

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DEIVIS HANSEN

**ANÁLISE COMPARATIVA E QUALITATIVA DE CURTO-CIRCUITO EM
BARRAMENTOS BLINDADOS APLICADOS A RAMAIS DE ALIMENTAÇÃO DE
BAIXA TENSÃO EM SUBSTITUIÇÃO AOS CONDUTORES TRADICIONAIS**

São Leopoldo
2019

DEIVIS HANSEN

**ANÁLISE COMPARATIVA E QUALITATIVA DE CURTO-CIRCUITO EM
BARRAMENTOS BLINDADOS APLICADOS A RAMAIS DE ALIMENTAÇÃO DE
BAIXA TENSÃO EM SUBSTITUIÇÃO AOS CONDUTORES TRADICIONAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica, pelo Curso de
Engenharia Elétrica da Universidade do
Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Me. Vinícius André Uberti

São Leopoldo

2019

Aos meus pais, por me apoiarem incondicionalmente
para que eu chegasse até aqui e realizasse esse sonho.
A Deus, que me deu forças nos momentos difíceis e
sempre recompensou os meus esforços.

AGRADECIMENTOS

Antes de mais nada, agradeço à minha família. Meu irmão, Tiago Hansen, sobretudo meus pais, Flávio Hansen e Erica Becker Hansen, que estão realizando esse sonho comigo. Eles são o meu exemplo, de família, perseverança, amor, dedicação, e todos os outros sentimentos bons que podem existir. O apoio deles foi, sem dúvida, importantíssimo para chegar até aqui.

Agradeço a Deus por me conceder saúde física e mental, de modo que o caminho fosse menos árduo. Com pedras, é verdade, mas sempre na certeza de que algo de melhor estava por vir, logo ali na frente.

Ao meu professor e orientador, Me. Vinícius André Uberti, o qual de forma profissional sempre me cobrou os resultados e o empenho que a carga solicitou, servindo de motivador e sempre na busca do meu melhor. Sem esse espírito, o resultado não seria o mesmo e por isso a minha gratidão.

Sempre acreditei muito no trabalho como formador de pessoas, não somente de profissionais, e graças a Deus tenho que agradecer às minhas três grandes experiências profissionais: Ao Eng. Levi C. F. da Silva, meu primeiro LÍDER profissional, que além de me ensinar os primeiros caminhos profissionais da engenharia, me reafirmou sempre que caráter e profissionalismo são essenciais! Aos engenheiros Daniel G. Filippin e Marcos A. Filippin, pela oportunidade de ampliar consideravelmente meus horizontes em relação à engenharia, permitindo uma imersão em tudo o que sempre quis ser desafiado profissionalmente. Também agradeço aos engenheiros Luciano K. dos Reis e Leonardo K. dos Reis, que me acolheram em meu mais novo desafio profissional, permitindo o meu crescimento e contribuição para mais essa área de atuação.

Aos meus colegas, que estiveram ao meu lado nos bons e maus momentos, seguindo firmes e fortes em busca do objetivo comum.

Por fim, aos meus amigos e demais familiares, que nesta longa trajetória souberam aguardar por aquele jantar, aquele passeio ou encontro de família que nem sempre pude participar em razão do desafio que estava à minha frente.

“No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação, não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem-feita ou não faz.”

Ayrton Senna

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo técnico comparativo do ponto de vista do curto circuito em ramais de distribuição de energia elétrica anteriores à medição em edificações com o uso de barramentos blindados em detrimento aos sistemas convencionais por cabos elétricos. Os ensaios são baseados nas normas ABNT, calculados por meio matemático e simulado por meio computacional com o uso de software específico de análise de circuitos. Este trabalho difere-se dos estudos disponíveis atualmente, que têm foco na análise de capacidade de condução de corrente e de queda de tensão, além de questões econômicas na escolha do sistema, mas não abordam o comportamento frente a ocorrência de curto-circuito. Viu-se que existem regiões tipicamente críticas quando do uso de barramentos blindados, com altos valores de corrente de curto-circuito, assim como pontos da instalação que pouco sofrem impacto na seleção deste material.

Palavras-chave: Barramento Blindado. Curto Circuito. Ramais de alimentação de edifícios.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de barramento de fabricação específica	24
Figura 2 - Representação de sistema com barramentos blindados	25
Figura 3 - Componentes de uma corrente de curto-circuito	27
Figura 4 - Representação de um curto-circuito trifásico	29
Figura 5 - Curto-circuito bifásico.....	29
Figura 6 - Curto-circuito bifásico com terra	30
Figura 7 - Curto-circuito fase-terra	30
Figura 8 - Curto-circuito com contato simultâneo	31
Figura 9 - Fluxograma de análise do sistema elétrico	45
Figura 10 – Exemplo de esquema de uma coluna de medidores.....	46
Figura 11 - Interface gráfica do programa <i>DOC</i> , para representação do diagrama unifilar do sistema	47
Figura 12 - Configuração dos parâmetros de um transformador.....	48
Figura 13 – Tela inicial de configuração de cabos elétricos	49
Figura 14 - Configuração dos parâmetros dos cabos.....	50
Figura 15 - Exemplo de diagrama unifilar de instalação padrão.....	51
Figura 16 – Edificação utilizada como modelo para a instalação padrão.....	52
Figura 17 – Diagrama Unifilar da instalação padrão com cabos elétrico convencionais.....	53
Figura 18 - Diagrama Unifilar da instalação padrão com barramentos blindados	55
Figura 19 – Variação percentual de I_{cc} para a simulação do projeto padrão, com o uso de cabos	61
Figura 20 – Variação percentual de I_{cc} para a simulação do projeto padrão, com o uso de barramentos blindados	62
Figura 21 – Valores absolutos de I_{cc} para validação do procedimento computacional com uso de cabos	62
Figura 22 – Valores de I_{cc} absolutos para validação do procedimento computacional com uso de barramentos blindados	63
Figura 23 – Comparação de valores de I_{cc} de acordo com o sistema de distribuição interno da edificação;	64
Figura 24 – Variação percentual de I_{cc} entre instalações com cabos e com barramentos blindados;	64

Figura 25 – Valores de lcc de acordo com a potência do Trafo;	68
Figura 26 – Valores de lcc de acordo com a distância dos QMs ao QGBT;	69
Figura 27 – Valores de lcc secundária de acordo com lcc da rede primária;.....	70
Figura 28 – Compilação dos resultados obtidos nas 27 composições simuladas	71

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros dos diversos cenários a serem ensaiados;	65
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados característicos de transformadores trifásicos em óleo para instalação interior ou exterior – primário em estrela ou triângulo, e secundário em estrela – 60Hz	18
Tabela 2 - Resistividades de alguns condutores elétricos.....	19
Tabela 3 - Seções mínimas de condutores	21
Tabela 4 - Valores limites admitidos para queda de tensão da tensão nominal.....	22
Tabela 5 – Dados de base utilizados para o cálculo por unidade	55
Tabela 6 – Dados do sistema à montante.....	56
Tabela 7 – Dados do transformador.....	56
Tabela 8 – Dados do circuito que conecta o transformador ao QGBT	56
Tabela 9 – Dados do barramento QGBT.....	57
Tabela 10 – Impedância dos condutores dos ramais dos QMs.....	57
Tabela 11 – Resumo de alguns parâmetros de cálculo e resultados obtidos nas simulações utilizando cabos convencionais	58
Tabela 12 – Impedâncias do barramento blindado	60
Tabela 13 – Resumo de alguns parâmetros de cálculo e resultados obtidos nas simulações utilizando barramentos blindados	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

CCM Centro de controle de Motores

CD Centro de Distribuição

EMUC Edificação de Múltiplas Unidades Consumidoras

EPR Etileno-Propileno

Icc Corrente de curto-circuito

PVC Cloreto de polivinila

QGBT Quadro Geral de Baixa Tensão

QM Quadro de Medição

TRAFO Transformador

XLPE Composto termofixo à base de polietileno reticulado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA	13
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 Objetivo Geral	14
1.2.2 Objetivos Específicos	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 TRANSFORMADOR	16
2.2 TRANSMISSÃO	19
2.2.1 Resistividade	19
2.2.2 Condutividade	20
2.2.3 Critérios para o Dimensionamento de Condutores	20
2.2.4 Barramentos Blindados	23
2.3 CURTO CIRCUITO	25
2.3.1 Tipos de Curto Circuito	28
2.4 SISTEMA DE BASE E VALORES POR UNIDADE (PU)	33
2.4.1 Sistema de Base	33
2.4.2 Valores por Unidade (pu)	34
2.5 DETERMINAÇÃO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO	36
2.5.1. Impedância do Sistema	36
2.5.2 Metodologia e Sequência de Cálculo	38
3 METODOLOGIA	44
3.1 FLUXOGRAMA DA ANÁLISE PROPOSTA, VALIDAÇÃO E ANÁLISES	44
3.2 CARACTERÍSTICAS DE UM SISTEMA PREDIAL COM BARRAMENTOS BLINDADOS	46
3.3. PARAMETRIZAÇÃO E SIMULAÇÃO UTILIZANDO O SOFTWARE DE DIMENSIONAMENTO ELÉTRICO	47
3.4 RESULTADOS ESPERADOS	51
4 ESTUDO DE CASO	52
4.1 APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO	52
4.2. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA INSTALAÇÃO PADRÃO	61

4.3 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PARA VARIAÇÕES DA INSTALAÇÃO PADRÃO	65
4.4 ANÁLISE DE RESULTADOS	72
5 CONCLUSÃO	74
REFERÊNCIAS.....	76

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, no mercado de energia brasileiro, diversos novos produtos e soluções vêm sendo adotados, visando melhorias no desempenho e no custo geral dos empreendimentos.

A implantação destas inovações, em razão da sazonalidade, tamanho do país e diversificada quantidade e qualidade de empresas de prestação de serviços elétricos e concessionárias de energia não ocorre de maneira uniforme, fazendo com que diversas regiões ou microrregiões do país adotem novos sistemas enquanto que outras pouco evoluem quanto às novas tecnologias.

No quesito regional, com a aquisição de duas das três concessionárias de energia do Rio Grande do Sul por parte de um grupo paulista, que por sua vez foi adquirida por um grupo chinês, várias inovações começaram a ser colocadas em prática, como por exemplo, o uso de barramentos blindados nos ramais de distribuição de energia anteriores à medição em edifício de múltiplas unidades com centros de medição descentralizados.

Por se tratar de um sistema inovador para os padrões regionais, as análises mais básicas como análise de custos diretos de instalação, capacidade de condução de corrente elétrica e queda de tensão dos trechos são realizadas imediatamente. Contudo, nem todos os aspectos foram analisados, como é o caso do comportamento destes barramentos frente à ocorrência de curto-circuitos.

Este trabalho acadêmico propõe um estudo quantitativo e qualitativo do ponto de vista do curto circuito utilizando estes barramentos blindados frente aos sistemas convencionais com o uso de cabos, estudo esse que comumente é desprezado, sendo realizadas aproximações e estimativas a partir de projetos semelhantes.

1.1 JUSTIFICATIVA

A evolução de tecnologias para as mais diversas áreas da engenharia é algo inevitável e que acontece a cada dia com maior velocidade. É preciso estar atento a todos estes acontecimentos, atualizando-se e aprimorando as técnicas de emprego de tais tecnologias.

Uma destas tecnologias é o uso de sistemas de barramentos blindados em ramais de energia anteriores à medição, sistema esse aplicado principalmente para edificações comerciais.

Este uso traz diversos benefícios, pois com o emprego dos barramentos blindados, tem-se um sistema mais compacto, versátil e confiável, além da diminuição das perdas por efeito Joule.

Imediatamente, o uso dos barramentos blindados se apresenta vantajoso, porém, se faz necessária uma análise mais aprofundada para avaliar se o custo (mais elevado) se mantém competitivo e a análise de curto-circuito em pontos fundamentais do sistema contribui para essa definição, visto que toda a seleção de dispositivos e equipamentos de proteção possuem o parâmetro de corrente de curto-circuito e, uma vez mal dimensionada, pode comprometer o custo e a técnica da utilização deste sistema.

Além disso, em razão da complexidade deste cálculo, o mesmo muitas vezes é desprezado pelos projetistas ou não se conhecem características elétricas destes barramentos que balizem de forma plausível as análises das correntes de curto-circuito da instalação.

Somando os itens anteriormente citados à falta de estudos de aplicação destes barramentos blindados com o foco nos valores de curto-circuito, identificou-se essa necessidade de contribuição, com um estudo direcionado aos projetistas, de modo a desmistificar os procedimentos para o cálculo destes parâmetros.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um estudo comparativo e qualitativo, do ponto de vista de curto circuito, entre sistemas prediais de distribuição de energia elétrica em ramais anteriores à medição, em Edificações de Múltiplas Unidades Consumidoras (EMUC), tipicamente prédios comerciais, com o uso de barramentos blindados versus sistemas tradicionais com cabos elétricos.

1.2.2 Objetivos Específicos

a) realizar os cálculos analíticos de curto-circuito com base nas normas ABNT, de modo a apresentar o roteiro para estudos desta natureza;

b) realizar a simulação computacional de curto-circuito dos barramentos blindados;

c) realizar análise dos impactos dessa seleção quanto ao dimensionamento dos sistemas de proteção, com vistas dos valores de curto-circuito encontrados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para a execução do trabalho proposto, é necessário o embasamento de alguns tópicos principais como: sistemas elétricos, correntes de curto circuito; características técnicas de barramentos blindados e cabos, padrões normativos a nível de Brasil e Mundo, além dos padrões aplicáveis das concessionárias de energia regionais.

Para fins de assimilação com o ensaio a ser realizado, neste trabalho será considerado que a geração (fonte) será a partir do transformador rebaixador de tensão (média para baixa tensão), desprezando todas as contribuições e variantes elétricas existentes antes deste ponto, como o sistema elétrico interligado, fluxos de potência, associação em paralelo de fontes, geradores, etc.

Em relação à carga, será considerada uma carga distribuída internamente à edificação, sendo simulada como uma impedância de fator de potência 0,92, de acordo com os limites estabelecidos pela legislação nacional;

2.1 TRANSFORMADOR

Um transformador obedece aos princípios de máquinas elétricas, possuindo algumas características básicas das quais são definidas as suas características elétricas vistas pelo sistema, tais como tensão primária e secundária, potência, impedância, número de fases, dentre outras características.

Para fins de estudo de curto circuito, destacam-se os seguintes parâmetros: Potência Elétrica [P], Tensão de Linha [VL] e Impedância [Z].

Por definição, potência elétrica é definida como a rapidez com que um trabalho é realizado, ou seja, é a medida do trabalho realizado por uma unidade de tempo. De forma prática, é obtida pela multiplicação entre a tensão aplicada ao sistema/circuito e a corrente elétrica do mesmo, definida pela equação abaixo (FITZGERALD, 1981):

$$P = VL I \quad [W] \quad (1)$$

onde:

VL: Tensão de linha aplicada;

I: Corrente do sistema.

Quanto à tensão de linha, sabe-se das características locais quanto ao nível de fornecimento de tensão. Sabe-se que existe uma variação da tensão nos pontos de entrega das concessionárias, em razão das variações de nível de carregamento da rede ao longo do dia, dentre outros fatores. De forma simplificada apenas, será utilizado esse parâmetro como uma grandeza fixa.

Em relação à impedância do transformador, a qual é definida como a medida da capacidade de um circuito/sistema de resistir ao fluxo de uma determinada corrente elétrica quando se aplica certa tensão elétrica em seus terminais (HAYT, 1990), tem-se regulamentado através da NBR 5440 os valores mínimos admitidos para cada transformador, de acordo com a sua capacidade, e estes valores são comumente expressos em valores percentuais em relação à potência do transformador.

A forma geral de expressão de uma impedância é:

$$Z = R + XL \quad [\Omega] \quad (2)$$

onde:

Z: Impedância [Ω]

R: Resistência Elétrica [Ω]

XL: Reatância Indutiva [Ω]

A tabela 1 apresenta os valores definidos como impedâncias mínimas de transformadores de distribuição conforme sua potência, utilizando da tensão primária máxima de 24,2kV, em razão do estudo de caso ter essa característica.

Tabela 1 – Dados característicos de transformadores trifásicos em óleo para instalação interior ou exterior – primário em estrela ou triângulo, e secundário em estrela – 60Hz

Potência do Transformador [kVA]	Perda em vazio [W]	Perda Cobre [W]	Impedância [%]
15	120	300	3.5
30	200	570	3.5
45	260	750	3.5
75	390	1200	3.5
112.5	520	1650	3.5
150	640	2050	3.5
225	900	2800	4.5
300	1120	3700	4.5
500	1700	6000	4.5
750	2000	8500	5.5
1000	3000	11000	5.5
1500	4000	16000	5.5

Fonte: Mamede Filho (2013).

A partir destas grandezas, pode-se apresentar a fórmula para a corrente de curto-circuito através do método KVA da NBR 5440 (ABNT, 2014), sendo possível dessa forma, obter-se a corrente de curto-circuito junto à fonte geradora (transformador):

$$I_{cc} = \frac{S}{V_L \sqrt{3} Z\%} \quad [A] \quad (3)$$

Onde:

I_{cc}: Corrente de Curto-Circuito;

S: Potência Aparente;

Z%: Impedância em percentual.

Nota-se que a partir da equação 3 pode-se definir que junto ao transformador as correntes de curto circuito são diretamente proporcionais à potência e inversamente proporcionais à tensão e à impedância.

2.2 TRANSMISSÃO

Os meios de transmissão da energia elétrica são basicamente realizados pela condução de corrente em metais de boa condutividade, porém, as formas, materiais, método de instalação, características físicas e químicas destes materiais são das mais diversas.

Características elétricas básicas dos transmissores dessa energia elétrica precisam ser referenciadas, como resistividade, condutividade, capacidade de condução de corrente, etc.

2.2.1 Resistividade

A resistência que um condutor oferece ao fluxo da corrente elétrica depende não apenas do tipo de materiais usados, mas do comprimento, da área de seção reta e da temperatura do condutor. Desconsiderando os efeitos da temperatura, a resistência é encontrada em uma relação direta com o comprimento do condutor e inversa com a área de seção reta. (MAMEDE FILHO, 2013).

A resistividade (ρ), ou resistência específica, depende do tipo de material condutor e é definida como a resistência por unidade de comprimento e área de seção reta do material. A Tabela 2 apresenta algumas resistividades de materiais mais comuns nas instalações elétricas:

Tabela 2 - Resistividades de alguns condutores elétricos

Material Condutor	Resistividade ($\Omega \cdot m$)
Alumínio	$2,83 \times 10^{-8}$
Cobre duro	$1,78 \times 10^{-8}$
Ouro	$2,45 \times 10^{-8}$
Prata	$1,64 \times 10^{-8}$

Fonte: Mamede Filho (2013).

A resistência elétrica R de um material está relacionada com a resistividade ρ de um material, com o comprimento do mesmo (l) e com a área do mesmo (A), de acordo com a equação 4:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad [\Omega] \quad (4)$$

2.2.2 Condutividade

Condutividade elétrica (σ) é o inverso da resistividade elétrica (ρ), ou seja, indica a facilidade com a qual um determinado material é capaz de conduzir uma corrente elétrica (BARTKOWIAK, 1999), e é expresso conforme equação 5:

$$\sigma = \frac{l}{\rho} \quad [\Omega^{-1}] \quad (5)$$

2.2.3 Critérios para o Dimensionamento de Condutores

A norma NBR 5410 / 2004 estabelece diversos os critérios e requisitos para o correto dimensionamento de condutores elétricos, sendo de suma importância os critérios de capacidade de condução de corrente, de queda de tensão e de capacidade de condução de corrente de curto-circuito por tempo limitado. Estes serão abordados de forma sucinta a seguir.

Este trabalho levará em consideração apenas condutores para fins de uso em baixa tensão, sendo estes dotados de isolamento em PVC para 750V, sem cobertura; dotados de isolamento de PVC ou EPR para 0,6/1,0kV, com capa de proteção em PVC ou ainda, dotados de isolamento de XLPE para 0,6/1kV, com capa de proteção em PVC.

2.2.3.1 Critérios de Capacidade de Condução de Corrente

Antes da direta seleção e cálculo da capacidade de condução de corrente de condutores, precisa-se ter em mente da necessidade de que toda a instalação deve ser dividida em vários circuitos, de modo a atender às condições de segurança, conservação de energia, funcionais, produção e manutenção. (MAMEDE FILHO, 2013).

Este critério consiste na determinação do valor de corrente máxima que irá percorrer o condutor, de modo a atender aos valores máximos de corrente elétrica prescritos na NBR 5410, não excedendo assim as temperaturas máximas de operação, como por exemplo 70°C para condutores com isolamento em PVC, e ainda,

de acordo com o método de instalação, obedecendo a corrente do circuito, seleccionar a seção mínima do condutor.

Deve-se ainda respeitar os critérios de seleção de seção mínimas dos condutores, conforme tabela a seguir:

Tabela 3 - Seções mínimas de condutores

Tipo de Instalação		Utilização do Circuito	Seção Mínima do Condutor – Material (mm ²)
Instalações Fixas em Geral	Cabos isolados	Circuitos de iluminação	1,5 – Cu 16 – Al
		Circuitos de força	2,5 – Cu 16 – Al
		Circuitos de sinalização e comando	0,5 Cu
	Condutores nus	Circuitos de força	10 – Cu 16 – Al
Circuitos de sinalização e controle		4 - Cu	
Ligações flexíveis feitas com cabos isolados		Para um equipamento específico	Como especificado na norma do equipamento
		Para qualquer outra aplicação	0,75 – Cu
		Circuitos a extrabaixa tensão para aplicações especiais	0,75 – Cu

Fonte: adaptado de Mamede Filho (2013).

Adota-se ainda critérios complementares de acordo com as características das instalações, devendo-se observar:

- a) se é um circuito terminal para ligação de motores;
- b) se é um circuito terminal para ligação de capacitores;
- c) fatores de correção de corrente:
 - temperatura ambiente;
 - resistividade térmica do solo;
 - agrupamento de circuitos;
- d) condutores em paralelo;

- e) determinação da seção dos condutores na presença de correntes harmônicas.

2.2.3.2 Critério do Limite de Queda de Tensão

Realizado o dimensionamento da seção do condutor pela capacidade de corrente de carga, faz-se necessário saber se esta seção também atende aos critérios de queda de tensão junto ao ponto terminal, de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 5410 / 2004 e citados em Mamede Filho (2013). A Tabela 4 apresenta os valores limite de queda de tensão de acordo com as características e início da instalação:

Tabela 4 - Valores limites admitidos para queda de tensão da tensão nominal

Item	Tipo da Instalação	Início da Instalação	Queda de Tensão (%)
a	Instalações alimentadas através de subestação própria	Terminais secundários do transformador	7%
b	Instalações alimentadas através de transformador da companhia distribuidora de energia elétrica	Terminais secundários do transformador de MT/BT, quando o ponto de entrega for aí localizado	7%
c	Instalações alimentadas através da rede secundária de distribuição	Ponto de Entrega	5%
d	Instalações alimentadas através de geração própria (grupo gerador)	Terminais do grupo gerador	7%

Fonte: adaptado de Mamede Filho (2013).

As seções mínimas dos condutores, levando em consideração os critérios de queda de tensão, podem ser obtidas, de modo simplificado a partir de equações (MAMEDE FILHO, 2013), sendo que para um circuito trifásico, a mesma é transcrita abaixo:

$$S_c = \frac{100 \times \sqrt{3} \times \rho \times \sum (L_c \times I_c)}{\Delta V_c \times V_{ff}} \quad [A] \quad (6)$$

Onde:

S_c : seção do condutor [mm^2];

ρ : resistividade do material condutor [Ωm];

L_c : comprimento do circuito [m];

I_c : corrente do circuito [A];

ΔV_c : queda de tensão máxima admitida em projeto [%];

V_{ff} : tensão entre fases [V].

2.2.3.3 Critério da Capacidade de Corrente de Curto Circuito

Com base na corrente de curto circuito, podem-se admitir dois critérios básicos para o dimensionamento da seção do condutor de fase, quais sejam:

- a) limitação da seção mínima do condutor para uma determinada corrente de curto circuito;
- b) limitação do comprimento máximo de um determinado circuito em função da corrente de curto-circuito fase e terra.

As limitações de seção mínima assim como os comprimentos máximos estabelecidos para determinados circuitos são de suma importância para que os dispositivos de proteção consigam sensibilizar a bobina de disparo magnético dos disjuntores, mantendo a instalação protegida e com a correta coordenação e seletividade dos dispositivos de proteção.

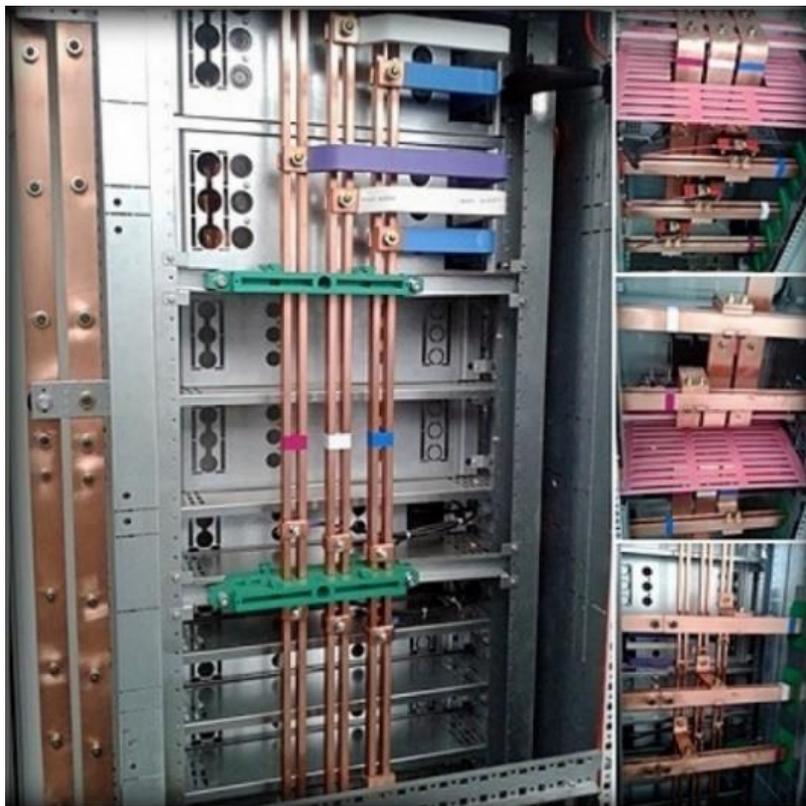
2.2.4 Barramentos Blindados

Os barramentos são elementos de seção transversal normalmente de formato retangular, instalados no interior de quadros, em subestações abrigadas, blindadas e ao tempo. Têm por objetivo, assim como os cabos, conduzir as correntes elétricas desde a fonte geradora até os pontos de consumo. (MAMEDE FILHO, 2013). Estes são divididos em dois principais grupos: Barramentos de fabricação específica e Barramentos Pré-Fabricados.

Os barramentos de fabricação específica são construídos em barras chatas, circulares ou de segmento contínuo. Estes são utilizadas em painéis elétricos, subestações abrigadas e ao tempo, e são construídos especificamente para a

atividade fim. (MAMEDE FILHO, 2013). A figura 1 ilustra uma instalação de um painel elétrico, que conta com barramentos de fabricação específica, ou seja, desenvolvidos especialmente para este painel.

Figura 1 - Exemplo de barramento de fabricação específica

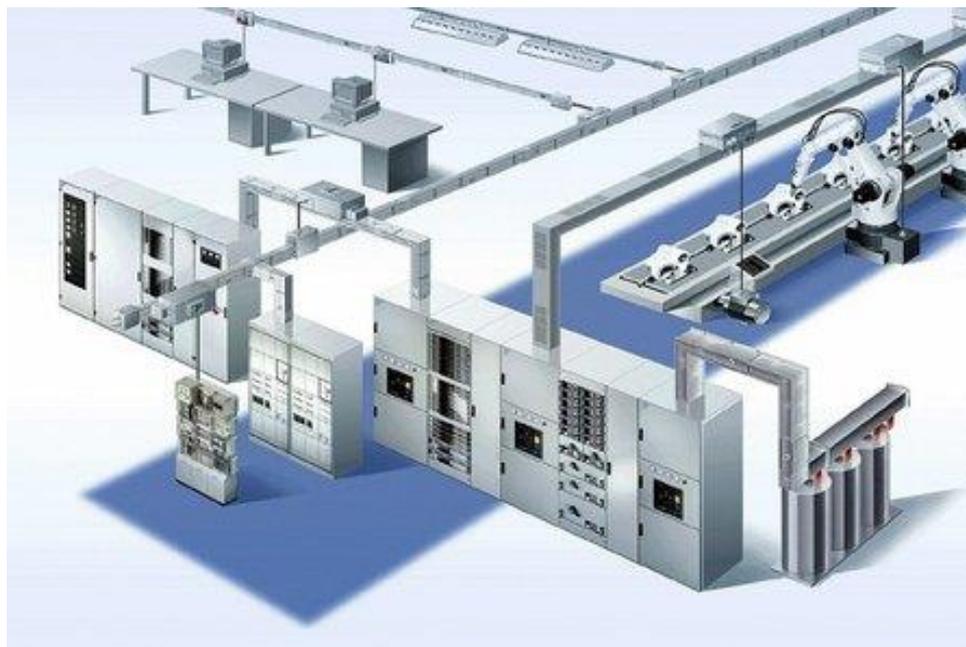


Fonte: Adaptado pelo autor de Megabarre (2018).

O estudo abordado neste trabalho irá tratar dos barramentos pré-fabricados. Estes são fabricados em cobre ou alumínio, sendo as barras suportadas por isoladores adequados, contidos em um invólucro rígido.

Estes barramentos, também chamados comumente de *busway's*, são fabricados em tamanhos padronizados e possuem várias conexões e acessórios, como curvas, transposições, conexões de painéis, caixas de derivação, dentre outras. A Figura 2 apresenta uma típica instalação elétrica com o uso de barramentos blindados. Estes podem interligar painéis, transformadores, motores, linhas de iluminação, estações de trabalho, dentre outros sistemas elétricos.

Figura 2 - Representação de sistema com barramentos blindados



Fonte: Adaptado pelo autor de Mecatel Barramentos (2018).

Estes barramentos podem ser ventilados ou não, dependendo de sua utilização. São sempre empregados em instalações abrigadas aparentes.

Devido ao seu custo maior que os condutores convencionais, são aplicados em circuitos com alta corrente de carga e onde se requer flexibilidade nas instalações. (MAMEDE FILHO, 2013). Outra vantagem deste sistema é que o mesmo apresenta uma baixa impedância e, conseqüentemente, uma baixa queda de tensão.

2.3 CURTO CIRCUITO

O cálculo e conseqüente definição dos valores de curto circuito das instalações elétricas é item fundamental em um projeto, necessário ao estudo de proteção, coordenação e seletividade dos dispositivos de proteção. Para isso, é fundamental que se tenha conhecimento das impedâncias dos elementos condutores desde o ponto de falha até a fonte geradora.

As correntes de curto-circuito adquirem valores de alta intensidade, porém com durações limitadas a décimos de segundo. (MAMEDE FILHO, 2013).

A causa mais comum para um curto-circuito é a perda de isolamento elétrico de algum elemento energizado ou toque acidental de partes vivas, seja entre elemento

condutor e a terra, ou entre condutores (curto circuito fase-fase ou trifásico). Quando destes incidentes, as correntes elétricas chegam de 10 a 100 vezes a corrente nominal no ponto de defeito da instalação e a intensidade desta depende do ponto de ocorrência da falha. (KINDERMAN, 1992).

Os prejuízos técnicos decorrentes de um curto circuito não se limitam a queima de equipamentos ou componentes elétricos, mas em razão da alta sollicitação mecânica quando do evento, podem gerar rompimento de apoios e deformações na estrutura de quadros, barramentos blindados e outros equipamentos.

As correntes de curto circuito ao longo do tempo de permanência assumem diversas formas, onde é possível a ocorrência de duas configurações (MAMEDE FILHO, 2013):

- a) corrente de curto-circuito simétrica, que é aquela onde a componente senoidal é simétrica em relação ao eixo do tempo. Esta geralmente é a forma de onda apresentada para correntes de falta de longa duração, e, portanto, são mais utilizadas para análises de efeitos térmicos nos condutores e dispositivos.
- b) corrente de curto-circuito assimétrica, que é aquela em que o componente senoidal da corrente se forma de maneira assimétrica, sendo ainda subdividida em três formas:
 - Parcialmente assimétrica;
 - Totalmente assimétrica;
 - Inicialmente assimétrica e posteriormente simétrica:

As análises de curto circuito têm características e abordagens de cálculos distintas para dois grupos de situações: correntes de falta ocorridas próximas da fonte geradora e correntes de falta distantes dos terminais do gerador.

No caso de curto-circuitos ocorridos distante da fonte, as impedâncias do gerador são desconsideradas, visto que a impedância da linha predomina, eliminando a influência da primeira sobre o valor de curto circuito.

A corrente de curto-circuito assimétrica apresenta dois componentes na sua formação, ou seja:

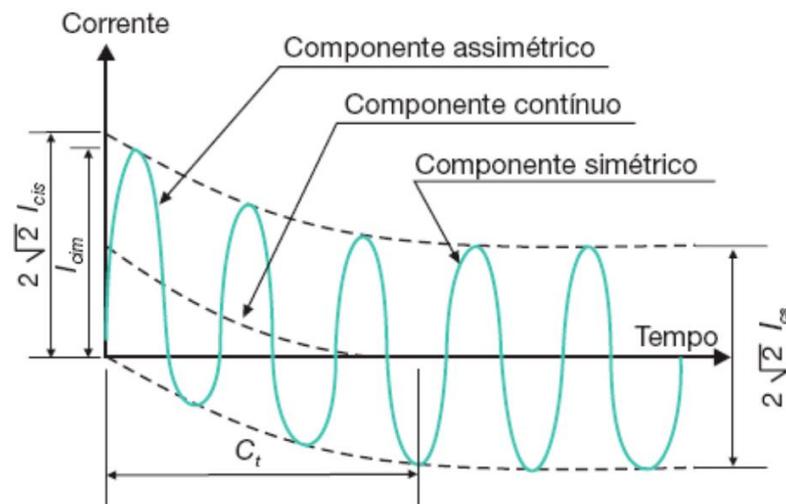
- a) *componente simétrico*: parte simétrica da corrente de curto-circuito;

b) *componente contínuo*: parte da corrente de curto-circuito de natureza contínua.

O componente contínuo tem valor decrescente e é formado em razão da propriedade característica do fluxo magnético que não pode variar bruscamente, fazendo com que as correntes de curto-circuito nas três fases se iniciem a partir do valor zero. (MAMEDE FILHO, 2013).

A soma, em qualquer instante, destes dois componentes, definirá o valor da I_{cc} (corrente de curto-circuito) assimétrica. A figura 3 ilustra os componentes de uma onda de curto-circuito.

Figura 3 - Componentes de uma corrente de curto-circuito



Fonte: Mamede Filho (2013).

Com base nesta figura, pode-se expressar os conceitos fundamentais que envolvem a questão:

- corrente alternada de curto-circuito simétrica*: é a componente alternada da corrente de curto-circuito que mantém em todo o período uma posição simétrica em relação ao eixo do tempo;
- corrente eficaz de curto-circuito simétrica permanente (I_{cs})*: é a corrente de curto-circuito simétrica, dada em seu valor eficaz, que persiste no sistema após decorridos os fenômenos transitórios;
- corrente eficaz inicial de curto-circuito simétrica (I_{cis})*: é a corrente, em seu valor eficaz, no instante do defeito. O gráfico da figura 3 esclarece

a obtenção do valor de I_{cis} em seus vários aspectos. Quando o curto-circuito ocorre longe da fonte de suprimento, o valor da corrente eficaz inicial de curto-circuito simétrica (I_{cis}) é igual ao valor da corrente eficaz de curto-circuito simétrica (I_{cs});

- d) *impulso da corrente de curto-circuito simétrica (I_{cim})*: é o valor máximo da corrente de defeito dado em seu valor instantâneo, e que varia conforme o momento da ocorrência do fenômeno;
- e) *potência de curto-circuito simétrica (P_{cs})*: é a potência correspondente ao produto de tensão de fase pela corrente simétrica de curto-circuito. Se o defeito for trifásico, aplica-se a este o fator $\sqrt{3}$. Observa-se que a tensão no momento do defeito é nula, porém a potência resultante é numericamente igual à que se definiu.

A formulação matemática que representa o comportamento da forma de onda da Figura 3, em qualquer tempo, é indicada na equação 07:

$$I_{cc(t)} = \sqrt{2} \times I_{cs} \times [\sin(\omega t + \beta - \theta) - e^{-\frac{t}{ct}} \times \sin(\beta - \theta)] \quad (7)$$

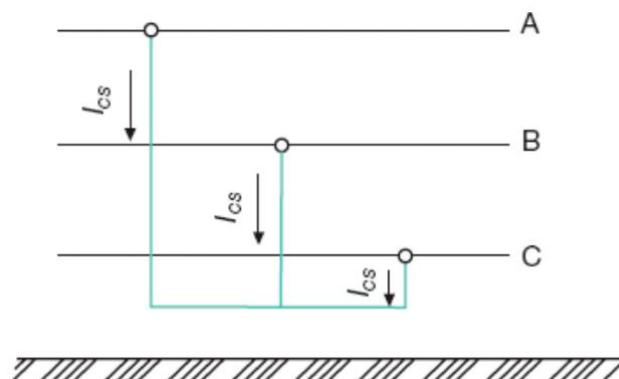
2.3.1 Tipos de Curto Circuito

Os defeitos nas instalações elétricas podem ocorrer em uma das seguintes formas:

2.3.1.1 Curto-circuito trifásico

Ocorre quando as tensões nas três fases se anulam no ponto de defeito, conforme figura 4.

Figura 4 - Representação de um curto-circuito trifásico



Fonte: Mamede Filho (2013).

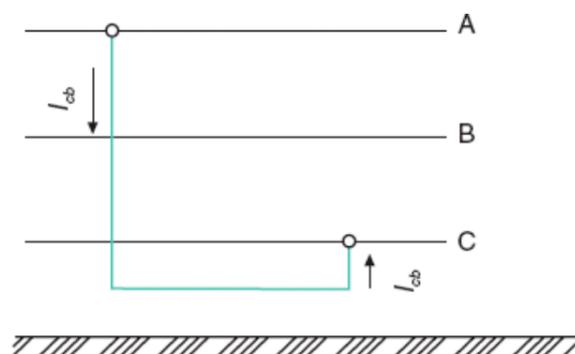
Por serem geralmente de maior valor, as correntes de curto-circuito trifásica são de fundamental importância devido à larga faixa de aplicação. Seu emprego se faz sentir nos seguintes casos:

- ajustes dos dispositivos de proteção contra sobrecorrente;
- capacidade de interrupção dos disjuntores;
- capacidade térmica dos cabos e equipamentos;
- capacidade dinâmica dos equipamentos;
- capacidade dinâmica dos barramentos coletores;

2.3.1.2 Curto-circuito bifásico

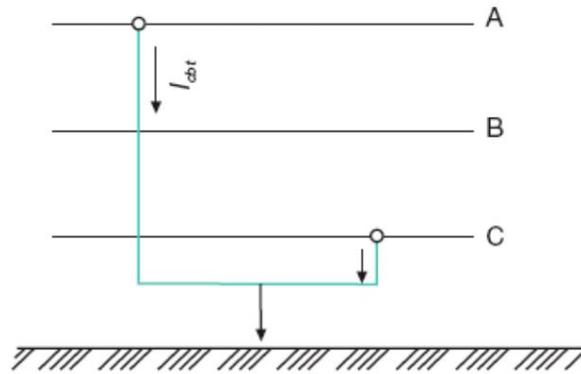
Estes podem ocorrer de duas formas: quando há apenas o contato entre duas fases (Figura 5), e, quando além das duas fases, há o contato com a terra (Figura 6):

Figura 5 - Curto-circuito bifásico



Fonte: Mamede Filho (2013).

Figura 6 - Curto-circuito bifásico com terra



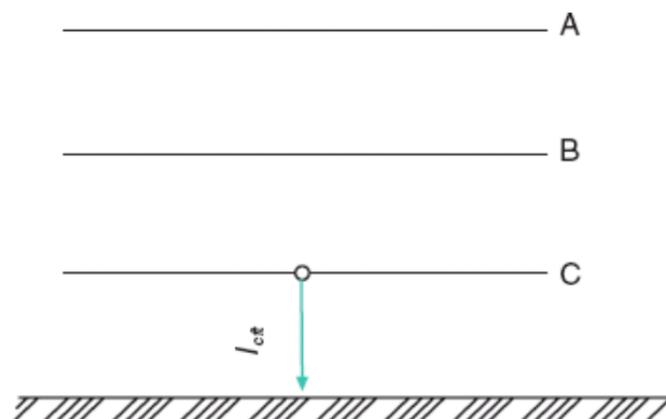
Fonte: Mamede Filho (2013).

2.3.1.3 Curto-circuito fase-terra

Neste caso, como o próprio nome diz, refere-se ao contato entre um condutor de fase e a terra.

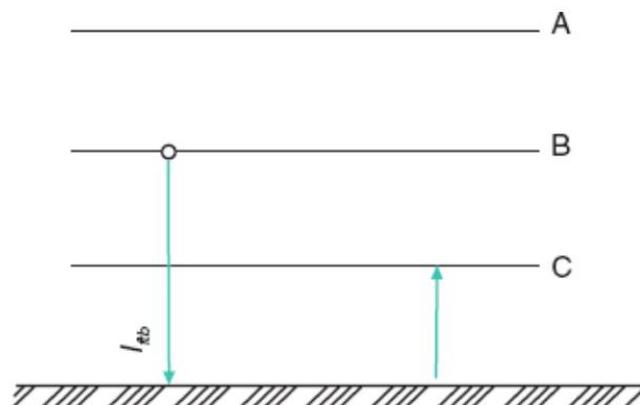
De modo similar ao curto-circuito bifásico, o defeito monopolar pode ocorrer em duas situações diversas: na primeira há somente o contato entre o condutor fase e terra, conforme figura 7, e na segunda, há o contato simultâneo entre um condutor fase e terra, e outro condutor fase e a terra como é ilustrado na figura 8. Diferente do curto-circuito bifásico, neste caso não há o contato direto entre dois condutores de fase, ou seja, haverá a impedância de contato à terra para o caso da figura 8.

Figura 7 - Curto-circuito fase-terra



Fonte: Mamede Filho (2013).

Figura 8 - Curto-circuito com contato simultâneo



Fonte: Mamede Filho (2013).

As correntes de curto-circuito monopulares são empregadas, segundo Kindermann (1992), para:

- a) ajuste dos valores mínimos dos dispositivos de proteção contra sobrecorrentes;
- b) seção mínima do condutor de uma malha de terra;
- c) limitação das tensões de passo e de toque;
- d) dimensionamento de resistor de aterramento.

As correntes de curto-circuito monopulares costumam ser maiores do que as correntes de curto-circuito trifásicas nos terminais do transformador da subestação, na condição de falta máxima.

Quando as impedâncias do sistema são muito pequenas, as correntes de curto-circuito de forma geral assumem valores muito elevados, capazes de danificar térmica e mecanicamente os equipamentos da instalação, caso o seu dimensionamento não seja compatível. Pode-se até não se obter no mercado equipamentos com capacidade suficiente para suportar determinadas correntes de curto-circuito. Neste caso, o projetista deve buscar meios para reduzir o valor dessas correntes, sendo possível uma das seguintes aplicações (MAMEDE FILHO, 2013):

- a) dimensionar os transformadores de força com impedância percentual elevada (transformadores normalmente fora dos padrões normalizados e fabricados sob encomenda); esta alternativa tem boa aplicabilidade

para instalações de consumidores únicos, cuja responsabilidade da subestação é do próprio consumidor, sendo a responsabilidade da concessionária limitada até o ponto de entrega. Em edificações de múltiplas unidades consumidoras, a subestação é encampada pela concessionária, e dessa forma, instala-se transformadores de potência e impedâncias padrão;

- b) dividir a carga da instalação em circuitos parciais alimentados através de vários transformadores (subestações primárias);
- c) inserir uma reatância série no circuito principal ou no neutro do transformador quando se tratar de correntes monophasadas elevadas. Esta medida, porém, acarreta uma redução no fator de potência, sendo necessária a compensação com um banco de capacitores, de modo a elevar este valor dentro dos padrões estabelecidos pelo regimento a nível nacional.

Dentre as informações obtidas através do conhecimento dos valores de curto-circuito da instalação, deve-se registrar também a análise das solicitações eletrodinâmicas das correntes de curto-circuito, além das solicitações térmicas destas mesmas correntes, sendo que a primeira provoca danos mecânicos nos barramentos, isoladores, suportes e até nos próprios quadros elétricos, enquanto que a segunda provoca danos nos barramentos, cabos, chave e outros equipamentos condutores.

Os curto-circuitos em sistemas elétricos geram desbalanceamentos, dificultando os cálculos e as simulações da ocorrência. Historicamente, por não existirem ferramentas analíticas adequadas, inicialmente, os estudos e análises de comportamento dos sistemas às diversas solicitações e ocorrências eram feitas em réplicas miniaturizadas, às vezes construídas no próprio pátio das empresas, o que trazia muitas dificuldades, principalmente pela quantidade enorme de variações possíveis tanto de falta quanto dos sistemas elétricos. (KINDERMANN, 1997).

Em 1915, a partir de ideias iniciais de colegas engenheiros, o Dr. C. L. Fortescue conseguiu formular uma ferramenta analítica muito poderosa, propondo, de maneira genérica, a decomposição de qualquer sistema de “n” fases desequilibradas nas suas respectivas componentes simétricas equilibradas, sendo posteriormente aplicada para os sistemas de potência.

Para sistemas elétricos trifásicos, a decomposição do sistema se dá em três componentes:

- a) sistema de sequência positiva;
- b) sistema de sequência negativa;
- c) sistema de sequência zero.

Sendo assim, a partir do sistema desequilibrado inicial, obtém-se os sistemas equilibrados citados acima, de forma segregada, com isso, facilitando o processo de cálculo com o uso de fórmulas que se aplicam à sistemas equilibrados. Ao final deste processo, novamente se recompõe o sistema original, porém, com os parâmetros desejados já calculados e conhecidos.

2.4 SISTEMA DE BASE E VALORES POR UNIDADE (PU)

É comum nas análises de sistemas elétricos e de outras disciplinas a utilização de artifícios matemáticos que muito simplificam a resolução dos cálculos, o que não é diferente quando do cálculo das correntes de curto-circuito, os quais são abordados nos tópicos a seguir.

2.4.1 Sistema de Base

Quando num determinado sistema há diversos valores tomados em bases diferentes é necessário estabelecer uma base única e transformar todos os valores considerados nesta base para que se possa trabalhar adequadamente com os dados do sistema.

Um exemplo de sistema de base é o sistema percentual ou por cento, os quais são tomados os valores considerando a base 100. Caso semelhante acontece com diversos elementos de um sistema elétrico. Costuma-se expressar a impedância do transformador em $Z\%$ (base 100) de sua potência nominal em kVA. Também as impedâncias dos motores elétricos são definidas em $Z\%$ na base da potência nominal do motor, em cv.

Já os condutores elétricos apresentam impedâncias em valores ôhmicos. Sendo assim, fica evidente essa necessidade de utilização dos parâmetros em base única para realização das operações elementares de um circuito.

2.4.2 Valores por Unidade (pu)

É um dos vários métodos de cálculo conhecidos na prática que procuram simplificar a resolução das questões relativas à determinação das correntes de curto-circuito.

O valor de uma determinada grandeza *por unidade* é definido como a relação entre esta grandeza e o valor adotado arbitrariamente como sua base, sendo expresso em valor decimal. O valor em *pu* pode também ser expresso em percentagem que corresponde a 100 vezes o valor encontrado. (MAMEDE FILHO, 2013).

Os valores de tensão, corrente, potência e impedância de um circuito, são, normalmente, convertidos em percentagem, ou por unidade – *pu*. As impedâncias dos transformadores, em geral dadas em forma percentual, são da mesma maneira convertidas em *pu*. As impedâncias dos condutores, conhecidas normalmente em ôhms/m, são transformadas também em *pu*, todas referidas, porém, a uma mesma base. O sistema *pu* introduz métodos convenientes de expressar as grandezas elétricas mencionadas numa mesma base. (KINDERMANN, 1997).

Uma das vantagens mais significativas para se adotar a prática do sistema *por unidade* está relacionada à presença de transformadores no circuito. Neste caso, as impedâncias no primário e secundário, que em valores ôhmicos estão relacionadas ao número de espiras, são expressas por um valor no sistema por unidade.

Comumente, arbitram-se como valores de base a potência e a tensão. As outras grandezas variam em função destas. Tomando-se como base a potência P_b em kVA e a tensão V_b em kV, tem-se:

a) *Corrente de base:*

$$I_b = \frac{P_b}{\sqrt{3} V_b} \quad [A] \quad (8)$$

b) *Impedância de base:*

$$Z_b = \frac{1000 V_b^2}{P_b} \quad [\Omega] \quad (9)$$

c) *Impedância por unidade ou pu:*

$$Z_{pu} = \frac{Z_{c\Omega}}{Z_b} \quad [pu] \quad (10)$$

Quando o valor de uma grandeza é dado numa determinada base (1) e se deseja conhecer seu valor numa outra base (2), podem-se aplicar as seguintes expressões:

d) *Tensão:*

$$V_{u2} = V_{u1} \frac{V_1}{V_2} \quad [pu] \quad (11)$$

Onde:

V_{u2} : Tensão em *pu* na base V_2 ;

V_{u1} : Tensão em *pu* na base V_1 .

e) *Corrente:*

$$I_{u2} = I_{u1} \frac{V_1}{V_2} \frac{P_1}{P_2} \quad [pu] \quad (12)$$

Onde:

I_{u2} : corrente em *pu* nas bases V_2 e P_2 ;

I_{u1} : corrente em *pu* nas bases V_1 e P_1 .

f) *Potência:*

$$P_{u2} = P_{u1} \frac{P_1}{P_2} \quad [pu] \quad (13)$$

Onde:

P_{u2} : potência em *pu* na base P_2 ;

P_{u1} : potência em *pu* na base P_1 .

g) *Impedâncias:*

$$Z_{u2} = Z_{u1} \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \frac{P_2}{P_1} \quad [pu] \quad (14)$$

Onde:

Z_{u2} : impedância em pu nas bases V_2 e P_2 ;

z_{u1} : impedância em pu nas bases V_1 e P_1 .

2.5 DETERMINAÇÃO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

As correntes de curto circuito devem ser determinadas em todos os pontos onde se requer a instalação de equipamentos ou dispositivos de proteção. Numa instalação predial ou industrial padrão, podem-se estabelecer previamente alguns pontos de importância fundamental:

- a) ponto de entrega de energia, cujo valor é normalmente fornecido pela companhia supridora;
- b) barramento do Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT), devido à aplicação dos equipamentos e dispositivos de manobra e proteção do circuito geral e dos circuitos de distribuição;
- c) barramento dos quadros de distribuição ou QDLs, devido ao dimensionamento dos disjuntores, normalmente selecionados para esta aplicação.

Cabe ainda análise dos barramentos de Centros de Controle de Motores (CCMs) e dos terminais de motores, quando aplicável. Estes dados são importantes para aplicações industriais. (MAMEDE FILHO, 2013). Como o enfoque desta análise é para aplicações prediais, estes não serão considerados neste momento.

2.5.1. Impedância do Sistema

No cálculo das correntes de defeito devem ser representados os principais elementos dos circuitos através de suas impedâncias. No entanto, as impedâncias de alguns desses elementos podem ser desprezadas, dependendo de algumas

considerações. É importante lembrar que, quanto menor é a tensão do sistema, mais necessário se faz considerar um maior número de impedâncias, dada a influência que poderia exercer no valor final da corrente. São elas:

2.5.1.1 Impedância reduzida do sistema

É aquela que representa todas as impedâncias desde a fonte de geração até o ponto de entrega de energia à unidade consumidora, isto é, compreendendo as impedâncias da geração, do sistema de transmissão, do sistema de subtransmissão e do sistema de distribuição.

O valor da impedância reduzida do sistema deve ser fornecido ao projetista da instalação pela área técnica da companhia concessionária de energia elétrica local. Dependendo da concessionária, pode ser fornecida em pu ou em ohms.

Muitas vezes, é fornecido o valor da corrente de curto-circuito no ponto de entrega de energia. Quando ainda os valores anteriores são desconhecidos, toma-se a capacidade de ruptura mínima do disjuntor geral de proteção de entrada, geralmente estabelecida por norma de fornecimento da concessionária e de conhecimento geral. Este último é o valor mais conservativo que se pode tomar como base para determinar a impedância reduzida do sistema. (MAMEDE FILHO, 2013). Na maioria das aplicações, a impedância do sistema de suprimento é muito pequena em relação ao valor da impedância da rede predial ou industrial em estudo.

2.5.1.2 Impedância do sistema primário (tensões acima de 2.400V)

É aquela que a partir do ponto de entrega de energia representa as impedâncias dos componentes conectados na tensão superior a 2.400V, isto é:

- transformadores de força;
- circuito de condutores nus ou isolados de grande comprimento;
- reatores ou limitadores, se for o caso.

2.5.1.3 Impedância do sistema secundário

É aquela que a partir do transformador abaixador representa as impedâncias de todos os componentes dos circuitos de tensão:

- circuitos de condutores nus ou isolados de grande comprimento;
- reatores limitadores, se for o caso;
- barramentos de painéis de comando de comprimento superior a 4m;
- impedância dos motores quando se levar em consideração a sua contribuição.

2.5.2 Metodologia e Sequência de Cálculo

Os processos de cálculo utilizados neste trabalho são de fácil aplicação no desenvolvimento de um projeto predial ou industrial. Os resultados são valores aproximados dos métodos mais sofisticados, porém a precisão obtida satisfaz plenamente aos propósitos que se destinam, sendo os cálculos apresentados a seguir (MAMEDE FILHO, 2013):

2.5.2.1 Impedância Reduzida do Sistema (Z_{us})

a) Resistência (R_{us}):

Como a resistência do sistema de suprimento é muito pequena relativamente ao valor da reatância, na prática é comum desprezar o seu efeito, isto é:

$$R_{us} \cong 0$$

b) Reatância (X_{us}):

Considerando-se que a concessionária forneça a corrente de curto-circuito (I_{cp}) no ponto de entrega, tem-se:

$$P_{cc} = \sqrt{3} V_{np} I_{cp} \quad [kVA] \quad (15)$$

Onde:

P_{cc} : potência de curto-circuito no ponto de entrega, em kVA;

V_{np} : tensão nominal primária no ponto de entrega, em kV;

I_{cp} : corrente de curto-circuito simétrica, em A.

O valor da reatância, em pu, é dado pela equação:

$$X_{us} = \frac{P_b}{P_{cc}} \quad [pu] \quad (16)$$

$$Z_{us} = R_{us} + jX_{us} \quad [pu] \quad (17)$$

2.5.2.2 Impedância do(s) Transformador(es) da Subestação (Zt)

É necessário conhecer:

- potência nominal P_{nt} dada em kVA;
- impedância percentual Z_{pt} ;
- perdas ôhmicas no cobre P_{cu} , em W;
- tensão nominal V_{nt} , em KV.

a) *Resistência (R_{ut}):*

Inicialmente determina-se a queda de tensão reativa percentual, ou seja:

$$R_{pt} = \frac{P_{cu}}{10 P_{nt}} \quad [\%] \quad (18)$$

Então, R_{ut} será determinada da seguinte forma:

$$R_{ut} = R_{pt} \frac{P_b}{P_{nt}} \left(\frac{V_{nt}}{V_b} \right)^2 \quad [pu] \quad (19)$$

b) *Reatância (X_{ut}):*

A impedância unitária tem o valor de:

$$Z_{ut} = Z_{pt} \frac{P_b}{P_{nt}} \left(\frac{V_{nt}}{V_b} \right)^2 \quad [pu] \quad (20)$$

A reatância unitária será:

$$X_{ut} = \sqrt{Z_{ut}^2 + R_{ut}^2} \quad [pu] \quad (21)$$

$$Z_{ut} = R_{ut} + jX_{ut} \quad [pu] \quad (22)$$

2.5.2.3 Impedância do Circuito que conecta o Trafo ao QGBT

a) *Resistência* (R_{uc1}):

$$R_{c1\Omega} = \frac{R_{u\Omega} L_{c1}}{1000 N_{c1}} \quad [\Omega] \quad (23)$$

$$R_{uc1} = R_{c1\Omega} \frac{P_b}{1000 V_b^2} \quad [pu] \quad (24)$$

Onde:

$R_{u\Omega}$: resistência do condutor de sequência positiva, em m Ω /m;

L_{c1} : comprimento do circuito, medido entre os terminais do transformador e o ponto de conexão com o barramento, dado em m;

N_{c1} : número de condutores por fase do circuito mencionado.

b) *Reatância* (X_{uc1}):

A reatância do cabo é:

$$X_{c1\Omega} = \frac{X_{u\Omega} L_{c1}}{1000 N_{c1}} \quad [\Omega] \quad (25)$$

$$X_{uc1} = X_{c1\Omega} \frac{P_b}{1000 V_b^2} \quad [pu] \quad (26)$$

Onde:

$X_{u\Omega}$: reatância de sequência positiva do condutor fase, em m Ω /m

Quando existem dois ou mais transformadores ligados em paralelo, deve-se calcular a impedância série de cada transformador com o circuito que liga ao QGBT, determinando-se em seguida, a impedância resultante através do paralelismo destas.

Para transformadores de impedâncias iguais e circuitos com condutores de mesma seção e comprimento, a impedância é dada por:

$$Z_{c1\Omega} = \frac{Z_{1cir}}{N_{trp}} \quad [\Omega \text{ ou } pu] \quad (27)$$

Onde:

Z_{1cir} : impedância do circuito, compreendendo o transformador e condutores, em Ω ou pu ;

N_{trp} : número de transformadores em paralelo;

2.5.2.4 Impedância do Barramento do QGBT (Z_{ub1})

a) *Resistência* (R_{ub1}):

$$R_{b1\Omega} = \frac{R_{u\Omega} L_{b1}}{1000 N_{b1}} \quad [\Omega] \quad (28)$$

Onde:

$R_{u\Omega}$: resistência ôhmica da barra, em $m\Omega/m$;

L_b : comprimento da barra, em m;

N_{c1} : número de barras em paralelo.

A resistência, em pu , é dada por:

$$R_{ub1} = R_{b1\Omega} \frac{P_b}{1000 V_b^2} \quad [pu] \quad (29)$$

b) *Reatância* (X_{ub1}):

$$X_{b1\Omega} = \frac{X_{u\Omega} L_{b1}}{1000 N_{b1}} \quad [\Omega] \quad (30)$$

A reatância, em pu , é dada por:

$$X_{ub1} = X_{b1\Omega} \frac{P_b}{1000 V_b^2} \quad [pu] \quad (31)$$

$$Z_{ub1} = R_{ub1} + jX_{ub1} \quad [pu] \quad (32)$$

2.5.2.5 Impedância do Circuito que conecta o QGBT aos QDLs

Os valores da resistência e reatância, em pu, respectivamente iguais a R_{uc2} e X_{uc2} , são calculados à semelhança de R_{uc1} e X_{uc1} , descritos no tópico 2.5.2.3.

2.5.2.6 Corrente Simétrica de Curto-Circuito Trifásico

Para a determinação das correntes de curto-circuito em qualquer ponto do sistema, procede-se à soma vetorial de todas as impedâncias calculadas até o ponto desejado e aplica-se a equação 31, ou seja:

$$Z_{atot} = \sum_{i=1}^{i=n} (R_{ui} + jX_{ui}) \quad [pu] \quad (33)$$

$R_{ui} + jX_{ui}$ são, genericamente, a resistência e a reatância unitárias de cada impedância do sistema até o ponto onde se pretende determinar os valores de curto-circuito.

A corrente de base vale:

$$I_b = \frac{P_b}{\sqrt{3} V_b} \quad [A] \quad (34)$$

A corrente de curto-circuito simétrica, valor eficaz, então é dada por:

$$I_{cs} = \frac{I_b}{1000 Z_{tot}} \quad [kA] \quad (35)$$

Quando pretende-se obter simplificada a corrente de curto-circuito simétrica nos terminais do transformador, basta aplicar a equação 35:

$$I_{cst} = \frac{I_n}{Z_{pt\%}} \times 100 \quad [A] \quad (36)$$

Onde:

I_n : corrente nominal do transformador, em A;
 $Z_{pt\%}$: impedância percentual do transformador.

Este valor é aproximado, pois nele não está computada a impedância reduzida do sistema de suprimento.

2.5.2.7 Corrente Assimétrica de Curto-Circuito Trifásico

$$I_{ca} = F_a \times I_{cs} \quad [A] \quad (37)$$

Onde:

F_a : fator de assimetria

2.5.2.8 Impulso da Corrente de Curto-Circuito

$$I_{cim} = \sqrt{2} \times I_{ca} \quad [kA] \quad (38)$$

2.5.2.9 Corrente Bifásica de Curto-Circuito

$$I_{cb} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_{cs} \quad [kA] \quad (39)$$

Seguindo este roteiro, com base na bibliografia de Mamede Filho (2013), obtém-se os valores de curto-circuito em todos os pontos da instalação.

3 METODOLOGIA

No referencial teórico foram apresentados o embasamento bibliográfico e a metodologia de cálculo para obtenção de valores de curto-circuito em uma instalação elétrica. Com isso, é possível criar um elo com o objetivo deste trabalho que é realizar uma análise do ponto de vista de um curto-circuito em instalações prediais com centros de medição descentralizados, comparando soluções com o uso tradicional por cabos elétricos e sistemas com barramentos blindados.

3.1 FLUXOGRAMA DA ANÁLISE PROPOSTA, VALIDAÇÃO E ANÁLISES

A figura 9 apresenta um fluxograma das etapas desta análise, permitindo que o procedimento seja realizado em qualquer sistema, com base na fundamentação teórica apresentada neste trabalho.

O projeto inicia com a seleção de uma instalação padrão, que servirá de referência para a análise comparativa entre o cálculo indicado no procedimento indicado em 2.5.2 e a análise por software.

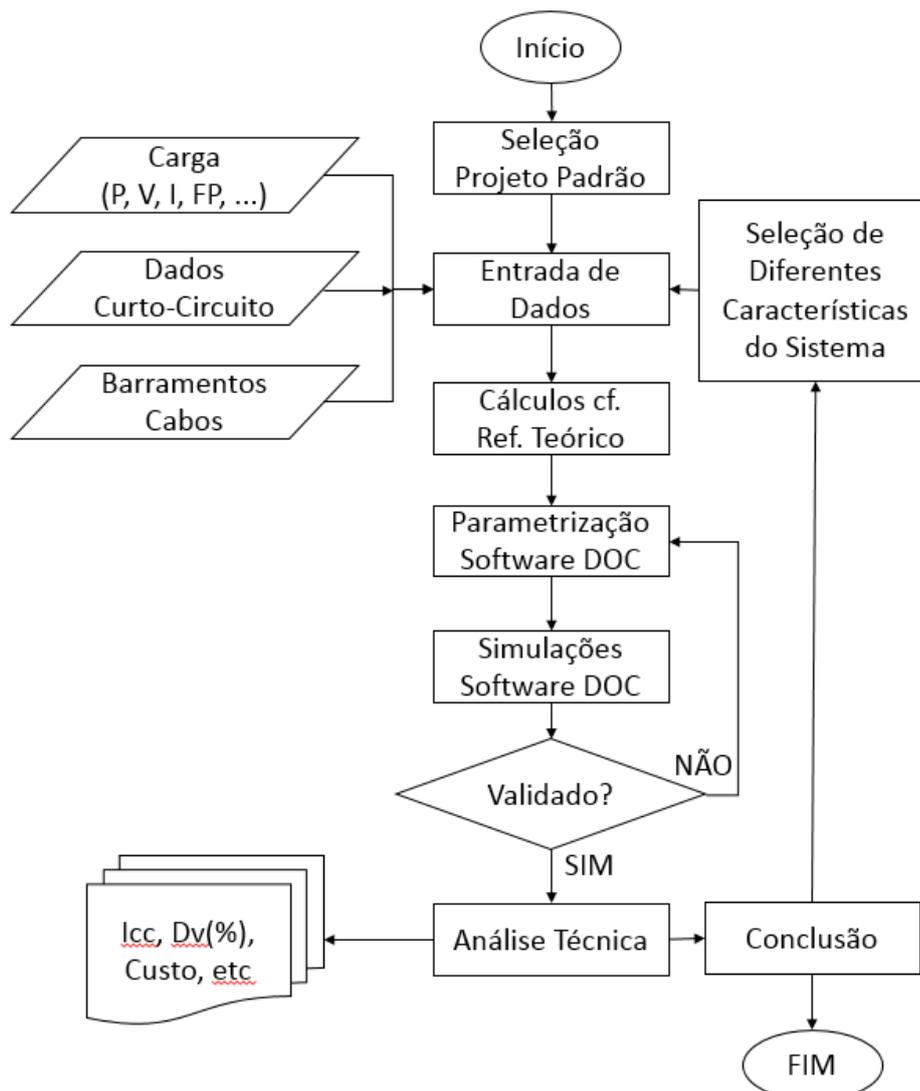
Dentre os dados de entrada do sistema, destacam-se as características da carga (Potência, Tensão, Corrente, Fator de Potência), dados de curto-circuito a montante do circuito em análise, dados dos circuitos de alimentação, ou seja, cabos e barramentos, considerando então, comprimentos, reatâncias, resistências, dentre outros dados.

Realiza-se então os procedimentos matemáticos citados em 2.5.2 e tem-se os valores de curto-circuito dos pontos desejados.

Será utilizado um software de dimensionamento de circuitos, da fabricante de dispositivos elétricos ABB (empresa multinacional italiana), que utiliza como base as normas internacionais para a realização dos diversos cálculos envolvidos.

As mesmas informações utilizadas para o cálculo *manual* de *I_{cc}* serão parametrizadas também no software, e então, realizada a simulação dos valores de curto-circuito.

Figura 9 - Fluxograma de análise do sistema elétrico



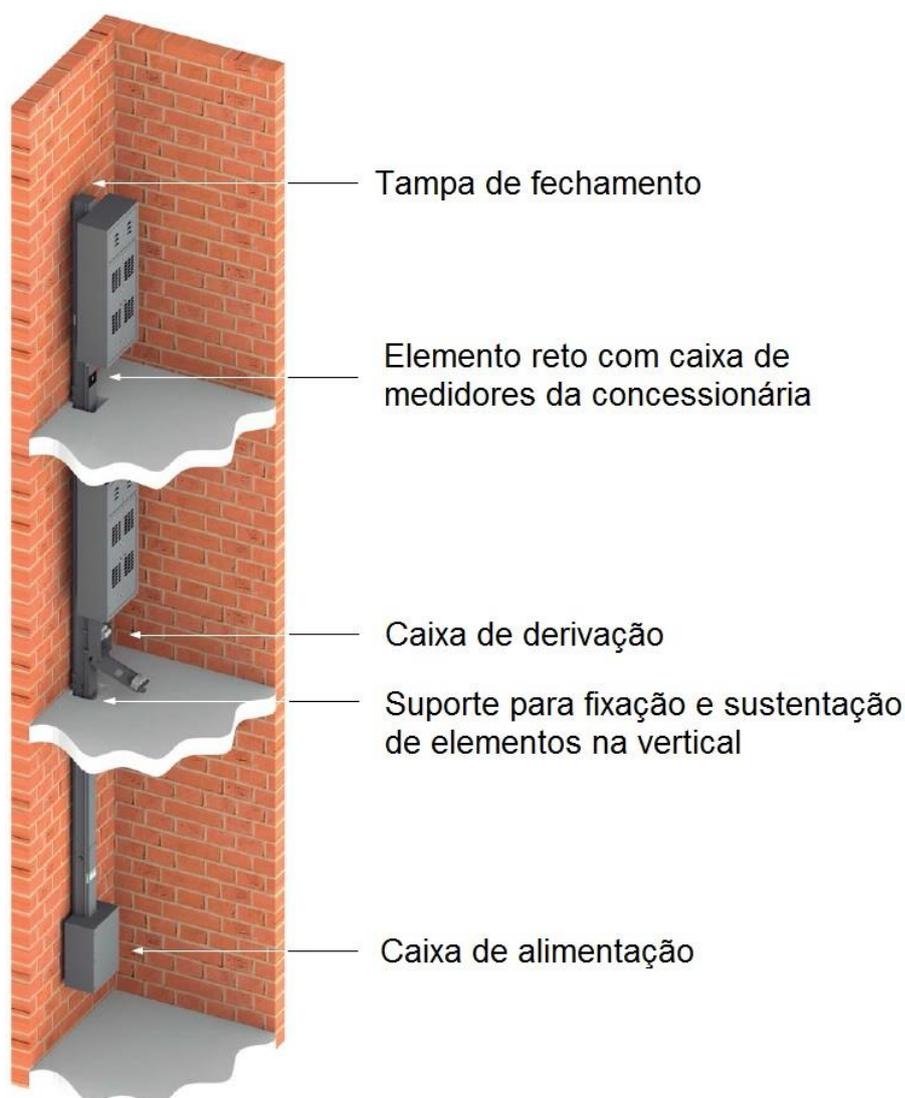
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Caso haja a validação em valores próximos, valida-se o procedimento por meio do software. Nesta etapa, será adotado como parâmetro de validação diferenças de até 10% entre os valores calculados manualmente e os valores simulados a partir do software. Após a validação, serão realizadas novas simulações com as mais diversas características de sistemas elétricos, ou seja, cargas baixas e altas, distâncias curtas e longas, impedâncias de linhas curtas e longas, etc., no intuito de verificar o comportamento do curto-circuito nas diversas composições, gerando dados para uma análise técnica quantitativa e qualitativa, chegando-se então às conclusões do estudo.

3.2 CARACTERÍSTICAS DE UM SISTEMA PREDIAL COM BARRAMENTOS BLINDADOS

Para um melhor entendimento da aplicação do estudo de caso, a figura 10 apresenta uma representação de uma coluna elétrica utilizando como alimentação do sistema elétrico uma linha de barramentos blindados, sendo que no pavimento inferior, está localizada a alimentação geral do sistema, como se houvesse um transformador junto ao painel ou uma alimentação elétrica proveniente da concessionária de energia, sendo este painel principal considerado como o QGBT.

Figura 10 – Exemplo de esquema de uma coluna de medidores



Fonte: Adaptado de Megabarre (2019).

Nos demais pavimentos estão localizados os painéis de medidores descentralizados, ou seja, são medições de clientes em painel que não seja o QGBT,

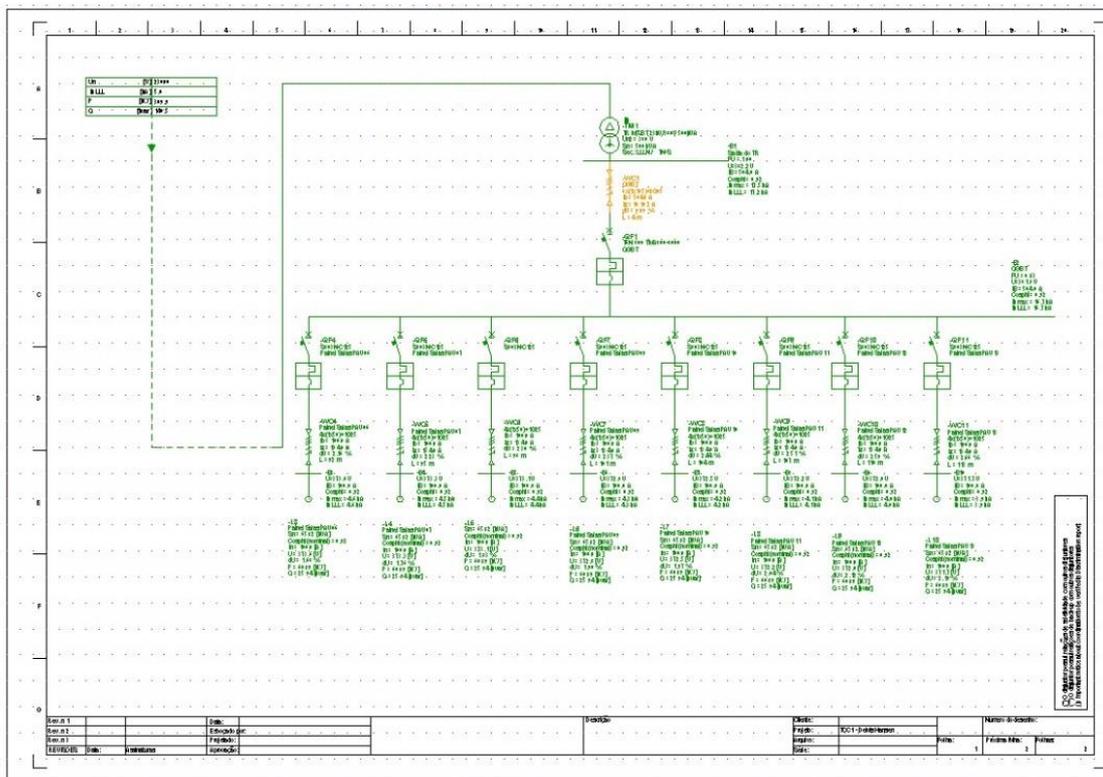
estando assim, próximos da carga, sendo representada por uma ou mais salas por pavimento. A proposta deste trabalho é analisar as incidências de um sinistro (curto-circuito) nestes locais, tanto nos pavimentos mais próximos do QGBT, quanto em pavimentos distantes.

3.3. PARAMETRIZAÇÃO E SIMULAÇÃO UTILIZANDO O SOFTWARE DE DIMENSIONAMENTO ELÉTRICO

Será utilizado o software de dimensionamento elétrico chamado DOC da empresa multinacional italiana ABB, sendo que o software utiliza das normas internacionais para embasamento dos cálculos, tornando a simulação idônea e validada a nível técnico. Existem diversos outros softwares que podem ser utilizados para as simulações, dos quais destacam-se o Simaris, Ecodial, ETAP, dentre outros.

A seguir são apresentadas algumas telas principais de uso e configuração do programa.

Figura 11 - Interface gráfica do programa *DOC*, para representação do diagrama unifilar do sistema

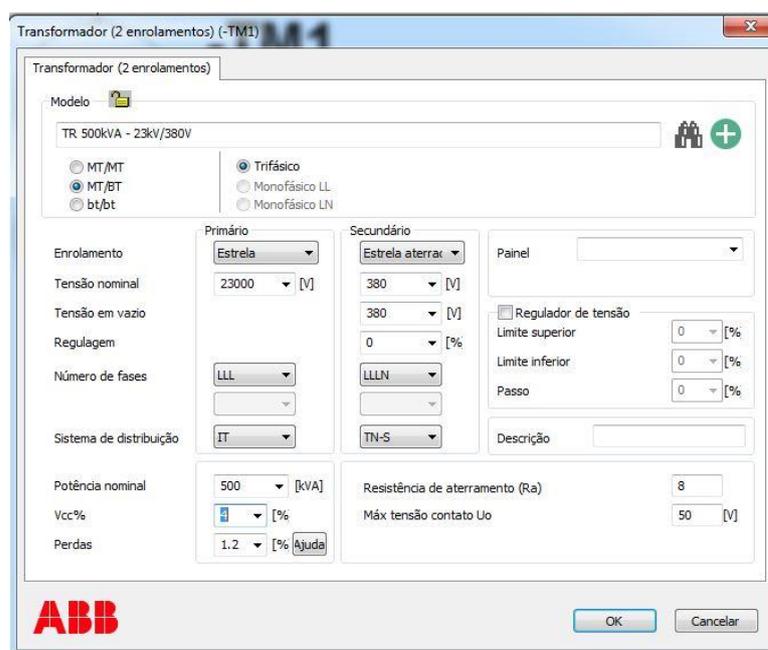


Fonte: adaptado de ABB (2019).

Na interface gráfica deverá ser desenhado todo o diagrama unifilar da instalação elétrica, representando os elementos da entrada de energia, posto de transformação, no caso de entrada em média tensão, circuitos alimentadores, painéis principais e secundários, além das cargas elétricas do sistema.

No caso da entrada de energia em média tensão, configuram-se dados como tipo do transformador, enrolamentos, tensão nominal, número de fases e sistema de distribuição, tanto no lado de alta tensão quanto no lado de baixa tensão. Além disso, pode-se ajustar os TAPs do regulador de tensão de modo a garantir a tensão nominal na saída do mesmo. A potência do equipamento, assim como as suas perdas, também deve ser configurada. A tela de configurações de um transformador é apresentada na figura 12.

Figura 12 - Configuração dos parâmetros de um transformador



Fonte: Adaptado de ABB (2019).

Outro importante elemento a ser configurado na utilização do software são os cabos elétricos, cuja impedâncias precisam considerar os mesmos valores estabelecidos nos cálculos manuais, de forma que os resultados em ambas simulações sejam as mais próximas possíveis, conseqüentemente com o menor erro. A figura 13 apresenta a tela de configurações dos cabos elétricos, sendo que são necessários diversos dados de entrada, como comprimento do trecho, tipo de cabo e sua isolação, método de instalação, máxima queda de tensão admitida, temperatura

ambiente, dentre outros parâmetros avançados. Considerando que o objetivo deste trabalho é a utilização de software de cálculo para a validação do roteiro manual de cálculo, e posteriormente avaliação de resultados para os mais diversos cenários, considera-se que o profissional já realizou o dimensionamento elétrico do sistema a ser simulado, e utilizará o software apenas para a análise dos resultados de curto-circuito nos mais variados pontos da instalação elétrica. Todo o dimensionamento elétrico é passível de ser realizado pelos softwares, porém, não será abordado aqui por não fazer parte da proposta do estudo.

Figura 13 – Tela inicial de configuração de cabos elétricos

The screenshot shows the 'Propriedades do alimentador' window with the following configuration details:

- Tab:** Cabo BT (-WC4)
- Descrição:** Painel Salas PAV06
- Is:** 100.0 [A]
- Cosp:** 0.91
- LLLN:** 380 [V]
- TN-S:** 60 [Hz]
- Temperatura ambiente:** 30 [°C]
- Máx. dv% permitida:** 4 [%]
- Cabo com dupla isolamento:**
- Radio button:** Cabo (selected)
- Comprimento:** 92.06 [m]
- Unipolar:** Unipolar
- PVC:** PVC
- Cu:** Cu
- Método de Instalação:** Embutido
- Em conduites:** Em conduites
- Em trifólio:** Em trifólio
- 59:** 59
- Fase:** 1 x 50 [mm²]
- Neutro:** 1 x 50 [mm²]
- PE:** 1 x 25 [mm²]
- Ic:** 134 [A]
- Kt:** 1.00
- dv:** 2.15 [%]
- Buttons:** Resultados Adicionais, Fatores de correção, Correntes de curto-circuito, Opções avançadas, OK, Cancelar
- Logo:** ABB

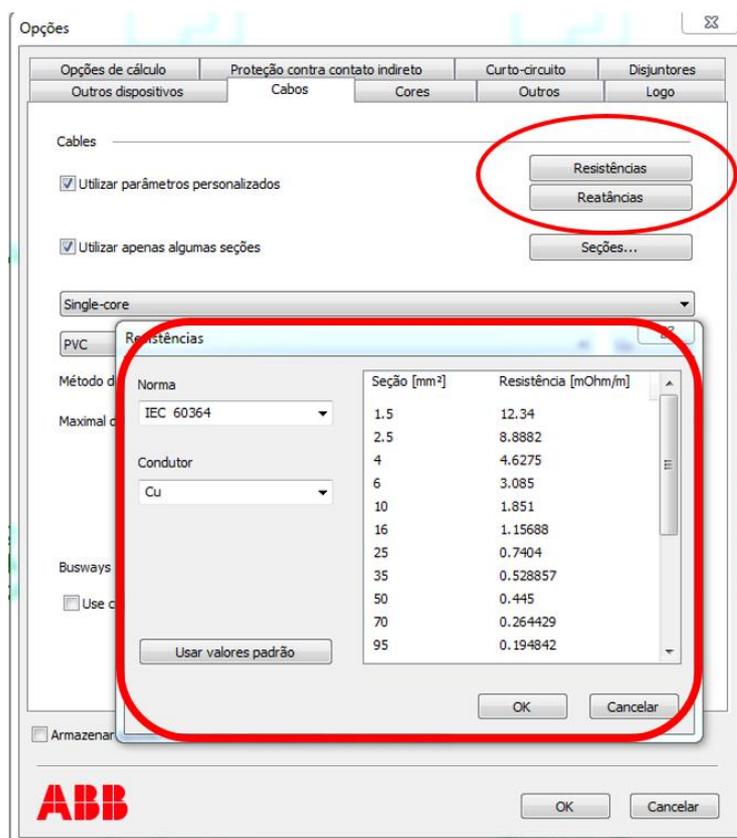
Fonte: adaptado de ABB (2019).

Para o caso das configurações dos cabos, as informações mais relevantes são a resistência e a reatância, de modo a compor a impedância do mesmo.

Além destas, o comprimento se torna uma informação de grande relevância.

É importante salientar que os softwares estejam configurados para o cálculo e dimensionamento de cabos elétricos de acordo com a norma IEC-60364. Ainda em relação aos cabos, a Figura 14 apresenta a tela de configuração das resistências e reatâncias dos cabos em questão.

Figura 14 - Configuração dos parâmetros dos cabos



Fonte: adaptado de ABB (2019).

Para o caso das cargas, a configuração e dados necessários é mais simples, sendo necessário o fator de potência da carga, além da sua potência ativa ou da corrente nominal.

A figura 15 apresenta um exemplo de instalação predial, onde é utilizado um transformador rebaixador de tensão para transformar a energia fornecida em média tensão pela concessionária (23kV) em baixa tensão (380V) a nível de usuário, e assim, distribuí-la nos diversos painéis de medidores (QMs...) representados com um barramento e uma carga genérica. Serão extrapoladas diversas topologias para esse sistema.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

Conforme demonstrado no fluxograma apresentado no capítulo 3, o primeiro passo para o estudo é a escolha de um projeto padrão, cujos dados são conhecidos, de modo a validar os procedimentos de cálculo.

Sendo assim, o projeto padrão utilizado foi o de uma edificação de uso comercial, composta por lojas e salas comerciais. A figura 16 apresenta a fachada da edificação para que se tenha uma ideia do porte do prédio.

Figura 16 – Edificação utilizada como modelo para a instalação padrão



Fonte: Divulgação (2018).

O prédio é composto por um andar subsolo de estacionamentos, um pavimento térreo, contendo a entrada de energia, subestação e QGBT, além de lojas e acesso à

torre. No segundo pavimento estão distribuídas as demais lojas do empreendimento. O terceiro e quarto pavimentos são compostos por estacionamentos. Por fim, a torre comercial é composta por dez pavimentos “tipo”, sendo que cada andar abriga sete salas comerciais. Nos últimos pavimentos, ainda se encontram dez salas comerciais, sendo quatro do tipo duplex, além de área condominial de convenções.

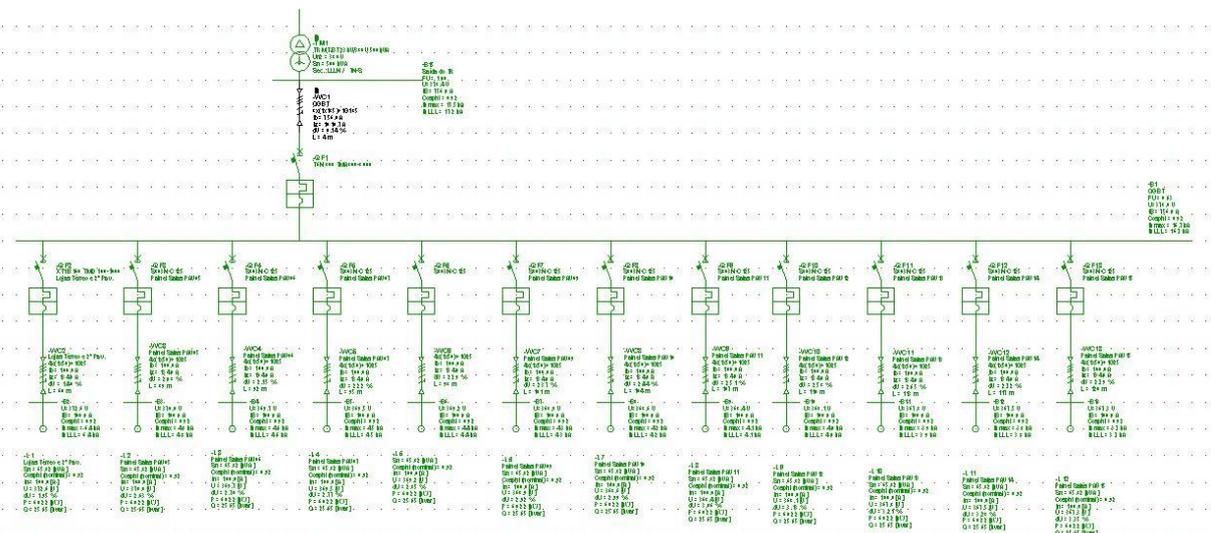
Em cada um dos pavimentos tipo, estão distribuídos painéis de medição secundários, denominados QMs (Quadros de Medição).

Todas as informações do diagrama unifilar da instalação elétrica acima citada haviam sido pré-definidas, sendo necessária apenas a obtenção das informações para entrada nos cálculos teóricos e computacionais.

À estas características da edificação e das instalações elétricas denominou-se *instalação padrão*, cujos dados principais de entrada são potência instalada de transformador de 500 kVA, distâncias médias dos ramais do QGBT aos QMs de aproximadamente 100 metros, e nível de curto circuito da rede primária da concessionária de 5 kA. No decorrer do trabalho são relacionadas as variações das características com esta instalação padrão.

A figura 17 representa o diagrama elétrico das instalações considerando que os meios de condução das correntes elétricas desde a subestação até os quadros de medição são os cabos elétricos convencionais.

Figura 17 – Diagrama Unifilar da instalação padrão com cabos elétrico convencionais



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

De acordo com o arranjo proposto e ilustrado na figura 21, desde o quadro principal QGBT partem ramais trifásicos individuais até cada um dos painéis de medição descentralizados (QMs), de modo a individualizar a corrente total da edificação em cada ramal, aplicando-se um fator de simultaneidade na barra principal do QGBT. Dessa forma se fazem necessários “ n ” eletrodutos tantos quantos forem os ramais em cabos, de modo a proteger mecanicamente os mesmos, e manter inviolável o condutor de modo a não prover formas de desvio de energia não medida pela concessionária.

A infraestrutura para esse conjunto de eletrodutos possui relevante ocupação nas instalações de forro e prumadas do prédio, principalmente nos primeiros trechos próximos ao QGBT, visto da quantidade de eletrodutos neste trecho inicial.

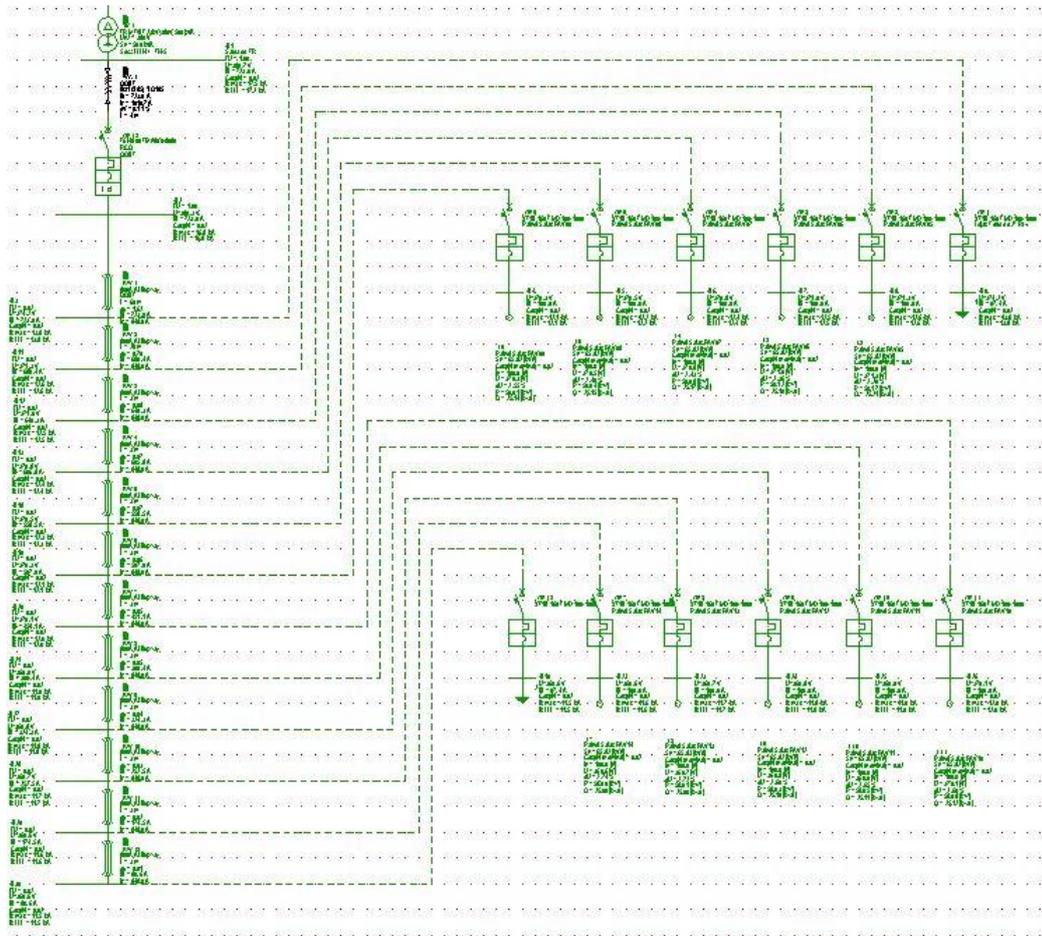
A figura 18 representa o diagrama elétrico da mesma instalação, porém considerando a alimentação dos QMs através de um único barramento blindado, o qual conduz toda a corrente elétrica da instalação, sendo aplicado fator de simultaneidade no decorrer do acoplamento das cargas ao barramento.

A variação destas duas formas de conduzir a energia até os QMs não influencia nas características do projeto padrão que estão sob ensaio (potência do transformador, distâncias e I_{cc} primária).

Apesar de a Figura 18 aparentemente possuir um sistema mais complexo do que a instalação apresentada na Figura 17, ambas têm o mesmo porte final. Na Figura 18 foram utilizadas linhas tracejadas para representar ligações virtuais, de modo a organizar o layout do desenho de modo mais amigável na visualização em relatório.

Seguindo o roteiro da metodologia, fez-se os cálculos teóricos de curto-circuito e após, fez-se a comparação com os resultados obtidos na simulação por software.

Figura 18 - Diagrama Unifilar da instalação padrão com barramentos blindados



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Para diversos cálculos utilizados no procedimento se faz necessário o conhecimento e aplicação dos conhecimentos referentes ao método de cálculo por unidade (pu), os quais estão indicados desde a equação 8 até a equação 14. A tabela 5 apresenta os valores utilizado como base para os cálculos no método de pu.

Tabela 5 – Dados de base utilizados para o cálculo por unidade

Dados do sistema de base por unidade [pu]	
Potência de base [kVA]	500
Tensão de Base [V]	0,38
Corrente de Base [A]	759,6714

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O roteiro inicia na obtenção das impedâncias reduzidas do sistema, apresentado nas equações 15 a 17, a qual diz respeito às contribuições da rede da

concessionária no ponto de entrega. A tabela 6 apresenta os dados utilizados para estes cálculos. Vale ressaltar que a resistência do sistema à montante utilizada foi zerada pois a contribuição deste parâmetro é praticamente nula.

Tabela 6 – Dados do sistema à montante

Dados de entrada do sistema a montante	
Tensão nominal primária no ponto de entrega [kV]	23
Corrente de Curto-Circuito no ponto de entrega [A]	5000
Resistência do sistema a montante [Ω]	0

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O próximo ponto a verificar é a impedância do transformador assim como do circuito que conecta o transformador ao QGBT, citados desde a equação 18 até a equação 27, sendo que os dados de entrada para estes são indicados nas tabelas 7 e 8.

Tabela 7 – Dados do transformador

Dados do Transformador	
Potência nominal [kVA]	500
Impedância [%]	4,50
Perdas ôhmicas no cobre [W]	6000
Tensão nominal [kV]	0,38

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tabela 8 – Dados do circuito que conecta o transformador ao QGBT

Dados do circuito que conecta o TRAF0 ao QGBT	
Resistência do condutor de sequência positiva [$m\Omega/m$]	0,1226
Comprimento do circuito [m]	4
Número de condutores por fase	2
Reatância do condutor de sequência positiva [$m\Omega/m$]	0,1073

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O QGBT possui contribuição em termos de impedância do sistema em razão da contribuição do próprio barramento, indicada pelas equações 28 a 32, cujos dados de entrada são apresentados na tabela 9.

Tabela 9 – Dados do barramento QGBT

Dados do barramento QGBT	
Largura da barra [m]	2
Número de barras	1
Resistência ôhmica da barra [$m\Omega/m$]	0,0548
Reatância ôhmica da barra [$m\Omega/m$]	0,1792

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Por fim, tem-se as contribuições dos ramais desde o QGBT até os QMs, calculadas desde a equação 33 até a equação 35, sendo que na equação 35, previamente faz-se o somatório de todas as impedâncias calculadas a montante do ponto para então descobrir o valor do curto-circuito no ponto em estudo. Foi considerado 1 condutor por fase e as distâncias utilizadas encontram-se nas tabelas 11 e 13, as quais trazem um resumo dos resultados. Para efeitos do cálculo da instalação padrão, foram utilizados valores de resistência e reatância de sequência positiva dos cabos, os quais são apresentados na tabela 10 (apenas os utilizados). Todos os ramais de cabos da instalação padrão possuem seção de 50 mm².

Tabela 10 – Impedância dos condutores dos ramais dos QMs

Dados de impedância dos cabos desde o QGBT até os QM's	
Resistência do condutor #50mm ² de sequência positiva [$m\Omega/m$]	0,445
Reatância do condutor #50mm ² de sequência positiva [$m\Omega/m$]	0,1127

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A tabela 11 apresenta o resumo das características da instalação para a opção utilizando cabos convencionais como condutores desde o QGBT aos QMs, além dos resultados obtidos a partir do roteiro de cálculo indicado até então.

Cada local em análise foi batizado com um número de ponto, de modo a facilitar a apresentação em tabela. Com exceção do ponto 1, todos os demais tem o ponto de partida comum, o QGBT. Para os pontos 2 e 3 há uma considerável variação no trecho horizontal até que os condutores completem o trajeto desde o QGBT até os respectivos QMs, porém, do ponto 4 em diante, a variação de distância corresponde apenas a diferença de um pavimento de pé-direito.

As colunas de Icc apresentam os valores obtidos no roteiro teórico assim como o mesmo parâmetro obtido a partir de simulação computacional, enquanto que as duas últimas colunas apresentam a variação do nível de curto-circuito entre os dois métodos de modo pontual e médio. A análise destes resultados será esplanada de forma mais completa no item 4.2.

Tabela 11 – Resumo de alguns parâmetros de cálculo e resultados obtidos nas simulações utilizando cabos convencionais

SITUAÇÃO 1 - QGBT JUNTO À SE / SAÍDA COM CABOS INDIVIDUAIS DO QGBT AOS QMs								
Ponto	De	Para	Distância [m]	Painel	Icc		ΔIcc [%]	Média
					Cálculo Teórico	Cálculo Software		
1	TR	QGBT	4	QGBT	15,3	16,7	8%	7%
2	QGBT	QM1	60	QM Lojas	6,0	6,4	6%	7%
3	QGBT	QM2	89	QM Salas PAV05	4,4	4,8	8%	7%
4	QGBT	QM3	92,06	QM Salas PAV06	4,3	4,6	7%	7%
5	QGBT	QM4	95,12	QM Salas PAV07	4,2	4,5	7%	7%
6	QGBT	QM5	98,18	QM Salas PAV08	4,1	4,4	7%	7%
7	QGBT	QM6	101,24	QM Salas PAV09	4,0	4,3	7%	7%
8	QGBT	QM7	104,3	QM Salas PAV10	3,9	4,2	7%	7%
9	QGBT	QM8	107,36	QM Salas PAV11	3,8	4,1	7%	7%
10	QGBT	QM9	110,42	QM Salas PAV12	3,7	4,0	8%	7%
11	QGBT	QM10	113,48	QM Salas PAV13	3,6	3,9	8%	7%
12	QGBT	QM11	116,54	QM Salas PAV14	3,5	3,8	8%	7%
13	QGBT	QM12	119,6	QM Salas PAV15	3,5	3,7	5%	7%

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Para as simulações envolvendo barramentos blindados, antes da seleção dos valores de impedância da linha, cabe ressaltar que existem dois tipos de materiais condutores empregados no produto: Cobre e Alumínio.

O alumínio tem uma resistividade ρ ($2.82 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ a $20^\circ C$), enquanto o cobre tem resistividade ρ ($1.72 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ a $20^\circ C$), ou seja, o alumínio tem resistividade 63% maior que a do cobre, o que significa que a seção do condutor de alumínio será 60% maior do que a do cobre.

Entretanto, o cobre é mais pesado, visto que o alumínio tem densidade menor do que o cobre. Como exemplo, uma barra de alumínio de $100 \times 6,45$ mm de seção transversal pesa 1,742 kg/m, enquanto a mesma seção transversal em cobre pesa 5,741 kg/m.

Adicionalmente, têm-se um preço de mercado bastante diverso entre os metais em epígrafe. Com valores de referência de 2017, enquanto o cobre eletrolítico estava custando aproximadamente R\$ 29/kg, a liga de alumínio AL-6101 era encontrada por aproximadamente R\$ 15,00/kg. Apesar de não serem dados atuais, as proporções se mantêm.

Assim, como exemplo prático, pode-se traçar um paralelo. Para a construção de um condutor de 1600 A trifásico com neutro, há as seguintes grandezas envolvidas: alumínio deverá ser construído com barras de seção transversal de 150×6,45 mm, conseqüentemente, temos por fase 2,612 kg/m, totalizando 10,45 kg/m para a configuração trifásica, e R\$ 156,72/m de barramento blindado. De forma análoga, para a construção de um condutor de 1600 A trifásico com neutro, há as seguintes grandezas envolvidas: cobre deverá ser construído com barras de seção transversal de 111×6,45 mm, conseqüentemente, temos por fase 6,372 kg/m, totalizando 25,49 kg/m para a configuração trifásica, e R\$ 739,15/m de barramento blindado.

Em última análise, para dimensionamento de linhas pré-fabricadas, utiliza-se o fator de queda de tensão ou fator “k”, que será de 0,0061V/100 m.A para o condutor em cobre, enquanto será de 0,0079V/100 m.A, ou seja, a queda de tensão será 29,51% superior nos condutores em alumínio.

Assim sendo, a escolha deve ser feita a partir do projeto de utilização do barramento, analisando cada instalação individualmente e suas particularidades de uso e características físico-químicas do ambiente da instalação.

Para o exemplo deste trabalho, a queda de tensão não possui peso relevante à escolha do material do barramento blindado, visto que as altas seções de trabalho reduzem consideravelmente o impacto do fator “k”, enquanto que a resistividade tem fator decisivo, visto que tem influência direta nos valores de curto circuito. Além das justificativas citadas, o barramento em alumínio possui custo consideravelmente inferior. Em razão disso, foi adotado o barramento blindado de alumínio.

Todos os barramentos blindados devem obedecer às normas ABNT NBR IEC 60439-2 para a construção do produto, a ABNT NBR 16019 para condições de instalação de barramentos blindados, e a ABNT NBR 5410 para o conjunto da instalação elétrica de baixa tensão.

Para captação das características técnicas, foi selecionado o barramento blindado do fabricante Megabarre, linha MV 800A em alumínio, e seus valores de

resistência e reatância do condutor de sequência positiva estão indicados na tabela 12:

Tabela 12 – Impedâncias do barramento blindado

Dados de impedância do barramento blindado selecionado	
Resistência do condutor de sequência positiva [mΩ/m]	0,028
Reatância do condutor de sequência positiva [mΩ/m]	0,032

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Com os dados acima listados, aplicando o mesmo procedimento de cálculo já citado chegou-se aos devidos resultados de curto-circuito das instalações. A tabela 13 apresenta os mesmos dados considerando a proposta com o uso de barramentos blindados, e o conteúdo das colunas é igual ao apresentado na tabela 11.

Tabela 13 – Resumo de alguns parâmetros de cálculo e resultados obtidos nas simulações utilizando barramentos blindados

SITUAÇÃO 2 - QGBT JUNTO À SE / SAÍDA COM BARRAM. BLINDADO COLETIVO DO QGBT AOS QMs								
Ponto	De	Para	Distância [m]	Painel	Icc		ΔIcc [%]	Média
					Cálculo Teórico	Cálculo Software		
1	TR	QGBT	4	QGBT	15,29	16,7	8%	2%
2	QGBT	QM1	60	QM Lojas	13,2	13,8	4%	2%
3	QGFL	QM2	29	QM Salas PAV05	12,3	12,6	2%	2%
4	QGFL	QM3	3,06	QM Salas PAV06	12,2	12,5	2%	2%
5	QGFL	QM4	3,06	QM Salas PAV07	12,1	12,3	2%	2%
6	QGFL	QM5	3,06	QM Salas PAV08	12,1	12,2	1%	2%
7	QGFL	QM6	3,06	QM Salas PAV09	12	12,1	1%	2%
8	QGFL	QM7	3,06	QM Salas PAV10	11,9	12	1%	2%
9	QGFL	QM8	3,06	QM Salas PAV11	11,8	11,9	1%	2%
10	QGFL	QM9	3,06	QM Salas PAV12	11,8	11,8	0%	2%
11	QGFL	QM10	3,06	QM Salas PAV13	11,7	11,7	0%	2%
12	QGFL	QM11	3,06	QM Salas PAV14	11,6	11,6	0%	2%
13	QGFL	QM12	3,06	QM Salas PAV15	11,5	11,4	-1%	2%

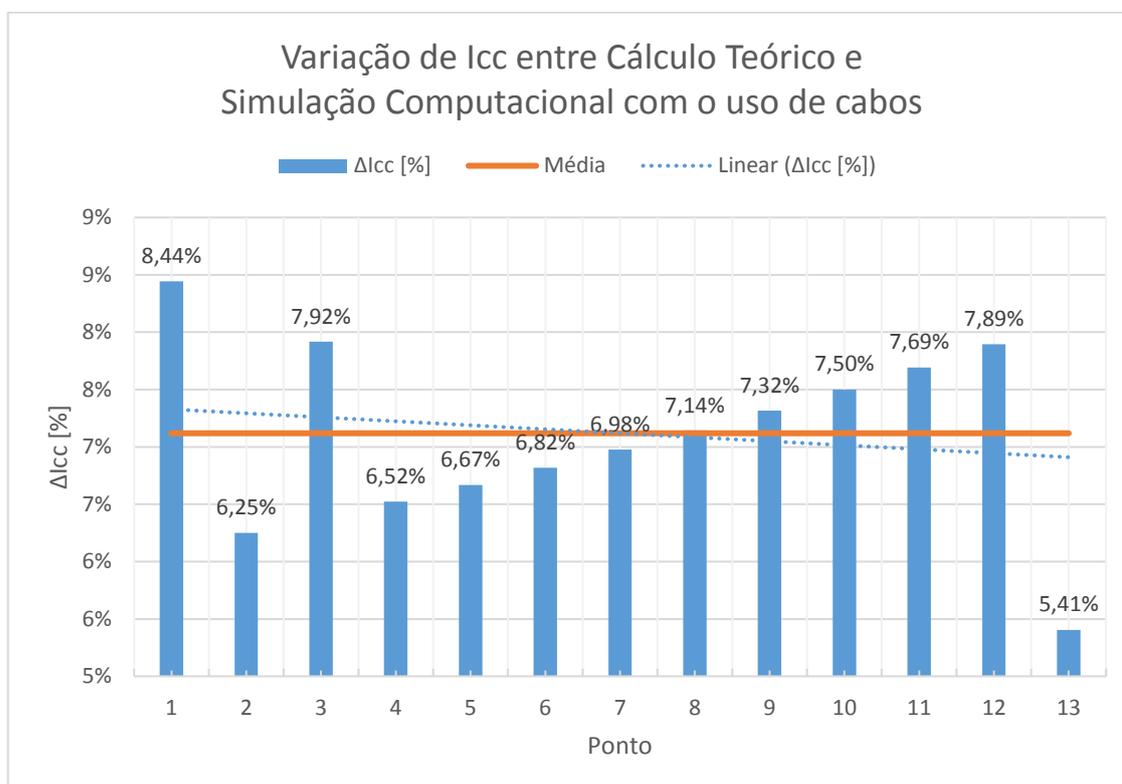
Fonte: elaborado pelo autor (2019).

4.2. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA INSTALAÇÃO PADRÃO

Foi convencionado que uma diferença entre os resultados do cálculo manual e da simulação igual ou inferior a 10% seria necessária para a validação da utilização do software para os ensaios propostos por este trabalho. Isto se confirmou, possibilitando que fossem realizadas as simulações com os diferentes cenários. As variações pontuais e médias já foram sumariamente apresentadas nas tabelas 11 e 13, e serão abordadas de maneiras mais abrangente nesta seção.

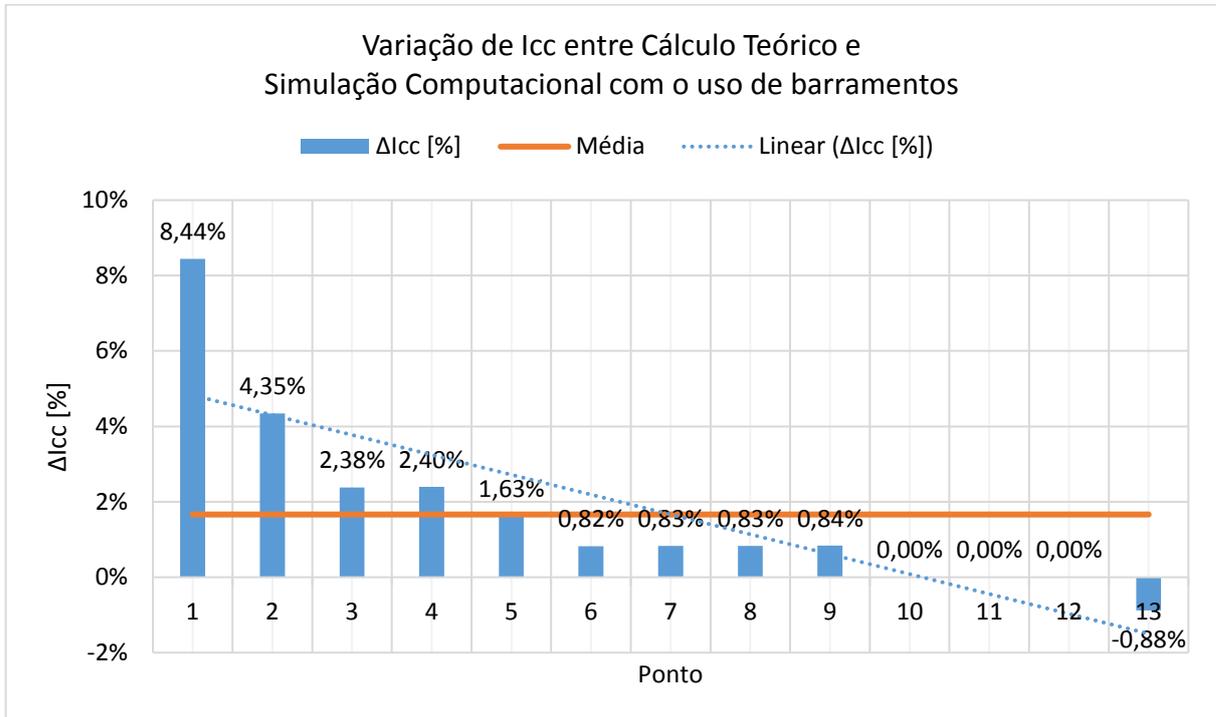
Para a instalação padrão obteve-se um erro percentual médio de 7% no caso da utilização de cabos, resultado apresentado na Figura 19. Para a utilização de barramentos blindados na mesma instalação padrão, este número foi ainda menor, resultando em erro percentual em torno de 2%, apresentado na Figura 20. A Figura 21 apresenta os valores absolutos de I_{cc} obtidos para a instalação com cabos, comparando o ambiente de cálculo manual com o ambiente de cálculo computacional, enquanto que a Figura 22 apresenta os mesmos resultados, porém com o uso de barramentos blindados.

Figura 19 – Variação percentual de I_{cc} para a simulação do projeto padrão, com o uso de cabos



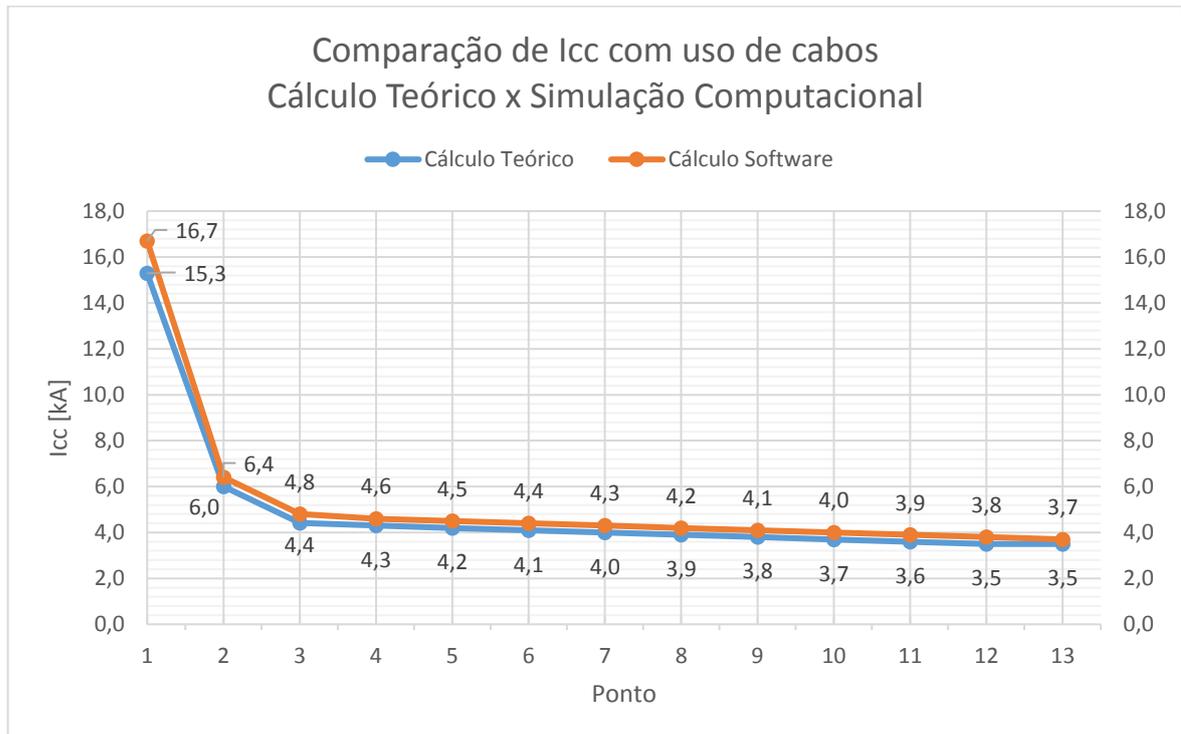
Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Figura 20 – Variação percentual de I_{cc} para a simulação do projeto padrão, com o uso de barramentos blindados



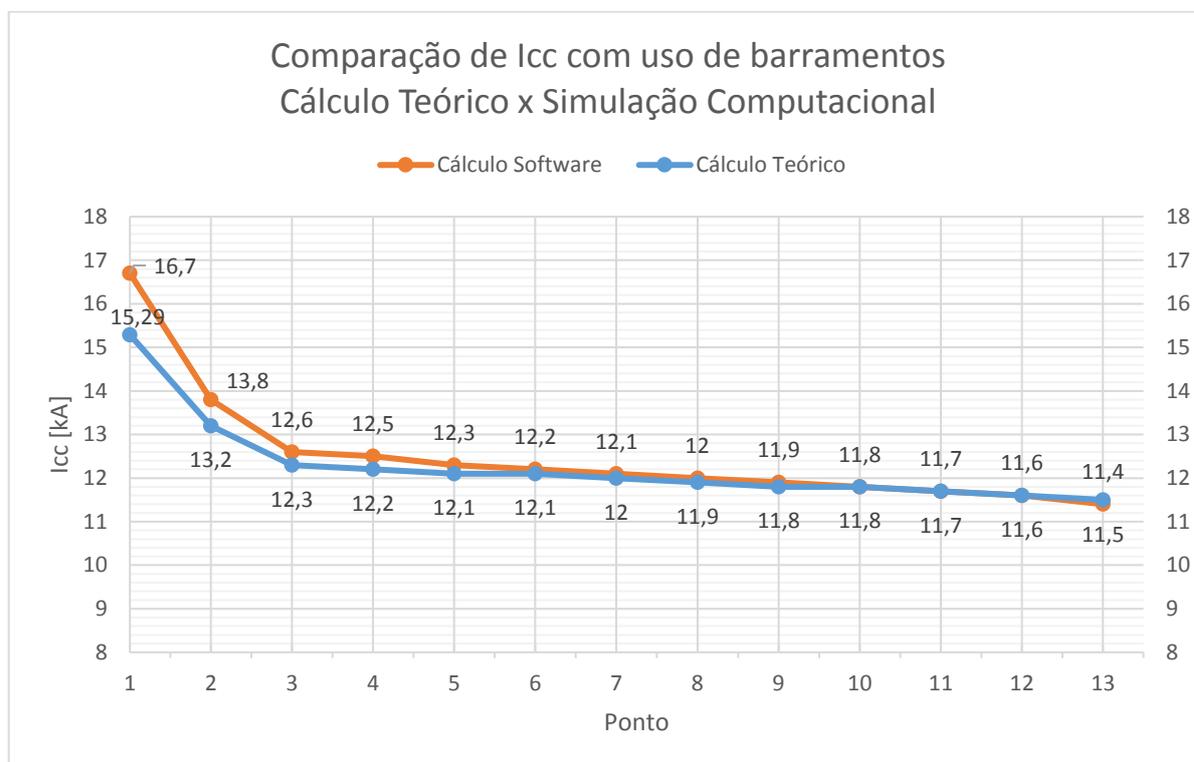
Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Figura 21 – Valores absolutos de I_{cc} para validação do procedimento computacional com uso de cabos



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Figura 22 – Valores de I_{cc} absolutos para validação do procedimento computacional com uso de barramentos blindados



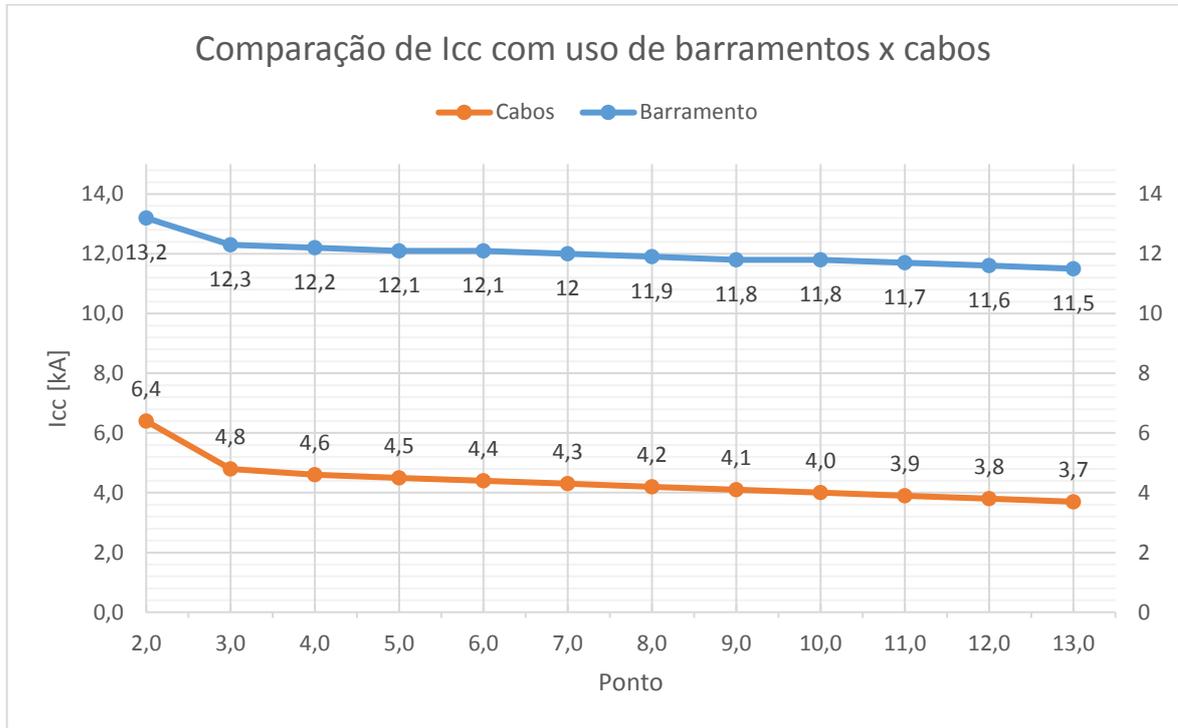
Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Faz-se necessária ainda a análise comparativa dos valores absolutos de curto-circuito quando do uso de cabos e do uso de barramentos blindados. Sabe-se que o ponto 1 é equivalente entre os sistemas e, portanto, não sofre alterações nos valores ensaiados. Em razão disso, apresenta-se na figura 23 os índices a partir do ponto 2. Os valores observados são substancialmente diferentes, o que requer atenção e acurácia por parte dos profissionais da área de projetos.

A variação desta ordem ocorre por conta da grande diferença de impedância de linha entre o barramento de 800 A e os cabos individuais de 50 mm², visto que o valor de curto circuito é inversamente proporcional à impedância do sistema.

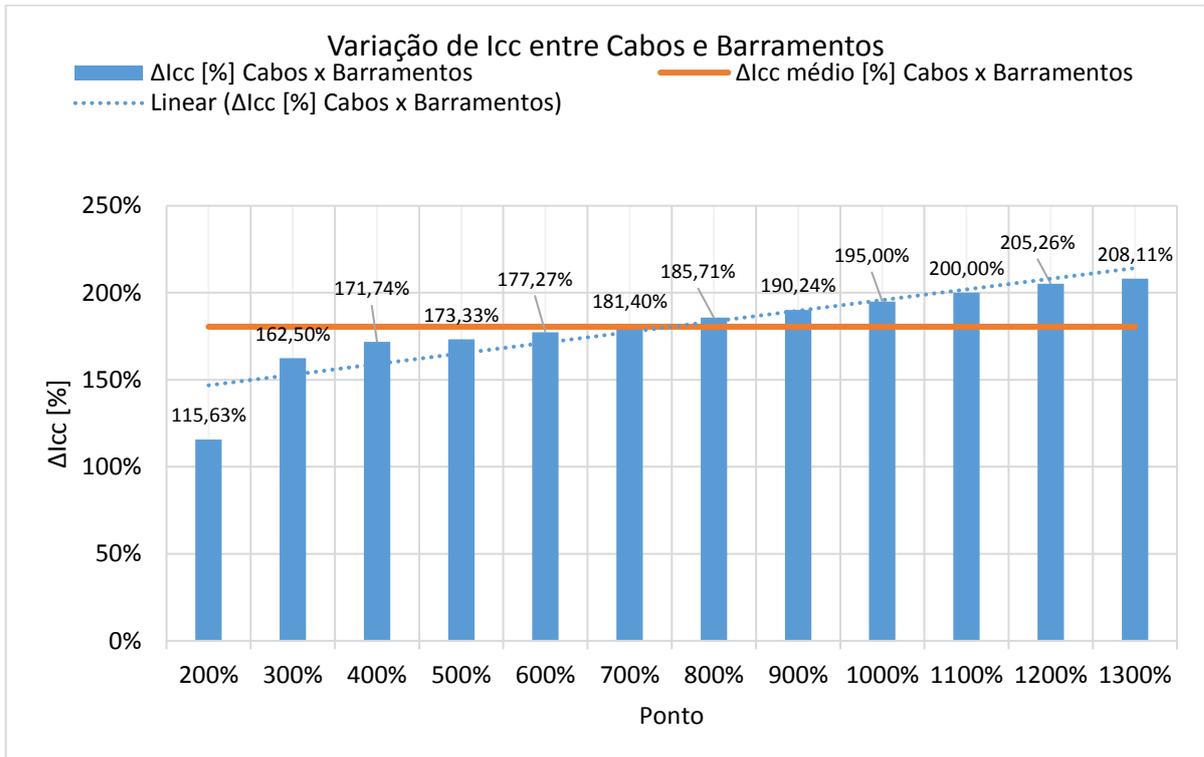
Quando considerada a análise através de proporcionalidade (percentual), torna-se ainda mais evidente os impactos nos valores de curto-circuito de instalações com barramentos blindados frente aos sistemas convencionais. A Figura 24 mostra a variação percentual em cada ponto e uma linha média da variação, a qual atingiu a marca de 181%.

Figura 23 – Comparação de valores de Icc de acordo com o sistema de distribuição interno da edificação;



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Figura 24 – Variação percentual de Icc entre instalações com cabos e com barramentos blindados;



Fonte: elaborado pelo autor

4.3 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PARA VARIAÇÕES DA INSTALAÇÃO PADRÃO

Ficou evidente através da análise dos resultados planejados em gráficos a diferença substancial nos valores de curto-circuito quando da comparação entre sistemas com cabos versus barramentos blindados. Seguindo a metodologia proposta, foi utilizado o software DOC para simulação de novas possibilidades de instalações elétricas, avaliando então o impacto da alteração de alguns dos principais parâmetros de entrada do sistema e visualização dos resultados.

A instalação padrão teve por parâmetros fundamentais potência de transformador de 500 kVA, distâncias na ordem de 100 m desde o QGBT até os quadros de medição e corrente de curto-circuito primária (oriunda da rede de distribuição de média tensão) na ordem de 5 kA.

Para cada um dos parâmetros citados, adotou-se um valor acima e outro abaixo da instalação padrão, e realizou-se todas as combinações possíveis entre os cenários, de modo a gerar uma amostragem suficiente para conhecer o comportamento destes sistemas. O quadro 1 apresenta todas as possibilidades ensaiadas.

Quadro 1 – Parâmetros dos diversos cenários a serem ensaiados;

Código	Trafo
A	Padrão 500kVA
B	Alto 1000kVA
C	Baixo 225kVA
	Total de Alternativas de Potência = 3
	Distâncias
1	maior que 100m
2	menor que 50m
3	maior que 200m
	Total de Alternativas de Distância = 3
	Influência do lcc rede primária
X	Padrão 5kA
Y	Baixa 2,5kA
Z	Alta 7,5kA

(continuação)

	Total de Alternativas de lcc primária = 3
	Possibilidades totais = 27

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Definidos os cenários possíveis de análise, utilizou-se o software DOC para a obtenção dos resultados requeridos, e os mesmos foram planejados em gráficos de modo a melhorar o entendimento destes e seus resultados.

O sistema foi analisado em 6 pontos específicos da instalação por se tratarem de locais com características específicas distintas, os quais são citados a seguir:

1. Barramento do Quadro de Medição (QM) mais próximo do QGBT: **QM-LOJAS**. Nesta posição pode-se avaliar a contribuição exclusiva do barramento, sem a contribuição de impedância de trechos terminais em cabos. As tabelas e figuras até aqui tratam este QM como o ponto 2.
2. Centro de Distribuição em loja, alimentado pelo QM das lojas, com curto trecho de cabos entre o QM e o CD: **CD Sala 01**. Foi escolhido este ponto pois além de ser alimentado por um quadro de medição com trecho pequeno de distância de barramento desde o QGBT, também está posicionado próximo do seu respectivo QM.
3. Centro de Distribuição em loja, alimentado pelo QM das lojas, com médio/longo trecho de cabos entre o QM e o CD: **CD Sala 02**. este ponto por sua vez, também está sendo alimentado por um quadro de medição com trecho pequeno de distância de barramento desde o QGBT, porém, no seu respectivo pavimento está mais distante do QM.
4. Barramento do Quadro de Medição (QM) mais distante do QGBT: **QM-PAV15**. Já nesta posição, pode-se avaliar a contribuição exclusiva do barramento em um trecho mais longo, mas ainda sem a contribuição de impedância de trechos terminais em cabos. As tabelas e figuras até aqui tratam este QM como o ponto 13.
5. Centro de Distribuição em sala da torre comercial, alimentado pelo QM-PAV15, com curto trecho de cabos entre o QM- PAV15 e o CD: **CD Sala 1501**. Foi escolhido este ponto pois está sendo alimentado por um quadro de medição com trecho grande de distância de

barramento desde o QGBT assim como está posicionado próximo do seu respectivo QM.

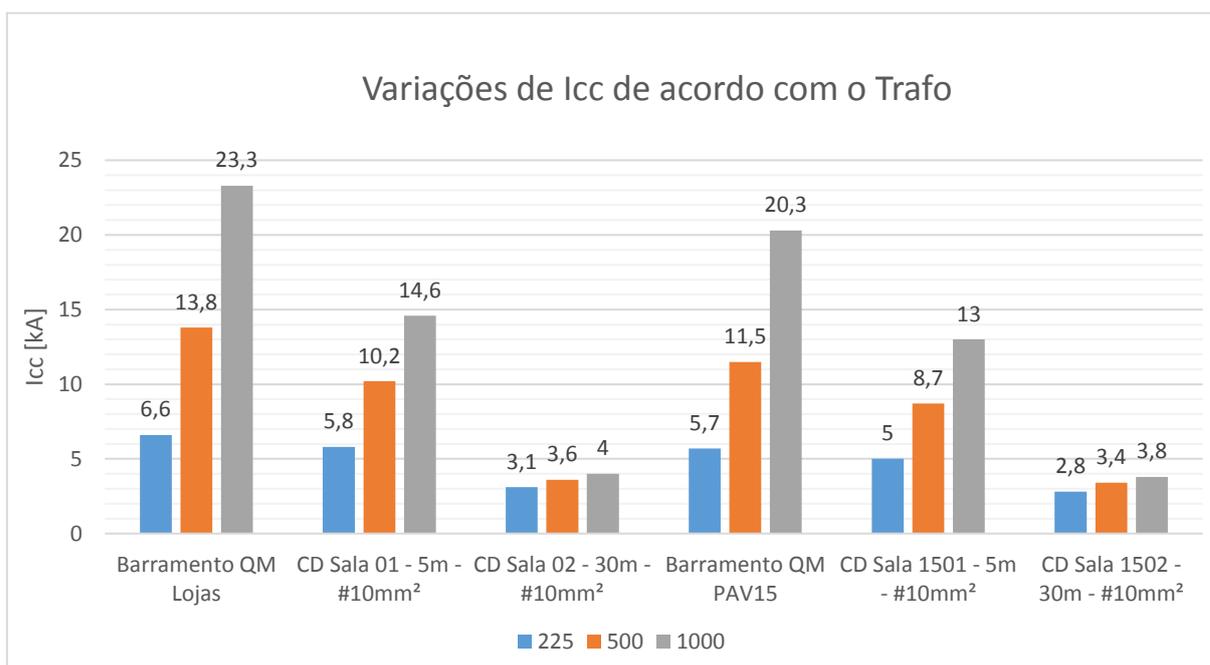
6. Centro de Distribuição em sala da torre comercial, alimentado pelo QM-PAV15, com médio/longo trecho de cabos entre o QM-PAV15 e o CD: CD **Sala 1502**. Por fim, este está sendo alimentado por um quadro de medição com trecho grande de distância de barramento desde o QGBT e no seu respectivo pavimento está mais distante do QM.

Além dos pontos já analisados anteriormente (1 a 13) escolheu-se adicionalmente uma análise nos CDs de algumas salas, uma vez que se a análise se limitasse ao QMs, ainda ficaria inconclusivo o impacto no valor de curto-circuito com uso de sistemas de barramento blindado junto ao último ponto da instalação, onde estão localizados os dispositivos de proteção contra sobrecorrente e curto-circuito, que precisam ser dimensionado de acordo com o lcc naquele ponto, e não a partir do curto-circuito nos QMs. Dessa forma, entende-se que a análise se torna muito mais completa e abrangente.

Estes ramais foram simulados com cabos alimentadores de seção 10mm². Esta seção foi adotada em razão de ser uma das bitolas mais utilizadas para salas de pequeno e médio porte em lojas e, principalmente, salas comerciais, visto que este condutor, em ramal trifásico tem a capacidade de condução de corrente, que varia de acordo com o método, de, aproximadamente, 50 A, valor este que abrange a grande maioria destas salas comerciais. Ainda que, por possuírem uma queda de tensão por metro considerável, para estas aplicações se mostram viáveis, pois o grande elemento de transmissão da energia se torna o barramento blindado, e este, por sua vez, em razão da elevada seção, possui baixíssima taxa de queda de tensão, permitindo o uso mais confortável de cabos de menor seção nas instalações terminais.

Inicialmente, avaliou-se a resposta dos níveis de lcc frente à alteração da potência do transformador junto à entrada de energia, cujos resultados estão apresentados na Figura 25.

Figura 25 – Valores de Icc de acordo com a potência do Trafo;



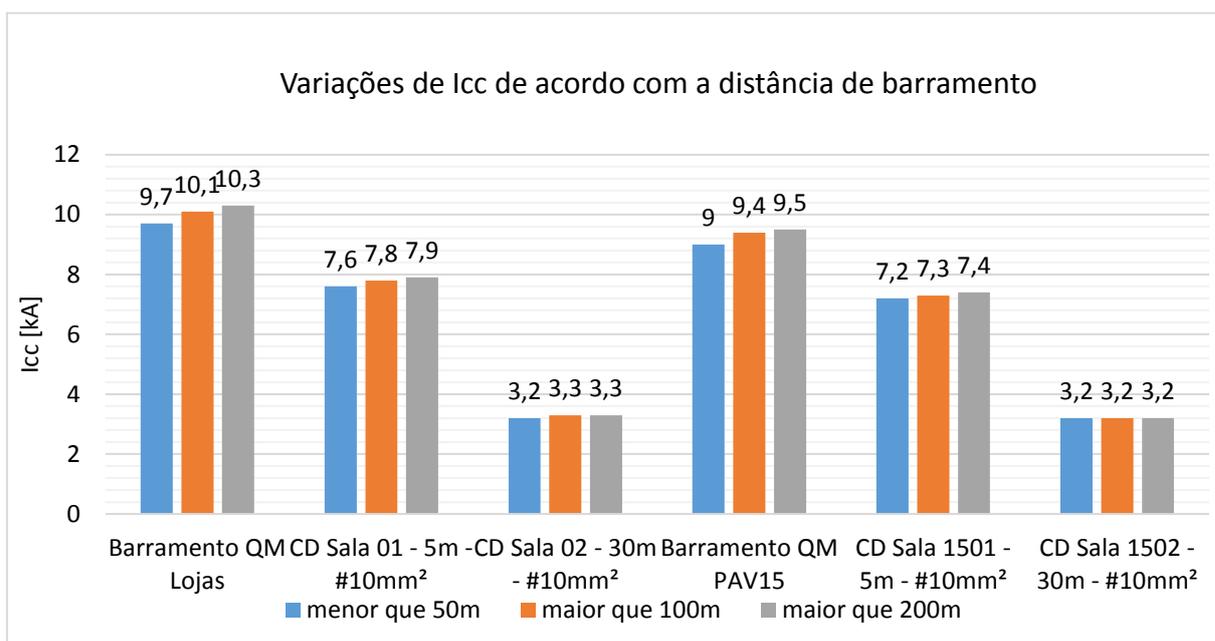
Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Nota-se com este gráfico a relevância da potência do transformador na determinação do Icc junto aos painéis, e consequente seleção dos dispositivos de proteção assim como cálculos de energia incidente sobre os mesmos.

Essa grande variação ocorre, pois o valor da potência tem contribuição considerável na obtenção da impedância do transformador. Quanto maior for a potência do transformador, menor a impedância do mesmo (Eq. 20), e consequentemente, do sistema, ao passo que quanto menor a impedância do sistema, maior será o valor de Icc (Eq. 35).

Outra simulação realizada foi variando a distância dos Centros de Medição em relação ao QGBT, considerando uma opção com distância média menor que 50 metros e em outra variação, distância maior que 200 m. Os resultados são apresentados na Figura 26.

Figura 26 – Valores de Icc de acordo com a distância dos QMs ao QGBT;

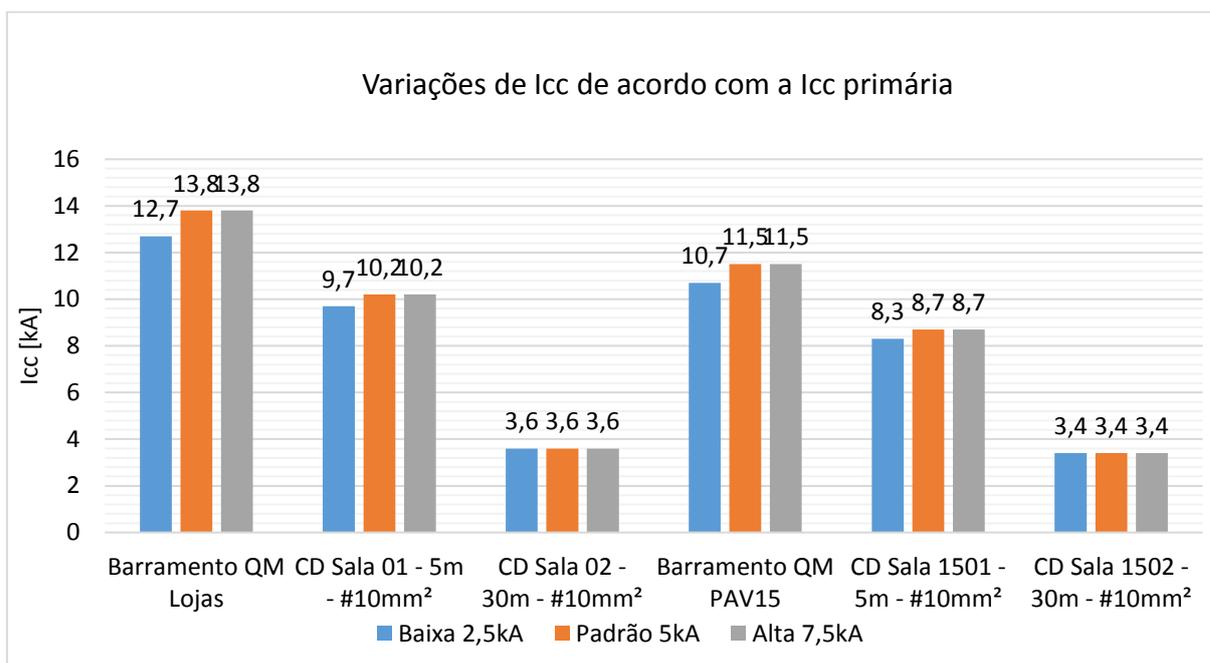


Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Nota-se que a distância de barramento não foi decisiva para o resultado final de Icc em cada trecho. Isto ocorre pois em razão do barramento possuir alta capacidade de condução de corrente e alta seção, a impedância por metro de barramento é consideravelmente baixa, gerando uma baixa contribuição na impedância total, mesmo que com trechos longos.

Uma terceira variação de parâmetros simulada foi a troca do nível de curto-circuito do ramal primário, oriundo da concessionária de energia elétrica, junto ao ramal de entrada, ligando a rede de média tensão ao transformador rebaixador de tensão. Foram utilizados valores 50% acima e 50% abaixo do padrão.

Figura 27 – Valores de Icc secundária de acordo com Icc da rede primária;

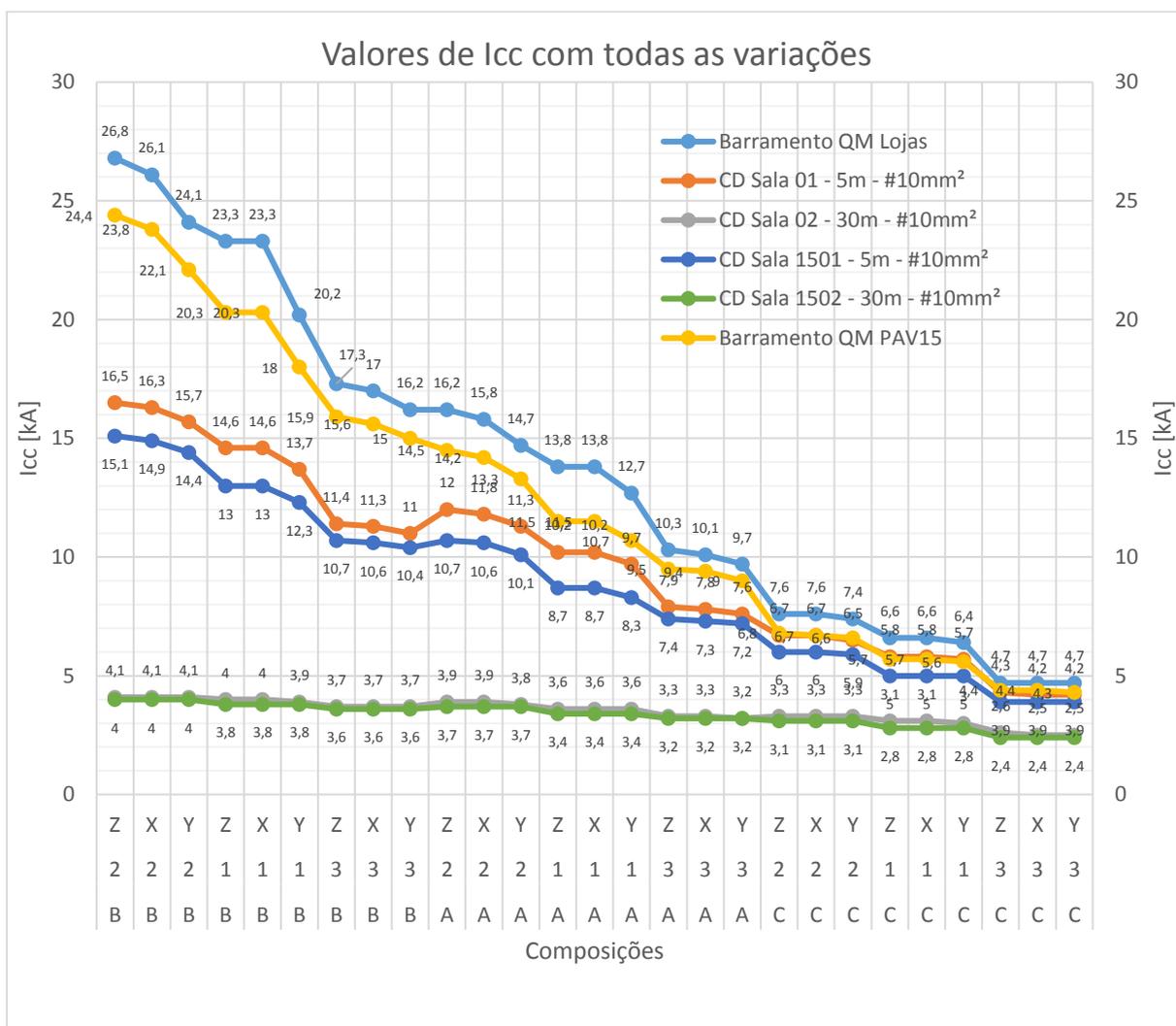


Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Pode-se observar que, para as variações de correntes de curto circuito na rede primária, oriundas dos arranjos de média tensão das concessionárias, há pouco impacto sobre os valores finais de Icc na rede secundária nos pontos observados. Considera-se baixo o impacto deste parâmetro de entrada visto da proporção baixa de impedância do sistema frente às impedâncias internas do mesmo, onde destaca-se o transformador.

Por fim, fez-se uma compilação de todas as 27 possibilidades simuladas e apresentadas na Figura 28.

Figura 28 – Compilação dos resultados obtidos nas 27 composições simuladas



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Antes de qualquer análise, cabe ressaltar que as linhas de interpolação não representam qualquer informação de valor de transição entre as variações simuladas. Graficamente a linha de interpolação foi representada de modo a gerar um melhor entendimento das grandezas e variações calculadas.

Nota-se que as variações possuem extremos bastante característicos. Os valores de curto circuito mais elevados estão localizados nos barramentos dos QMs, fazendo com que os disjuntores instalados junto a estes painéis tenham características especiais quanto ao elevado valor de Icc, por vezes sendo necessário inclusive o uso de disjuntores do tipo caixa moldada, regidos pela norma ABNT NBR 60947, a qual regula os requisitos para dispositivos com capacidade de interrupção de curto-circuito maiores que 25 kA. Nestes casos

extremos, cabe ainda análise de custos quanto ao uso de disjuntores regidos pela ABNT NBR NM 60898, que trata de disjuntores para proteção de sobrecorrentes para instalações domésticas e similares ($I_{cc} < 25 \text{ kA}$), pois por se tratar de condições especiais para minidisjuntores e dessa forma não sendo encontrados de maneira corriqueira junto aos fornecedores, podem ter um custo mais elevado do que um dispositivo de caixa moldada.

É possível avaliar também que, quando do uso de um comprimento considerável de condutores de baixa seção, e, conseqüentemente, elevada impedância, os valores de I_{cc} caem bruscamente, sendo aplicada de forma sistemática os minidisjuntores (ABNT 60898). Para o caso de uso de condutores de baixa seção, porém muito próximos dos QMs (de elevado I_{cc}), já não é possível determinar uma faixa regular de grandeza para o I_{cc} , ficando a cargo da contribuição de curto circuito do transformador.

Pode-se considerar uma faixa segura para aplicação dos minidisjuntores, instalações cujo curto-circuito seja menor do que 20kA, enquanto que acima deste valor, costuma-se partir para disjuntores do tipo caixa moldada. Pontos da instalação com curto-circuito menor do que 10 kA são os mais seguros e comuns, e, portanto, aplicados em larga escala nas edificações.

4.4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Como visto no decorrer do capítulo 4, foram ensaiados vários cenários de modo a conhecer o comportamento dos barramentos blindados frente ao curto circuito.

Ficou evidente, conforme as Figuras 23 e 24, que há uma alteração considerável nos níveis de curto-circuito quando da escolha de barramentos blindados em comparação com os resultados obtidos no caso de instalações com múltiplos ramais convencionais em cabos, elevação essa na ordem de quase 200%.

Nas simulações dos cenários envolvendo barramentos blindados, visualizou-se que alguns parâmetros não foram determinantes no valor de I_{cc} , tais como o nível de curto-circuito primário e o comprimento do barramento blindado em si. Já o valor de potência instalada do transformador foi o fator que mais trouxe impacto para os cenários ensaiados, indicados na Figura 25, com variações de mais de 350%.

Outro fator de grande importância, que foi adicionado nas análises computacionais foi o uso de condutores de baixa seção e alta impedância após os QMs, simulando os trechos finais até os centros de distribuição em último nível, onde estão instalados os disjuntores das unidades privativas da edificação. Trechos curtos com estes cabos tiveram baixo para médio impacto na diminuição dos níveis de curto circuito, enquanto trechos mais longos (a partir de 20 metros) tiveram considerável redução de I_{cc} , permitindo a seleção de disjuntores de baixo nível de curto-circuito.

Verifica-se também, pela Figura 28, que independente da potência do transformador, os pontos em análise com utilização dos cabos de baixa seção e longa distância mantêm um comportamento uniforme de baixo valor de I_{cc} , variando de 4,1 a 2,3 kA, enquanto que junto aos QMs, estes valores são substancialmente maiores, variando de 16,5 a 4,7 kA.

Dessa forma os barramentos blindados ainda carecem de análise pontual de acordo com o seu projeto de aplicação, porém pode-se concluir que algumas combinações podem determinar características específicas para os valores de curto-circuito. No caso de pontos em análise junto aos barramentos blindados, nota-se altos valores de I_{cc} , principalmente quando do uso de transformadores de alta potência, enquanto nos pontos da instalação já distantes do QM, com utilização de cabos de baixa seção, os valores de I_{cc} são substancialmente baixos.

5 CONCLUSÃO

Como em todo o projeto elétrico, as características de cada sistema tornam a instalação dinâmica e única frente aos padrões estabelecidos, porém, sabe-se que algumas características tendem a se repetirem, de modo que seja possível realizar avaliações de desempenho de acordo com cada situação.

Neste trabalho, foi possível concluir que para variações de alguns parâmetros de entrada de uma instalação elétrica (Icc primária e distância de barramentos) pouco impacto há sobre os valores de Icc calculados nos pontos de interesse, enquanto outros dados (potência do transformador) são fundamentais na seleção dos dispositivos, vista dos valores de curto-circuito.

Procurou-se estabelecer faixas de dados de entrada de modo que pudesse ocorrer uma simples mudança de sistema de condução sem que fossem afetados os dispositivos de proteção, porém, notadamente houve uma variação bruta nos valores de curto-circuito, fazendo com que os resultados fossem adversos ao que inicialmente se supunha.

Fez-se ainda uma análise adicional quando do uso do software de simulação, onde estratificou-se a instalação até o centro de distribuição (CD) das salas da torre comercial, aplicando-se distâncias curtas e médias/longas, com o uso de cabo 10mm² e verificou-se que quando do uso de condutores de baixa seção, e conseqüente alta impedância, os valores de curto circuito caem bruscamente, mas se faz necessário um considerável comprimento de cabos para que o efeito tenha relevância no valor de curto circuito.

Ao final do trabalho, atingiu-se os objetivos propostos iniciais, uma vez que os cálculos de curto-circuito foram realizados e validados, assim como a simulação computacional. Além disso, foi possível realizar a análise de impacto da seleção dos barramentos blindados na condução de energia em instalações prediais, atendendo assim o escopo do trabalho em sua plenitude.

Diferente dos resultados esperados, viu-se que para uma considerável variação de tipologias de instalações os valores de curto-circuito mudaram de maneira substancial, requerendo severa atenção e cuidado na seleção dos dispositivos de proteção por parte dos projetistas em seus projetos com o uso de barramentos blindados.

Por fim, reafirma-se a necessidade de investimentos em estudos quanto à aplicação, impactos, otimização, custos e demais análises, de modo a fomentar o uso dos barramentos blindados aplicados a circuitos de alimentação em baixa tensão, de modo que todas as suas variáveis sejam conhecidas. É necessário conhecer todos os impactos nas instalações elétricas, e contribuir para a sociedade com estas análises de modo a consagrar o uso dos mesmos, e continuar a evolução tecnológica da engenharia elétrica e suas aplicações.

Como forma de continuidade ou complemento a este trabalho, sugerem-se os seguintes trabalhos:

- a) Análise de impacto de custo na seleção de dispositivos de proteção com diferentes níveis de curto-circuito;
- b) Análise completa e estratificada de custo x benefício na seleção de barramentos blindados como meio de condução de energia para centros de medição descentralizados;
- c) Análise dos impactos da alteração na energia incidente com a alteração da tipologia para barramentos blindados.

REFERÊNCIAS

BARTKOWIAK, Roberto A. **Circuitos elétricos**. 2. ed. São Paulo: Makron Books, 1999.

EISBERG, Robert; RESNICK, Robert. **Física quântica**: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas. Tradução de Paulo Costa Ribeiro, Ênio Costa da Silveira e Marta Feijó Barroso. Rio de Janeiro: Campus, 1979.

FITZGERALD, Arthur Eugene. **Engenharia elétrica**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1981.

HALLIDAY, David; RESNIK, Robert; KRANE, Denneth S. **Física 3**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004. v. 2.

HAYT, Kemmerly. **Análise de circuitos em engenharia**. São Paulo: McGraw-Hill, 1990.

KINDERMANN, Geraldo. **Curto circuito**. 2. ed. Porto Alegre: Saga Luzzatto, 1997.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas industriais**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MECATEL BARRAMENTOS. **Instalação barramentos**. Disponível em: <http://www.mecatel.com.br/barramento_blindado.html>. Acesso em: 26 nov. 2018.

MEGABARRE. **Catálogo produtos**. Disponível em: <http://files.megabarre.com.br/catalogs/20161219_CATALOGO_MV_Web.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16019: Linhas elétrica pré-fabricadas (barramentos blindados) de baixa tensão – Requisitos para instalação. Rio de Janeiro, 2011. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5410: Instalações Elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2004. 209 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 60439-2: Conjuntos de manobra e controle de baixa tensão Parte 2: Requisitos particulares para linhas elétricas pré-fabricadas (sistemas de barramentos blindados). Rio de Janeiro, 2004. 31 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 60947: Dispositivo de manobra e comando de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2013. 247 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 60898: Disjuntores para proteção de sobrecorrentes para instalações domésticas e similares. Rio de Janeiro, 2004. 116 p.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60364: Low-voltage electrical installations. Genebra, 2005. 47 p.