica
UHE	Usina hidrelétrica
UTE	Usina termoelétrica
UTN	Usina Termonuclear
ART	Anotação de responsabilidade técnica
CELESC	Centrais Elétricas de Santa Catarina
PVC	Cloreto de polivinila
EPR	Etileno-propileno
XLPE	Polietileno reticulado
FCT	Fator de correção de temperatura
FCA	Fator de correção de agrupamento

LISTA DE SÍMBOLOS

I_B	Corrente de projeto do circuito
I_Z	Capacidade de condução de corrente
I_N	Corrente nominal do dispositivo de proteção
I_2	Corrente convencional de atuação ou corrente convencional de fusão
E	Energia dissipada no condutor
R	Resistência elétrica do condutor
i_{max}	Corrente de projeto máxima prevista para o circuito
Δt	Intervalo de tempo de circulação da corrente i_{max}
ρ	Resistividade elétrica do material condutor
l	Comprimento do circuito
S	Seção transversal do condutor
CT	Custo total
CI	Custo de um comprimento de cabo instalado
CJ	Valor presente das perdas em joules durante a vida econômica da instalação
i_{max}	Corrente máxima no cabo durante o primeiro ano de instalação
l	Comprimento do cabo do circuito
F	Quantidade auxiliar
R	Resistência c.a. aparente do condutor por unidade de comprimento
S_{ec}	Seção econômica do condutor
F	Quantidade auxiliar
ρ_{20}	Resistividade elétrica do material condutor em temperatura de 20°C
B	Quantidade auxiliar
α_{20}	Coeficiente de temperatura para a resistência do condutor a 20°C
θ_m	Temperatura média de operação do condutor
A	Componente variável do custo por unidade de comprimento conforme seção do condutor
N_p	Número de condutores de fase por circuito
N_C	Número de circuitos que levam o mesmo valor e tipo de carga;
T	Tempo de operação com perda Joule máxima
P	Custo de um W.h no nível de tensão aplicado

D	Varição anual da demanda
Q	Quantidade auxiliar
i	Taxa de capitalização para cálculo do valor presente
r	Quantidade auxiliar
N	Período coberto pelo cálculo financeiro
a	Aumento anual da carga
b	Aumento anual do custo da energia elétrica, sem incluir efeitos de inflação
θ_m	Valor da temperatura média de operação do condutor
θ	Temperatura máxima nominal do condutor para o tipo de cabo considerado
θ_A	Temperatura ambiente média
RI	Retorno dos investimentos
CI _E	Custo inicial obtido pelo critério econômico
CI _T	Custo inicial obtido pelo critério técnico
CJ _T	Custo operacional, ao longo de 20 anos, obtido pelo critério técnico
CJ _E	Custo operacional, ao longo de 20 anos, obtido pelo critério econômico
γ_p	Refere-se ao efeito pelicular
γ_s	Refere-se ao efeito de proximidade
λ_1	Refere-se as perdas em blindagens metálicas
λ_2	Refere-se as perdas em armações

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO LITERÁRIA.....	14
2.1	EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO ..	14
3	PROJETO DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS EM BAIXA TENSÃO	16
3.1	PARTES COMPONENTES.....	17
3.2	ASPECTOS NECESSÁRIOS.....	18
3.3	ETAPAS DO PROJETO.....	20
3.3.1	Influências externas	20
3.3.1.1	Meio ambiente	21
3.3.1.2	Utilização	22
3.3.1.3	Construção das edificações	23
3.3.2	Influências internas	23
3.3.3	Levantamento de carga	23
3.3.4	Divisão de circuitos	24
3.3.5	Dimensionamento dos condutores elétricos	26
3.3.5.1	Conceitos essenciais.....	26
3.3.5.1.1	Fios x cabos	26
3.3.5.1.2	Material condutor.....	27
3.3.5.1.3	Isolação dos condutores.....	28
3.3.5.1.4	Nomenclatura dos condutores.....	28
3.3.5.2	Critérios para dimensionamento da seção mínima dos condutores de fase	28
3.3.5.2.1	Seção mínima	29
3.3.5.2.2	Capacidade de condução de corrente.....	29
3.3.5.2.3	Queda de tensão.....	31
3.3.5.2.4	Proteção contra sobrecargas	32
3.3.5.2.5	Proteção contra curtos-circuitos	33
3.3.5.2.6	Proteção contra contatos indiretos	33
3.4	Dimensionamento econômico de condutores elétricos	33

4	NBR 15920-OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA DAS SEÇÕES DOS CABOS DE POTÊNCIA.....	35
4.1	PERDAS JOULE EM CONDUTORES ELÉTRICOS	35
4.2	DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE CONDUTORES ELÉTRICOS SEGUINDO A NORMA ABNT NBR 15920.....	37
4.2.1	Aspectos econômicos.....	39
4.3	DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DOS CONDUTORES ELÉTRICOS APLICADO À ESTUDOS DE CASO.	44
4.3.1	Caso 1- Dimensionamento de um alimentador para um compressor de ar	45
4.3.1.1	Dimensionamento técnico NBR 5410/2004 (caso 1).....	47
4.3.1.1.1	Seção mínima (caso 1).....	47
4.3.1.1.2	Capacidade de condução de corrente (caso 1).....	48
4.3.1.1.3	Queda de tensão (caso 1)	48
4.3.1.2	Dimensionamento econômico NBR 15920/2011 (caso 1)	49
4.3.1.1	Cálculo do custo total para seções nominais padronizadas.....	51
4.3.2	Caso 2 – Dimensionamento de um alimentador para máquina extrusora 120mm. 52	
4.3.2.1	Dimensionamento técnico NBR 5410/2004 (caso 2).....	53
4.3.2.1.1	Seção mínima (caso 2).....	54
4.3.2.1.2	Capacidade de condução de corrente (caso 2).....	54
4.3.2.1.2	Queda de tensão (caso 2)	54
4.3.2.2	Dimensionamento econômico NBR 15920/2011 (caso 2)	55
4.3.2.3	Cálculo do custo total para seções nominais padronizadas.....	57
4.3.3	Caso 3- Dimensionamento de uma entrada de energia elétrica em um edifício residencial multifamiliar	58
4.3.3.1	Dimensionamento técnico (caso 3)	61
4.3.3.2	Dimensionamento econômico NBR 15920/2011 (caso 3).....	61
4.3.3.3	Cálculo do custo total para seções nominais padronizadas	63
5	RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS	65
5.1	RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO 1 (COMPRESSOR DE AR).....	65

5.2	RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO 2 (EXTRUSORA 120MM)	67
5.3	RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO 3 (EDIFÍCIO DE USO COLETIVO)	68
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71

1 INTRODUÇÃO

A Engenharia Elétrica engloba várias áreas de atuação, como por exemplo: controle, automação, eletrônica, telecomunicação e eletrotécnica. Em cada área, o Engenheiro eletricista poderá identificar e solucionar problemas, aplicando os conhecimentos adquiridos.

A vertente objeto de estudo deste trabalho de conclusão de curso é a eletrotécnica, mais especificamente as instalações elétricas em baixa tensão. Podendo ser definida como: a matéria que engloba a transferência de energia elétrica proveniente de uma fonte (como subestações, geradores e redes de distribuição), sua transformação e seus pontos de utilização como: motores, lâmpadas e tomadas.

Além disso, as instalações elétricas são divididas em duas etapas: projeto e execução, que realizados corretamente garantem o funcionamento adequado da instalação, a conservação dos bens e a segurança de pessoas e animais.

A etapa a ser abordada neste trabalho, é a de projeto, assim, apresentar-se-á uma metodologia visando a otimização econômica de cabos e condutos do ponto de vista da viabilidade técnica e econômica. A metodologia a ser empregada para a obtenção destas componentes econômicas é baseada na norma NBR 15920/2011.

Todo este desenvolvimento é aplicado a estudos de caso com a finalidade de expor a aplicabilidade da metodologia, evidenciar o quão flexível podem ser as instalações, elaborar tabelas e gráficos para a comparação de valores de cada instalação elétrica e caracterizar os materiais e métodos aplicados.

2 REVISÃO LITERÁRIA

Neste capítulo aborda-se a necessidade e a aplicabilidade da norma NBR 15920/11. É notável que o dimensionamento exposto pela NBR 5410/04 não é suficiente para uma análise econômica na seleção das seções de condutores elétricos.

Apesar de ser uma norma recente, alguns profissionais e bibliografias aplicaram esta metodologia obtendo resultados realmente satisfatórios.

Algumas destas aplicações são abordadas no item 2.1.

2.1 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO

A seguir, demonstra-se algumas aplicações da norma objeto de estudo deste trabalho de conclusão de curso, destacando os resultados obtidos, afim de expor o quanto esta metodologia pode, se aplicado corretamente, findar em ótimos resultados econômicos.

O primeiro caso a ser exposto foi obtido no “ Guia EM da NBR 5410 – Instalações em baixa tensão”.

Neste exemplo foi aplicado o dimensionamento técnico (NBR 5410/04) e o dimensionamento econômico (NBR 15920/11) em um circuito alimentando um quadro de distribuição, constituído por três cabos unipolares com condutor de cobre, isolamento termofixa e isolamento de PVC, dispostos em trifolio, em um leito de cabos. O circuito tem 100 metros de comprimento, a temperatura ambiente é de 30°C e a corrente de projeto é de 320A. Estimou-se que este circuito opere 4000 horas por ano, o período de análise foi de 10 anos e, por fim, o valor da tarifa de energia elétrica considerado foi de 0,036R\$/kWh.

Aplicando o dimensionamento econômico, obteve-se uma seção transversal de 95mm² e aplicando o dimensionamento técnico, obteve-se um condutor de 150mm².

Portanto, verificou-se que a seção do cabo determinada pelo critério econômico traz maiores benefícios, se a análise considerar, não apenas os custos iniciais, mas os custos totais incorridos, num prazo mais compatível com a vida útil da instalação.

O período de retorno de investimento obtido foi de 5,9 anos, tendo uma diferença dos custos de perda de energia dos dois critérios de R\$ 318, 70 por ano.

Para o segundo caso, buscou-se a referência “MORENO, Hilton. DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE CONDUTORES ELÉTRICOS. Um caminho para economizar Energia.”. Neste caso, considera-se um circuito em 220/380V, 60Hz, trifásico, constituído por um condutor de cobre (classe de encordoamento 2), isolação em EPR e cobertura em PVC, instalado em eletroduto aparente. O circuito tem 100 metros de comprimento, temperatura ambiente média de 40°C, corrente máxima no primeiro ano de 150A, operando 4000 horas por ano e o custo de energia elétrica no primeiro ano é de 0,1 R\$/kWh. A análise foi feita para um período de 20 anos.

Aplicando o dimensionamento econômico, obteve-se uma seção transversal de 400mm² e aplicando o dimensionamento técnico, obteve-se um condutor de 95mm².

Concluiu-se que, apesar do cabo dimensionado pelo critério econômico ter um custo inicial maior que o cabo calculado pelo critério técnico, há um retorno deste investimento em 5,2 anos, economizando (durante a vida útil do circuito) R\$ 6.385,60.

3 PROJETO DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS EM BAIXA TENSÃO

O objetivo deste capítulo é caracterizar um projeto de instalações elétricas em baixa tensão e estabelecer um sequenciamento lógico para o projeto da mesma. Visando a definição da fiação através dos critérios técnicos definidos pela NBR 5410/04. A seguir, há a apresentação dos possíveis tipos de projeto elétrico e algumas de suas peculiaridades:

- Projeto Residencial
- Projeto Predial
- Projeto Industrial

Essas três aplicações têm características que possibilitam haver inúmeras soluções de projeto, entretanto há o chamado “ponto ótimo” da instalação, o qual agrega a solução mais viável econômica e tecnicamente. Estas aplicações serão abordadas ao decorrer deste trabalho.

O projeto residencial é o mais simples deste grupo, pois as maiores cargas a serem instaladas (chuveiros) têm caráter resistivo, sendo que os demais equipamentos a serem alimentados são eletroeletrônicos e de iluminação, caracterizados pelo baixo consumo.

O projeto predial é caracterizado por algumas cargas de caráter indutivo e de maior potência (motores e bombas d'água). Além das demais cargas presentes em projetos residenciais, no geral, apresenta uma subestação externa entre 75kVA e 225kVA .

Em um projeto de instalações industriais há a forte presença de cargas indutivas, oriundas principalmente de motores. Assim, a instalação torna-se de caráter fortemente indutivo. Deste modo, o projeto fica mais complexo devido à necessidade do projeto de banco de capacitores para compensar este baixo fator de potência. E, principalmente, a necessidade de uma subestação, já que o fornecimento é dado na tensão de distribuição primária (13,8kV).

Os exemplos citados anteriormente não são de exclusividade de cada tipo de aplicação, podendo variar de acordo com as características do ambiente a receber o projeto e sua aplicação.

3.1 PARTES COMPONENTES

Ao terminar um projeto de instalações elétricas de cunho residencial, predial ou industrial é necessário que o mesmo contenha uma série de informações que em conjunto formam o projeto como um todo. A seguir, mostra-se alguns itens que podem ser elaborados em um projeto elétrico:

- ART (Anotação de Responsabilidade Técnica)
- Consulta prévia para fornecimento de energia
- Memorial descritivo
- Memorial de cálculo
 - Levantamento de carga
 - Cálculo da demanda
 - Dimensionamento da fiação
 - Dimensionamento da proteção
 - Dimensionamento dos condutos
- Plantas de situação e pavimentos
- Quadros de distribuição de circuitos
- Diagramas unifilares
- Esquemas verticais
 - Elétrica
 - Telefonia
 - Complementares (alarme, tv a cabo, iluminação de emergência)
- Detalhes
 - Entrada de serviço
 - Caixas de passagem
 - Aterramento
 - Para-raios
 - Centro de medição
- Convenções
- Especificações
- Listas de materiais

Nota-se que estes itens podem sofrer acréscimos ou diminuição, de acordo com cada projeto e necessidade dos clientes.

3.2 ASPECTOS NECESSÁRIOS

Após a familiarização com as partes componentes de um projeto elétrico, começar-se-á as suas etapas de elaboração. Para desenvolver cada item citado na seção 3.1 é necessário o conhecimento dos dados relativos às condições de suprimento e das características funcionais do local onde será aplicado o projeto. Comumente, o projetista recebe do seu cliente um conjunto de plantas (onde se especifica toda informação do projeto).

Como visto anteriormente, os projetos elétricos podem ser de caráter residencial, predial, industrial e outros, assim, notou-se a necessidade de elaborar um conjunto de informações necessárias para o início do projeto que abrangesse todos os tipos de instalações. Segundo [11], [9], [6] e [12], os itens mínimos necessários são:

- a) Planta de situação: tem a finalidade de situar a obra no contexto urbano;
- b) Planta baixa de arquitetura do empreendimento: contém toda a área de construção, indicando com detalhes divisionais os ambientes e suas finalidades, dependência em geral e outros que compõem o conjunto arquitetônico;
- c) Planta baixa do arranjo de máquinas para projetos industriais e planta baixa do arranjo de motores para projetos residenciais e prediais: contém a projeção aproximada de todas as máquinas e motores, com seus devidos posicionamentos e características, além de possíveis painéis de controle;
- d) Plantas de detalhes: devem conter todas as particularidades do projeto arquitetônico que venham a contribuir para a definição do projeto elétrico, seguem alguns exemplos:
 - Vistas e cortes da edificação;
 - Detalhes de colunas e vigas de concreto ou outras particularidades de construção;
- e) Condições de fornecimento de energia elétrica: Esta informação deve ser fornecida pela concessionária de energia elétrica atuante na região do projeto, Pode-se citar algumas:

- Garantia de que o suprimento da carga a ser instalada tenha as mínimas condições necessárias exigidas por lei;
- Tensão de fornecimento;
- Tipo de sistema que fará o suprimento do local, juntamente com sua capacidade de curto-circuito atual e futura;

f) Característica das cargas a serem instaladas: Pode ser fornecido pelo cliente ou buscado suas especificações em catálogos e manuais.

O conhecimento prévio destes detalhes capacita o projetista a elaborar um trabalho condizente com as necessidades do cliente. É importante questionar a respeito dos possíveis planos futuros para a edificação, pois um projeto deve atender as necessidades atuais e prever a mínima estrutura necessária para posterior expansão.

Alguns aspectos relevantes que o projetista deve se atentar , conforme [11], são:

- a) Flexibilidade: é a capacidade de admitir mudanças na localização das máquinas e equipamentos sem comprometer seriamente as instalações existentes;
- b) Acessibilidade: Exprime a facilidade de acesso a todas as máquinas e equipamentos de manobra;
- c) Confiabilidade: Representa o desempenho do sistema quanto às interrupções temporárias e permanentes, bem como assegura proteção à integridade física dos que usufruem e operam a instalação;
- d) Continuidade: o projeto deve ser desenvolvido de forma que a instalação tenha o mínimo de interrupção total ou em qualquer um de seus circuitos.

O projeto de uma edificação envolve várias etapas: do projeto arquitetônico juntamente com o Cálculo Estrutural às Instalações (Elétrica, Hidráulica, Sanitária, Climatização, Circuito Fechado de TV, Telefônico, Lógica). Os projetistas dessas várias áreas deverão ter um contato durante a elaboração dos projetos, a fim de discutirem as melhores soluções a serem aplicadas, encontrando a melhor forma possível de compatibilizar todos os projetos.

Cabe acrescentar que todos os itens apresentados neste trabalho estão baseados e de acordo com a legislação e as normas vigentes. A principal norma utilizada em instalações elétricas em baixa tensão é a NBR 5410/2004, podendo-se

fazer uso de outros materiais técnicos que posteriormente serão citados , [2], [9], [8], [17], [16], entre outros.

3.3 ETAPAS DO PROJETO

Para elaborar um projeto elétrico residencial, predial ou industrial é necessário ter umas mãos todos os dados pertinentes para seu início e perceber a importância dos aspectos relevantes (Flexibilidade, Confiabilidade, Acessibilidade, Continuidade). Todo projeto elétrico deve ter uma metodologia ou uma sequência de etapas a serem seguidas, com a finalidade de organizar e periodizar seu trabalho.

A seguir, listar-se-á uma sequência lógica de projeto elétrico.

- Levantamento de cargas;
- Separação de circuitos;
- Dimensionamento de fiação;
- Dimensionamento da proteção;
- Dimensionamento dos condutos;

Este sequenciamento serve apenas como um guia, podendo variar de acordo com a necessidade de cada projeto. Posteriormente, alguns itens desta sequência lógica serão abordados, dando-se mais ênfase em alguns aspectos.

3.3.1 Influências externas

As influências externas podem ser definidas como os aspectos externos relevantes ao um projeto que acarretam na seleção de diferentes tipos de materiais que devem garantir a segurança de pessoas e animais, o funcionamento adequado da instalação e a conservação dos bens.

A instalação não pode ser separada do ambiente em que se encontra, pois se este ambiente não for ideal, introduz riscos maiores ou menores à segurança das pessoas e ao desempenho dos componentes da instalação. Cada componente a ser utilizado no projeto elétrico deve ser selecionado levando em consideração primeiramente estas influências externas. Assim, os componentes devem ter graus de proteção condizentes com o ambiente o qual serão submetidos.

O grau de proteção é importante, pois é tratado com clareza na referência [2] e é o dado que os fabricantes dos materiais elétricos costumam fornecer. A classificação “IP” seguida por dois algarismos, ou até por mais duas letras, indica o grau de proteção de determinado material. Segundo a norma internacional IEC 60529, o primeiro algarismo traduz a proteção que o invólucro do material oferece ao usuário, contra contatos acidentais com partes internas perigosas, seja o perigo elétrico ou de outra natureza. O segundo algarismo indica a proteção contra penetração de líquidos e as duas letras finais é uma indicação complementar relativa à proteção das pessoas.

De acordo com [2], há uma tendência de se associar a ideia de “influências externas” predominantemente a fatores como temperatura ambiente, condições climáticas, presença de água e solicitações mecânicas. É importante destacar que a classificação destas influências cobre uma gama muito mais extensa de variáveis, todas tendo seu peso em aspectos como seleção de componentes, adequação de medidas de proteção, entre outros.

O item 4.2.6 (Classificação das influências externas) de [2] define que a condição de influência externa é designada por um código que compreende sempre um grupo de duas letras maiúsculas e um número:

- a) A primeira letra mostra a categoria geral da influência externa, podendo ser:
 - “A” refere-se a meio ambiente
 - “B” refere-se a utilização
 - “C” refere-se a construção das edificações
- b) a segunda letra indica a natureza da influência externa.
- c) o número indica a classe de cada influência externa.

Seguindo a codificação imposta por [2], abordar-se-á, primeiramente, as categorias gerais de influência externa:

3.3.1.1 Meio ambiente

Esta categoria geral de influências externas é bastante ampla, tendo vários aspectos relevantes, dentre eles, pode-se citar:

- temperatura ambiente
- condições climáticas do ambiente

- altitude
- presença de água
- presença de corpos sólidos
- presença de substâncias corrosivas ou poluentes
- solicitações mecânicas
- presença de flora e mofo
- fenômenos eletromagnéticos de baixa frequência (conduzidos ou radiados)
- fenômenos eletromagnéticos de alta frequência conduzidos, induzidos ou radiados (contínuos ou transitórios)
- descargas eletrostáticas
- radiações ionizantes
- radiação solar
- descargas atmosféricas
- movimentação do ar
- vento

Estes aspectos citados possuem Tabelas com códigos, classificação, características, aplicações e exemplos das influências. Estas Tabelas estão dispostas no item 4.2.6.1 da referência [2].

3.3.1.2 Utilização

Esta categoria geral de influências externa está dividida em:

- competência das pessoas.
- resistência elétrica do corpo humano.
- contato das pessoas com o potencial da terra.
- condições de fuga das pessoas em emergências.
- natureza dos materiais processados ou armazenados.

Estes aspectos citados possuem Tabelas com códigos, classificação, características, aplicações e exemplos das influências. Estas Tabelas estão dispostas no item 4.2.6.2 da referência [2].

3.3.1.3 Construção das edificações

Esta categoria geral de influências externa está dividida em:

- matérias de construção.
- estrutura das edificações.

Estes aspectos citados possuem Tabelas com códigos, classificação, características, aplicações e exemplos das influências. Estas Tabelas estão dispostas no item 4.2.6.3 da referência [2].

3.3.2 Influências internas

Estas características internas do projeto devem ser analisadas através do projeto arquitetônico em conjunto com o projeto estrutural, levando em consideração as características e tipos dos tetos, pisos, paredes, pilares, divisórias, vigas entre outros. Este item é de suma importância, pois toda seleção de componentes e métodos de instalação deve ser baseada nestas características.

O projetista deve analisar os projetos telefônico e estrutural para não haver incompatibilidades dos mesmos com o projeto elétrico. Qualquer dúvida das características construtivas da edificação deve ser sanada, pois, qualquer informação incorreta ou ambígua pode acarretar grandes mudanças de projeto.

3.3.3 Levantamento de carga

Após a apresentação de uma sequência lógica para a elaboração de um projeto elétrico no item 3.3, detalhar-se-á cada etapa desta ordem, com o foco na otimização do projeto no tocante a condutores e condutos.

Seguindo as etapas do projeto, começa-se explanando sobre o levantamento de carga. Pode-se dizer que este tópico é o início do projeto elétrico, pois seu principal objetivo é atender as cargas a serem instaladas levando energia elétrica desde o ponto de entrega previamente estipulado.

O levantamento de carga ou previsão de carga tem como principal objetivo a obtenção da quantidade de pontos de utilização como, por exemplo, pontos de

iluminação, tomadas de uso geral, tomadas de uso específico e motores. É necessário ter conhecimento das respectivas potências elétricas de cada ponto.

Quando o projetista está nesta etapa é imprescindível o contato com o cliente, pois ele abordará suas principais necessidades, localizando-as em sua planta baixa. É notável a existência de normas para definição destas cargas e suas localizações. Após o total conhecimento da planta baixa, suas peculiaridades e, principalmente, as cargas que serão atendidas neste projeto, deve-se seguir as regras estipuladas na referência [2].

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso é a otimização de projetos elétricos no tocante a condutos e condutores, assim o total detalhamento desta etapa torna-se dispensável, porém alguns pontos devem ser destacados:

- Segundo [6], considera-se como carga de um equipamento de utilização, sua potência nominal absorvida, sendo indicada pelo próprio fabricante ou calculada com o uso de sua tensão nominal, corrente nominal e fator de potência.

- A referência [2] apresenta os requisitos complementares para instalações ou locais específicos, onde são abordados casos mais particulares, como locais contendo banheiras, piscinas, compartimentos condutivos, locais contendo aquecedores de sauna e locais de habitação.

- A carga de iluminação deve ser determinada segundo a norma NBR8995-1/2013, que estipula parâmetros a serem seguidos no projeto de iluminação de acordo com cada ambiente ou instalação.

Certamente, para o levantamento das cargas ser projetado adequadamente deve-se buscar as referências citadas, tendo como principal referência os itens 4.2.1.2.1 até 4.2.1.2.3 da NBR 5410/04, sem deixar de levar em consideração as necessidades do cliente.

3.3.4 Divisão de circuitos

A separação de circuitos ou divisão das instalações, seguem o item 4.2.5 da referência [2]. Entretanto, buscando resumir e simplificar o entendimento da norma, as referências [11],[9] e [15] apresentam algumas definições e necessidades para esta etapa do projeto.

As principais considerações e exigências desta etapa de projeto serão listadas a seguir, mas é indispensável atender a todos os requisitos da norma vigente.

- A instalação deve ser dividida em tantos circuitos quanto necessários, devendo cada circuito ser concebido de forma a poder ser seccionado sem risco de realimentação inadvertida através de outro circuito.
- Segurança: evitar que a falha em um circuito prive a alimentação de toda uma área.
- Conservação de energia: prever a possibilidade que cargas de iluminação e climatização sejam acionadas na justa medida das necessidades
- Funcional: viabilizar a criação de vários ambientes, como os necessários em auditórios, salas de reuniões, entre outros.
- Produção: Minimizar as paralizações resultantes de uma ocorrência.
- Manutenção: Facilitar ou possibilitar ações de reparo ou inspeção.
- Devem ser previstos circuitos distintos para as partes das instalações que requeiram controle específico, por exemplo, sistemas de monitoramento de câmeras de segurança.
- Devem ser previstos circuitos terminais distintos para iluminação e para pontos de tomada, assim, devem ser individualizados pela função dos equipamentos de utilização que alimentam.
- As cargas devem ser distribuídas o mais uniformemente possível entre as fases.
- Caso as instalações possuam mais de um tipo de alimentação, como, concessionária e geração própria, a distribuição associada especificamente a cada uma delas deve ser disposta separadamente e de forma claramente diferenciada das demais.

Vale ressaltar que em locais de habitação, ou seja, unidades residenciais, hotéis, motéis e similares, a norma NBR 5410/04 define algumas regras, considerações e restrições que devem ser observadas na elaboração de projetos elétricos nestes ambientes.

3.3.5 Dimensionamento dos condutores elétricos

Este trabalho de conclusão de curso busca uma metodologia para otimização de projetos elétricos, para este melhoramento objetivado aqui, é necessário o pleno conhecimento das etapas de um projeto elétrico. Estes tópicos vêm sendo abordados no decorrer destas seções.

Como já citado, a otimização de projetos elétricos, que é alvo deste estudo, tem como foco principal a viabilidade técnica e financeira. Para que este objetivo seja alcançado, foi definido que as etapas de que serão analisadas a fundo, aplicando técnicas de dimensionamento e análise de custo são:

- Dimensionamento de condutores elétricos
- Dimensionamento de condutos

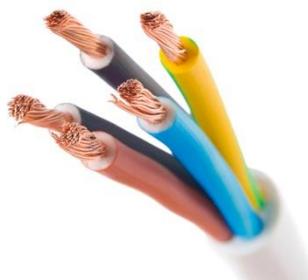
3.3.5.1 Conceitos essenciais

Nesta seção, apresentar-se-á alguns conceitos usados para o dimensionamento de condutores elétricos e, posteriormente, as técnicas e métodos envolvidos. Todos os itens a serem abordados tem embasamento teórico nas referências bibliográficas e serão pontualmente citados.

3.3.5.1.1 Fios x cabos

A principal diferença entre os fios e os cabos é a flexibilidade, ou seja, o quão maleável este condutor é. A característica que define esta maleabilidade é que um fio é composto apenas de um único e espesso filamento rígido, já os cabos são feitos por diversos filamentos mais finos o que lhes dá a flexibilidade, acarretando facilidade nas instalações em eletrodutos. As Figuras 3.1 e 3.2 representam um exemplo de fio e de cabo, respectivamente.

Figura 3.1 – Cabo de cobre



Fonte: <http://www.tecnogeradores.com.br/blog/quais-sao-e-para-que-servem-os-cabos-eletricos-especiais/> acessado em 27/06/2015

Figura 3.2 – Fio de cobre



Fonte: <http://www.tecnogeradores.com.br/blog/quais-sao-e-para-que-servem-os-cabos-eletricos-especiais/> acessado em 27/06/2015

Devem ser usados os Fios e Cabos de cobre de alta condutibilidade, tipo anti-chamas, com revestimento termoplástico e nível de isolamento para 750V e 1000V, salvo indicação em contrário do projeto elétrico.

3.3.5.1.2 Material condutor

Conforme [11], a maioria absoluta das instalações emprega o cobre como o elemento condutor dos fios e cabos elétricos. Entretanto, o uso do condutor de alumínio é reduzido, mas existe. Sua aplicação em menor escala se deve principalmente as restrições impostas pela norma NBR5410/04, mesmo que seu preço de mercado seja significativamente menor que os condutores de cobre.

3.3.5.1.3 Isolação dos condutores

Os fios e cabos são isolados com diferentes compostos, porém, os mais empregados em instalações elétricas são com isolamento de PVC (cloreto de polivinila), EPR (etileno-propileno) e o XLPE (polietileno reticulado). Cada componente apresenta características químicas, elétricas e mecânicas próprias, acarretando, assim, o seu emprego em condições específicas para cada instalação.

A isolação dos condutores isolados é caracterizada pela tensão entre fases que suportam, padronizados pela norma NBR 6148 em 750V. A isolação dos condutores unipolares é designada pelos valores nominais de tensões que suportam, respectivamente, entre fase e terra e entre fases, 0,6/1kV, padronizados pela NBR 6251 (condutores em baixa tensão).

3.3.5.1.4 Nomenclatura dos condutores

Os cabos são chamados de isolados quando dotados de uma camada isolante, sem capa de proteção. Entretanto são denominados unipolares os condutores que possuem uma camada isolante, revestida por uma capa. Quando o um cabo é constituído por vários condutores isolados, sendo que esse conjunto é protegido por uma capa externa, denomina-se cabo multipolar.

3.3.5.2 Critérios para dimensionamento da seção mínima dos condutores de fase

Após apresentar alguns conceitos necessários para a escolha e dimensionamento dos condutores, iniciar-se-á listando os critérios que envolvem tal procedimento:

- Seção mínima.
- Capacidade de condução de corrente.
- Queda de tensão.
- Proteção contra sobrecargas.
- Proteção contra curtos-circuitos.
- Proteção contra contatos indiretos.

Estes critérios serão detalhados a seguir, com suas respectivas referências e seção mínima dos condutores de fase. Entretanto este dimensionamento pode ser questionado ao fazer-se uma análise de custos futuros, podendo surgir novas dimensões que aperfeiçoem este projeto. Os métodos usados para isto serão abordados posteriormente.

3.3.5.2.1 Seção mínima

Este critério é apresentado no item 6.2.6.1 da referência [2]. Este, estabelece que a seção dos condutores em circuitos de corrente alternada não deve ser inferior ao valor pertinente dado na Tabela 47, desta referência. A seguir, resume-se esta Tabela considerando os itens mais relevantes e aplicáveis a este trabalho.

Tabela 3.1-Seção mínima dos condutores elétricos

Utilização do circuito	Tipo de linha		Seção mínima (Cu)[mm ²]	Seção mínima (Al)[mm ²]
Iluminação	Instalações fixas em geral	Condutores e cabos isolados	1,5	16
Força			2,5	16
Sinalização e de controle			0,5	---
Força		Condutores nus	10	16
Sinalização e de controle			4	---
Para equipamento específico	Linhas flexíveis com cabos isolados		Vide norma Equipam.	---
Para qualquer outra aplicação			0,75	---

Fonte: Tabela 47, NBR 5410/04.

3.3.5.2.2 Capacidade de condução de corrente

Para dimensionar um circuito elétrico é necessário atender a vários requisitos de projeto e critérios. O critério da capacidade de condução de corrente constituirá o ponto de partida do processo.

Este critério de dimensionamento de condutores é apresentado na Seção 6.2.5 da NBR 5410/04, o qual apresenta algumas Tabelas para determinação dos

condutores. Para que o este processo seja feito corretamente, é necessário que o projetista “converta”, ou seja, aproxime os dados reais de projeto dos circuitos em informações harmonizadas com as condições que foram elaboradas a norma. Para se aproximar o máximo destas condições a norma apresenta dois fatores de correção:

- Fator de correção de temperatura (FCT);
- Fator de correção de agrupamento (FCA);

Segundo [2], a corrente transportada por qualquer condutor, durante períodos prolongados em funcionamento normal, deve ser tal que a temperatura máxima para serviço contínuo dada na Tabela 3.2, não seja ultrapassada. É considerado a temperatura ambiente de 30°C. Se esta não for aplicada,então, há necessidade de correção, segundo a Tabela 40 da NBR 5410/04.

Tabela 3.2 – Temperaturas características dos condutores.

Tipo de isolamento	Temperatura máxima para serviço contínuo (condutor) °C	Temperatura limite de sobrecarga (condutor) °C	Temperatura limite de curto circuito (condutor) °C
Policloreto de vinila (PVC) até 300mm ²	70	100	160
Borracha etileno-propileno (EPR)	90	130	250
Polietileno reticulado (XLPE)	90	130	250

Fonte: Tabela 35, NBR 5410/2004

Assim, a Tabela 3.2 leva em consideração que apenas há um único circuito no interior do conduto. Em havendo mais de um circuito, então, as capacidades dos cabos deverão ser reduzidas por um fator dado pelas Tabelas 42 à 45 da NBR 5410/04, salientando que, em especial, a Tabela 42 foi organizada levando-se em consideração que os cabos, de cada circuito no interior do conduto, são semelhantes.

Se isto não for verificado, então, o FCA a ser utilizado pode ser obtido pela equação que relaciona o fator de correção de agrupamento e n.

Onde n é o número de circuitos e/ou cabos multipolares dentro do conduto.

Com efeito, a definição de semelhança se dá pela análise inicial das correntes de cada circuito e, pela bitola da fiação que, supostamente, suporta esta corrente. Se as bitolas estivessem dentro de um intervalo de 3 bitolas normalizadas consecutivas, então, disse que os cabos são semelhantes. Do contrário, havendo pelo menos um fora do intervalo, caracteriza-se a não semelhança.

Para que a prerrogativa citada no parágrafo anterior seja atendida é necessário que a corrente dos condutores não seja superior as capacidades de corrente adequadamente obtidas das Tabelas 36 a 39 da NBR 5410/04, corrigidas, se for o caso, pelos fatores indicados nas Tabelas 40 até 45 da mesma norma.

Como estas Tabelas referidas são extensas e serão empregadas apenas partes delas, nota-se que não se faz necessário a sua reprodução na íntegra. Assim, quando alguma destas Tabelas for consultada para dimensionamento, então irão ser citadas e referenciadas ao decorrer deste trabalho.

3.3.5.2.3 Queda de tensão

Neste critério, a norma expõe os limites máximos admissíveis de queda de tensão nas instalações alimentadas por ramal de baixa tensão e por transformados/gerador próprio. Este critério é tratado na seção 6.2.7, [2], que possui algumas peculiaridades que são ressaltadas a seguir.

Em qualquer ponto de utilização da instalação, a queda de tensão verificada não deve ser superior aos seguintes valores, dados em relação ao valor nominal da instalação:

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

Caso em circuitos terminas, a máxima queda de tensão permitida deve ser de 4%

Algumas quedas de tensão podem ser maiores que as indicadas anteriormente, sendo permitidas aquelas para equipamentos com corrente de partida elevada, durante o período de partida, desde que dentro dos limites impostos.

3.3.5.2.4 Proteção contra sobrecargas

Conforme [2], estes critérios de dimensionamento têm como alicerce a premissa que os condutores vivos devem ser protegidos, por um ou mais dispositivos de seccionamento automático contra sobrecargas e curtos-circuitos. Exceto quando estas sobrecorrentes forem limitadas atendendo a normatização vigente. Deve haver uma coordenação entre as duas proteções conforme o item 5.3.6 da NBR 5410/04.

Este item é um critério para dimensionamento dos condutores elétricos, pois se deve haver uma coordenação entre condutores e dispositivos de proteção. Para que a proteção dos condutores, no ponto de vista de sobrecarga, esteja assegurada, as características de atuação do dispositivo destinado a promover a proteção devem atender as equações (1) e (2).

$$I_B \leq I_N \leq I_Z \quad (1)$$

$$I_2 \leq 1,45 \cdot I_Z \quad (2)$$

Onde,

I_B = Corrente de projeto do circuito

I_Z = Capacidade de condução de corrente

I_N = Corrente nominal do dispositivo de proteção

I_2 = Corrente convencional de atuação ou corrente convencional de fusão

3.3.5.2.5 Proteção contra curtos-circuitos

As correntes de curto circuito devem ser determinadas em todos os pontos da instalação que forem julgados como necessário, podendo ser efetuado por cálculo ou medição. Tendo estes valores de corrente de curto circuito, deve-se escolher os componentes da instalação que suportem estas correntes por pequenos períodos de tempo sem que haja danificação nos mesmos.

3.3.5.2.6 Proteção contra contatos indiretos

O Objetivo desta medida de proteção é enunciado na seção 5.1.3.1 da NBR 5410/04 que diz: “o objetivo é assegurar que o circuito seja automaticamente desligado caso alguns de seus equipamentos por ele alimentados venha a sofrer uma falta à terra ou à massa capaz de originar uma tensão de contato perigosa. Há casos em que este seccionamento automático pode ser efetuado com o uso de dispositivo a sobrecorrente. Este critério tem características semelhantes ao critério de queda de tensão”. Por conseguinte, esta etapa do dimensionamento pode acarretar a alteração da seção do condutor, no comprimento do circuito ou em ambos.

3.4 Dimensionamento econômico de condutores elétricos

Existem métodos para o dimensionamento de condutores elétricos em projetos de instalações elétricas de baixa tensão que aplicam inúmeros conceitos, técnicas, tabelas e fórmulas. Entretanto, normalmente, o objetivo do projetista é determinar condutores com bitola o menor possível, desde que dentro das limitações impostas pelas normas, a fim de gerar menos custos na instalação elétrica.

Dependendo do ponto de vista, os custos gerados escolhendo um condutor com a menor seção permitida em norma pode acarretar em custos maiores que escolhendo um condutor de menor seção.

Com a intenção de promover esta otimização de custos do projeto de instalações elétricas no tocante a condutores, buscou-se referências bibliográficas que trazem técnicas para este dimensionamento econômico.

A norma NBR 15920/11 trata da otimização econômica dos cabos de potência, a seguir serão expostos alguns conceitos para este dimensionamento, tratando desde a motivação para seu uso até custos finais da instalação.

4 NBR 15920-OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA DAS SEÇÕES DOS CABOS DE POTÊNCIA

Buscando alcançar a otimização de um projeto elétrico em termos de condutores e condutos, fica evidente a necessidade de ferramentas de auxílio que serviram de embasamento teórico na obtenção da seção econômica ou ponto ótimo referente a condutores de energia elétrica.

A ferramenta selecionada foi obtida através da Norma NBR 15920/2011- Cabos elétricos-Condições de operação- Otimização econômica das seções dos cabos de potência. Esta normatização foi desenvolvida com base em algumas normas nacionais e internacionais.

Segundo a referência [1], esta norma trata somente da escolha econômica de seções de condutores com bases em perdas Joule. As perdas devido à queda de tensão não foram consideradas.

Para utilizar este procedimento proposto pela NBR 15920/11, é necessário munir-se de alguns conceitos.

A seguir, serão abordados tópicos relevantes para o entendimento e aplicação da norma NBR 15920/11.

4.1 PERDAS JOULE EM CONDUTORES ELÉTRICOS

As perdas de energia em forma de calor provenientes da circulação de corrente por uma resistência elétrica são denominadas de perdas Joule. Segundo [13], a perda de energia em um condutor elétrico é calculada a partir da sua resistência elétrica, da corrente de projeto máxima prevista para o circuito e do tempo que esta corrente circula pelo condutor. Este equacionamento pode ser expresso por:

$$E = R \cdot i_{\max}^2 \cdot \Delta t \quad (3)$$

Onde,

E = Energia dissipada no condutor, [Wh];

R = Resistência elétrica do condutor, [Ω];

i_{\max} = Corrente de projeto máxima prevista para o circuito, [A];

Δt = intervalo de tempo de circulação da corrente i_{\max} , [h];

A resistência elétrica do condutor é dada pela equação 4:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (4)$$

Tem-se,

ρ = Resistividade elétrica do material condutor [$\Omega \cdot m$];

l = Comprimento do circuito [m];

S = Seção transversal do condutor [mm^2];

Substituindo (4) em (3):

$$E = \rho \cdot \frac{l}{S} \cdot i_{\max}^2 \cdot \Delta t \quad (5)$$

Pode-se concluir que a potência dissipada no condutor elétrico decorrente da passagem de corrente elétrica por um determinado tempo é diretamente proporcional à resistividade elétrica do material condutor.

Com a intenção de simplificar os cálculos, a referência [1] propõe que se use o valor de resistividade elétrica em uma temperatura de operação de 20°C. Os materiais condutores a serem objeto de estudo neste trabalho serão os condutores de cobre e alumínio, deste modo a norma explicita que os valores das resistividades do cobre e do alumínio a 20°C são, respectivamente, $18,35 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m$ e $30,3 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m$.

As perdas Joule aqui relacionadas são abordadas apenas para a frequência fundamental de operação (normalmente 60Hz), entretanto, segundo [13], as correntes harmônicas são fontes de perdas energéticas através de calor provenientes de sua circulação nos condutores elétricos. Como a influência destas correntes é pequena e envolve elevado número de cálculos necessários, delimitou-se este trabalho de conclusão de curso apenas na aplicação de correntes elétricas na frequência fundamental de operação.

Analisando a equação (5), fica evidente que a energia dissipada no condutor “E” é inversamente proporcional a seção do condutor elétrico “S”, ou seja, quanto

maior a seção do cabo a ser aplicada, menor é a energia dissipada no mesmo. Assim, notou-se a necessidade da elaboração e normatização de um dimensionamento que leve em conta as perdas joule.

Portanto, o Procobre, instituição pertencente ao grupo International Copper Association, em conjunto com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), elaborou a criação e lançamento da norma técnica que propõe um método auxiliar para o dimensionamento de condutores elétricos para baixas e médias tensões. A “NBR 15920 - Cabos elétricos – Cálculo da corrente nominal – Condições de operação – Otimização econômica das seções dos cabos de potência” traz um método de dimensionamento que prevê seções nominais maiores que as determinadas pelo método “tradicional” proposto pela NBR 5410/2004- Instalações elétricas de baixa tensão.

Com o intuito de levar em consideração as perdas Joule no condutor, concluindo que há uma seção econômica do condutor que traz otimização de energia elétrica para a instalação, sem deixar de lado os custos iniciais e de operação. Os conceitos necessários serão abordados ao decorrer deste trabalho quando se mostrarem necessários.

4.2 DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE CONDUTORES ELÉTRICOS SEGUINDO A NORMA ABNT NBR 15920.

Como este dimensionamento de condutores leva em consideração custos de condutores, instalação, energia elétrica, entre outros aspectos, seja no futuro ou no presente são necessárias algumas definições:

- Em [1], para combinar os custos de compra e instalação com os custos de perdas de energia que surgem durante a vida econômica de um cabo, é necessário expressá-los em valores econômicos comparáveis, tais valores se referem ao mesmo ponto no tempo. É conveniente usar a data de compra da instalação como ponto inicial e referir-se a ele como "presente". Os custos "futuros" das perdas de energia são convertidos ao seu "valor presente" equivalente. Isto é feito pelo processo de amortização, sendo a taxa de amortização ligada ao custo do dinheiro.

- A taxa de inflação presente no período a ser analisado é desconsiderada, tendo em vista que, guardando suas devidas proporções, não influenciarão ao aplicar este dimensionamento, pois com os algebrismos aplicados ela é desprezada.

- Como esta norma visa calcular os custos presentes das perdas no condutor, é necessário determinar valores apropriados ao desenvolvimento futuro da carga a ser analisada, os aumentos anuais do preço da energia elétrica [Kwh] e uma taxa de desconto anual pela vida econômica do cabo, este último conceito será explicado quando for necessário para os cálculos.

A fim de simplificar, as equações propostas por essa norma são de aplicação direta. Entretanto, deve-se salientar que os parâmetros financeiros a serem aplicados permanecerão inalterados durante a vida econômica do cabo.

Dois métodos são apresentados nesta normatização. No primeiro método, conforme [1], uma série de seções de condutores está sendo considerada, pois o objetivo é calcular uma gama de correntes econômicas para cada uma das seções de condutor previsto para as condições de instalação específica e, então, selecionar aquela seção cuja faixa contém o valor requerido para a carga. Este método é apropriado onde várias instalações semelhantes estão sendo consideradas.

O segundo método é mais útil quando apenas uma instalação elétrica está envolvida, pois aborda uma metodologia mais direta de cálculo, onde é calculada a seção transversal ótima que a carga exige e, então, é selecionada a seção nominal mais próxima. Ressalta-se que a aplicação deste método de otimização econômica, não desobriga o projetista de realizar os dois cálculos para os métodos de dimensionamento da fiação padronizados pela NBR 5410/04.

Analisando os dois métodos, optou-se pela segunda abordagem, pois os estudos de caso a serem objeto deste dimensionamento se aproximam das características deste equacionamento e tem-se uma aplicação mais direta na maioria dos casos.

Tendo em vista estas delimitações e observações propostas, a seguir, abordar-se os aspectos econômicos envolvidos neste dimensionamento com a pretensão de dar subsídio para o cálculo da seção econômica previamente dita.

4.2.1 Aspectos econômicos

O custo total de instalar e operar um cabo durante sua vida econômica, expresso em valores presentes, é calculado conforme a equação (6).

$$CT = CI + CJ \quad (6)$$

Onde,

CT = Custo total, [R\$];

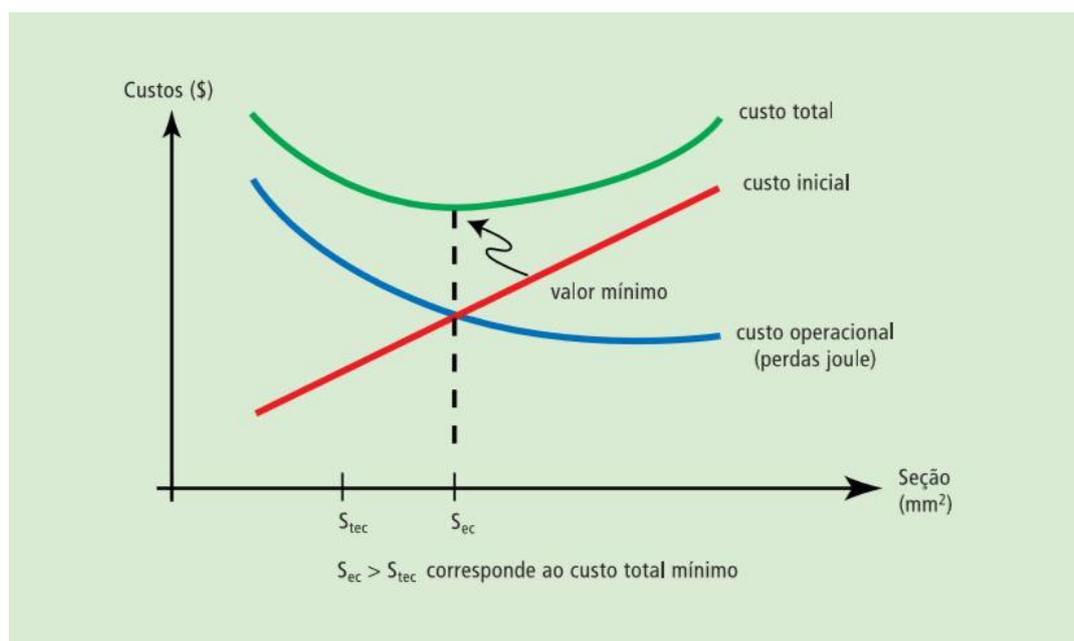
CI = Custo de um comprimento de cabo instalado, expresso em unidade de moeda, [R\$];

CJ = Custo equivalente na data em que a instalação foi adquirida, ou seja, o valor presente, das perdas em joules durante a vida econômica de N anos, expresso em unidade de moeda [R\$];

Como expresso anteriormente, é necessário relacionar os custos iniciais de compra e instalação com os custos de perdas de energia que surgem ao decorrer da vida útil do condutor elétrico. Para que seja possível relacionar estes custos é necessário que estes valores econômicos sejam comparáveis, ou seja, referindo-se ao mesmo ponto no tempo.

Para a compreensão do conceito de seção econômica de um condutor expressa-se a equação (6) no gráfico apresentado na Figura 4.1 (curvas típicas de custo inicial e operacional).

Figura 4.1- Custos em função da seção do condutor



Fonte: MORENO, Hilton.

Ao analisar este gráfico, nota-se a presença da curva de custo total que expressa a soma das curvas de custo inicial e de custo operacional. Ao selecionar uma seção de condutor elétrico tem-se um custo inicial que envolve o custo do condutor, conduto e sua instalação, é claro que ao aumentar esta seção os custos iniciais aumentam, pois o condutor fica mais caro juntamente com seu conduto e instalação. De forma antagônica, o custo operacional diminui ao selecionar um condutor de seção transversal maior (pode-se analisar as equações (4) e (5) para chegar a esta conclusão).

Como o custo total envolve a soma destas duas curvas, há um ponto em que temos a seção do condutor selecionado pelo métodos técnico, ou seja, pela NBR 5410/04, esta seção é expressa no gráfico por S_{tec} . Neste ponto da seção técnica, tem-se um custo inicial menor e um custo operacional maior, ambos devido a uma escolha de seção transversal mínima que atenda os requisitos normativos. Porém, busca-se selecionar um valor econômico para esta área transversal, assim, ao analisar o gráfico, observa-se a existencia de um ponto de mínimo presente na curva de custo total, o qual está relacionado à seção econômica.

Por definição, denomina-se seção econômica S_{ec} como aquela seção que resulta no menor custo total de instalação e operação de um condutor elétrico durante sua vida econômica considerada.

De acordo com [1], a equação do custo total (6), pode ser reescrita pela equação (7):

$$CT = CI + i_{max}^2 \cdot R \cdot l \cdot F \quad (7)$$

Onde,

i_{max} = Corrente máxima no cabo durante o primeiro ano de instalação, [A];

l = Comprimento do cabo do circuito, [m];

F = Calculado pela equação (10), [mm^2];

R = Resistência c.a. aparente do condutor por unidade de comprimento, [Ω/m];

Vale ressaltar que, o cálculo desta resistência c.a. deve levar em consideração os efeitos pelicular e de proximidade (y_p e y_s) e as perdas em blindagens metálicas e armações (λ_1 e λ_2). Estes efeitos e perdas serão abordados no apêndice A.

O valor de “R” em função da seção padronizada “ S_{ec} ” do condutor deve ser considerada na temperatura média de operação do condutor θ_m e calculada pela expressão (8).

$$R(S_{ec}) = \frac{\rho_{20} \cdot B [1 + \alpha_{20} \cdot (\theta_m - 20)]}{S_{ec}} \cdot 10^6 \quad (8)$$

Segundo [13], a seção econômica do condutor pode ser expressa pela equação principal (9) e pelas equações auxiliares (10), (11), (12) e (13). A seguir, estas equações serão abordadas e, então, suas variáveis e constantes serão caracterizadas.

$$S_{ec} = 1000 \cdot \left\{ \frac{i_{max}^2 \cdot F \cdot \rho_{20} \cdot B [1 + \alpha_{20} \cdot (\theta_m - 20)]}{A} \right\}^{0.5} \quad (9)$$

$$F = N_p \cdot N_c \cdot (T \cdot P + D) \cdot \left(\frac{Q}{1 + \frac{1}{100}} \right) \quad (10)$$

$$B = (1 + y_p + y_c) \times (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \quad (11)$$

$$Q = \frac{1-r^n}{1-r} \quad (12)$$

$$r = \frac{\left(1 + \left(\frac{a}{100}\right)^2\right) \cdot \left(1 + \left(\frac{b}{100}\right)\right)}{1 + \left(\frac{i}{100}\right)} \quad (13)$$

Onde,

S_{ec} = Seção econômica do condutor, [mm²];

i_{max} = Corrente máxima no cabo durante o primeiro ano de instalação, [A];

F = Quantidade auxiliar que leva em consideração o arranjo do ramal a ser dimensionado (número de condutores de fase por circuito e número de circuitos que levam o mesmo valor e tipo de carga) e variáveis envolvendo custos de energia, tempo de operação e variação anual da demanda;

ρ_{20} = Resistividade elétrica do material condutor em temperatura de 20°C, [$\Omega \cdot m$];

B = quantidade auxiliar que abrange os efeitos peliculares e de proximidade no circuito. Ver Apêndice A;

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 = Componente variável do custo por unidade de comprimento conforme seção do condutor, [R\$/m.mm²];

N_p = Número de condutores de fase por circuito;

N_c = Número de circuitos que levam o mesmo valor e tipo de carga;

T = Tempo de operação com perda Joule máxima, [h/ano];

P = Custo de um W.h no nível de tensão aplicado, [R\$/W.h];

D = Variação anual da demanda, [R\$/W.ano];

Q = Quantidade auxiliar que envolve as variações anuais de carga, custo de energia e uma taxa de capitalização;

i = Taxa de capitalização para cálculo do valor presente, [%];

r = Quantidade auxiliar para obtenção da Quantidade auxiliar Q;

N = Período coberto pelo cálculo financeiro, pode-se denominar como “vida econômica”, [ano];

a = aumento anual da carga, [%];

b = aumento anual do custo da energia elétrica, sem incluir efeitos de inflação, [%];

A definição das variáveis auxiliares servem para facilitar a escrita e a resolução da equação principal que define a seção econômica dos condutores elétricos.

Considerações importantes para o cálculo da seção do condutor:

- Após a introdução a respeito das variáveis (y_p , y_s , λ_1 e λ_2) no apêndice A, a NBR 15920/2011 cita que para efeito da determinação da seção econômica, normalmente, estes valores podem ser desconsiderados sem haver perdas significativas no resultado do cálculo (caso de cabos de baixa tensão, $\leq 1\text{kV}$).

- Os valores obtidos para a seção econômica do condutor elétrico normalmente são de dimensões diferentes das disponíveis no mercado. Deste modo, é necessário que o projetista calcule o custo total para as seções nominais padronizadas maiores e menores adjacentes à escolhida através do dimensionamento econômico.

- Para utilizar a equação (9), deve-se conhecer o valor da temperatura média de operação do condutor θ_m . A referência [1] expõe a equação (14) como uma forma simples para estimar θ_m .

$$\theta_m = \frac{(\theta - \theta_A)}{(3)} + \theta_A \quad (14)$$

Onde,

θ = Temperatura máxima nominal do condutor para o tipo de cabo considerado, [°C];

θ_A = Temperatura ambiente média, [°C];

- Ainda, para aplicar a equação (9) é necessário o valor da variável auxiliar A caracterizada como componente variável do custo por unidade de comprimento conforme seção do condutor, dada em R\$/m.mm². A elaboração dos valores desta variável deve considerar o custo total da instalação de um condutor, incluindo o custo do próprio cabo, suas terminações, dos elementos de linha elétrica (condutos) e da mão de obra de montagem.

A elaboração de uma tabela que relacione todos estes custos em relação ao condutor selecionado torna-se muito variável, pois há inúmeras características

inerentes ao cabo que podem ser selecionadas, como por exemplo: material condutor e isolamento. Além de que o tipo de instalação do condutor acarreta mais tempo de mão de obra, que por sua vez não pode ter seu valor comparado, pois um profissional instalador pode demandar mais tempo que outro ou ter seu valor de mão de obra diferente dos demais.

Deste modo, optou-se por exemplificar com a Tabela 4.1 elaborada pela referência [13], que possui valores determinados por profissionais do ramo e estudiosos desta nova normatização. Entretanto é necessário levantar estes valores para o tipo de instalação a ser aplicada. Para cada estudo de caso será elaborada uma tabela com estes valores. A seguir, o exemplo desta Tabela é mostrado.

Tabela 4.1- Exemplo de determinação dos valores da variável A

Determinação dos valores da variável A				
Seção nominal do cabo [mm^2]	Custo inicial Ci [R\$/m]			A [R\$/m. mm^2]
	Cabo	Instalação (conduto e mão-de-obra)	Total	
25	6,9	11,20	18,10	-
35	7,57	11,26	18,84	$(18,84-18,10)/(35-25)=0,073$
50	8,57	11,37	19,94	$(19,94-18,84)/(50-35)=0,074$
70	9,91	11,51	21,42	$(21,42-19,94)/(70-50)=0,074$
95	11,58	11,68	23,26	$(23,36-21,42)/(95-70)=0,074$
120	13,24	11,86	25,10	$(25,10-23,26)/(120-95)=0,074$
150	15,24	12,06	27,30	$(27,30-25,10)/(150-120)=0,073$
185	17,78	12,30	29,87	$(29,87-27,30)/(185-150)=0,074$
240	21,25	12,68	33,93	$(33,93-29,87)/(240-185)=0,074$
300	25,25	13,09	38,34	$(38,34-33,93)/(300-240)=0,074$
400	31,92	13,78	45,70	$(45,70-38,34)/(400-300)=0,074$
Média				0,074

Fonte: [13]

Para utilizar a equação (9), deve-se admitir o valor médio de A como exemplificado na Tabela acima.

4.3 DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DOS CONDUTORES ELÉTRICOS APLICADO À ESTUDOS DE CASO.

A seguir, é aplicado o dimensionamento econômico e técnico a três estudos de caso. Cada aplicação terá suas características abordadas e suas plantas baixas anexadas neste trabalho (Anexos A, B e C).

A motivação para a escolha destes três estudos de caso provém do projeto técnico elaborado previamente. Ao dimensionar os condutores destes não foi levado em consideração qualquer custo de instalação ou custos futuros, então, a aplicação da NBR 15920/2011 se tornou interessante, podendo trazer resultados expressivos para a otimização econômica dos projetos.

4.3.1 Caso 1- Dimensionamento de um alimentador para um compressor de ar

O estabelecimento a ser objeto de estudo é um posto de combustível existente, mais especificamente o circuito de alimentação de um compressor de ar. Este compressor localiza-se em uma casa de máquinas do posto, conforme a planta baixa que se encontra no anexo A.

Neste caso será abordado o dimensionamento econômico e técnico para um circuito que atenderá ao compressor de ar composto por um motor trifásico de 5CV, com corrente nominal igual a 8,7A e tensão de 380 Volts. O circuito possui 57 metros de extensão desde a saída do Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT), que está localizado na sala de comando no interior do posto, até os conectores do motor do compressor. O tempo de operação deste circuito é de seis horas por dia, ligado trezentos e sessenta dias por ano. O método de instalação dos condutores é por meio de eletroduto enterrado no solo (método de instalação "D" da Tabela 33 da NBR 5410/04). O conduto a ser utilizado deve ser eletroduto de aço GF pesado, pois a instalação trata-se de uma área classificada havendo risco de explosão. A agência nacional de petróleo ANP estipula o uso deste tipo de eletroduto para evitar risco de início de explosão. Os parâmetros necessários para o dimensionamento econômico estão dispostos na Tabela 4.2 e 4.3.

Tabela 4.2-Definição dos parâmetros iniciais do estudo de caso 1

Variável	Descrição	Valor
N	Número de anos de operação	20 anos
T	Tempo de operação com perdas Joule	2160h/ano
N_p	Número de condutores de fase por circuito	3
N_c	Número de circuitos que levam mesma carga	1
a	Aumento anual de carga	0%
b	Aumento anual do custo de energia	10%
i	Taxa de capitalização(sem inflação)	6%
P	Custo de 1 watt-hora para a carga	0,0005364R\$/Wh
D	Variação anual de demanda	0

Fonte: produção do próprio autor

Tabela 4.3- Determinação dos valores da variável A para o caso 1

Determinação dos valores da variável A				
Seção nominal do cabo [mm^2]	Custo inicial C_i [R\$/m]			A [R\$/m. mm^2]
	Cabo	Instalação (conduto e mão-de-obra)	Total	
2,5	4,03	29,41	33,44	-----
4	8,24	29,41	37,65	$(37,65-33,44)/(4-2,5)=2,8$
6	10,49	29,41	39,9	$(39,9-37,65)/(6-4)=1,125$
10	17,52	29,41	46,93	$(46,93-39,9)/(10-6)=1,75$
16	28,10	29,41	57,51	$(57,51-46,93)/(16-10)=1,76$
25	36,21	29,41	65,62	$(65,62-57,51)/(25-16)=0,9$
35	50,21	38,58	88,79	$(88,79-65,62)/(35-25)=2,31$
50	76,84	38,58	115,42	$(115,42-88,79)/(50-35)=1,78$
70	107,40	54,11	161,51	$(161,51-115,42)/(70-50)=2,3$
95	141,40	74,28	188,68	$(188,68-161,51)/(95-70)=1,08$
120	180,70	74,28	254,98	$(254,98-188,68)/(120-95)=2,65$
150	222,40	95,45	317,85	$(317,85-254,98)/(150-120)=2,09$
185	273,80	95,45	369,25	$(369,25-317,85)/(185-150)=1,47$
240	363,26	120,71	483,97	$(483,97-369,25)/(240-185)=2,08$
300	456,00	139,22	595,22	$(595,22-483,97)/(300-240)=1,85$
400	507,00	139,22	646,22	$(646,22-595,22)/(400-300)=0,51$
Média				1,76

Fonte: produção do próprio autor

Vale destacar que os valores contidos na Tabela 4.3 foram especificados e calculados com base em todos os materiais e mão-de-obra necessária para a instalação em cada estudo de caso. Todas as informações referentes a aspectos econômicos dos itens da instalação estão no Anexo D.

Estes valores foram coletados em uma pesquisa dentre várias lojas de comércio de materiais elétricos. Cabe ao projetista avaliar as dimensões dos condutos e acessórios que devem ser aplicados para cada seção nominal de condutor elétrico. Ao analisar o Anexo D pode-se notar que os valores das dimensões de alguns itens foram omitidos, pois eles variam de acordo com o condutor especificado.

O dimensionamento do condutor de proteção (terra) é efetuado através da Tabela 58 da NBR 5410/11 para ambos os casos (econômico e técnico), pois, inicialmente seleciona-se a seção transversal dos condutores fase e, então, aplicando esta Tabela, obtém-se a seção do condutor de proteção. Dependendo do resultado obtido em cada dimensionamento, o custo inicial para implantar todo o circuito, incluindo o condutor terra, pode variar. Deste modo, para o dimensionamento econômico não se considerou os valores para este condutor.

Apenas para demonstrar os custos de sua implantação, em cada estudo de caso, citar-se-á se o dimensionamento econômico acarretaria maior investimento para a instalação deste condutor de proteção, tendo em vista que com o aumento das seções dos condutores fase, pode-se aumentar as dimensões do condutor de proteção (terra).

4.3.1.1 Dimensionamento técnico NBR 5410/2004 (caso 1)

Para dimensionar este ramal de alimentação do compressor de ar de posto de combustível, aplica-se a Norma NBR 5410/2004. Os métodos para este dimensionamento técnico foram citados neste trabalho, deste modo os critérios que serão utilizados são:

- Seção mínima.
- Capacidade de condução de corrente.
- Queda de tensão.

4.3.1.1.1 Seção mínima (caso 1)

Consulta-se a Tabela 3.1 deste trabalho tendo em vista que o ramal é de instalações fixas em geral, a utilização do circuito é de força e condutores de cobre isolados. Portanto, a seção mínima neste circuito é $2,5\text{mm}^2$.

4.3.1.1.2 Capacidade de condução de corrente (caso 1)

Para este caso se considerará a temperatura ambiente de 30°C e no solo de 20°C, o que leva a um fator de correção de temperatura unitário (FCT=1). Também, sendo o eletroduto exclusivo para o circuito de alimentação do compressor, então, o fator de correção de agrupamento será unitário (FCA=1).

O cabo a ser implantado será com isolamento EPR, e como citado anteriormente, o método de instalação é através de eletroduto enterrado (método de instalação “D” da Tabela 33 da NBR 5410/04). Com o auxílio de [2], Tabela 37- Capacidades de condução de corrente, em ampéres, para os métodos de referência A1, A2, B1, B2, C e D, condutores de alumínio e cobre, isolamento EPR e XLPE, temperatura no condutor 90°C. O condutor deve ter capacidade de condução de no mínimo 8,7A. Assim, a menor seção nominal que possui esta característica é 0,5mm².

4.3.1.1.3 Queda de tensão (caso 1)

Ao consultar o item 6.2.7 de [2], obteve-se que a máxima queda de tensão permitida deve ser de 4%, pois se trata de um caso de circuito terminal.

Como o circuito é trifásico em 380V e a queda de tensão máxima permitida é de 4%, então calcula-se qual o fator de queda de tensão máximo necessário [V/A.km] para que o condutor deste circuito se enquadre na faixa permitida:

$$\text{Fator de queda de tensão} = \frac{V}{A \cdot \text{km}}$$

Efetuada as substituições e os algebrismos necessários, tem-se:

$$(\text{Fator de queda de tensão máximo}) = \frac{380 \cdot 0,04}{8,7 \cdot 0,057} = 30,65 \frac{V}{A \cdot \text{km}}$$

Buscando um fabricante que possua um condutor com as características vistas anteriormente, tem-se que o fator de queda de tensão que mais se aproxima do obtido anteriormente é $24,1 \frac{V}{A \cdot \text{km}}$, para cabo EPR 1,5mm². Portanto:

$$\frac{V}{8,7,0,057} = 24,1$$

Isolando a variável tensão V, tem-se que a queda de tensão é igual a 11,95V se enquadrando na máxima queda de tensão permitida para este circuito (15,2V).

Com a execução destes três critérios seleciona-se a maior seção obtida entre os mesmos, portanto a seção técnica para este estudo de caso é 2,5mm².

4.3.1.2 Dimensionamento econômico NBR 15920/2011 (caso 1)

Para o dimensionamento propriamente dito é necessário determinar as variáveis auxiliares r, Q, B e F, para, então, aplicar a equação (9) que seleciona a seção econômica do condutor.

Tendo em mãos os valores das variáveis das Tabelas 2 e 3, pode-se iniciar o cálculo das incógnitas auxiliares e posteriormente a seção econômica.

Determinação da quantidade auxiliar r:

Pela equação 13, tem-se:

$$r = \frac{\left(1 + \left(\frac{0}{100}\right)^2\right) \cdot \left(1 + \left(\frac{10}{100}\right)\right)}{1 + \left(\frac{6}{100}\right)} = 1,03$$

Determinação da quantidade auxiliar Q:

Aplicando a equação 12, tem-se:

$$Q = \frac{1 - 1,03^{20}}{1 - 1,03} = 26,87$$

Determinação da quantidade auxiliar B:

Como enunciado anteriormente, em cabos de baixa tensão, a quantidade auxiliar B, pode ser desconsiderada, deste modo, B assume o valor igual a 1.

Determinação da quantidade auxiliar F:

Aplicando a equação 10, tem-se:

$$F = 3.1. (2160.0,0005364 + 0). \left(\frac{26,87}{\left(1 + \frac{6}{100}\right)} \right) = 88,11R\$/W$$

Determinação da Seção econômica S_{ec} :

De acordo com o estudo de caso selecionado e os cálculos efetuados anteriormente, elabora-se a Tabela 4.4, a seguir:

Tabela 4.4-Organização dos parâmetros do estudo de caso 1

Variável	Descrição	Valor
i_{max}	Corrente máxima prevista para o circuito no primeiro ano	8,7A
A	Variável auxiliar	1,76
F	Variável auxiliar	88,11R\$/W
ρ_{20}	Resistividade elétrica do cobre a 20°C	$18,35.10^{-9} \Omega.m$
α_{20}	Coeficiente de temperatura para a resistência do cobre a 20°C	$3,93.10^{-3}$
B	Variável auxiliar	1
θ_a	Temperatura ambiente média	30°C
θ	Temperatura nominal máxima para o condutor selecionado	90°C

Fonte: produção do próprio autor

Para este caso, aplicar-se-á condutores com isolamento EPR, deste modo a temperatura nominal máxima de operação deste condutor, segundo [2], é de 90°C.

Aplicando a equação 14, tem-se:

$$\theta_m = \frac{(90-30)}{(3)} + 30 = 50^\circ\text{C}$$

Por conseguinte, com a equação 9, determina-se a seção econômica do condutor:

$$S_{ec} = 1000. \left\{ \frac{8,7^2 \cdot 88,11 \cdot 18,35 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot [1 + 3,93 \cdot 10^{-3} \cdot (50 - 20)]}{1,76} \right\}^{0,5} = 8,81 \text{mm}^2$$

Após obter a seção econômica do condutor para este estudo de caso, é notável que o valor obtido ($8,81\text{mm}^2$) não é um valor nominal comercial. Portanto, deve-se calcular o custo total das seções nominais padronizadas maiores e menores adjacentes para selecionar qual é a mais econômica.

4.3.1.1 Cálculo do custo total para seções nominais padronizadas

Como o objetivo deste trabalho é otimizar um projeto elétrico, é necessário calcular o custo total das seções nominais padronizadas maiores e menores adjacentes que foram obtidas anteriormente.

Estas seções nominais são 10mm^2 e 6mm^2 .

Através da equação 8 e dos parâmetros da Tabela 4.3, obtem-se os seguintes resultados:

Para o cabo de 10mm^2 ,

$$R(10\text{mm}^2) = \frac{18,35 \cdot 10^{-9} \cdot 1 [1 + 3,93 \cdot 10^{-3} \cdot (50 - 20)]}{10} \cdot 10^6 = 2,05 \cdot 10^{-3} \Omega/\text{m}$$

E para o cabo de 6mm^2 ,

$$R(6\text{mm}^2) = \frac{18,35 \cdot 10^{-9} \cdot 1 [1 + 3,93 \cdot 10^{-3} \cdot (50 - 20)]}{6} \cdot 10^6 = 3,41 \cdot 10^{-3} \Omega/\text{m}$$

Com o auxílio do Anexo D, obtem-se os custos inicial CI para os cabos 10mm^2 e 6mm^2 . Agora, aplicando a equação 7, obtem-se:

Para o cabo de 10mm^2 ,

$$CT = CI + i_{\text{max}}^2 \cdot R \cdot l \cdot F = 2669,00 + 8,7^2 \cdot 2,05 \cdot 10^{-3} \cdot 57 \cdot 88,11 = \text{R\$ } 3448,27$$

E para o cabo de 6mm^2 ,

$$CT = CI + i_{\text{max}}^2 \cdot R \cdot l \cdot F = 2274,00 + 8,7^2 \cdot 3,41 \cdot 10^{-3} \cdot 57 \cdot 88,11 = \text{R\$ } 3570,26$$

Assim, a seção econômica para este estudo de caso é 10mm^2 , pois apresenta o menor custo entre as seções nominais padronizadas maiores e menores adjacentes que foram obtidas anteriormente.

4.3.2 Caso 2 – Dimensionamento de um alimentador para máquina extrusora 120mm.

Neste estudo de caso analisar-se-á um pátio fabril que possuir algumas máquinas e motores elétricos. Dentre as máquinas disponíveis optou-se pelo circuito que forneceria energia para uma máquina extrusora 120mm. A planta baixa da fábrica com a indicação da extrusora se encontra no Anexo B deste trabalho.

Como no estudo de caso do posto de combustível, aqui, será abordado o dimensionamento econômico e técnico para um circuito que atenderá a máquina extrusora 120mm destacada em sua planta baixa. As especificações e características deste caso são abordadas à seguir.

Este ramal de ligação que vai do quadro de máquinas até a carga em questão (motor trifásico de 100CV) com corrente nominal de operação igual a 143A e tensão de 380 Volts, tendo o ramal um comprimento de 27 metros. O tempo de operação deste circuito é de dezesseis horas por dia, ligado duzentos e oitenta e oito dias por ano. O método de instalação dos condutores é através de eletrocalha aramada (método de instalação “F” da Tabela 33 de [2]).

Os parâmetros necessários para o dimensionamento estão dispostos nas Tabelas 4.5 e 4.6.

Tabela 4.5-Definição dos parâmetros iniciais do estudo de caso 2

Variável	Descrição	Valor
N	Número de anos de operação	20 anos
T	Tempo de operação com perdas Joule	4608h/ano
N_p	Número de condutores de fase por circuito	3
N_c	Número de circuitos que levam mesma carga	1
A	Aumento anual de carga	0%
B	Aumento anual do custo de energia	10%
I	Taxa de capitalização(sem inflação)	6%
P	Custo de 1 watt-hora para a carga	0,0005364R\$/Wh
D	Variação anual de demanda	0

Fonte: produção do próprio autor

Tabela 4.6- Determinação dos valores da variável A para o caso 2.

Determinação dos valores da variável A				
Seção nominal do cabo [mm ²]	Custo inicial Ci [R\$/m]			A [R\$/m. mm ²]
	Cabo	Instalação (conduto e mão-de-obra)	Total	
2,5	4,03	52,65	56,68	-----
4	8,24	52,65	60,89	$(60,89-56,68)/(4-2,5)=2,71$
6	10,49	52,65	63,14	$(63,14-60,89)/(6-4)=1,125$
10	17,52	52,65	70,17	$(70,17-63,14)/(10-6)=1,75$
16	28,10	52,65	80,75	$(80,75-70,17)/(16-10)=1,76$
25	36,21	52,65	88,86	$(88,86-80,75)/(25-16)=0,9$
35	50,21	57,46	107,67	$(107,67-88,86)/(35-25)=1,88$
50	76,84	62,81	139,65	$(139,65-107,67)/(50-35)=2,13$
70	107,40	68,38	175,78	$(175,78-139,65)/(70-50)=1,8$
95	141,40	68,38	209,78	$(209,78-175,78)/(95-70)=1,36$
120	180,70	68,38	249,08	$(249,08-209,78)/(120-95)=1,6$
150	222,40	79,62	302,02	$(302,02-249,08)/(150-120)=1,76$
185	273,80	79,62	353,42	$(353,42-302,02)/(185-150)=1,47$
240	363,26	79,62	442,88	$(442,88-353,42)/(240-185)=1,62$
300	456,00	79,62	535,62	$(535,62-442,88)/(300-240)=1,55$
400	507,00	79,62	586,62	$(586,62-535,62)/(400-300)=0,51$
Média				1,59

Fonte: produção do próprio autor

Vale destacar que os valores contidos na Tabela 4.6 foram especificados e calculados com base em todos os materiais e mão-de-obra necessária para a instalação em cada estudo de caso. Todas as informações referentes a aspectos econômicos dos itens da instalação estão no Anexo E.

Estes valores foram coletados em uma pesquisa dentre várias lojas de comércio de materiais elétricos. Cabe ao projetista avaliar as dimensões dos condutos e acessórios que devem ser aplicados para cada seção nominal de condutor elétrico. Ao analisar o Anexo E pode-se notar que os valores das dimensões de alguns itens foram omitidos, pois eles variam de acordo com o condutor especificado.

4.3.2.1 Dimensionamento técnico NBR 5410/2004 (caso 2)

Para dimensionar este ramal de alimentação desta máquina extrusora 120mm, aplica-se a Norma NBR 5410/2004. Os métodos para este dimensionamento técnico

seguem a mesma metodologia aplicada do estudo de caso 1, deste modo os critérios que serão utilizados são:

- Seção mínima.
- Capacidade de condução de corrente.
- Queda de tensão.

4.3.2.1.1 Seção mínima (caso 2)

Este circuito tem as mesmas características que o caso anterior, assim consulta-se a tabela 3.1 deste trabalho tendo em vista que o ramal é de instalações fixas em geral, a utilização do circuito é de força e condutores de cobre isolados. Portanto, a seção mínima neste circuito é $2,5\text{mm}^2$.

4.3.2.1.2 Capacidade de condução de corrente (caso 2)

Após o levantamento de todos os dados para este projeto, nota-se que não será necessário o uso do fator de correção de temperatura, pois se considera que a operação deste circuito é dada em temperatura ambiente de 30°C . Por conseguinte, não é necessário fator de correção por agrupamento, visto que este circuito segue por seu conduto sem outros condutores ocupando a mesma via.

O cabo a ser implantado será com isolamento EPR, e como citado anteriormente, o método de instalação dos condutores é através de eletrocalha aramada (método de instalação "F" da Tabela 33 da NBR 5410/04). Com o auxílio de [2], Tabela 38- Capacidades de condução de corrente, em ampéres, para os métodos de referência E, F e G, condutores de alumínio e cobre, cabo unipolar, três condutores carregados no mesmo plano justapostos, isolamento EPR e XLPE, temperatura no condutor 90°C . O condutor deve ter capacidade de condução de no mínimo 143A. Assim, a menor seção nominal que possui esta característica é 35mm^2 .

4.3.2.1.2 Queda de tensão (caso 2)

Ao consultar o item 6.2.7 de [2], obteve-se que a máxima queda de tensão permitida deve ser de 4%, pois se trata de um caso de circuito terminal.

Como o circuito é trifásico em 380V e a queda de tensão máxima permitida é de 4%, então, calcula-se qual o fator de queda de tensão máximo necessário [V/A.km] para que o condutor deste circuito se enquadre na faixa permitida:

$$\text{Fator de queda de tensão} = \frac{V}{A \cdot \text{km}}$$

Efetuando as substituições e os algebrismos necessários, tem-se:

$$(\text{Fator de queda de tensão máximo}) = \frac{380 \cdot 0,04}{143 \cdot 0,027} = 3,93 \frac{V}{A \cdot \text{km}}$$

Buscando um fabricante que possua um condutor com as características vistas anteriormente, tem-se que o fator de queda de tensão que mais se aproxima do obtido anteriormente é $3,8 \frac{V}{A \cdot \text{km}}$, para cabo EPR 10mm². Portanto:

$$\frac{V}{143 \cdot 0,027} = 3,8$$

Isolando a variável tensão V, tem-se que a queda de tensão é igual a 14,67V se enquadrando na máxima queda de tensão permitida para este circuito (15,2V).

Com a execução destes três critérios seleciona-se a maior seção nominal obtida entre os mesmos, portanto a seção técnica para este estudo de caso é 35mm² para as fases.

4.3.2.2 Dimensionamento econômico NBR 15920/2011 (caso 2)

Para o dimensionamento previamente dito é necessário determinar as variáveis auxiliares r, Q, B e F, para , então, aplicar a equação (9) que seleciona a seção econômica do condutor.

Tendo em mãos os valores das variáveis das Tabelas 4.5 e 4.6, pode-se iniciar o cálculo das incógnitas auxiliares e , posteriormente, a seção econômica.

Determinação da quantidade auxiliar r:

Pela equação 13, tem-se:

$$r = \frac{\left(1 + \left(\frac{0}{100}\right)^2\right) \cdot \left(1 + \left(\frac{10}{100}\right)\right)}{1 + \left(\frac{6}{100}\right)} = 1,03$$

Determinação da quantidade auxiliar Q:

Aplicando a equação 12, tem-se:

$$Q = \frac{1 - 1,03^{20}}{1 - 1,03} = 26,87$$

Determinação da quantidade auxiliar B:

Como enunciado anteriormente, em cabos de baixa tensão, a quantidade auxiliar B, pode ser desconsiderada, deste modo, B assume o valor igual a 1.

Determinação da quantidade auxiliar F:

Aplicando a equação 10, tem-se:

$$F = 3.1. (4608.0,0005364 + 0) \cdot \left(\frac{26,87}{\left(1 + \frac{6}{100}\right)}\right) = 188R\$/W$$

Determinação da Seção econômica S_{ec} :

De acordo com o estudo de caso selecionado e os cálculos efetuados anteriormente, elabora-se a Tabela 4.7.

Tabela 4.7-Organização dos parâmetros do estudo de caso 2.

Variável	Descrição	Valor
i_{max}	Corrente máxima prevista para o circuito no primeiro ano	143A
A	Variável auxiliar	1,59
F	Variável auxiliar	88,11R\$/W
ρ_{20}	Resistividade elétrica do cobre a 20°C	$18,35 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m$
α_{20}	Coefficiente de temperatura para a resistência do cobre a 20°C	$3,93 \cdot 10^{-3}$
B	Variável auxiliar	1
θ_a	Temperatura ambiente média	30°C
θ	Temperatura nominal máxima para o condutor selecionado	90°C

Fonte: produção do próprio autor

Aplicando a equação 14, tem-se:

$$\theta_m = \frac{(90-30)}{(3)} + 30 = 50^\circ\text{C}$$

Por conseguinte, com a equação 9, determina-se a seção econômica do condutor:

$$S_{ec} = 1000 \cdot \left\{ \frac{143^2 \cdot 188 \cdot 18,35 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot [1 + 3,93 \cdot 10^{-3} \cdot (50 - 20)]}{1,59} \right\}^{0,5} = 222,7 \text{ mm}^2$$

Após obter a seção econômica do condutor para este estudo de caso, observa-se que o valor obtido ($222,7 \text{ mm}^2$) não é um valor nominal comercial, portanto, deve-se calcular o custo total das seções nominais padronizadas maiores e menores adjacentes para selecionar qual é a mais econômica.

4.3.2.3 Cálculo do custo total para seções nominais padronizadas

Como o objetivo deste trabalho é otimizar um projeto elétrico, é necessário calcular o custo total das seções nominais padronizadas maiores e menores adjacentes que foram obtidas anteriormente.

Estas seções nominais são 185 mm^2 e 240 mm^2 .

Através da equação 8 e dos parâmetros da Tabela 4.6, obtem-se os seguintes resultados:

Para o cabo de 185 mm²,

$$R(185\text{mm}^2) = \frac{18,35 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot [1 + 3,93 \cdot 10^{-3} \cdot (50 - 20)]}{185} \cdot 10^6 = 1,1 \cdot 10^{-4} \Omega/\text{m}$$

E para o cabo de 240mm²,

$$R(240\text{mm}^2) = \frac{18,35 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot [1 + 3,93 \cdot 10^{-3} \cdot (50 - 20)]}{240} \cdot 10^6 = 0,85 \cdot 10^{-4} \Omega/\text{m}$$

Com o auxílio do Anexo D, obtem-se os custos iniciais CI para os cabos 185mm² e 240mm², aplicando a equação 7, obtem-se:

Para o cabo de 185mm²,

$$CT = CI + i_{\text{max}}^2 \cdot R \cdot l \cdot F = 9541 + 143^2 \cdot 1,1 \cdot 10^{-4} \cdot 27.188 = \text{R\$ } 21.171,00$$

E para o cabo de 240mm²,

$$CT = CI + i_{\text{max}}^2 \cdot R \cdot l \cdot F = 11956 + 143^2 \cdot 0,85 \cdot 10^{-4} \cdot 27.188 = \text{R\$ } 21.019,00$$

Assim, a seção econômica para este estudo de caso é 240 mm², pois apresenta o menor custo entre as seções nominais padronizadas maiores e menores adjacentes que foram obtidas anteriormente.

4.3.3 Caso 3- Dimensionamento de uma entrada de energia elétrica em um edifício residencial multifamiliar

Como terceiro exemplo de aplicação, o caso estudado será o de um padrão de entrada de energia elétrica de um edifício residencial multifamiliar. O

dimensionamento econômico seguirá a mesma linha de cálculo que os casos anteriormente vistos, porém há uma diferença no dimensionamento técnico, onde se fará uso da NORMA TÉCNICA DPSC/NT – 03 Fornecimento de Energia Elétrica à Edifícios de Uso Coletivo da CELESC para especificar condutos, condutores e métodos de instalação.

Este caso servirá como um comparativo entre a especificação econômica e técnica de uma entrada de energia elétrica.

Esta entrada de energia elétrica, juntamente com a planta baixa está no Anexo C, deste trabalho. As especificações e características deste caso são abordadas à seguir.

A entrada de energia será do tipo subterrânea, seguindo os padrões estabelecidos pela concessionária.

Como foi projetado previamente esta entrada de energia, sabe-se que atenderá 29 unidades consumidoras, sendo 28 unidades residenciais monofásicas com fornecimento de energia A3, ou seja, com potências nominais entre 8kW e 11kW e uma unidade de uso comum (trifásica) com fornecimento C3.

Fazendo o dimensionamento e calculando a demanda prevista para este edifício, chegou-se à demanda de 93kVA. Assim, com o auxílio da referência [12], Tabela 9 – dimensionamento de eletrodutos – fornecimento em baixa tensão, projetou-se a entrada de energia elétrica devirando do poste CELESC até a proteção geral do quadro geral de medição utilizando um disjuntor de 150A, ramal de ligação subterrâneo, com condutor com isolamento EPR e com seção transversal de 95mm² para os quatro condutores (3F+N).

Deste modo, a corrente nominal de operação é considerada igual a 141A e tensão de 380 Volts, tendo o ramal 30 metros de extensão. O tempo de operação deste circuito é de oito horas por dia, ligado trezentos e sessenta dias por ano. Os parâmetros necessários para o dimensionamento econômico estão dispostos nas Tabelas 4.8 e 4.9.

Tabela 4.8-Definição dos parâmetros iniciais do estudo de caso 3

Variável	Descrição	Valor
N	Número de anos de operação	20 anos
T	Tempo de operação com perdas Joule	2880h/ano
N_p	Número de condutores de fase por circuito	3
N_c	Número de circuitos que levam mesma carga	1
A	Aumento anual de carga	2%
b	Aumento anual do custo de energia	10%
I	Taxa de capitalização(sem inflação)	6%
P	Custo de 1 watt-hora para a carga	0,0005364R\$/Wh
D	Variação anual de demanda	0

Fonte: produção do próprio autor

Tabela 4.9- Determinação dos valores da variável A para o caso 3

Determinação dos valores da variável A				
Seção nominal do cabo [mm^2]	Custo inicial C_i [R\$/m]			A [R\$/m. mm^2]
	Cabo	Instalação (conduto e mão-de-obra)	Total	
10	23,28	35,22	58,5	-----
16	37,48	35,22	72,70	$(72,70-58,5)/(16-10)=2,37$
25	48,28	35,22	83,50	$(83,50-72,70)/(25-16)=1,2$
35	67,00	38,86	105,86	$(105,86-83,50)/(35-25)=2,23$
50	102,52	42,2	144,72	$(144,72-105,86)/(50-35)=2,59$
70	143,28	47,53	190,81	$(190,81-144,72)/(70-50)=2,3$
95	188,48	55,66	244,14	$(244,14-190,81)/(95-70)=2,13$
120	241,00	55,66	296,67	$(296,67-244,14)/(120-95)=2,1$
150	296,48	65,66	362,14	$(362,14-296,67)/(150-120)=2,18$
185	365,12	65,66	430,78	$(430,78-362,14)/(185-150)=1,96$
240	484,4	71,77	556,17	$(556,17-430,78)/(240-185)=2,28$
300	608,4	87,90	696,3	$(696,3-556,17)/(300-240)=2,33$
400	677	87,90	764,9	$(764,9-696,3)/(400-300)=0,69$
Média				2,03

Fonte: produção do próprio autor

Vale destacar que os valores contidos na Tabela 4.9 foram especificados e calculados com base em todos os materiais e mão-de-obra necessária para a instalação em cada estudo de caso. Todas as informações referentes a aspectos econômicos dos itens da instalação estão no Anexo F.

Estes valores foram coletados em uma pesquisa dentre várias lojas de comércio de materiais elétricos. Cabe ao projetista avaliar as dimensões dos condutos e acessórios que devem ser aplicados para cada seção nominal de condutor elétrico.

Ao analisar o Anexo F pode-se notar que os valores das dimensões de alguns itens foram omitidos, pois eles variam de acordo com o condutor especificado.

4.3.3.1 Dimensionamento técnico (caso 3)

O dimensionamento da entrada de energia elétrica deste edifício residencial de uso coletivo será baseado na NORMA TÉCNICA DPSC/NT – 03 Fornecimento de Energia Elétrica à Edifícios de Uso Coletivo da CELESC.

Assim, considerando os dados de projeto deste estudo de caso pode-se dimensionar os condutos, condutores e o método de instalação a ser empregado. Sabe-se que, neste edifício, a demanda prevista é de 93kVA, deste modo, com o auxílio da referência [16], a Tabela 9 – dimensionamento de eletrodutos – fornecimento em baixa tensão fornece que para entrada de energia subterrânea, derivando do poste CELESC, deve-se utilizar junto ao poste um eletroduto de aço galvanizado a fusão com diâmetro de 3” seguindo para uma caixa de passagem junto ao poste, mas distanciada em 70cm (Ver anexo C). Então usa-se, derivando desta caixa até o quadro de medição da CELESC, eletroduto KANALEX PEAD com diâmetro de 3”. O condutor elétrico deve ser com isolamento EPR, 1kV e seção nominal de 95mm².

Com o dimensionamento técnico efetuado, segue-se para a aplicação da norma NBR 15920/2011.

4.3.3.2 Dimensionamento econômico NBR 15920/2011 (caso 3)

Para o dimensionamento previamente dito é necessário determinar as variáveis auxiliares r, Q, B e F, para, então, aplicar a equação (9) que seleciona a seção econômica do condutor.

Tendo em mãos os valores das variáveis da Tabela 4.8 e 4.9, pode-se iniciar o cálculo das incógnitas auxiliares e posteriormente a seção econômica.

Determinação da quantidade auxiliar r:

Pela equação 13, tem-se:

$$r = \frac{\left(1 + \left(\frac{1}{100}\right)^2\right) \cdot \left(1 + \left(\frac{10}{100}\right)\right)}{1 + \left(\frac{6}{100}\right)} = 1,037$$

Determinação da quantidade auxiliar Q:

Aplicando a equação 12, tem-se:

$$Q = \frac{1-1,037^{20}}{1-1,037} = 28,86$$

Determinação da quantidade auxiliar B:

Como enunciado anteriormente, em cabos de baixa tensão, a quantidade auxiliar B, pode ser desconsiderada, deste modo, B assume o valor igual a 1.

Determinação da quantidade auxiliar F:

Aplicando a equação 10, tem-se:

$$F = 3.1. (2880.0,0005364 + 0,01). \left(\frac{28,86}{\left(1 + \frac{6}{100}\right)} \right) = 133,24 \text{ R\$/W}$$

Determinação da Seção econômica S_{ec} :

De acordo com o estudo de caso selecionado e os cálculos efetuados anteriormente, elabora-se a Tabela 4.10.

Tabela 4.10-Organização dos parâmetros do estudo de caso 3

Variável	Descrição	Valor
i_{max}	Corrente máxima prevista para o circuito no primeiro ano	141A
A	Variável auxiliar	
F	Variável auxiliar	133,24R\$/W
ρ_{20}	Resistividade elétrica do cobre a 20°C	$18,35 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m$
α_{20}	Coefficiente de temperatura para a resistência do cobre a 20°C	$3,93 \cdot 10^{-3}$
B	Variável auxiliar	1
θ_a	Temperatura ambiente média	30°C
θ	Temperatura nominal máxima para o condutor selecionado	90°C

Fonte: produção do próprio autor

Aplicando a equação 14, tem-se:

$$\theta_m = \frac{(90-30)}{(3)} + 30 = 50^\circ\text{C}$$

Por conseguinte, com a equação 9, determina-se a seção econômica do condutor:

$$S_{ec} = 1000 \cdot \left\{ \frac{143^2 \cdot 133,24 \cdot 18,35 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot [1 + 3,93 \cdot 10^{-3} \cdot (50-20)]}{2,03} \right\}^{0,5} = 165,9 \text{mm}^2$$

Após obter a seção econômica do condutor para este estudo de caso, é notável que o valor obtido não é um valor nominal comercial, portanto, deve-se calcular o custo total das seções nominais padronizadas maiores e menores adjacentes para selecionar qual é a mais econômica.

4.3.3.3 Cálculo do custo total para seções nominais padronizadas

Como o objetivo deste trabalho é otimizar um projeto elétrico, é necessário calcular o custo total das seções nominais padronizadas maiores e menores adjacentes que foram obtidas anteriormente.

Estas seções nominais são 150mm^2 e 185mm^2 .

Através da equação 6 e dos parâmetros da Tabela 4.9, obtem-se os seguintes resultados:

Para o cabo de 150 mm²,

$$R(150\text{mm}^2) = \frac{18,35 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot [1 + 3,93 \cdot 10^{-3} \cdot (50 - 20)]}{150} \cdot 10^6 = 1,367 \cdot 10^{-4} \Omega/\text{m}$$

E para o cabo de 185 mm²,

$$R(185\text{mm}^2) = \frac{18,35 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot [1 + 3,93 \cdot 10^{-3} \cdot (50 - 20)]}{185} \cdot 10^6 = 1,1 \cdot 10^{-4} \Omega/\text{m}$$

Com o auxílio do Anexo F, obtem-se os custos iniciais CI para os cabos 150 mm² e 185 mm², aplicando a equação 7, obtem-se:

Para o cabo de 150 mm²,

$$CT = CI + i_{\text{max}}^2 \cdot R \cdot l \cdot F = 10866 + 141^2 \cdot 1,367 \cdot 10^{-4} \cdot 30.133,24 = \text{R\$ } 21.673,69$$

E para o cabo de 185 mm²,

$$CT = CI + i_{\text{max}}^2 \cdot R \cdot l \cdot F = 12922 + 141^2 \cdot 1,1 \cdot 10^{-4} \cdot 30.133,24 = \text{R\$ } 21.663,51$$

Assim, a seção econômica para este estudo de caso é 185 mm², pois apresenta o menor custo entre as seções nominais padronizadas maiores e menores adjacentes que foram obtidas anteriormente.

5 RESULTADOS DOS DIMENSIONAMENTOS

A análise dos dimensionamentos e os resultados obtidos serão tratados separadamente, a fim de detalhar cada caso demonstrando numericamente e através de gráficos a relevância dos métodos aplicados. Posteriormente, haverá a discussão abordando os aspectos gerais deste trabalho na seção “conclusão”.

Os custos iniciais envolvidos em cada projeto são diretamente proporcionais a seção nominal selecionada, ou seja, quanto maior a bitola do cabo, maior será o custo inicial, porém os custos de operação (perdas Joule) são inversamente proporcionais a seção de projeto.

5.1 RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO 1 (COMPRESSOR DE AR)

Ao aplicar os critérios técnicos (NBR 5410/2004) para o dimensionamento deste ramal de alimentação obteve-se uma seção nominal de $2,5\text{mm}^2$, o custo inicial de implantação deste condutor, aliado aos condutos, acessórios e mão-de-obra é de R\$ 1.906,00. Todavia, o custo operacional ao longo da vida útil de 20 anos deste circuito é de R\$ 3.117,00, totalizando em R\$ 5.023,00.

Foi aplicado o dimensionamento econômico embasado na norma NBR 15920/2011, resultando em uma seção nominal do condutor igual a 10mm^2 , afirmando a premissa de que este dimensionamento sempre resultará em um seção maior ou igual a obtida através do dimensionamento técnico. O custo inicial é de R\$ 2.669,00 e o custo operacional é R\$ 779,29, totalizando R\$ 3.448,29.

Seguindo a Tabela 58 da referência [2], o condutor de proteção para o primeiro dimensionamento seria de $2,5\text{mm}^2$ e para o econômico de $2,5\text{mm}^2$, acarretando um aumento no custo inicial de R\$ 254,79.

Com estes resultados ficou claro que a normatização proposta, ao levar em consideração as perdas Joule, é de grande valia, pois optando-se pela seção obtida tem-se uma economia, ao fim da vida útil do condutor, igual a R\$ 1574,71. O período de retorno previsto é dado pela equação 15, segundo [13].

$$RI = \frac{CI_E - CI_T}{(CJ_T - CJ_E)/20} \quad (15)$$

Onde,

RI=Retorno dos investimentos, [anos].

CI_E= Custo inicial obtido pelo critério econômico, [R\$].

CI_T= Custo inicial obtido pelo critério técnico, [R\$].

CJ_T= Custo operacional, ao longo de 20 anos, obtido pelo critério técnico, [R\$].

CJ_E= Custo operacional, ao longo de 20 anos, obtido pelo critério econômico, [R\$].

Aplicando a equação (15), para este estudo de caso:

$$RI = \frac{2.669 - 1.906}{(3.117 - 779,29)/20} = 6,5 \text{ anos}$$

Assim, obtém-se um retorno de investimento de aproximadamente 78 meses. Tendo um resumo dos valores envolvidos na Tabela 5.1.

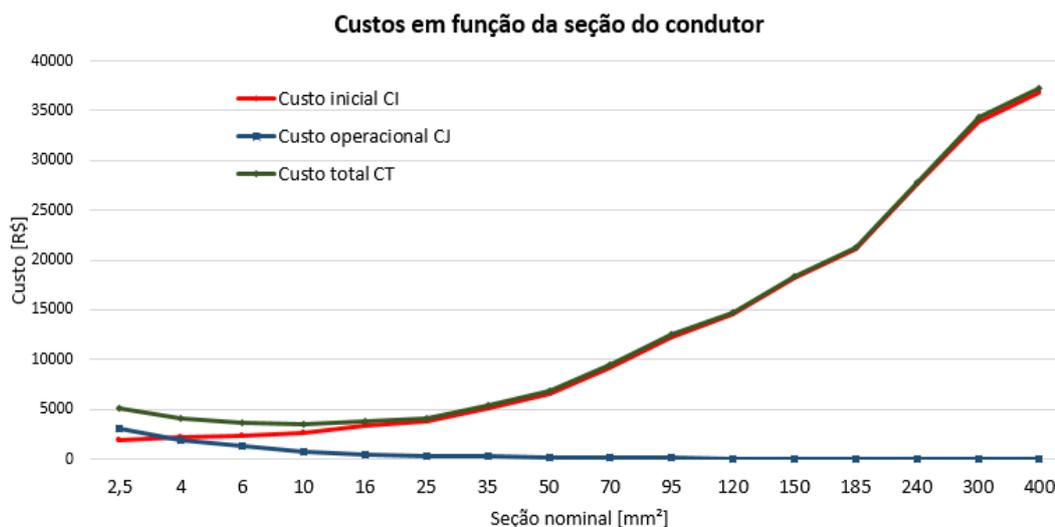
Tabela 5.1 -Resultados econômicos (caso 1)

Dimensionamento	CI [R\$]	CJ [R\$]	CT [R\$]	Economia [R\$]	Payback [meses]
Técnico NBR 5410	1.906,00	3.117,00	5.023,00	1574,71	78
Econômico NBR 15920	2.669,00	779,29	3.448,29		

Fonte: produção do próprio autor

A Figura 5.1 demonstra todos os custos envolvidos de acordo com a seção nominal selecionada. Analisando esta Figura, fica claro que o ponto onde há o menor custo total, apesar de ter custo inicial elevado, é dado na seção econômica de 10mm².

Figura 5.1- Gráfico dos custos em função da seção do condutor (caso 1).



Fonte: Produção do próprio autor

5.2 RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO 2 (EXTRUSORA 120mm)

Ao aplicar os critérios técnicos (NBR 5410/2004) para o dimensionamento deste ramal de alimentação obteve-se uma seção nominal de 35mm², o custo inicial de implantação deste condutor, aliado aos condutos, acessórios e mão-de-obra é de R\$ 2907,00, todavia, o custo operacional ao longo da vida útil de 20 anos deste circuito é de R\$ 60.351,00, totalizando em R\$ 63.258,00.

Foi aplicado o dimensionamento econômico embasado na norma NBR 15920/2011, resultando em uma seção nominal do condutor igual a 240mm², afirmando a premissa de que este dimensionamento sempre resultará em um seção maior ou igual a obtida através do dimensionamento técnico. O custo inicial é de R\$ 11.956,00 e o custo operacional é R\$ 8801,18, totalizando R\$ 20.757,18.

Seguindo a Tabela 58 da referência [2], o condutor de proteção para o primeiro dimensionamento seria de 16mm² e para o econômico de 120mm², acarretando um aumento no custo inicial de R\$ 1.373,01.

Com estes resultados ficou claro que a normatização proposta, ao levar em consideração as perdas Joule, é de grande valia, pois optando-se pela seção obtida tem-se uma economia, ao fim da vida útil do condutor, igual a R\$ 39.594,00. Aplicando a equação (15), obtem-se o período de retorno previsto.

$$RI = \frac{11.956 - 2.907}{(60.351 - 8.801,18)/20} = 3,5 \text{ anos}$$

O período de retorno previsto é igual a 42 meses. Tendo um resumo dos valores envolvidos na Tabela 5.2.

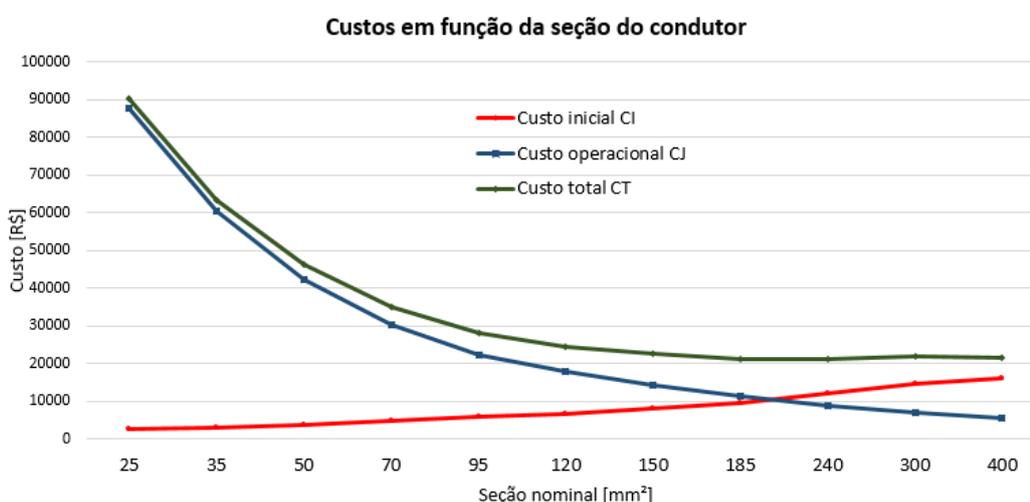
Tabela 5.2 - Resultados econômicos (caso 2)

Dimensionamento	CI [R\$]	CJ [R\$]	CT [R\$]	Economia [R\$]	Payback [meses]
Técnico NBR 5410	2907,00	60.351,00	63.258,00	39.594,00	42
Econômico NBR 15920	11.956,00	8801,18	20.757,18		

Fonte: produção do próprio autor

A Figura 5.2 demonstra todos os custos envolvidos de acordo com a seção nominal selecionada. Analisando esta Figura, fica claro que o ponto onde há o menor custo total, apesar de ter custo inicial elevado, é dado na seção econômica de 240mm².

Figura 5.2- Gráfico dos custos em função da seção do condutor (caso 2).



Fonte: Produção do próprio autor

5.3 RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO 3 (EDIFÍCIO DE USO COLETIVO)

Ao aplicar a normatização imposta pela concessionária para o dimensionamento desta entrada de energia obteve-se uma seção nominal de 95mm² para as fases e

neutro, o custo inicial de implantação deste condutor, aliado aos condutos, acessórios e mão-de-obra é de R\$ 7322,00, todavia, o custo operacional ao longo da vida útil de 20 anos deste circuito é de R\$ 17.152,00, totalizando em R\$ 24.386,00.

Foi aplicado o dimensionamento econômico embasado na norma NBR 15920/2011, resultando em uma seção nominal do condutor igual a 185mm², afirmando a premissa de que este dimensionamento sempre resultará em um seção maior ou igual a obtida através do dimensionamento técnico. O custo inicial é de R\$ 12.922,00 e o custo operacional é R\$ 8741,51, totalizando R\$ 21.663,51.

O condutor de proteção neste estudo de caso é denominado “PEN” devido ao esquema de aterramento selecionando pela concessionária ser o TN-C, então, neste estudo de caso torna-se desnecessário o cálculo da seção transversal do condutor terra.

Com estes resultados ficou claro que a normatização proposta, ao levar em consideração as perdas Joule, é de grande valia, pois optando-se pela seção obtida tem-se uma economia, ao fim da vida útil do condutor, igual a R\$ 2.722,49.

Aplicando a equação (15), obtem-se o período de retorno previsto.

$$RI = \frac{12.922 - 7.322}{(17.152 - 8.741,51)/20} = 13,3 \text{ anos}$$

O período de retorno previsto é igual a 160 meses. Tendo um resumo dos valores envolvidos na Tabela 5.3.

Tabela 5.3-Resultados econômicos (caso 3)

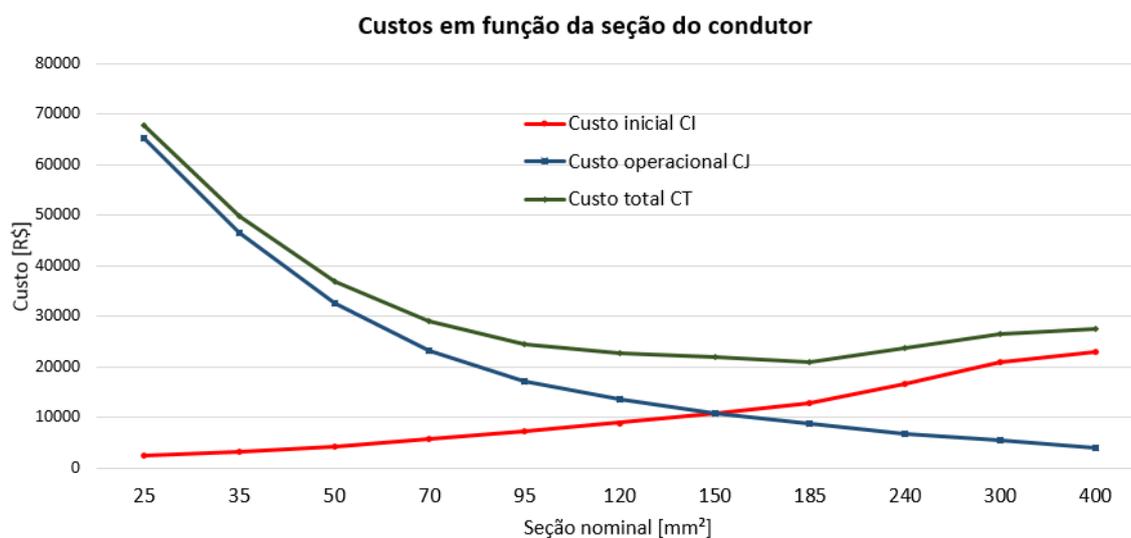
Dimensionamento	CI [R\$]	CJ [R\$]	CT [R\$]	Economia [R\$]	Payback [meses]
Técnico NT-03	7322,00	17.152,00	24.386,00	2.722,49	160
Econômico NBR 15920	12.922,00	8741,51	21.663,51		

Fonte: produção do próprio autor

A Figura 5.3 demonstra todos os custos envolvidos de acordo com a seção nominal selecionada. Analisando esta Figura, fica claro que o ponto onde há o menor custo total, apesar de ter custo inicial elevado, é dado na seção econômica de 185mm².

Deste modo, com o resultado obtido conclui-se que o método de dimensionamento usado pela concessionária não leva em consideração as perdas Joule nos condutores que acarretam custos futuros não previstos no projeto. Todavia, a troca da seção proposta pela normatização da CELESC torna-se inviável, pois, apesar da economia energética, o retorno do investimento é de 160 meses, com base de tempo de 20 anos, fazendo com que não seja vantajoso a opção pela seção otimizada.

Figura 5.3- Gráfico dos custos em função da seção do condutor (caso 3).



Fonte: Produção do próprio autor

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o término deste trabalho de conclusão de curso, alcançou-se o objetivo da otimização de projetos elétricos aplicado a três estudos de caso. A principal vertente deste trabalho é a otimização econômica e técnica no tocante a condutores e condutos, deste modo elaborou-se uma metodologia baseada em pesquisa bibliográfica que resultou positivamente.

O tópico desenvolvido com maior profundidade foi o dimensionamento econômico dos condutores elétricos. Do exposto, conclui-se que a norma NBR 15920/2011 pode ser aplicada e obter resultados importantes em muitos casos. As características de projeto mais relevantes para a otimização econômica do projeto elétrico são que o circuito a ser dimensionado deve operar muitas horas por ano sem que haja muitas variações da corrente elétrica passante e que se aproxime da corrente máxima de operação. Normalmente, esta normatização possui melhores resultados quando aplicada em circuitos cujas seções nominais obtidas pelo dimensionamento técnico sejam maiores ou iguais a 25mm^2 (caso 2).

Ao considerar as perdas em forma de calor proveniente da circulação de corrente em um condutor (perdas Joule), o projetista possui uma ferramenta pouco utilizada, entretanto, se aplicada, acarreta redução significativa de custos durante a vida útil da instalação, tendo o retorno de seu investimento em poucos anos e uma vantagem adicional que o condutor terá sua vida útil aumentada, pois estará operando em temperaturas menores.

Este trabalho de conclusão de curso pode ser base para futuros trabalhos. Sugere-se que, para agregar conteúdo, ao dimensionar os condutores elétricos utilizando os critérios técnicos, faça-se um aprofundamento nos critérios de proteção contra sobrecargas, proteção contra curto-circuitos e proteção contra contatos indiretos. Outro ponto que pode ser acrescentado é um estudo comparativo de preços dos condutos que podem ser aplicados em cada caso, podendo resultar em uma otimização do projeto.

Por fim, o dimensionamento econômico baseado na norma NBR 15920/2011 aborda um custo inicial maior com o intuito de obter um custo operacional menor, tal característica pode causar rejeição, pois acarreta maior investimento no momento da execução do projeto. Deste modo, cabe ao projetista caracterizar as vantagens e

demonstrar a otimização que pode resultar com o uso deste dimensionamento econômico.

REFERÊNCIAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15920: Cabos elétricos – Cálculo da corrente nominal – condição de operação – Otimização econômica das seções dos cabos de potência. Primeira edição, Rio de Janeiro: 2011. 27 p.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5410: Instalações Elétricas em Baixa Tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- [3] BARICHELLO, Ivan Carlos. Dimensionamento Econômico e Ambiental de Condutores Elétricos em Baixa Tensão. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade São Francisco, Itatiba, 2012.
- [4] CAVALIN, Geraldo, CERVELIN, Severino. Instalações Elétricas Prediais. 18ª. Edição Revisada. Editora LTC. Rio de Janeiro. 2006.
- [5] COTRIM, Ademaro. Instalações Elétricas. 4ª. Edição. Prentice-Hall. São Paulo. 2003.
- [6] CREDER, Hélio. Instalações Elétricas. 15ª. Edição. Editora LTC. Rio de Janeiro. 2007.
- [7] IEC 60287-1-1. Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1-1: Current rating equations of losses – General. Edition 1.2, 2001. 67 p.
- [8] Lição Teórica. Instalações elétricas: 1ª parte – Cabos e Linhas. Disponível em: https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/55006/1/Cabos_3_aula.pdf. Acesso: 20 de Agosto de 2015.
- [9] LIMA FILHO, Domingos Leite. Projetos de Instalações Elétricas Prediais. 12ª. Edição, Editora Érica. São Paulo. 2006.
- [10] LINHAS DE TRANSMISSÃO- materiais para estudo de tensão e corrente para linhas de transmissão Disponível em: <<https://linhasdetransmissao.wordpress.com/2013/01/12/efeito-pelicular/>> Acesso: 20 de Agosto de 2015.
- [11] MAMEDE FILHO, João. Instalações Elétricas Industriais. 8ª. Edição. Editora LTC. Rio de Janeiro. 2011.

- [12] MAMEDE FILHO, João. Instalações Elétricas Industriais. 7ª. Edição. Editora LTC. Rio de Janeiro. 2007.
- [13] MORENO, Hilton. DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE CONDUTORES ELÉTRICOS. Um caminho para economizar Energia. Disponível em: <http://www.faatesp.edu.br/publicacoes/04_dimensio.pdf> Acesso: 20 de Agosto de 2015.
- [14] MOTTA, Adriano. Manual Prático do Eletricista. São Paulo: Hemus, 2004.
- [15] NISKIER, Júlio, MACINTYRE, Archibald J. Instalações Elétricas. 5ª. Edição. Editora LTC. Rio de Janeiro. 2008.
- [16] NORMA TÉCNICA DPSC/NT – 03 Fornecimento de Energia Elétrica à Edifícios de Uso Coletivo. CELESC
- [17] Resolução número 414 da Agência Nacional de Energia Elétrica, 2010
- [18] SITE ANEEL- BIG, boletim de informações de geração atualizado em 01/05/2015

APÊNDICE A – Características da variável B.

Para calcular a seção econômica de um condutor elétrico é preciso ter em mente alguns conceitos. Ao aplicar as equações é notável que para determinar a variável B deve-se conhecer o conceito de efeito pelicular e efeito de proximidade.

A variável B tem como sua equação característica:

$$B = (1 + y_p + y_c).(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \quad (16)$$

Onde,

y_p refere-se ao efeito pelicular;

y_s refere-se ao efeito de proximidade;

λ_1 refere-se as perdas em blindagens metálicas;

λ_2 refere-se as perdas em armações;

Efeito pelicular

Segundo o material disponibilizado pela referência [10], o efeito pelicular ou skin effect, do inglês, é um efeito que normalmente é encontrado em sistemas de transmissão baseado em corrente alternado, pois em sistemas de corrente contínua, a corrente elétrica passando pelo condutor elétrico se distribui uniformemente por toda a seção transversal do mesmo. Em corrente alternada, com o aumento da frequência de operação, a desuniformidade referente à corrente elétrica torna-se mais acentuada, aumentando as diferenças entre as densidades de carga em determinados pontos da seção transversal do cabo.

Este efeito é mais caracterizado com a diminuição da densidade de corrente no interior do condutor e o aumento da corrente nas partes mais externas, usualmente denominadas de coroa. Este fenômeno ocorre devido ao campo eletromagnético alternado que é aplicado ao condutor.

O efeito pelicular fica mais claro em frequências de operação mais altas, portanto, para o dimensionamento econômico e aplicação da norma NBR 15920/2011 será desconsiderado, pois dificultaria os cálculos e análises sem ter relevância para a seleção dos condutores. A Figura 1 ilustra este efeito:

Figura 1-Efeito pelicular em um condutor elétrico

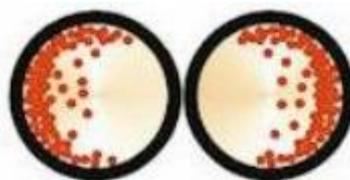


Fonte: [16]

Efeito de proximidade

Segundo [3], “O efeito de proximidade é o fenômeno caracterizado por uma distribuição não uniforme de densidade de corrente em um condutor, causado pela influência da corrente que percorre outros condutores próximos. Se as correntes estão no mesmo sentido, as partes dos condutores que estão mais próximas são atravessadas por um maior fluxo magnético e como consequência a densidade de corrente será maior nas partes mais afastadas dos condutores. Se os condutores forem percorridos por correntes de sentidos contrários, a densidade de corrente será maior nas partes mais próximas dos condutores. O efeito de proximidade diminui com o aumento da distância entre condutores”. A Figura 2 pode ilustrar este fenômeno:

Figura 2-Efeito de proximidade em dois condutores elétricos



Fonte: [16]

A referência IEC 60287-1-1-*Electric cables – Calculation of the current rating – rating equations of losses*, demonstra como pode ser calculada a influência deste efeito em cabos elétricos que estejam operando próximos uns dos outros. Todavia, analisando as fórmulas envolvidas, obtidas em [7], ficou claro que este efeito é de maior relevância em maiores frequências e normalmente calculado para cabos de média e alta tensão.

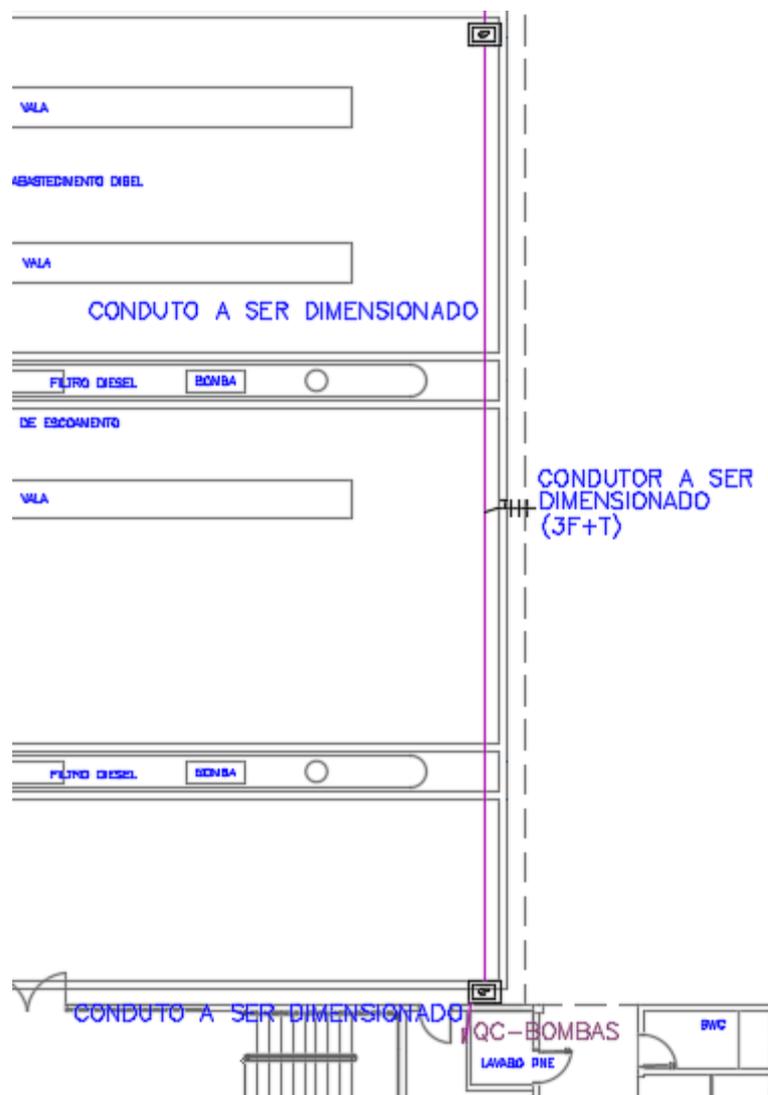
Como os estudos de caso deste trabalho são em baixa tensão, desconsidera-se qualquer interferência causado pelo efeito de proximidade nos condutores a serem empregados nos projetos.

Perdas em blindagens metálicas e armações

As blindagens metálicas e armações são características físicas de cabos de média e alta tensão, sendo responsáveis pela proteção mecânica e elétrica dos cabos. Entretanto, o cabeamento a serem empregado neste trabalho é de baixa tensão e não contempla blindagens e armações. Por conseguinte, estas perdas são desconsideradas no cálculo, não o afetando significativamente.

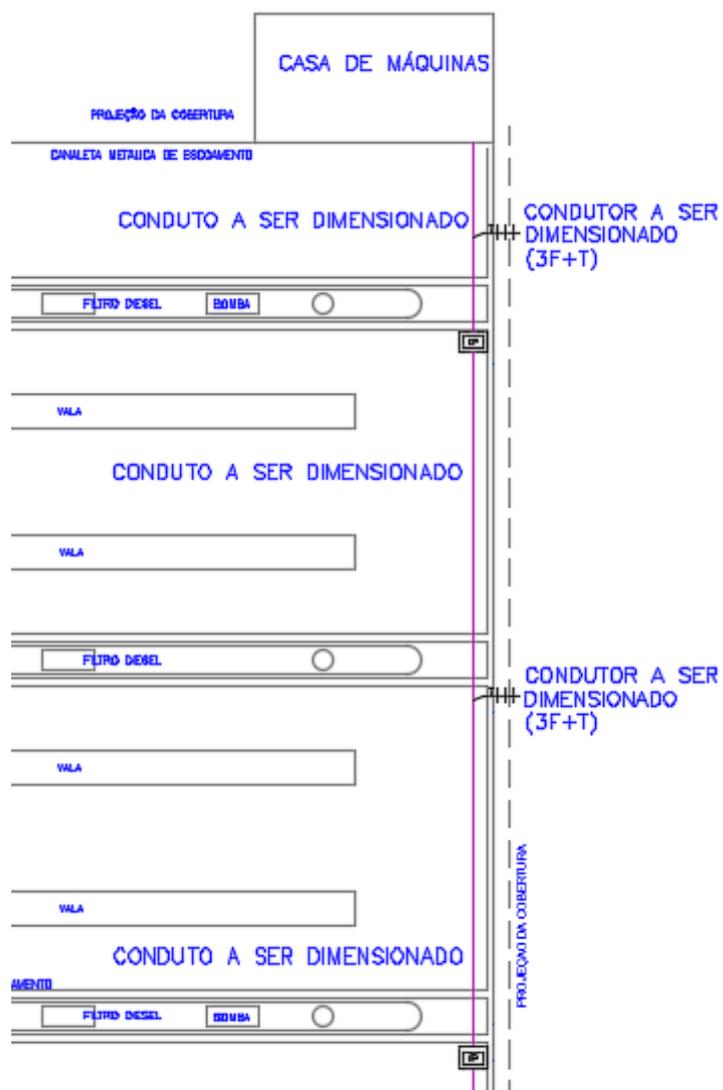
ANEXO A- Planta baixa (caso 1)

PLANTA BAIXA A

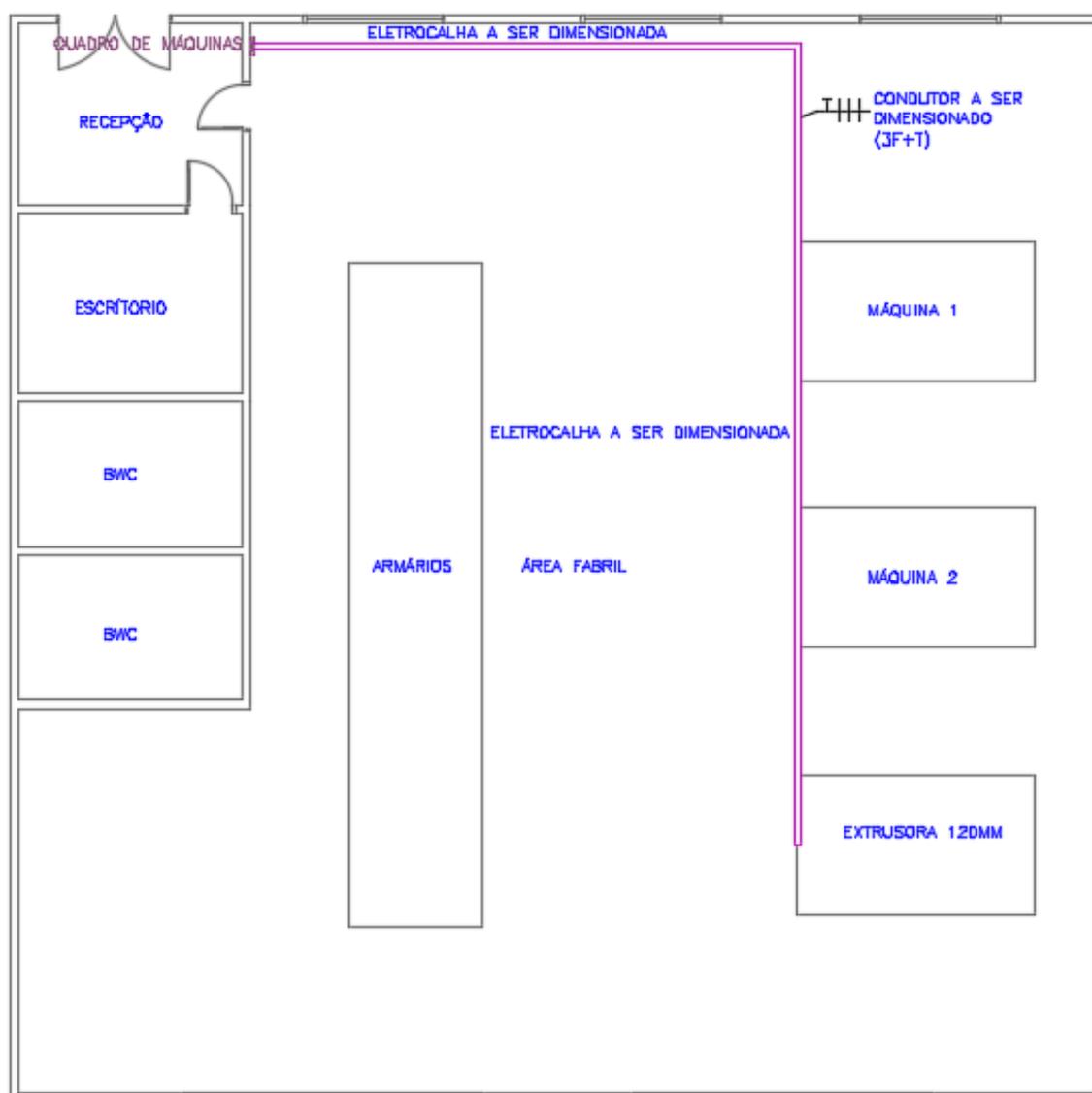


Fonte: Produção do próprio autor

PLANTA BAIXA B

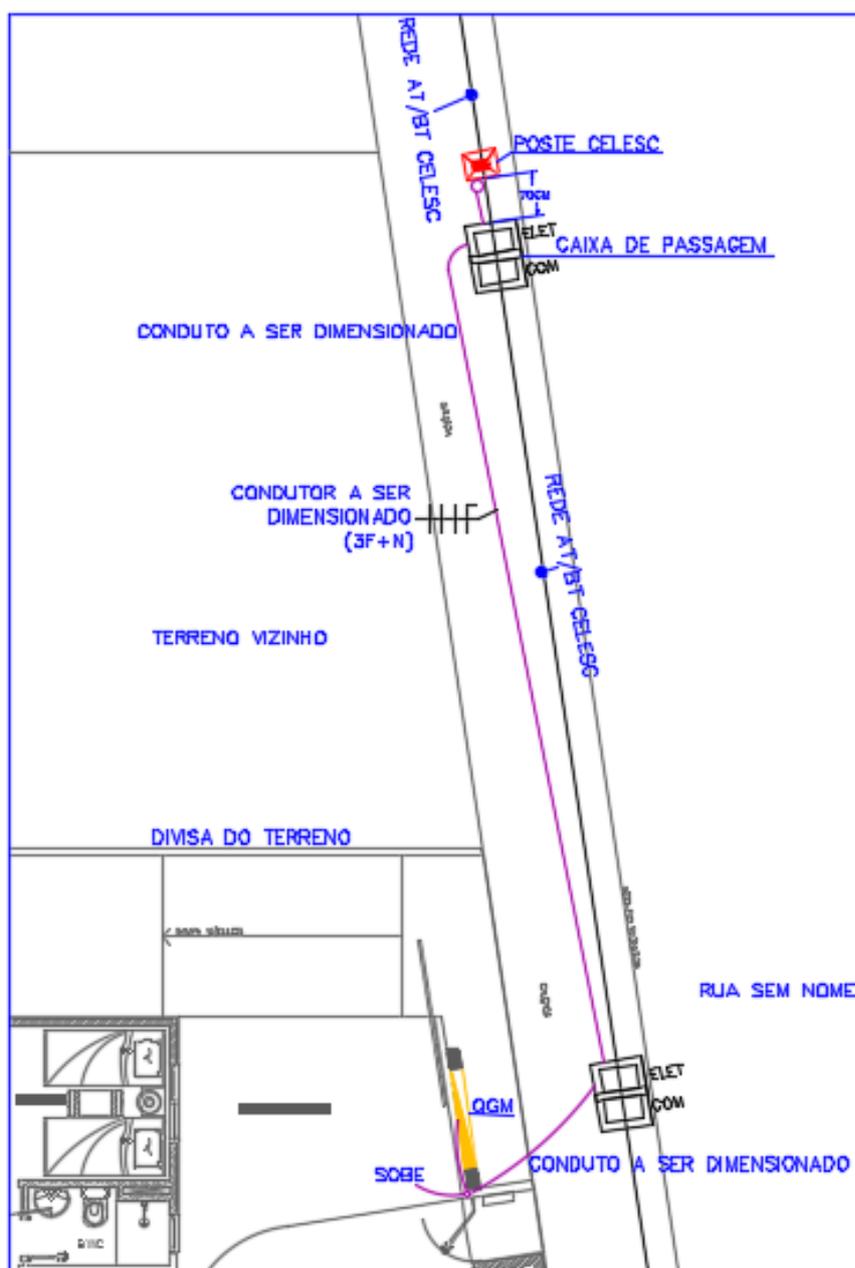


Fonte: Produção do próprio autor

ANEXO B- Planta baixa (caso 2)

Fonte: Produção do próprio autor

ANEXO C- Planta baixa (caso 3)



Fonte: Produção do próprio autor

ANEXO D- Tabela de custos (caso 1)

Item	Quant	Custos de implantação de condutores e condutos															
		Seção nominal transversal dos condutores [mm ²]															
		2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300	400
Custo do condutor [R\$/m]		1,35	2,75	3,5	5,82	9,37	12,07	16,75	25,63	35,82	47,12	60,25	74,12	91,28	121,1	152,1	169,2
Custo do condutor por fase [R\$/m]	57m	76,95	156,7	199,5	331,74	534,09	687,99	954,75	1460,91	2041,74	2686	3434	4225	5202	6902	8669	9644
Custo do condutor neutro [R\$/m]	0m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total para o circuito (3F+N)		230	470	598	993	1602	2064	2862	4380	6123	8058	10302	12675	15606	20706	26007	28932
Total para o circuito por metro		4,03	8,24	10,49	17,52	28,1	36,21	50,21	76,84	107,4	141,4	180,7	222,4	273,8	363,26	456	507
Eletroduto de aço GF pesado	50m	25,3	25,3	25,3	25,3	25,3	25,3	33,6	33,6	45,3	68,3	68,3	84,3	84,3	102,1	123,2	123,2
Kanalex PEAD	5m	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
Mão de obra	1	400	400	400	400	400	400	500	500	800	800	800	1200	1200	1750	1750	1750
Total para o ramal		1676	1676	1676	1676	1676	1676	2199	2199	3084	4234	4234	5441	5441	6881	7936	7936
Total para o ramal por metro		29,41	29,41	29,41	29,41	29,41	29,41	38,58	38,58	54,11	74,28	74,28	95,45	95,45	120,71	139,22	139,22
Custo inicial (CI) [R\$]		1906	2146	2274	2669	3278	3740	5061	6579	9207	12292	14536	18116	21047	27587	33943	36868

Fonte: Produção do próprio autor

ANEXO E- Tabela de custos (caso 2)

Item	Quant	Custos de implantação de condutores e condutos															
		Seção nominal transversal dos condutores [mm ²]															
		2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300	400
Custo do condutor [R\$/m]		1,35	2,75	3,5	5,82	9,37	12,07	16,75	25,63	35,82	47,12	60,25	74,12	91,28	121,1	152,1	169,2
Custo do condutor por fase [R\$/m]	27m	36,45	74,25	94,5	157,14	252,99	325,89	452,25	692,01	967,14	1272,2	1626	2001	2464	3269	4104	4568
Custo do condutor neutro [R\$/m]	0m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total para o circuito (3F+N)		109	222	283,5	471	759	978	1356	2076	2901	3816	4878	6003	7392	9807	12312	13704
Total para o circuito por metro		4,03	8,24	10,49	17,52	28,1	36,21	50,21	76,84	107,4	141,4	180,7	222,4	273,8	363,26	456	507
Eletrocalha aramada sem tampa com acessórios	25m	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	27,00	27,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00
Kanalex PEAD	3m	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
Curva horizontal 90°	1	30,99	30,99	30,99	30,99	30,99	30,99	30,99	52,55	52,55	52,55	52,55	52,55	52,55	52,55	52,55	52,55
Curva vertical externa 90°	1	33,75	33,75	33,75	33,75	33,75	33,75	33,75	56,69	56,69	56,69	56,69	56,69	56,69	56,69	56,69	56,69
Mão de obra	1	800	800	800	800	800	800	800	900	900	900	900	1200	1200	1200	1200	1200
Total para o ramal		1421	1421	1421	1421	1421	1421	1551	1696	1846	1846	1846	2149	2149	2149	2149	2149
Total para o ramal por metro		52,65	52,65	52,65	52,65	52,65	52,65	57,46	62,81	68,36	68,36	68,36	79,62	79,62	79,62	79,62	79,62
Custo inicial (CI) [R\$]		1530	1643	1704	1892	2180	2399	2907	3772	4747	5662	6724	8152	9541	11956	14461	15853

Fonte: Produção do próprio autor

ANEXO F- Tabela de custos (caso 3)

Item	Quant	Custos de implantação de condutores e condutos															
		Seção nominal transversal dos condutores [mm ²]															
		10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300	400			
Custo do condutor [R\$/m]		5,82	9,37	12,07	16,75	25,63	35,82	47,12	60,25	74,12	91,28	121,1	152,1	169,2			
Custo do condutor por fase [R\$/m]	30m	174,60	281,11	362,10	502,5	768,9	1074	1413	1807	2224	2738	3633	4563	5076			
Custo do condutor neutro [R\$/m]	30m	174,60	281,11	362,10	502,5	768,9	1074	1413	1807	2224	2738	3633	4563	5076			
Total para o circuito (3F+N)		698	1125	1448	2010	3076	4296	5652	7228	8896	10962	14532	18252	20304			
Total para o circuito por metro		23,28	37,48	48,28	67	102,52	143,28	188,48	241	296,48	365,12	484,4	608,4	677			
Eletróduto de aço GF pesado	6m	33,6	33,6	33,6	45,3	45,3	68,3	102,1	102,1	102,1	102,1	123,2	204,2	204,2			
Curva 90° aço GF	1	9,78	9,78	9,78	16,60	16,60	38,60	53,90	53,90	53,90	53,90	92,25	107,8	107,8			
Kanalex PEAD	20m	2,3	2,3	2,3	3,9	3,9	3,9	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2			
Mão de obra	1	800	800	800	800	900	900	900	900	1200	1200	1200	1200	1200			
Total para o ramal		1057	1057	1057	1166	1266	1426	1670	1670	1970	1970	2153	2637	2637			
Total para o ramal por metro		35,22	35,22	35,22	38,86	42,2	47,53	55,66	55,66	65,66	65,66	71,77	87,9	87,9			
Custo inicial (C1) [R\$]		1755	2182	2505	3176	4342	5724	7322	8898	10866	12922	16685	20889	22941			

Fonte: Produção do próprio autor

ANEXO G- Dimensionamento de eletrodutos-Fornecimento em baixa tensão

DEMANDA PROVAVEL DA EDIFICACAO (kW)	DEQUANTO R TERMINOMETRICO PROTECCAO GERAL (A)	RAMAL DE LIDACAO - CONDUtores			RAMAL DE ENTRADA - CONDUtores		ELETRO DUTOS					
		AEREO - MULTIFLEXADO	AEREO - MULTIFLEXADO	SUBTERRANEO (mm ²)	EM BUTIDO EM ALVENARIA (mm ²)	SUBTERRANEO (mm ²)	TIPO	TAMANHO NOMINAL	ROSCA	TAMANHO NOMINAL	ROSCA	
ATE 25	10	10	10	10	10	10	40	1 1/2	50	1 1/2		
26,1 A 32	50	16	10	10	16	16	40	1 1/2	50	1 1/2		
32,1 A 45	70	25	16	16	25	25	40	1 1/2	50	1 1/2		
45,1 A 88	90	35	25	25	35	35	50	2	60	2		
88,1 A 65	100	50	25	35	50	50	50	2	60	2		
65,1 A 75	125	70	35	50	70	70	65	2 1/2	85	3		
75,1 A 95	150	70	50	70	70	95	80	3	85	3		
95,1 A 112,5	175	95	70	70	95	120	80	3	85	3		
112,6 A 131	200	120	70	95	120	150	100	4	100	4		
131,1 A 145	225	--	--	120	120	185	100	4	100	4		
145,1 A 164	250	--	--	150	150	240	100	4	100	4		
164,1 A 195	300	--	--	185	240	300	100	4	100	4		
195,1 A 225	350	--	--	2 X 95	2 X 120	2 X 150	125	2 X 3	150	2 X 4		

Fonte: [16]

ANEXO H- Tabelas para queda de tensão e condução de corrente (Condutor EPR)

TABELA 19 - QUEDA DE TENSÃO EM V/A. km
CABO EPROTENAX, CABO EPROTENAX GSETTE E AFUMEX 0,6/1kV

> Cabo Eprotenax, Cabo Eprotenax Gsette e Afumex 0,6/1kV.

seções nominais (mm ²)	instalação ao ar livre ^(C)												cabos uni e bipolares		cabos tri e tetrapolares			
	cabos unipolares ^(D)						cabos unipolares ^(D)						circuito trifásico ^(B)		circuito monofásico ^(B)		circuito trifásico	
	circuito monofásico			circuito trifásico			circuito monofásico			circuito trifásico			circuito monofásico		circuito trifásico			
	s=10cm		s=20cm	s=10cm		s=20cm	s=10cm		s=20cm	s=10cm		s=20cm	s=10cm		s=20cm	s=10cm		s=20cm
	FP-0,8	FP-0,95	FP-0,8	FP-0,95	FP-0,8	FP-0,95	FP-0,8	FP-0,95	FP-0,8	FP-0,95	FP-0,8	FP-0,95	FP-0,8	FP-0,95	FP-0,8	FP-0,95	FP-0,8	FP-0,95
1,5	23,8	28,0	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
2,5	14,9	17,4	15,0	17,5	14,7	17,3	12,9	15,1	13,0	15,1	12,8	15,0	12,7	15,0	14,6	17,3	12,7	15,0
4	9,4	10,9	9,5	10,9	9,2	10,8	8,2	9,5	8,2	9,5	8,0	9,4	7,9	9,3	9,1	10,8	7,9	9,3
6	6,4	7,3	6,4	7,3	6,2	7,2	5,5	6,3	5,6	6,3	5,4	6,2	5,3	6,2	6,1	7,1	5,3	6,2
10	3,9	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	2,58	2,83	2,64	2,86	2,42	2,74	2,25	2,46	2,31	2,48	2,12	2,39	2,05	2,35	2,34	2,70	2,03	2,34
25	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	1,50
35	1,34	1,37	1,40	1,41	1,21	1,30	1,18	1,20	1,23	1,23	1,06	1,14	0,99	1,10	1,15	1,26	0,98	1,09
50	1,06	1,05	1,12	1,09	0,94	0,99	0,94	0,92	0,99	0,95	0,83	0,87	0,76	0,83	0,86	0,95	0,75	0,82
70	0,81	0,77	0,88	0,80	0,70	0,71	0,72	0,68	0,78	0,70	0,63	0,63	0,56	0,59	0,63	0,67	0,54	0,58
95	0,66	0,59	0,72	0,62	0,56	0,54	0,59	0,52	0,64	0,55	0,50	0,48	0,43	0,44	0,48	0,50	0,42	0,44
120	0,57	0,49	0,63	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	0,35
150	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
185	0,44	0,36	0,51	0,39	0,38	0,32	0,40	0,32	0,46	0,35	0,34	0,29	0,27	0,26	0,30	0,29	0,26	0,25
240	0,39	0,30	0,45	0,33	0,33	0,27	0,35	0,27	0,41	0,30	0,30	0,24	0,23	0,21	0,26	0,24	0,22	0,21
300	0,35	0,26	0,41	0,29	0,30	0,24	0,32	0,24	0,37	0,26	0,28	0,21	0,21	0,18	0,23	0,20	0,20	0,18
400	0,31	0,23	0,38	0,26	0,27	0,21	0,29	0,21	0,34	0,23	0,25	0,19	0,19	0,16	—	—	—	—
500	0,28	0,20	0,34	0,23	0,25	0,18	0,26	0,18	0,32	0,21	0,24	0,17	0,17	0,14	—	—	—	—
630	0,26	0,17	0,32	0,21	0,24	0,16	0,24	0,16	0,29	0,19	0,22	0,15	0,16	0,12	—	—	—	—
800	0,23	0,15	0,29	0,18	0,22	0,15	0,22	0,14	0,27	0,17	0,21	0,14	0,15	0,11	—	—	—	—
1000	0,21	0,14	0,27	0,17	0,21	0,14	0,21	0,13	0,25	0,16	0,20	0,13	0,14	0,10	—	—	—	—

NOTAS:

A) Os valores da tabela admitem uma temperatura no condutor de 90 °C;

B) Válido para instalação em eletroduto não-magnético e diretamente enterrado;

C) Aplicável a fixação direta a parede ou teto, ou eletrocalha aberta, ventilada ou fechada, espaço de construção, bandeja, prateleira, suportes e sobre isoladores.

Fonte: http://br.prysmiangroup.com/br/files/dimensionamento_bt.pdf-acessado em 02/11/15

