

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CAMPUS CURITIBA  
ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA / ELETROTÉCNICA**

**DILIOMAR MOREIRA DURÃES DA SILVA  
JEAN GABRIEL ROGENSKI PEREIRA  
ROGER DAL NEGRO**

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA  
ESTUDO DE PROTEÇÃO E SELETIVIDADE PARA ENTRADA DE  
SERVIÇO EM TENSÃO PRIMÁRIA DE DISTRIBUIÇÃO 13,8 kV  
CONFORME DIRETRIZES DA COPEL**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CURITIBA**

**2015**

**DILIOMAR MOREIRA DURÃES DA SILVA  
JEAN GABRIEL ROGENSKI PEREIRA  
ROGER DAL NEGRO**

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA  
ESTUDO DE PROTEÇÃO E SELETIVIDADE PARA ENTRADA DE  
SERVIÇO EM TENSÃO PRIMÁRIA DE DISTRIBUIÇÃO 13,8 kV  
CONFORME DIRETRIZES DA COPEL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado a disciplina de TCC2, do Curso Superior de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cícero Fritzen

**CURITIBA**

**2015**

Diliomar Moreira Durães da Silva  
Jean Gabriel Rogenski Pereira  
Roger Dal Negro

## **DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ESTUDO DE PROTEÇÃO E SELETIVIDADE PARA ENTRADA DE SERVIÇO EM TENSÃO PRIMÁRIA DE DISTRIBUIÇÃO 13,8 kV CONFORME DIRETRIZES DA COPEL**

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 29 de junho de 2015.

---

Prof. Emerson Rigoni, Dr  
Coordenador de Curso  
Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica

---

Profa. Annemarle Gehrke Castagna, Mestre  
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso  
de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica do DAELT

### **ORIENTAÇÃO**

---

Paulo Cícero Fritzen, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Orientador

### **BANCA EXAMINADORA**

---

Paulo Cícero Fritzen, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Antonio Ivan Bastos Sobrinho, Esp.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Raphael Augusto de Souza Benedito, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## RESUMO

SILVA, Diliomar M. D.; PEREIRA, Jean G. R.; NEGRO, Roger D. Desenvolvimento de ferramenta computacional para estudo de proteção e seletividade para entrada de serviço em tensão primária de distribuição 13,8 kV conforme diretrizes da COPEL. 2015. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica) do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Este trabalho aborda os conceitos envolvidos na elaboração de estudos de proteção e seletividade destinados a consumidores atendidos pela rede primária de distribuição da Companhia Paranaense de Energia. Segundo a NBR14039 estes estudos tornam-se obrigatórios para consumidores com potência de transformação superior a 300 kVA, e tem como fundamento o cálculo das correntes de curto-circuito no interior da instalação e da influência dos aparelhos elétricos para o circuito. O objetivo deste estudo é determinar os ajustes de tempo e corrente dos relés de proteção, bem como, dimensionar fusíveis destinados a proteção de transformadores. O resultado deste trabalho é a elaboração de um estudo de proteção e seletividade para uma indústria fictícia, seguindo passo a passo os conceitos envolvidos, e sem a utilização de *softwares* destinados a facilitar estes estudos. Por fim, apresenta uma ferramenta computacional capaz de auxiliar, e automatizar algumas etapas do desenvolvimento dos estudos de proteção e seletividade, gerando um relatório apto a aprovação pela concessionária.

**Palavras-chave:** estudo de proteção. Seletividade. Relé de sobrecorrente. Curto-circuito.

## ABSTRACT

SILVA, Diliomar M. D.; PEREIRA, Jean G. R.; NEGRO, Roger D. Development of computational tools for protection and selectivity study for entrance of electric power in main distribution 13.8 kV as COPEL's directives. 2015. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica) do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

This paper is about the concept involved in protection and selectivity studies destined for consumers connected in the primary network distribution of Companhia Paranaense de Energia. According to NBR14039 This situation is mandatory for consumers with transformation power over 300 kVA, and it evolves the calculation of short-circuit current inside the installation, also the influence of the electrical equipments to the circuit. The goal of the study is to determine the adjustment of time and current of the protection relay, as well as fuse's designation for transformer's protection. The result achieved in this paper is a presentation of a protection and selectivity study for a fictitious factory, following a step by step concept, without the use of computer software's. Lastly, it presents computational tools capable of assisting some development's stages of the protection and selectivity study, creating a report than can assist the Energy Utility.

Keywords: protection study. Selectivity. Overcurrent relay. Short-circuit.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: sistema de distribuição da Copel em 13,8 kV .....	21
Figura 2: componentes de sequência positiva .....	25
Figura 3: componentes de sequência negativa .....	26
Figura 4: componentes de sequência zero .....	26
Figura 5: diagrama típico de sequência positiva para cálculo da corrente de curto-circuito trifásico.....	28
Figura 6: diagrama típico de sequência positiva, negativa e zero para cálculo da corrente de curto-circuito monofásico .....	30
Figura 7: diagrama típico de sequência positiva e negativa para cálculo do curto-circuito bifásico .....	31
Figura 8: corrente de curto-circuito assimétrica e simétrica.....	32
Figura 9: característica instantânea (50/50N).....	43
Figura 10: curva IEC normal inversa .....	44
Figura 11: curva IEC muito inversa .....	45
Figura 12: curva IEC extremamente inversa .....	46
Figura 13: diagrama unifilar do esquema de proteção de um alimentador radial .....	48
Figura 14: curva da suportabilidade térmica categoria I .....	51
Figura 15: curva da suportabilidade térmica categoria II .....	52
Figura 16: curva da suportabilidade térmica categorias III e IV .....	52
Figura 17: curto-circuito trifásico.....	89
Figura 18: curto-circuito monofásico .....	90
Figura 19: proteção dos transformadores .....	91
Figura 20: início da EPS v1.0.....	95
Figura 21: guia “dados do consumidor” .....	95
Figura 22: guia “transformadores” .....	96
Figura 23: guia “impedâncias”, dados da concessionária.....	96
Figura 24: guia “impedâncias”, condutores.....	97
Figura 25: guia “impedâncias”, transformadores .....	98
Figura 26: guia “corrente do consumidor” .....	98
Figura 27: guia “transformador de corrente” .....	99
Figura 28: guia “proteção concessionária” .....	100
Figura 29: guia “ajustes de fase do relé” .....	100

Figura 30: guia “ajustes de neutro do relé” .....	101
Figura 31: guia “proteção transformadores” .....	102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: ocorrência de curto-circuitos .....	27
Tabela 2: nomenclatura para TCs de proteção .....	36
Tabela 3: tabela de seleção de fusíveis HH .....	39
Tabela 4: características de disjuntores instalados em consumidores atendidos em 13,8 kV ..	40
Tabela 5: valores dos coeficientes das curvas IEC .....	47
Tabela 6: fator de multiplicação para se determinar a corrente de “ <i>Inrush</i> ” em 0,1 s.....	50
Tabela 7: parâmetros para cálculo da curva de danos em transformadores a óleo, categoria I.... .....	53
Tabela 8: parâmetros para cálculo da curva de danos em transformadores a óleo, categoria II .. .....	54
Tabela 9: parâmetros para cálculo da curva de danos em transformadores a óleo, categoria III . .....	54
Tabela 10: parâmetros para cálculo da curva de danos em transformadores a óleo, categoria IV.....	54
Tabela 11: parâmetros para cálculo da curva de danos em transformadores a seco, categoria I . .....	55
Tabela 12: parâmetros para cálculo da curva de danos, em transformadores a seco, categoria II .....	55
Tabela 13: dados para curva de danos do transformador 1.....	56
Tabela 14: dados para curva de danos dos transformadores 2, 3 e 4.....	56
Tabela 15: intervalos de coordenação entre aparelhos de proteção.....	61
Tabela 16: ajustes das proteções da Copel .....	63
Tabela 17: impedâncias em p.u. do sistema elétrico no ponto de entrega.....	63
Tabela 18: resistências e reatâncias indutivas de fios e cabos com isolação 12/20 kv.....	65
Tabela 19: resistências e reatâncias indutivas e capacitivas de cabos de alumínio nu com alma de aço .....	70
Tabela 20: correntes de curto-circuito ponto 0 .....	73
Tabela 21: correntes de curto-circuito ponto 1 – CAB. MEDIÇÃO/PROTEÇÃO .....	74
Tabela 22: correntes de curto-circuito ponto 2 – CAB. SECCIONAMENTO .....	74
Tabela 23: correntes de curto-circuito ponto 3 – CAB. TRANSFORMAÇÃO (A) .....	75
Tabela 24: correntes de curto-circuito ponto 4 – CAB. TRANSFORMAÇÃO (B).....	75
Tabela 25: correntes de curto-circuito ponto 5 – POSTE 1.....	76

Tabela 26: correntes de curto-circuito ponto 6 – POSTE 2.....	76
Tabela 27: correntes de curto-circuito ponto 7 – POSTE 3.....	77
Tabela 28: correntes de curto-circuito ponto 8 – POSTE 4.....	77
Tabela 29: correntes de curto-circuito ponto 9 – POSTE 5.....	78
Tabela 30: correntes de curto-circuito ponto 10 – ETDI.....	78
Tabela 31: correntes de curto-circuito ponto 11 – TR3 (Bornes de BT).....	79
Tabela 32: correntes de curto-circuito ponto 12 – CCM-1.....	79
Tabela 33: correntes de curto-circuito ponto 13 – CCM-2.....	80
Tabela 34: correntes de curto-circuito ponto 14 – QDG-380 V (A) .....	80
Tabela 35: correntes de curto-circuito ponto 15 – QDG-380 V (B).....	81
Tabela 36: correntes de curto-circuito ponto 16 - QDG-220 V.....	81
Tabela 37: correntes de curto-circuito ponto 17 – REFEITÓRIO.....	82
Tabela 38: correntes de curto-circuito ponto 18 – PR-SUL.....	82

## LISTA DE SIGLAS

ABB	ASEA Brown Boveri
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACR	alta capacidade de ruptura
ANSI	American National Standards Institute
AT	alta tensão
AWG	american wire gage
BT	baixa tensão
CAB	cabine
CCM	centro de controle de motores
Copel	Companhia Paranaense de Energia
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz
DCI	detalhes de carga instalada
ETDI	estação de tratamento de dejetos industriais
HH	high-voltage high-rupturing capacity
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEC	International Electrotechnical Commission
p.u.	por unidade
PR-Sul	Paraná sul
PVO	pequeno volume de óleo
QDG	quadro de distribuição geral
SI	Sistema Internacional de Unidades
TC	transformador de corrente
TCC	trabalho de conclusão de curso
TP	transformador de potencial
NTC	norma técnica Copel

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1	TEMA .....	14
1.1.1	Delimitação do tema .....	14
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS .....	14
1.3	OBJETIVOS .....	15
1.3.1	Objetivo geral.....	15
1.3.2	Objetivos específicos .....	15
1.4	JUSTIFICATIVA .....	16
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	17
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
<b>2</b>	<b>NORMATIZAÇÃO .....</b>	<b>20</b>
2.1	NTC 900100 – CRITÉRIOS PARA APRESENTAÇÃO DE PROJETOS DE ENTRADA DE SERVIÇO .....	20
2.2	NTC 903100 – FORNECIMENTO EM TENSÃO PRIMÁRIA DE DISTRIBUIÇÃO .....	21
<b>3</b>	<b>CONCEITOS BÁSICOS SOBRE CURTOS-CIRCUITOS.....</b>	<b>23</b>
3.1	CÁLCULOS EM POR UNIDADE.....	23
3.1.1	Grandezas elétricas em por unidade.....	23
3.1.2	Equações Básicas .....	24
3.1.3	Sistema por unidade em estudos de proteção e seletividade.....	24
3.2	COMPONENTES SIMÉTRICOS .....	24
3.2.1	Componentes de sequência positiva .....	25
3.2.2	Componentes de sequência negativa.....	25
3.2.3	Componentes de Sequência Zero .....	26
3.3	CURTO-CIRCUITO .....	26
3.4	CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO .....	28
3.5	CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA.....	29
3.6	CURTO-CIRCUITO FASE-FASE .....	30
3.7	CURTO-CIRCUITO FASE-FASE-TERRA.....	32
3.8	SIMETRIA DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO .....	32
3.8.1	Fator de assimetria .....	33
<b>4</b>	<b>APARELHOS DE PROTEÇÃO.....</b>	<b>34</b>
4.1	TRANSFORMADORES DE CORRENTE.....	34
4.1.1	Exatidão .....	34
4.1.2	Saturação .....	35
4.1.3	Dimensionamento do TC de proteção.....	35
4.1.4	Especificação .....	36
4.2	FUSÍVEIS .....	37
4.2.1	Proteção de transformadores .....	38
4.3	DISJUNTORES DE MÉDIA TENSÃO .....	39
4.4	RELÉS DE PROTEÇÃO .....	40
4.4.1	Relés de sobrecorrente .....	41
4.4.1.1	Funções ANSI.....	41
4.4.1.2	Curvas de atuação .....	42
4.4.1.3	Conexão com o sistema.....	48

<b>5</b>	<b>ESTUDO DE PROTEÇÃO E SELETIVIDADE</b> .....	<b>49</b>
5.1	PROTEÇÃO ELÉTRICA .....	49
5.1.1	Proteção de transformadores de potência.....	49
5.1.1.1	Corrente de magnetização .....	49
5.1.1.2	Suportabilidade térmica .....	51
5.1.1.3	Curva de danos .....	53
5.1.1.4	Proteção primária e secundária de fase e terra .....	56
5.1.2	Proteção de condutores .....	57
5.2	SELETIVIDADE ELÉTRICA.....	59
5.2.1	Seletividade amperimétrica.....	59
5.2.2	Seletividade cronológica .....	60
5.2.3	Seletividade convencional.....	60
5.2.4	Intervalos de coordenação.....	60
<b>6</b>	<b>PROCEDIMENTOS PARA ELABORAÇÃO DO ESTUDO DE PROTEÇÃO E SELETIVIDADE</b> .....	<b>62</b>
6.1	SOLICITAÇÃO DE DADOS DO PONTO DE ENTREGA.....	62
6.2	DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS .....	63
6.2.1	Impedâncias dos transformadores .....	63
6.2.2	Impedâncias dos condutores isolados .....	64
6.2.3	Impedâncias dos condutores aéreos .....	69
6.3	ESTUDO DE CURTO-CIRCUITO.....	73
6.4	CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO DOS TRANSFORMADORES.....	83
6.5	CÁLCULO DA CORRENTE DE PARTIDA .....	83
6.6	DIMENSIONAMENTO DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE PROTEÇÃO.....	84
6.7	AJUSTES DO RELÉ DE PROTEÇÃO.....	85
6.7.1	Unidade temporizada de fase .....	86
6.7.2	Unidade instantânea de fase .....	86
6.7.3	Curva temporizada de fase.....	87
6.7.4	Unidade temporizada de neutro .....	87
6.7.5	Unidade instantânea de neutro .....	87
6.7.6	Curva temporizada de neutro .....	87
6.8	ESTUDOS DE SELETIVIDADE.....	88
6.9	RESUMO DO ESTUDO DE PROTEÇÃO .....	92
<b>7</b>	<b>FERRAMENTA ESTUDO DE PROTEÇÃO E SELETIVIDADE (EPS v1.0)</b> .....	<b>94</b>
7.1	FUNÇÕES DA FERRAMENTA.....	94
7.2	VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA .....	102
7.2.1	Dados iniciais .....	103
7.2.2	Comparação dos cálculos.....	103
7.2.3	Comparação dos gráficos .....	104
<b>8</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>106</b>
<b>9</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>107</b>
	ANEXO A – Apresentação do estudo de proteção e seletividade em entradas de serviço ...	110
	ANEXO B – Critérios de ajustes do sistema de proteção .....	111
	ANEXO C – Elos fusíveis de distribuição .....	112
	ANEXO D – Valores limites de correntes de fusão para elos fusíveis tipo “H” e tipo “K” ..	113
	ANEXO E – Diagrama unifilar da indústria “A” .....	114
	ANEXO F – Estudo de proteção e seletividade escritório “B” – PTW.....	117
	ANEXO G – Diagrama unifilar escritório “B” .....	125

APÊNCIDE A – Detalhes dos cálculos de impedância do Condutor C1 .....	126
APÊNCIDE B – Detalhes dos cálculos de impedância do Condutor C3 .....	127
APÊNCIDE C – Detalhes dos cálculos das correntes de curto-circuito no Ponto 0 .....	128
APÊNCIDE D – Estudo de proteção e seletividade escritório “B” – EPS.....	131

## 1 INTRODUÇÃO

O fornecimento em tensão primária de distribuição torna-se conveniente a partir do momento em que há muita carga instalada em determinado sistema elétrico, em casos onde não seria economicamente interessante para a concessionária fornecer energia em baixa tensão, pois, além de ter que arcar com o ônus da construção e montagem de uma subestação na via pública, teria de entrar na propriedade particular com cabos de grande capacidade de condução de corrente e, portanto de elevado custo (NISKIER, 2000).

Segundo a NTC 903100, o fornecimento será efetuado em tensão primária de distribuição (13,8 kV ou 34,5 kV) quando a carga instalada na unidade consumidora for superior a 75 kW, e a demanda de potência contratada ou estimada pelo interessado for igual ou inferior a 2.500 kW. Para instalações com potência de transformação superior a 300 kVA, torna-se obrigatório o estudo de proteção e seletividade, que determina os valores de ajustes dos aparelhos de proteção da unidade consumidora coordenando-os com as proteções da rede da Copel. Neste caso a proteção geral do sistema elétrico deverá ser feita através de disjuntor de alta tensão com atuação comandada por relé secundário (funções 50/51 e 50N/51N).

O objetivo da proteção em sistemas elétricos é impedir que falhas causem riscos à vida dos que estão no entorno do sistema, bem como evitar danos em bens materiais. Já a seletividade tem a função de selecionar, coordenar e aplicar a correta proteção, no menor tempo possível, isolando a menor porção do sistema elétrico (MARDEGAN, 2012).

Para apresentação de projetos de instalações elétricas de unidades consumidoras atendidas em tensão primária de distribuição, devem ser atendidos os requisitos do formulário da COPEL, apresentado no anexo A, “Apresentação do Estudo de Proteção e Seletividade em Entradas de Serviço”, que indica os documentos e cálculos necessários para aprovação de projetos de entradas de serviço.

## 1.1 TEMA

Este trabalho aborda os conceitos envolvidos no desenvolvimento de uma ferramenta computacional para estudo de proteção e seletividade para entrada de serviço em tensão primária de distribuição 13,8 kV conforme diretrizes da norma NTC 903100 – Fornecimento em Tensão Primária de Distribuição – Versão Novembro/2013 e formulário “Apresentação do Estudo de Proteção e Seletividade de Entrada de Serviço” da Copel.

### 1.1.1 Delimitação do tema

Serão analisadas as normas e procedimentos nacionais e internacionais referentes a critérios de projetos e estudos de entradas de serviço com fornecimento em tensão primária de distribuição. Como base teórica, serão utilizadas as normas técnicas da Companhia Paranaense de Energia, em especial ao que se refere a entradas de energia com tensão de fornecimento em 13,8 kV.

O estudo trata de unidades consumidoras com um ou mais transformadores, com ligação do tipo delta no primário e estrela no secundário, considerando que não existirá paralelismo entre geradores particulares e o sistema elétrico da concessionária.

Com base nos conceitos apresentados, será desenvolvida ferramenta computacional que auxilie na elaboração do estudo de proteção e seletividade conforme as exigências da Copel.

## 1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Em um sistema elétrico, falhas podem ocorrer em diferentes lugares e por diversos motivos. Cada falha possui características próprias que afetam o sistema de modo particular. Um sistema de proteção e seletividade eficaz é aquele que possui capacidade de identificar o motivo da falha, e funções adequadas para solucioná-la da melhor maneira possível.

O profissional designado ao estudo da proteção e seletividade em sistemas elétricos, encontra dificuldades, uma vez que devem ser consideradas muitas variáveis em sua análise, de forma que em algumas etapas do estudo devam ser levantadas hipóteses que se aproximem das características do sistema elétrico real. No estudo da proteção elétrica, será necessária a determinação dos aparelhos utilizados em função das propriedades elétricas da carga alimentada. Simultaneamente a este estudo, deverão ser analisadas as variáveis envolvidas na

seletividade do acionamento das diversas proteções elétricas do sistema, que influenciam quanto ao momento e modo de operação destas.

Para a elaboração destes estudos, serão necessários diversos dados do sistema elétrico em questão, como impedâncias de aparelhos e condutores; em alguns casos, estes dados são dificilmente obtidos, principalmente quando se tem pouca documentação referente a este sistema. Nestes casos, devem ser tomadas algumas considerações para representar seus componentes da forma mais próxima ao real possível: essas ponderações podem ser feitas desde o cálculo das impedâncias dos condutores até os ajustes dos aparelhos de proteção da concessionária.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver uma ferramenta computacional que auxilie a elaboração do estudo de proteção e seletividade em entradas de serviço de unidades consumidoras atendidas pela Copel, em tensão primária de distribuição. A ferramenta proverá informações técnicas, como curva de proteção elétrica, cálculo de curto-circuito, entre outras, conforme exigências do formulário “Apresentação do Estudo de Proteção e Seletividade de Entrada de Serviço” da COPEL (Companhia Paranaense de Energia).

#### 1.3.2 Objetivos específicos

- Estudo sobre proteção e seletividade em unidades consumidoras alimentadas em tensão primária de distribuição 13,8 kV.
- Coletar dados elétricos em catálogos de fabricantes, como impedâncias em transformadores, cabos e aparelhos, potências consumidas e potências de transformação, e dados da rede elétrica, normalmente fornecidos pela concessionária de energia.
- Apresentação e análise dos componentes do sistema elétrico de uma indústria fictícia, contendo diagramas unifilares e dados obtidos diretamente com a concessionária de energia responsável por esta unidade consumidora.

- Realizar o estudo de proteção e seletividade da entrada de serviço da indústria, de acordo com as exigências referentes a apresentação de projetos de instalações elétricas da Copel.
- Buscar catálogos e manuais de aparelhos elétricos, para obtenção de um banco de dados essenciais para os cálculos e gráficos necessários para o estudo.
- Desenvolver uma ferramenta computacional, utilizando como base recursos do *Microsoft Office Excel e Visual Basic*. A ferramenta será responsável por coletar dados elétricos fornecidos pelo usuário, realizar os cálculos necessários para um estudo de proteção e seletividade, e gerar relatório apresentando suas análises.
- O relatório gerado pela ferramenta deverá estar de acordo com as exigências das normas de apresentação de projetos de instalação elétrica da Copel.
- Validação dos relatórios gerados pela ferramenta desenvolvida, através de comparação com estudos de proteção e seletividade elaborados por outros *softwares* e aprovados na Copel.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

Trabalhar com segurança é uma das principais exigências, sempre que a eletricidade está envolvida, bem como em diversas outras áreas de trabalho. Desde serviços simples a operações mais complexas, a vida dos envolvidos é o bem mais precioso. Quando o assunto sistema elétrico de potência é abordado, devem ser considerados todos os riscos que estão agregados a esta área. Acidentes envolvendo eletricidade podem facilmente levar profissionais a se afastarem desta área por incapacitação; porém, em muitos casos, estes acidentes são fatais. (MTE – NR-10, 2004).

Com o desenvolvimento de novas tecnologias na área elétrica, esta passa a ter maior importância para os profissionais da eletricidade, pois os novos aparelhos produzidos passam a satisfazer os quesitos precisão, confiabilidade e continuidade.

Para sistemas de potência com elevados valores de carga, os riscos tornam-se tão grandes que não há como realizar uma instalação elétrica industrial sem um estudo de proteção e seletividade.

No desenvolvimento da ferramenta computacional desenvolvida neste trabalho, serão coletados inúmeros dados de diversos fabricantes. Com isso, pretende-se comparar a atuação

dos diferentes tipos de aparelhos, verificando qual terá o melhor aproveitamento para aquela situação, melhorando a implantação da proteção nas futuras instalações.

## 1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Primeiramente será realizada uma pesquisa de referência bibliográfica sobre proteção e seletividade, tendo como base e material de apoio, livros, artigos, dissertações, revistas e etc.

Após a apresentação dos conceitos básicos e componentes dos sistemas de proteção, será apresentada uma indústria real, que servirá de base para elaboração do estudo de proteção e seletividade. Este estudo será desenvolvido a partir das premissas da Copel.

Durante a etapa de estudo, serão coletados dados de aparelhos elétricos, com o objetivo de levantar um banco de dados com diversos modelos e fabricantes.

Uma vez realizado o estudo para a planta em análise, será criada uma ferramenta que auxilie na criação dos próximos estudos, levando em conta as dificuldades e premissas encontradas para o primeiro.

Os resultados obtidos desta ferramenta serão comparados com estudos de proteção e seletividade aprovados na Copel, e elaborados por outro *software*, no caso, o PTW (Power Tools For Windows).

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) será composto das etapas a seguir.

### 1. INTRODUÇÃO

Uma breve contextualização, apresentando algumas características das entradas de energia com fornecimento pela Copel, e a necessidade do estudo da proteção e da seletividade.

### 2. NORMATIZAÇÃO

Nesta etapa, serão brevemente apresentadas as normas referentes a instalações elétricas em unidades consumidoras com fornecimento da Copel, por sua rede de distribuição primária em 13,8 kV.

### 3. CONCEITOS BÁSICOS

Serão apresentados os conceitos básicos envolvidos no estudo de proteção e seletividade elétrica, iniciando com definições de cálculo por unidade, componentes simétricos, impedâncias de aparelhos e cálculos de curtos-circuitos simétricos e assimétricos.

### 4. APARELHOS DE PROTEÇÃO

É a etapa onde são apresentados os principais aparelhos de proteção; serão estudados detalhadamente: fusíveis, relés, disjuntores e transformadores de corrente.

Serão estudadas as influências que cada aparelho tem sobre o circuito elétrico de uma indústria.

### 5. ESTUDO DA PROTEÇÃO E SELETIVIDADE

Esta etapa apresentará os conceitos envolvidos nos estudos de proteção e seletividade e como se deve proceder para obter análises. O objetivo desta etapa é determinar quais informações serão necessárias para gerar um relatório para apresentação do estudo de proteção e seletividade na Copel.

### 6. PROCEDIMENTOS PARA ELABORAÇÃO DO ESTUDO DE PROTEÇÃO E SELETIVIDADE

Com base nos estudos abordados no item 5, serão apresentados os procedimentos para criação do estudo de proteção e seletividade; para facilitar as explicações, será utilizada como exemplo uma grande indústria real atuante na área de bebidas. Nesta etapa será gerado um relatório.

### 7. LEVANTAMENTO DE DADOS

Com base em catálogos e manuais de fabricantes de aparelhos elétricos, serão levantados dados técnicos em função das necessidades encontradas na elaboração do estudo de proteção e seletividade da indústria. Estes dados serão coletados para futuras análises.

### 8. DESENVOLVIMENTO DO *SOFTWARE*

Será desenvolvida uma ferramenta com função de executar os cálculos necessários ao estudo de proteção e seletividade, bem como gerar um relatório com todas as análises, apresentadas de acordo com as normas da Copel.

## 9. VALIDAÇÃO DO *SOFTWARE*

Os resultados obtidos através da nova ferramenta serão comparados com estudos de proteção e seletividade elaborados por outros *softwares* e aprovados na Copel.

## 2 NORMATIZAÇÃO

Projetos e execuções de instalações elétricas exigem um amplo conhecimento técnico para garantir sua eficiência, qualidade, e proteção para os usuários, aparelhos, e o ambiente ao redor. Na área elétrica, bem como em outras áreas, conforme a necessidade de aprofundar-se em determinado assunto, surge a exigência da especialização e perícia. Isto também fica nítido quando o grau de responsabilidade aumenta, onde ações inconsequentes tomadas, podem levar a riscos altíssimos, porém, desnecessários.

Instalações elétricas em baixa ou alta tensão apresentam riscos aos seres vivos e aparelhos; porém, este risco pode ser controlado. Um curto circuito, por exemplo, pode elevar facilmente o valor eficaz da corrente em escalas fatais aos seres humanos, sem mencionar os danos aos aparelhos. Isto implica a exigência de proteções elétricas adequadas a este sistema.

Com o intuito de auxiliar os profissionais da área elétrica na elaboração de projetos, órgãos como a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e concessionárias, como a Companhia Paranaense de Energia (Copel), estabeleceram uma série de normas com bases em estudos, pesquisas, ensaios laboratoriais entre outros. Estas normas trazem informações, medidas e valores, a fim de conceber um projeto de uma instalação elétrica ideal, onde todos os aparelhos operam com a maior segurança e com o menor consumo possível.

A seguir serão apresentados alguns pontos importantes de algumas NTCs (Normas Técnicas da Copel), bem como o que é necessário para aprovação do estudo de proteção e seletividade na Copel.

### 2.1 NTC 900100 – CRITÉRIOS PARA APRESENTAÇÃO DE PROJETOS DE ENTRADA DE SERVIÇO

A norma NTC 900100 apresenta a documentação mínima necessária para apresentação do projeto de entradas de serviço. Alguns pontos importantes a destacar sobre esta norma, são as advertências quanto à responsabilidade: ela não implica em responsabilidade da Copel quanto “à qualidade dos materiais, a proteção contra riscos e danos à propriedade, ou à segurança de terceiros” .

Além de algumas de instalações elétricas em baixa tensão, todos os projetos de unidades consumidoras atendidas em tensão primária de distribuição deverão ser apresentados para análise da Copel, e seguir as diretrizes desta norma.

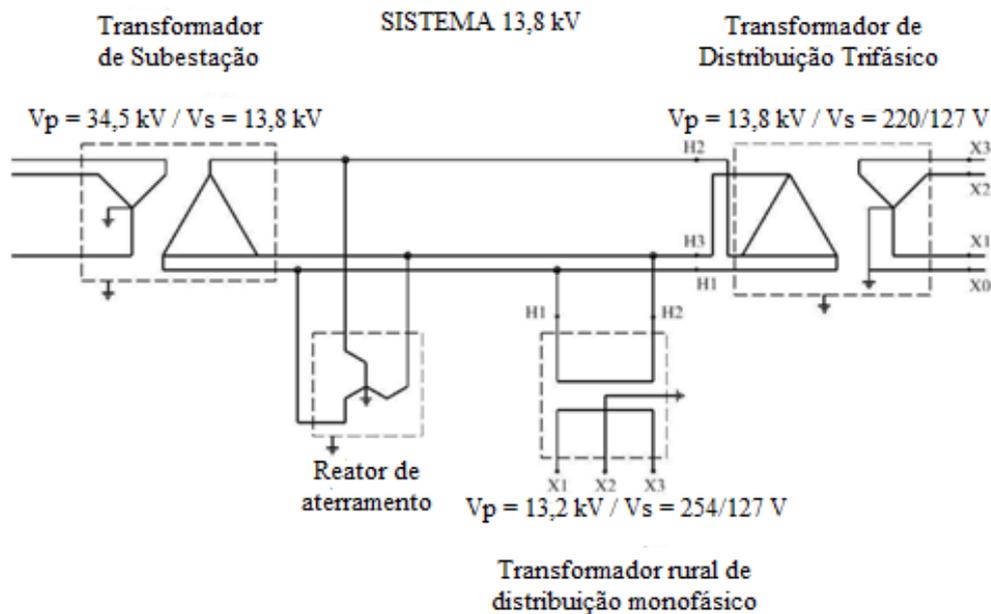
Diagramas unifilares, planta de situação, memoriais descritivos, entre outros documentos, são exigidos e padronizados por esta norma; porém, um deles será o principal objeto de estudo deste trabalho: a “Planilha Resumo do Estudo de Proteção”, que apresentará os valores de curto-circuito e ajustes dos relés de proteção da unidade consumidora.

## 2.2 NTC 903100 – FORNECIMENTO EM TENSÃO PRIMÁRIA DE DISTRIBUIÇÃO

A norma NTC 903100 visa a unificação de procedimentos envolvidos no fornecimento de energia elétrica às unidades consumidoras atendidas em rede primária, nas tensões 13,8 kV e 34,5 kV.

É estabelecido que serão atendidas em tensão primária de distribuição, unidades consumidoras com carga instalada superior a 75 kW, e demanda de potência igual ou inferior a 2.500 kW.

A distribuição poderá ser feita em tensão nominal de 13,8 kV, sistema em triângulo, ou 34,5 kV, sistema em estrela. Será adotado neste trabalho, o estudo do sistema trifásico a três condutores ligados em triângulo, e tensão nominal de 13,8 kV, conforme o sistema da figura 1.



**Figura 1: sistema de distribuição da Copel em 13,8 kV.**

**Fonte: NTC 903100 (Companhia Paranaense de Energia, 2012).**

Quanto às proteções da unidade consumidora, é determinado nesta NTC que admita coordenação com as proteções da rede da Copel, e recomenda-se que esta proteção seja dimensionada e ajustada de modo a permitir adequada seletividade entre os demais aparelhos de proteção da instalação. A norma padroniza os procedimentos de instalação de transformadores de potencial e de corrente, onde exige que sejam instalados à montante do disjuntor geral, evitando que falhas no próprio disjuntor interfiram na alimentação destes aparelhos.

É permitido que o aparelho de manobra e proteção seja a própria chave fusível da rede da Copel, se a instalação dispuser de transformador único de até 300 kVA. Caso exista mais de um transformador, deverá ser instalado aparelho de manobra e proteção imediatamente após a medição, permitindo a utilização de chave seccionadora com abertura sob carga e fusível ACR ou disjuntor acionado por relé secundário. Para instalações com potência de transformação acima de 300 kVA, a proteção geral deverá ser feita através de disjuntor de alta tensão comandada por relé secundário com as funções 50/51 e 50/51N.

Os sistemas de proteção com relé secundário deverão possuir duas fontes capacitivas: uma para o circuito *trip* do disjuntor, e outra para alimentação auxiliar do relé. Estas fontes deverão ser exclusivas para o sistema de proteção, além de possuir um botão para desconectar o capacitor da fonte do circuito, para fins de sinalização e testes; deverá manter a energia armazenada em níveis satisfatórios, sendo capaz, na falta de alimentação da concessionária, de manter o relé em funcionamento durante no mínimo sessenta segundos, e deverá suportar aberturas seguidas sobre o disjuntor.

Em casos de impossibilidade de proteção do transformador pelo relé secundário, recomenda-se a utilização de fusíveis de alta capacidade de ruptura. A escolha do fusível a ser instalado, deve ser em função do múltiplo 1,5 a 2,5 da corrente nominal do transformador a ser protegido.

A norma estabelece as características do relé de proteção secundária que deverá ser microprocessado, conter as funções 50/51 (relé de sobrecorrente instantâneo e temporizado de fase), 50/51N (relé de sobrecorrente instantâneo e temporizado de neutro) e 74 (relé de alarme), possuir interface homem/máquina para parametrização e verificações de ajuste, lacres de acesso, indicações através de LEDs ou display dos estados abertura por fase e abertura por neutro, função *auto-check* que verifica a correta operação de todas suas funções do relé, e contato de *watch dog* que reinicia o aparelho em caso de falha de funcionamento do programa principal, e possuir no mínimo as curvas-padrão pré-ajustadas (normal inversa, muito inversa e extremamente inversa) para faltas entre fases e fase-terra.

### 3 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE CURTOS-CIRCUITOS

#### 3.1 CÁLCULOS EM POR UNIDADE

Em sistemas elétricos onde existe mais de um nível de tensão, ou seja, quando existem transformadores de potência, pode-se utilizar o sistema por unidade (p.u.) para facilitar cálculos. O auxílio se dá, tendo em vista que em um sistema em p.u., os níveis de tensão são unificados, permitindo a análise de vários aparelhos e componentes do sistema no mesmo nível de tensão.

Um dado em p.u. é a relação entre seu valor real e um valor base pré-definido. O valor obtido da relação será um número sem unidade. Devem-se determinar os valores básicos de potência e tensão de modo a reduzir ao máximo a quantidade de cálculos. (NISKIER, 1978).

##### 3.1.1 Grandezas elétricas em por unidade

Para o cálculo de grandezas elétricas como, potência ( $S$ ), corrente ( $i$ ), tensão ( $V$ ) e impedância ( $Z$ ), devem-se utilizar as seguintes relações:

$$S [pu] = \frac{S \text{ real } [VA]}{S \text{ base } [VA]} \quad (1)$$

$$i [pu] = \frac{i \text{ real } [A]}{i \text{ base } [A]} \quad (2)$$

$$V [pu] = \frac{V \text{ real } [V]}{V \text{ base } [V]} \quad (3)$$

$$Z [pu] = \frac{Z \text{ real } [\Omega]}{Z \text{ base } [\Omega]} \quad (4)$$

### 3.1.2 Equações Básicas

Após a obtenção de pelo menos duas das grandezas elétricas citadas anteriormente em p.u., como por exemplo, potência ( $S$ ) e tensão ( $V$ ), podem-se utilizar as equações básicas para determinar as demais; utilizam-se, por exemplo, as seguintes equações:

$$Z \text{ [pu]} = \frac{V^2 \text{ [pu]}}{S \text{ [pu]}} \quad (5)$$

$$i \text{ [pu]} = \frac{S \text{ [pu]}}{V \text{ [pu]}} \quad (6)$$

### 3.1.3 Sistema por unidade em estudos de proteção e seletividade

Ao iniciar o estudo de proteção e seletividade em uma entrada de serviço, deve-se solicitar junto à concessionária de energia elétrica, dados de curto-circuito e impedância do sistema elétrico no ponto de entrega. Normalmente, a Copel fornece estes dados em valores por unidade de uma grandeza, o que simplifica os cálculos necessários para a elaboração dos estudos.

Em estudos de proteção e seletividade de entradas de serviço em 13,8 kV, destinados a aprovação na Copel, comumente são adotados os seguintes valores base:

Potência base: 100 MVA (trifásico).

Tensão base: 13,8 kV (tensão de linha).

## 3.2 COMPONENTES SIMÉTRICOS

Segundo Stevenson (1978), desde 1918 a análise por componentes simétricos é uma das ferramentas mais importantes quando se trata de cálculos em circuitos desequilibrados.

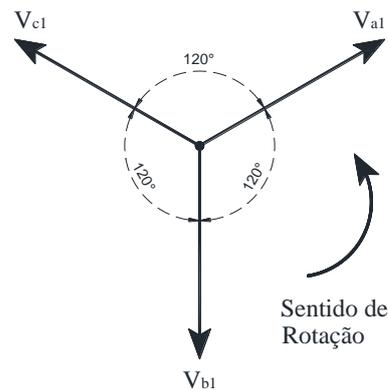
O Dr. C. L. Fortescue, responsável por este método, concluiu que um sistema trifásico não simétrico ou desequilibrado, pode ser decomposto em três sistemas de fasores equilibrados: sequência positiva, sequência negativa, e outro denominado de sequência zero, de maneira que uma sequência de fasores qualquer pode ser escrita da seguinte forma:

$$\vec{V}_A = \begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \vec{V}_0 + \vec{V}_1 + \vec{V}_2 = \begin{bmatrix} \dot{V}_{A0} \\ \dot{V}_{B0} \\ \dot{V}_{C0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{V}_{A1} \\ \dot{V}_{B1} \\ \dot{V}_{C1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{V}_{A2} \\ \dot{V}_{B2} \\ \dot{V}_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{A0} + \dot{V}_{A1} + \dot{V}_{A2} \\ \dot{V}_{B0} + \dot{V}_{B1} + \dot{V}_{B2} \\ \dot{V}_{C0} + \dot{V}_{C1} + \dot{V}_{C2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

“As muitas vantagens da análise dos sistemas de potências pelo método dos componentes simétricos tornar-se-ão evidentes gradualmente, à medida em que vamos aplicando o método ao estudo das faltas assimétricas a sistemas simétricos”. (STEVENSON, 1978).

### 3.2.1 Componentes de sequência positiva

Composto por três fasores de mesmo módulo e defasados entre si de 120°, com mesma sequência do sistema original, conforme mostra a figura 2.

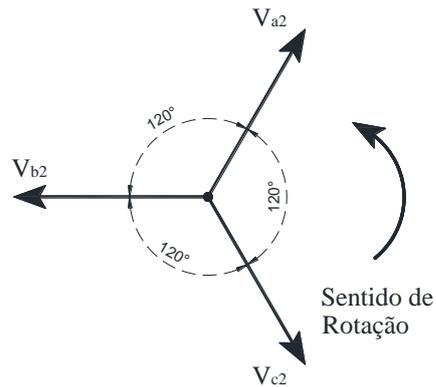


**Figura 2: componentes de sequência positiva.**

**Fonte: Stevenson (1978).**

### 3.2.2 Componentes de sequência negativa

Composto por três fasores de mesmo módulo e defasados entre si de 120°, porém com sequência inversa a do sistema original, conforme mostra a figura 3.

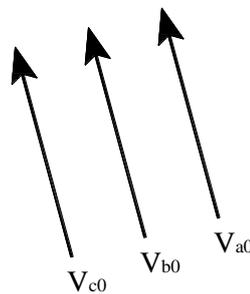


**Figura 3: componentes de sequência negativa.**

Fonte: Stevenson (1978).

### 3.2.3 Componentes de sequência zero

Composto por três fasores de mesmo módulo e fase, ou seja, defasagem zero entre si, sem rotação, conforme mostra a figura 4.



**Figura 4: componentes de sequência zero.**

Fonte: Stevenson (1978).

## 3.3 CURTO-CIRCUITO

O fenômeno ocorrido no contato entre dois ou mais pontos com diferentes potenciais elétricos, reduzindo subitamente a impedância do sistema, é denominado “curto-circuito”; os efeitos deste fenômeno são indesejáveis, pois causam elevações aos níveis de corrente, o que gera um aquecimento indesejado nos condutores e aparelhos que não são dimensionados para suportar estas correntes, podendo danificá-los ou provocar riscos a vida de pessoas ou animais.

As elevações dos níveis de corrente provenientes de curtos-circuitos, geram também forças mecânicas entre os condutores em falha, podendo danificar isoladores, enrolamentos de transformadores, danos físicos em painéis ou outros aparelhos que não forem projetados levando em conta estes esforços (SCHNEIDER-ELECTRIC, 2013).

A corrente de curto-circuito que circula em um sistema elétrico é determinada pelas forças eletromotrizes e impedâncias internas da fonte, e as impedâncias situadas entre ela e o ponto onde ocorreu a falta (STEVENSON, 1978).

Segundo Kindermann (1997), um curto-circuito pode ocorrer em qualquer ponto do sistema, podendo ser provocado por defeitos em isolações, problemas mecânicos ou elétricos, altas temperaturas, manutenções inadequadas, manobras incorretas, vandalismos, entre outras causas.

Os sistemas de potências mais vulneráveis a faltas são os sistemas de distribuição e transmissão, devido a variação de relevo.

As faltas de maior ocorrência são as faltas entre fase e terra; em compensação, devido a sua natureza física, as faltas com maior dificuldade para ocorrer são as faltas trifásicas; as médias de ocorrência de curto-circuito de cada tipo são:

Tabela 1: ocorrência dos curto-circuitos.

<b>Tipo da falta</b>	<b>Ocorrência</b>
Trifásico	6%
Bifásico fase-fase	15%
Bifásico fase-fase-terra	16%
Monofásico	63%

Fonte: Kindermann (1978).

Para eliminar um curto-circuito de forma mais rápida e eficaz, deve-se conhecer seus efeitos por toda a instalação elétrica; portanto, deverão ser calculadas as correntes de curto-circuito em vários pontos distintos. Obter as dimensões das correntes de falta é um dos processos no dimensionamento de condutores e proteções da rede elétrica.

### 3.4 CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO

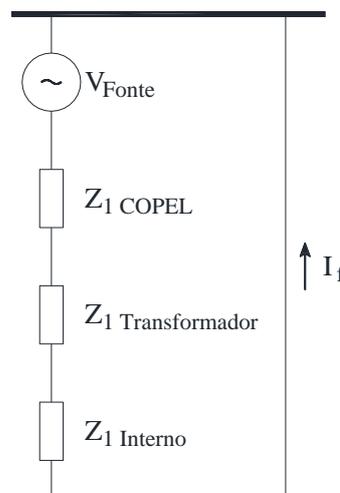
Curto-circuito trifásico é a falta onde as correntes nas três fases são equilibradas; admite-se, que neste, caso existem apenas os componentes de sequência positiva, caracterizando-o como um curto-circuito simétrico.

Por ser balanceado, é possível calcular as correntes de falta considerando apenas uma fase do circuito, sendo indiferente para a análise a existência ou não de contato entre as fases e a terra.

O formulário da Copel, apresentado no anexo A, “Apresentação do Estudo de Proteção e Seletividade em Entradas de Serviço”, indica a necessidade do cálculo de curto-circuito trifásico simétrico no ponto de instalação dos transformadores de corrente e da maior corrente de falta ocorrida na baixa tensão referida ao primário.

Para obter a corrente de curto-circuito trifásico, devem-se determinar as impedâncias acumuladas entre a fonte e o ponto onde ocorreu a falta. Portanto, deverão ser conhecidas as impedâncias de sequência positiva no ponto de entrega, dados fornecidos pela concessionária ( $Z_1$  COPEL), impedância de sequência positiva do transformador ( $Z_1$  Transformador) e dos condutores e demais aparelhos existentes no interior do sistema, compreendidos entre o transformador e o ponto onde incide o curto-circuito ( $Z_1$  Interno) (KINDERMANN, 1997).

A figura a seguir representa o diagrama típico de sequência positiva para cálculo da corrente de curto-circuito trifásico em unidades consumidoras atendidas pela rede primária de 13,8 kV da Copel, em delta.(valores por fase)



**Figura 5: diagrama típico de sequência positiva para cálculo da corrente de curto-circuito trifásico.**

**Fonte: Kindermann (1978).**

Portanto, para o cálculo do curto-circuito trifásico simétrico, será utilizada a seguinte equação:

$$I_{cc\ 3\phi} = \frac{V_F}{\sum Z_1}, \quad (8)$$

onde,  $\sum Z_1$  representa o somatório das impedâncias de sequência positiva entre a fonte e o ponto ao qual deseja-se calcular a amplitude do curto-circuito trifásico.

### 3.5 CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA

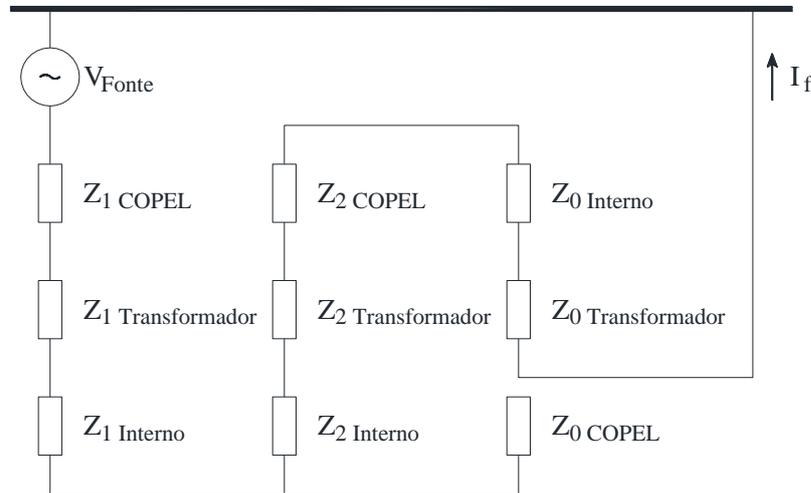
Nos sistemas elétricos, as falhas mais comuns são as assimétricas, sendo que destas, a de maior ocorrência é a falta monofásica; ela ocorre no contato entre uma fase do sistema e a terra.

O formulário da Copel, apresentado no anexo A, “Apresentação do Estudo de Proteção e Seletividade em Entradas de Serviço”, indica a necessidade do cálculo de curto-circuito monofásico simétrico no ponto de instalação dos transformadores de corrente e da mínima corrente de falta na rede interna de alta tensão, adotando os valores de resistência de falta  $3 \times R_f = 21 + j0$  pu com tensão base de 13,8 kV, segundo o IEEE, 1999, este valor de  $21 + j0$  pu, ou  $40 \Omega$ , é um valor assumido internacionalmente como valor médio de resistência de falta; porém, contesta-se a utilização deste valor, tendo em vista que é difícil determinar quando teve origem a utilização deste para a determinação da corrente de falta entre fase e terra. A IEEE indica ainda, que o documento mais antigo conhecido que utiliza  $40 \Omega$ , data de 1937, pertencente a *Edison Electric Institute and Bell Telephone System*.

A corrente de curto-circuito monofásica terá as componentes simétricas de sequência positiva, negativa e zero; portanto, deverá ser determinado o somatório de todas as impedâncias  $Z_1, Z_2$  e  $Z_0$  existentes da fonte geradora ao ponto onde ocorre a falha. (KINDERMANN, 1997).

Em sistemas elétricos com transformador de potência com ligação do tipo Dyn, primário em delta e secundário em estrela com neutro acessível, como o condutor neutro não tem conexão entre os enrolamentos do primário e do secundário, a impedância de sequência zero entre a fonte e o ponto de entrega deverá ser desconsiderada no somatório de impedâncias.

A figura a seguir representa o diagrama típico de seqüências positiva, negativa e zero para cálculo da corrente de curto-circuito monofásico em unidades consumidoras atendidas pela rede primária de 13,8 kV da Copel e com transformador em ligação Dyn.



**Figura 6: diagrama típico de seqüência positiva, negativa e zero para cálculo da corrente de curto-circuito monofásico.**  
**Fonte: Kindermann (1978).**

Portanto, para o cálculo do curto-circuito fase-terra, em sistemas elétricos com transformador de potência do tipo Dyn, será utilizada a seguinte equação:

$$I_{cc\ 1\phi} = \frac{3 \cdot V_F}{\sum Z_1 + \sum Z_2 + \sum Z_0}, \quad (9)$$

onde,  $\sum Z_1$ ,  $\sum Z_2$  e  $\sum Z_0$  representam respectivamente os somatório das impedâncias de seqüência positiva, negativa e nula entre a fonte e o ponto ao qual deseja-se calcular a amplitude do curto-circuito monofásico.

### 3.6 CURTO-CIRCUITO FASE-FASE

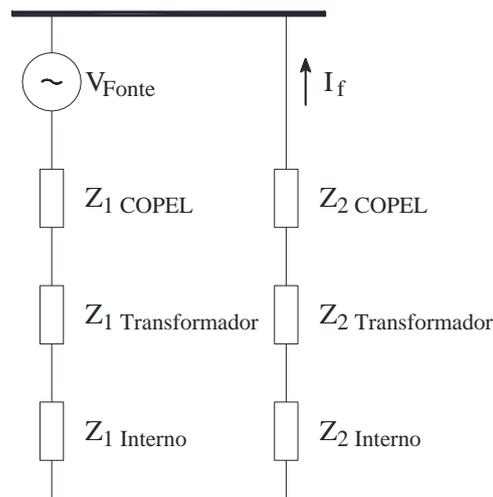
O curto-circuito bifásico ou fase-fase ocorre no contato entre duas fases do sistema elétrico.

O cálculo da amplitude da corrente desta falta não é solicitado pela Copel; porém, será considerado neste estudo devido a necessidades além da aprovação do projeto na

concessionária; por exemplo, o cálculo dos esforços mecânicos dos barramentos de um painel provenientes de curtos-circuitos bifásicos.

Para obter a corrente de curto-circuito fase-fase, devem-se determinar as impedâncias acumuladas entre a fonte e o ponto onde ocorreu a falta, desconsiderando a componente de sequência zero, que não se manifesta nesta falta. Portanto, deverão ser conhecidas as impedâncias de sequência positiva e negativa no ponto de entrega, dados fornecidos pela concessionária ( $Z_{1\text{ COPEL}}$  e  $Z_{2\text{ COPEL}}$ ), impedância de sequência positiva e negativa do transformador ( $Z_{1\text{ Transformador}}$  e  $Z_{2\text{ Transformador}}$ ) e dos condutores e demais aparelhos existentes no interior do sistema, compreendidos entre o transformador e o ponto onde incide o curto-circuito ( $Z_{1\text{ Interno}}$  e  $Z_{2\text{ Interno}}$ ). (KINDERMANN, 1997).

A figura a seguir representa o diagrama típico de seqüências positiva e negativa para cálculo da corrente de curto-circuito bifásico em unidades consumidoras atendidas pela rede primária de 13,8 kV da Copel.



**Figura 7: diagrama típico de seqüência positiva e negativa para cálculo da corrente de curto-circuito bifásico.**

**Fonte: Kindermann (1978).**

Pode-se considerar  $\sum Z_1 = \sum Z_2$ , portanto, para o cálculo do curto-circuito fase-fase, será utilizada a seguinte equação:

$$I_{cc\ 2\phi} = \frac{\sqrt{3}V_F}{\sum Z_1 + \sum Z_2} = \frac{V_L}{2 \cdot \sum Z_1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{cc\ 3\phi}, \quad (10)$$

onde,  $\sum Z_1$ ,  $\sum Z_2$  representam respectivamente os somatório das impedâncias de sequência positiva e negativa entre a fonte e o ponto ao qual deseja-se calcular a amplitude do curto-circuito monofásico.

### 3.7 CURTO-CIRCUITO FASE-FASE-TERRA

Neste tipo de curto-circuito, além do contato entre duas fases do sistema elétrico, ocorre o contato com a terra.

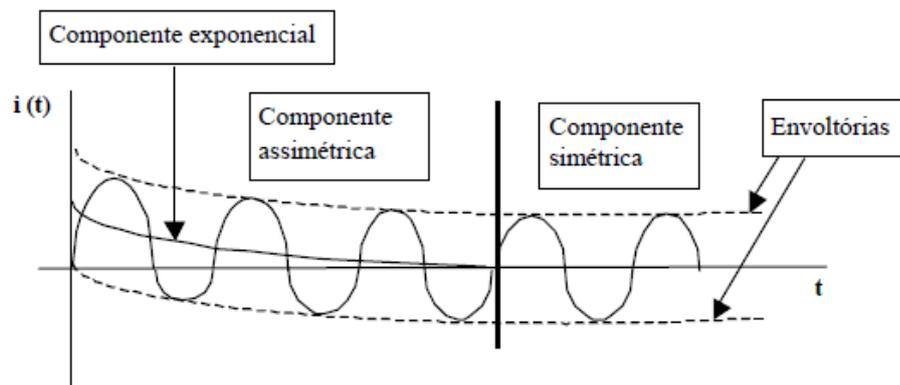
Diferente da anterior, a corrente de falta na falha fase-fase-terra terá a componente de sequência zero; portanto, deverá ser considerada nos cálculos. (KINDERMANN, 1997).

Para o ajuste dos relés de sobrecorrente, são necessários os valores da corrente dos curtos-circuitos trifásico e monofásico; desta forma: cálculo da amplitude da corrente de falta fase-fase-terra não é solicitado pela Copel, e não será considerado neste estudo.

### 3.8 SIMETRIA DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

A corrente de curto-circuito é caracterizada como simétrica quando a envoltória da onda da corrente de falta é simétrica em relação ao eixo dos tempos. Do contrário será considerada assimétrica (SCHNEIDER-ELECTRIC, 2013).

Segundo Almeida (2000), um curto-circuito pode iniciar com características assimétricas, e, com o tempo, tornarem-se simétricas. Isto ocorre, pois no início de uma falha, a corrente terá um pico inicial por influência da componente DC, que se extinguirá após determinado tempo, dependente da relação entre a reatância e a resistência do sistema. Após isto, a corrente de falta torna-se simétrica. A figura 8 a seguir, apresenta este caso.



**Figura 8:** corrente de curto-circuito assimétrica e simétrica.

Fonte: Almeida (2000).

### 3.8.1 Fator de assimetria

O valor da corrente de curto-circuito assimétrica é o produto entre a corrente de falta simétrica eficaz e o fator de assimetria. Segundo Mardegan (2011), para valores eficazes (rms) ou para valores de pico, o fator de assimetria é calculado a partir das seguintes equações:

$$F_{assimetria-RMS} = \sqrt{1 + 2 \cdot e^{-\frac{4\pi}{(X/R)} \cdot t_{ciclos}}} \quad (11)$$

$$F_{assimetria-pico} = \sqrt{2} \cdot \left(1 + e^{-\frac{2\pi}{(X/R)} \cdot t_{ciclos}}\right) \quad (12)$$

$X$  e  $R$  são respectivamente os valores da reatância e resistência entre a fonte e o ponto onde ocorre o curto-circuito. O valor de  $t_{ciclos}$  é tempo em ciclos para o instante em que se deseja calcular o fator de assimetria; com base nas normas IEC 60909 e IEEE Std-551, é padrão na maioria das literaturas a adoção do valor de 0,5 ciclos.

## 4 APARELHOS DE PROTEÇÃO

### 4.1 TRANSFORMADORES DE CORRENTE

Transformadores de corrente (TC) são aparelhos monofásicos constituídos por dois enrolamentos acoplados magneticamente, primário e secundário; os TCs são utilizados em casos onde é necessário reduzir a corrente elétrica de um circuito sem interferir em seu funcionamento (MARDEGAN, 2010)

Estes aparelhos reproduzem no secundário, uma parcela da corrente circulante em seu enrolamento primário (SIEMENS, 2015). Segundo Mardegan, (2010), normalmente no enrolamento secundário, a corrente especificada será 1 A, ou 5 A; porém, podem ser encontrados em catálogo de fabricantes, secundários de 2,5 A ou 10 A entre outros valores. As correntes são reduzidas com o intuito de promover segurança aos operadores dos aparelhos a jusante do secundário do transformador de corrente, além de padronizar os valores de corrente de relés e medidores, reduzindo custos com isolação nestes mesmos aparelhos.

Segundo a ABNT, na norma NBR 6856 – transformador de corrente, estes aparelhos são classificados em duas categorias: TC para serviço de medição, e TC para serviço de proteção.

#### 4.1.1 Exatidão

O valor de exatidão é o erro máximo que o TC poderá apresentar no secundário para um valor de vinte vezes a corrente nominal do primário.

Os transformadores de corrente utilizados em serviços de medição deverão ser construídos obedecendo umas das seguintes classes de exatidão (precisão do aparelho):

0,3 % – 0,6 % – 1,2 %

Os transformadores de corrente utilizados em serviços de proteção deverão ser construídos obedecendo umas das seguintes classes de exatidão:

5,0 % - 10,0 %

#### 4.1.2 Saturação

Segundo Mardegan (2010), o núcleo dos transformadores de corrente é feito de material saturável: “quando ele atinge a região de saturação a corrente secundária não terá mais a forma senoidal e não mais reproduzirá fielmente a corrente primária”

A saturação pode ser causada por correntes elevadas no enrolamento primário, potência no secundário superior a capacidade do TC, assimetria da corrente de falta, ou por fluxo remanescente no núcleo do TC.

#### 4.1.3 Dimensionamento do TC de proteção

Para o dimensionamento do TC, deverão ser conhecidas as cargas conectadas ao seu enrolamento secundário, e os níveis de correntes de curto-circuito que irão circular em seu enrolamento primário.

Os transformadores de corrente para proteção das unidades consumidoras atendidas pela Copel, devem atender os critérios apresentados no documento “Apresentação do Estudo de Proteção e Seletividade em Entradas de Serviço” (anexo A). É mister que a corrente nominal primária do TC seja maior que a corrente de carga da instalação, não deve saturar com o maior valor de corrente de curto-circuito trifásica simétrica considerando carga máxima no secundário do TC, e deverá ser considerado um fator de sobrecorrente igual a 20.

Primeiramente, seguindo as diretrizes da Copel, será determinada a corrente nominal mínima do primário do TC, da forma que:

$$I_{np} > I_c, \quad (13)$$

sendo  $I_{np}$  a corrente nominal do enrolamento primário do transformador de corrente, e  $I_c$  a corrente de carga da instalação.

A tensão induzida no secundário poderá ser determinada da seguinte forma:

$$FS \cdot I_{ns} \cdot Z_{Burden} < V_s, \quad (14)$$

sendo FS o fator de sobrecorrente,  $I_{ns}$  a corrente nominal especificada para o enrolamento secundário,  $V_s$  a tensão induzida no enrolamento secundário, e  $Z_{Burden}$  a

impedância instalada no secundário do TC, compreendendo, por exemplo, um relé de proteção e seus condutores.

Por fim, como o TC não deverá saturar com vinte vezes a corrente nominal, este valor deverá ser comparado ao maior valor de curto-circuito simétrico ( $I_{cc\text{ máx.}}$ ) no local de instalação do TC:

$$20 \cdot I_{np} > I_{cc\text{ máx.}} \quad (15)$$

#### 4.1.4 Especificação

Definido pela ANSI e adotada pela ABNT, os transformadores de corrente de proteção obedecem à seguinte nomenclatura:

Tabela 2: nomenclaturas para TCs de proteção.

Tipo T (ou H) A	Tipo C (ou L) B
10 T 10	10 C 10
20	20
50	50
100	100
200	200
400	400
800	800
2.5 T 10	2.5 C 10
20	20
50	50
100	100
200	200
400	400
800	800

**Fonte: Pereira.**

Primeiramente, é determinada a exatidão do transformador, de acordo com a necessidade de utilização; o próximo passo é determinar a classe de tensão do aparelho, se o TC é de baixa tensão (L ou B) ou alta tensão (H ou A), e por fim a tensão máxima induzida no secundário conforme o dimensionamento do aparelho.

## 4.2 FUSÍVEIS

Alguns dos aparelhos utilizados na proteção de circuitos elétricos são os fusíveis, que operam isolando parte do circuito na ocorrência de uma sobrecorrente ou um curto circuito (GORA, 2002). Seu funcionamento segue a Lei de Joule (efeito Joule ou efeito térmico), em de que a circulação de corrente em um condutor produz calor de acordo com a equação abaixo.

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (16)$$

Sendo  $Q$  a quantidade de calor gerada,  $I$  é o valor da corrente,  $R$  é o valor da resistência e  $t$  é o tempo; nota-se que uma corrente elétrica elevada percorrendo uma resistência durante um tempo elevado, produzirá um elevado valor de temperatura.

A composição destes aparelhos consiste em ligas metálicas, chamadas de elo fusível, normalmente formada de estanho, chumbo, mercúrio, ou outro material de baixo ponto de fusão, conectando dois pontos do circuito. (GORA, 2002).

Uma das extremidades do elo fusível é conectada à cabeça do botão, que é responsável por fixar e garantir a conexão elétrica; a outra, a cordoalha, ou rabicho, será responsável por receber o calor produzido pela corrente (CARDOSO, 2009).

Quando uma corrente passa pelo elo fusível, o calor é transmitido à cordoalha por meio da condução. A quantidade de calor transmitida depende do comprimento do elemento fusível e da intensidade da corrente. Assim, por mais que uma corrente baixa passe pela liga metálica, se esta for muito comprida, será gerado um foco de calor que poderá ocasionar a ruptura do filamento. Caso aconteça o dual, uma corrente grande em um filamento pequeno terá o mesmo efeito: este é o efeito da corrente de curto circuito (CARDOSO, 2009).

Podem-se classificar as velocidades de atuação dos fusíveis de acordo com o ponto de fusão das ligas e seu respectivo comprimento. Fusíveis feitos com ligas com menor ponto de fusão, são chamados de fusíveis rápidos.

O encapsulamento deste aparelho também possui características especiais: ele é constituído de fibra de vidro com gases deionizantes, que possui a função de extinguir o arco elétrico formada na ruptura do elo fusível (CARDOSO, 2009).

Assim, a atuação deste aparelho se dá em duas etapas: a primeira é o rompimento do elo fusível devido à alta temperatura, e a segunda, é a extinção do arco elétrico formado pelos gases deionizantes.

Os fusíveis possuem como características para especificação, detalhes, como tensão nominal, nível básico de isolamento, frequência, corrente nominal, corrente de interrupção e corrente de curta duração. Para a proteção, a característica mais relevante é a corrente de interrupção: ela deve ser fundamentada na corrente assimétrica de maior nível de curto-circuito no ponto de instalação da chave (ALMEIDA, 2000).

No dimensionamento do fusível deverão ser analisadas as curvas de ensaios fornecidas pelos fabricantes, e as características do sistema elétrico no qual o fusível será instalado. Os fusíveis se comportam de maneiras diferentes de acordo com as grandezas elétricas do circuito: é essencial a análise completa do sistema, verificado quais são as correntes de curto-circuito e o ponto de instalação, para então especificar o fusível que atenderá a exigência.

Os fusíveis utilizados em alta tensão têm alguns aspectos construtivos diferentes dos utilizados na baixa tensão como, por exemplo, seus invólucros, que devem possuir alta rigidez dielétrica; normalmente, a porcelana é utilizada para este fim.

A Copel, através da norma NTC 810032, estabelece as características que os fabricantes de elos-fusíveis de distribuição deverão obedecer. O anexo C apresenta os tipos de elos aceitos pela Copel, bem como a norma a qual cada um deve atender.

O tempo de interrupção dos elos fusíveis são obtidos de suas características de fusão: 'tempo x corrente'; em casos de instalação em chaves fusíveis ou molas desligadoras, estas curvas não devem variar com os esforços mecânicos ao qual os fusíveis serão submetidos. Os limites das características de fusão 'tempo x corrente' são determinados pela Copel e apresentados no anexo D.

#### 4.2.1 Proteção de transformadores

Como citado em itens anteriores, existem casos em que não é possível fazer a proteção de transformadores através dos ajustes dos relés de sobrecorrente, principalmente se a instalação possuir diversos transformadores operando em paralelo.

Segundo Almeida (2000), os elos-fusíveis destinados à proteção de transformadores deverão seguir os seguintes requisitos: suportar continuamente uma sobrecarga de aproximadamente 2 vezes a corrente nominal do transformador, atuar em um intervalo de tempo inferior a 17 s para correntes de 2,5 a 3 vezes a nominal do transformador, e suportar a corrente de magnetização do transformador. Alguns fabricantes fornecem tabelas para seleção de elos-fusíveis de acordo com a potência dos transformadores, como apresentado a seguir.

Tabela 3: tabela de seleção de fusíveis HH.

Tensão	Tn 17,5 kV				Tn 36 kV	
	Ts 13,2 kV		Ts 13,8 kV		Ts 34,5 kV	
Potencia (kVA)	Ip	Ic	Ip	Ic	Ip	Ic
10	0,44	4	0,42	4		
15	0,66	4	0,63	4		
30	1,32	4	1,26	4		
45	1,97	6	1,87	6	0,76	4
75	3,29	12,5	3,15	10	1,26	4
112,5	4,93	16	4,72	12,5	1,89	6
150	6,57	16	6,29	16	2,52	6
225	9,86	25	9,43	20	3,77	10
300	13,5	32	12,6	32	5,03	12,5
500	21,9	50	20,9	50	8,38	20
750	32,9	63	31,5	63	12,6	25
1000	43,8	100	41,9	100	16,8	40
1500	65,7	160	62,9	125	25,2	50
200	87,6		83,8	165	33,5	80
2500			105		41,9	100

Fonte: Inebrasa (2015).

Tn a tensão nominal superior do limitador fusível; Ts a tensão de serviço da instalação; Ip a corrente nominal do transformador; Ic a corrente nominal do calibrador do limitador fusível.

#### 4.3 DISJUNTORES DE MÉDIA TENSÃO

Disjuntores de média tensão são aparelhos de manobra eletromecânicos acionados por relés, e capazes de conduzir ou interromper correntes elétricas nas condições normais ou anormais do circuito. Na ocorrência de curtos-circuitos no interior das unidades consumidoras, eles são responsáveis por interromper o circuito, para que não sejam afetados os aparelhos de proteção da concessionária de energia, bem como os transformadores de potência instalados a jusante.

“Quando ocorre uma falta no sistema de potência, os disjuntores mais próximos devem isolar o trecho defeituoso o mais rápido possível, de forma a minimizar os efeitos da falta sobre o restante do sistema”. (AMON F°, 1987).

São considerados de média tensão, os disjuntores com tensão nominal de serviço superior a 1 kV; em unidades consumidoras atendidas pela rede de 13,8 kV da Copel, os

disjuntores deverão seguir as diretrizes das normas NTC 811215 e NTC 811216 (Companhia Paranaense de Energia, 2014), onde a primeira é responsável por disjuntores com pólos isolados a pequenos volumes de óleo (PVO), e a segunda por disjuntores com pólos isolados a vácuo.

O seccionamento de circuitos elétricos sob carga gera arcos elétricos, devidos à “tendência da corrente elétrica continuar sendo conduzida durante a velocidade de abertura” (Lívia Cunha, 2010). Isso ocorre porque a corrente não pode ter uma variação instantânea devido à conservação do fluxo magnético nas indutâncias do circuito (AMON F°, 1986).

O disjuntor é responsável pela extinção dos arcos, o que exige altas capacidades de interrupção de correntes elétricas. As normas NTC 811215 e NTC 811216 (Companhia Paranaense de Energia, 2014), estabelecem as características mínimas necessárias dos disjuntores instalados em média tensão, para extinção destes arcos sem causar sobrecargas perigosas aos demais componentes do sistema. A tabela 4 a seguir, apresenta características mínimas exigidas pela Copel.

Tabela 4: características de disjuntores instalados em consumidores atendidos em 13,8 kV.

Tensão Nominal (kV)	Frequência Nominal (Hz)	Tensão suportável nominal à terra		Corrente nominal (A)	Capacidade de interrupção trifásica simétrica nominal (MVA)	Tempo máximo de interrupção (ms)
		Impulso atmosférico (kV eficaz)	A 60 Hz a seco 1 min (kV eficaz)			
15	60	95	34	600	350	100

Fonte: NTC 811216 (2014).

#### 4.4 RELÉS DE PROTEÇÃO

Relés são aparelhos que analisam constantemente diversas grandezas do sistema elétrico, destinados a atuar na ocorrência de anomalias compreendidas em seus níveis de sensibilidade. Entre as grandezas avaliadas pelos relés, estão: corrente, tensão, potência, frequência, ângulo de fase, entre outras, de acordo com as necessidades em diversos campos de atuação.

O funcionamento do relé não é caracterizado pelo bloqueio ou seccionamento do circuito no qual ele é atuante, e sim pela emissão de sinais aos demais aparelhos do sistema de

proteção; por exemplo, o sinal enviado à bobina de abertura de um disjuntor de média tensão na ocorrência de curto-circuito ou sobrecarga em determinado sistema industrial. Segundo Almeida (2000), além da abertura de um disjuntor, o relé poderá enviar sinalização de alarme, bloqueio, ou as três ao mesmo tempo.

Existem diversos tipos de relés, caracterizados pela grandeza avaliada pelo aparelho, forma de conexão com o sistema, forma construtiva, ou princípios de funcionamento, como relés direcionais, diferenciais, de sobretensão ou subtensão (MARDEGAN, 2012). Porém, o foco deste item será o relé de proteção secundária, com atuação por sobrecorrente destinado a proteção de instalações em entradas de serviço alimentadas em 13,8 kV.

#### 4.4.1 Relés de sobrecorrente

Relés de sobrecorrente são os aparelhos supervisores da corrente elétrica, e operam quando seus valores ultrapassam uma marca pré-definida. Os relés de sobrecorrente podem ser utilizados na proteção geral ou de determinados pontos, com atuação instantânea (função ANSI 50) ou temporizada (função ANSI 51). (ALMEIDA, 2000)

Em entradas de serviço com potência de transformação superior a 300 kVA, é exigida pela Copel a proteção geral feita através de disjuntor de média tensão, comandada por relé secundário com atuação por sobrecorrente temporizada de fase e neutro (ANSI 51 e 51N), sobrecorrente instantânea de fase e neutro (ANSI 50 e 50N), e alarme de continuidade e falha do circuito da bobina de *trip* (ANSI 74).

A filosofia de atuação dos relés de sobrecorrente pode ser obtida através da respectiva curva tempo x corrente; esta curva pode ser modificada de acordo com as necessidades do sistema elétrico, através das parametrizações do relé.

##### 4.4.1.1 Funções ANSI

As funções ANSI (IEEE Standard C37.2 Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations) foram criadas visando a unificação da indicação de aparelhos de proteção como relés e disjuntores em projetos de instalações elétricas; cada função representa a proteção contra determinado tipo de falha do sistema. Alguns aparelhos de proteção são providos de diversas funções ANSI; por exemplo, os relés

de proteção secundária, que contém funções correspondentes à proteção contra anomalias tanto na tensão do sistema quanto na corrente elétrica.

Relés com a função ANSI 50 têm a capacidade de atuar assim que a corrente elétrica do circuito ultrapassar determinado valor em um tempo previamente definido. Esta função é utilizada na proteção contra curtos-circuitos nas fases. Para a proteção do condutor neutro é necessária a função ANSI 50N. (IEEE C37.2, 2008).

Relés com a função ANSI 51 têm a capacidade de atuar por sobrecorrente, levando em conta também o tempo de ocorrência da anomalia no sistema. Esta função é utilizada na proteção contra sobrecargas das fases. Para a proteção do condutor neutro é necessária a função ANSI 51N. (IEEE C37.2, 2008).

Relés com a função ANSI 74 verificam e indicam a ocorrência de falhas de continuidade em seus circuitos, e no circuito da bobina de *trip*. (IEEE C37.2, 2008).

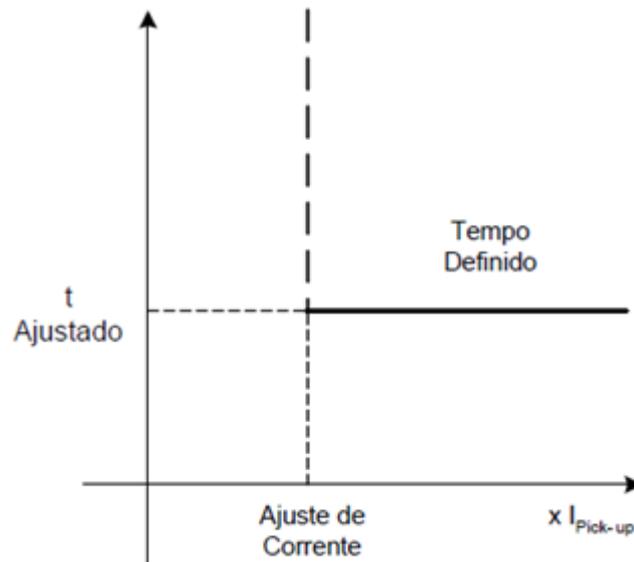
O circuito de *trip* é responsável pelo sinal de desligamento enviado pelo relé aos demais aparelhos de proteção. (MARDEGAN, 2012).

#### 4.4.1.2 Curvas de atuação

Segundo Mardegan (2011), a maioria dos relés fabricados são digitais, e permitem a seleção de suas características de atuação alterando facilmente os parâmetros no próprio relé.

Existem dois tipos de curvas de atuação dependentes do tempo: a curva de tempo definido e de tempo dependente (ALMEIDA, 2000).

O ajuste da curva de tempo definido, caracteriza a função ANSI 50 do relé de sobrecorrente. Ajusta-se o tempo e a corrente mínima de atuação; o relé irá atuar neste tempo para qualquer valor de corrente igual ou superior ao pré-definido; normalmente a corrente ajustada será igual à corrente do consumidor ou  $I_{Pick-up}$  (ALMEIDA, 2000). A figura 9 a seguir apresenta as características da curva de tempo definido.



**Figura 9: característica Instantânea (50/50N).**

**Fonte: Schneider-Electric (2013).**

As características de atuação da curva de tempo dependentes, que caracterizam a função ANSI 51, são escolhidas a partir de equações pré-definidas por normas internacionais; estas equações são caracterizadas pelas formas das curvas geradas no gráfico tempo x corrente.

A seguir serão apresentadas as equações e formas de curvas características mais utilizadas da Norma IEC, respectivamente: Normal Inversa, Muito Inversa e Extremamente Inversa. A incógnita  $DT$  das equações é o ajuste do multiplicador dos tempos parametrizado no relé de sobrecorrente. (MARDEGAN, 2012).

➤ Curva de tempo dependente normal inversa

$$t = \frac{0,14}{I^{0,02} - 1} \cdot DT \quad (17)$$

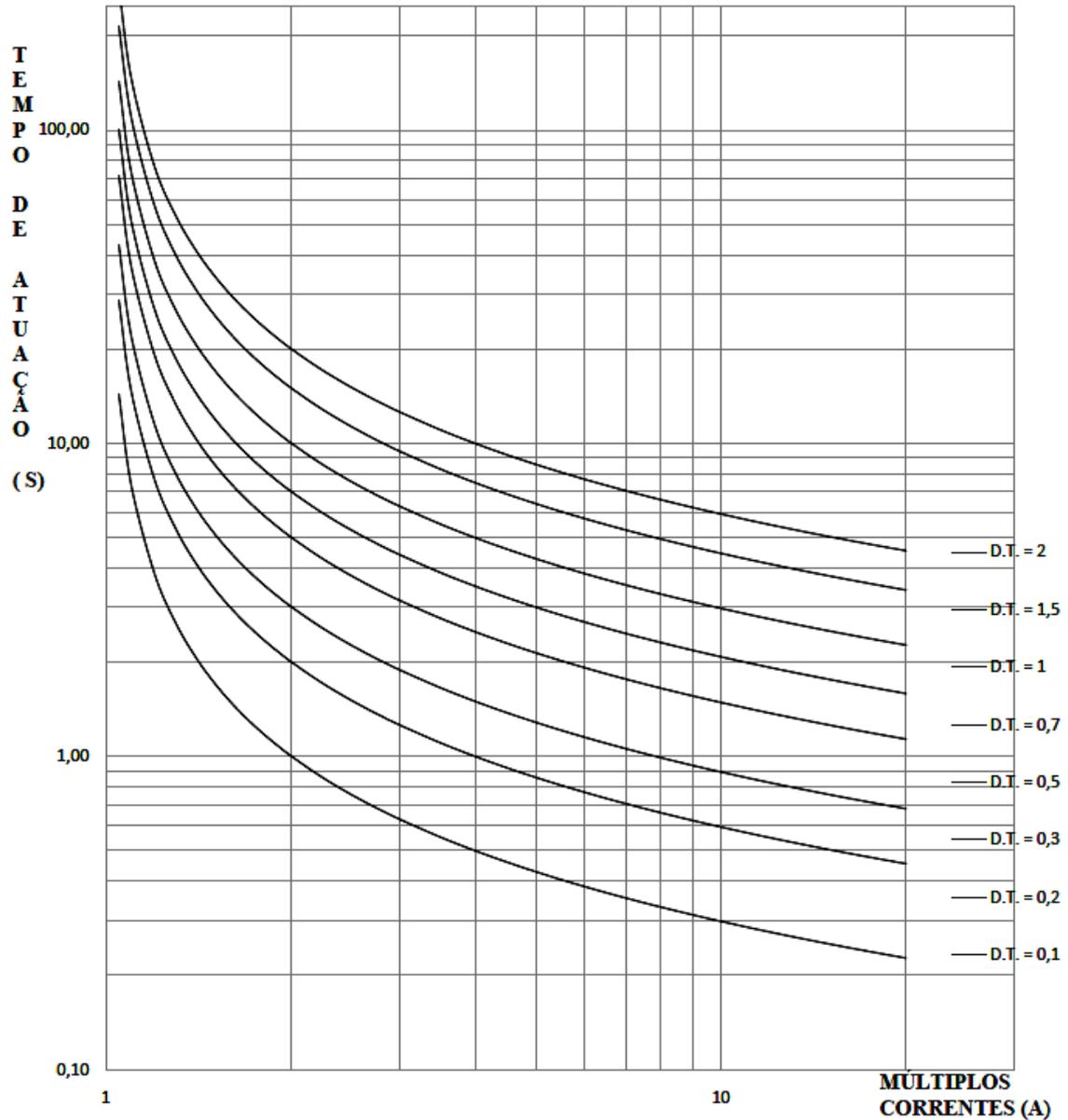


Figura 10: curva IEC normal inversa.

Fonte: Pextron (2011).

➤ Curva de tempo dependente muito inversa

$$t = \frac{13,5}{I - 1} \cdot DT \quad (18)$$

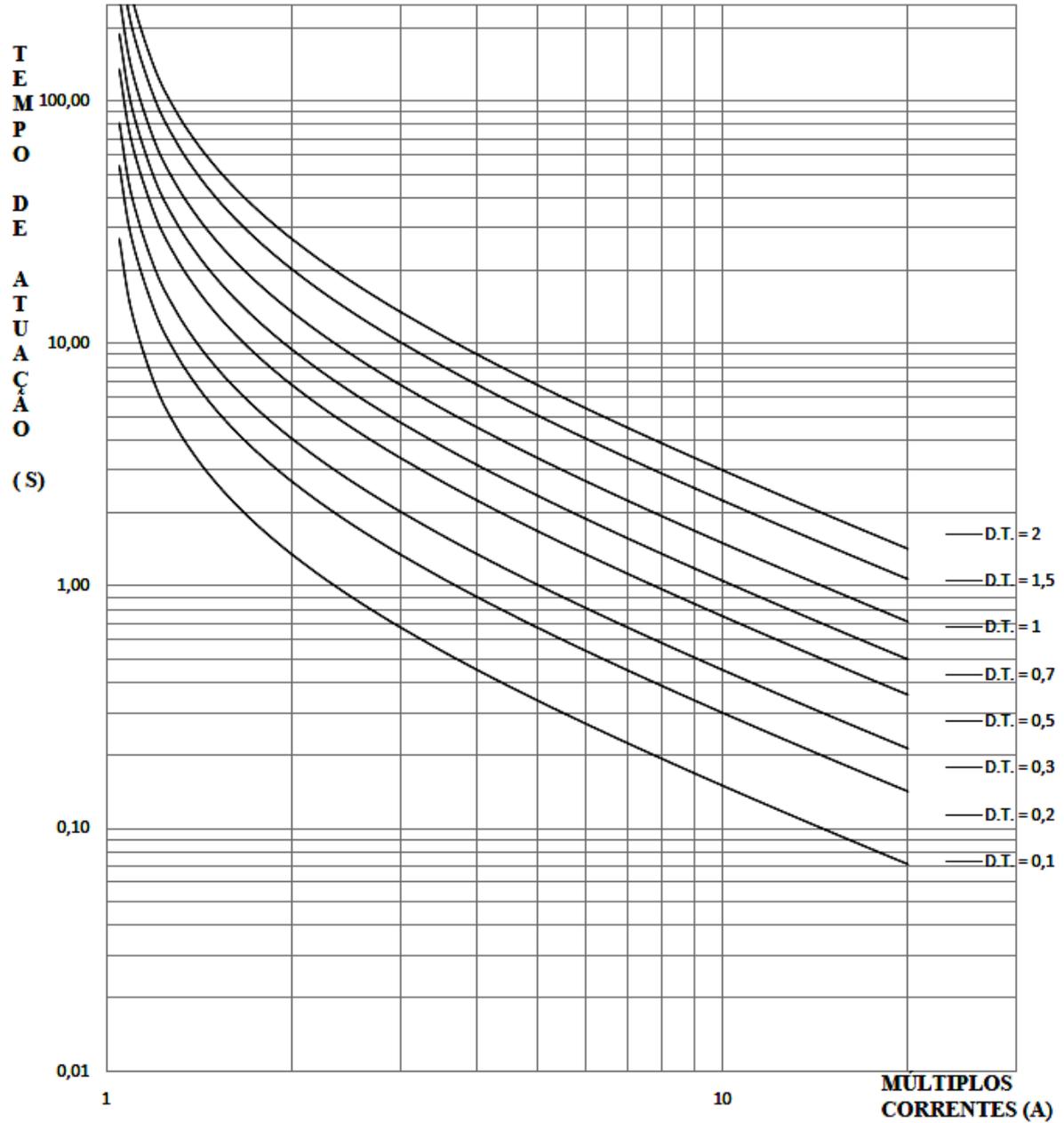


Figura 11: curva IEC muito inversa.

Fonte: Pextron (2011).

➤ Curva de tempo dependente extremamente inversa

$$t = \frac{80}{I^2 - 1} \cdot DT \quad (19)$$

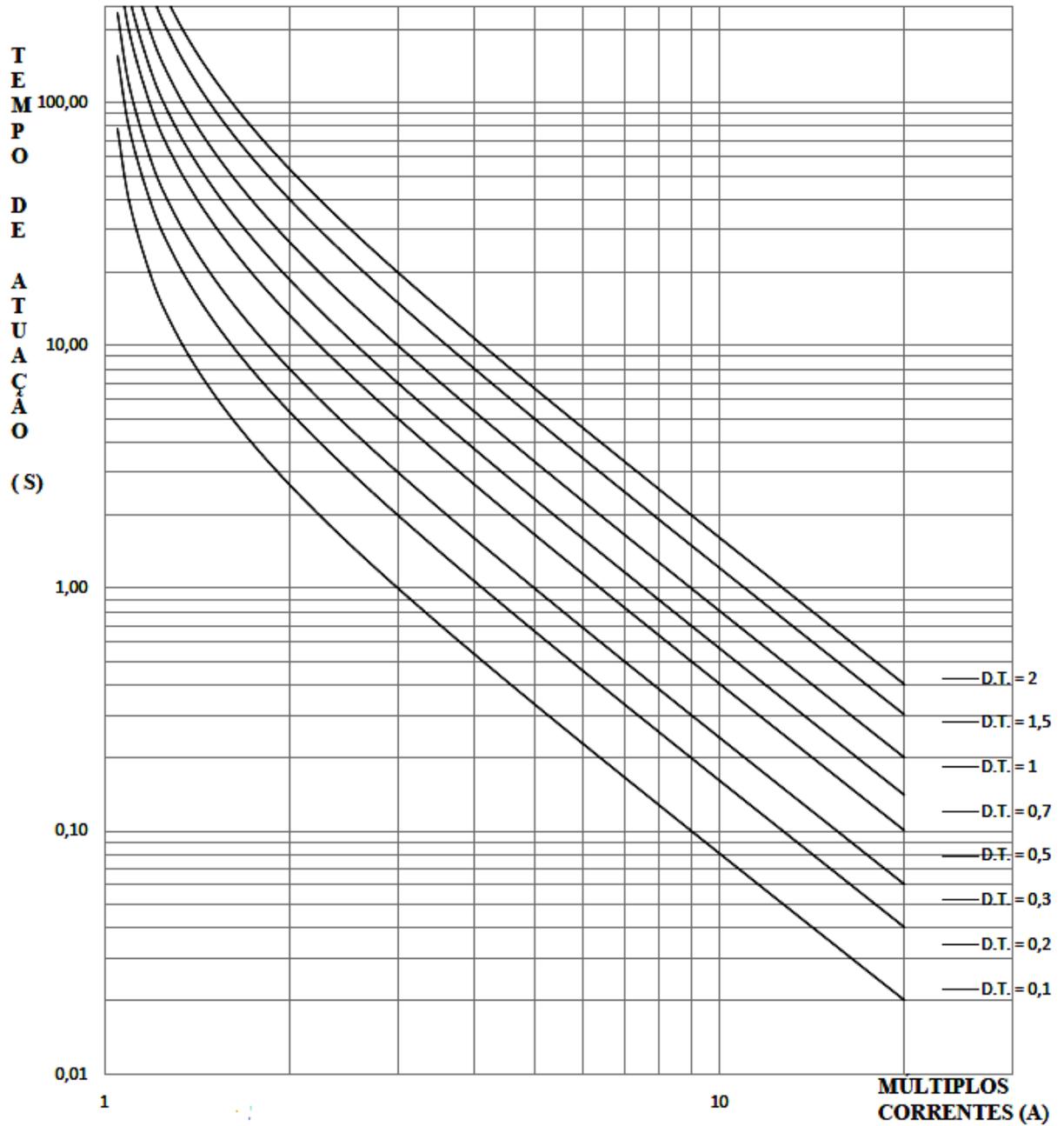


Figura 12: curva IEC extremamente inversa.

Fonte: Pextron (2011).

➤ Equação geral das curvas de tempo dependente

Em alguns manuais de ajuste do relé de sobrecorrente, poderão ser encontradas as equações gerais das curvas de tempo dependente; são elas:

$$t = \frac{k}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^a - 1} \cdot \frac{T}{\beta} \quad (20)$$

$$DT = \frac{T}{\beta} \quad (21)$$

Neste caso, será fornecida a tabela de valores dos respectivos coeficientes para o tipo de curva necessária a proteção da instalação elétrica em questão. A tabela a seguir apresenta os coeficientes para as curvas de tempo inverso, muito inverso, longo inverso, extremamente inverso e ultra-inverso.

Tabela 5: valores dos coeficientes das curvas IEC.

Tipo de curva	Valores dos coeficientes		
	K	$\alpha$	B
Tempo inverso	0,14	0,02	2,97
Tempo muito inverso	13,5	1	1,5
Tempo longo inverso	120	1	13,33
Tempo extremamente inverso	80	2	0,808
Tempo ultra-inverso	315,2	2,5	1

Fonte: Schneider-Electric (2008).

As equações apresentadas anteriormente operam em função de valores definidos de tempo e corrente, em que  $t$  é o tempo em segundos no qual o relé deve atuar,  $I/I_s$  é a relação entre a corrente de curto-circuito secundário referida ao primário e a corrente de partida ou de *pick-up*, e  $DT$  é o ajuste do multiplicador dos tempos. (MARDEGAN, 2012).

A corrente de partida, ou de *pick-up*, é o menor valor para o qual o relé irá atuar: é calculada através da capacidade de transformação e da demanda do consumidor, de modo que:

$$\frac{\text{Capac. de Transf. [kVA]}}{\sqrt{3} \cdot V_L} \geq I_{\text{Pick-up}} \geq \frac{\text{Demanda. [kW]}}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot FP} \quad (22)$$

O tempo de atuação  $t$  do relé, deverá ser determinado levando em conta os demais aparelhos de proteção do sistema, de modo a garantir a coordenação entre as proteções; estas configurações serão aprofundadas no item 5.2: SELETIVIDADE ELÉTRICA.

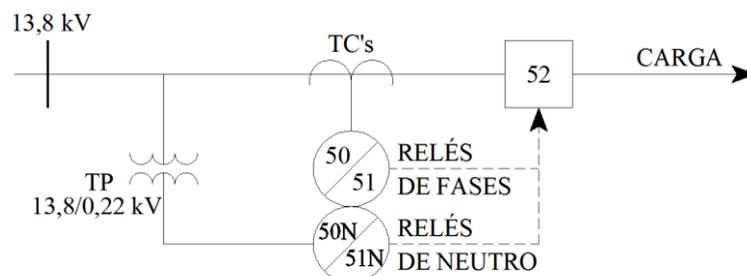
A partir destes dados, e do estudo completo de curto-circuito, é possível parametrizar a maioria dos relés; porém, para alguns, será necessário o conhecimento de outros métodos de construção das curvas de tempo dependente, por exemplo, para relés fabricados em conformidade com as diretrizes das normas ANSI C37.90 e ANSI C37.112, que obedecem outras equações para geração das curvas.

#### 4.4.1.3 Conexão com o sistema

Segundo Almeida (2000), quando utilizados para proteção dos circuitos primários do sistema elétrico, os relés de sobrecorrente serão instalados de forma indireta, através de transformadores de corrente.

Os esquemas de ligações podem variar entre fabricantes, porém, basicamente, o relé conterá três unidades temporizadas e de tempo dependente para as fases, e uma para o neutro, sendo necessária a existência de três transformadores de corrente, um para cada fase, e um transformador de potencial para a alimentação do relé.

Em projetos de instalações elétricas, os aparelhos de proteção são geralmente representados pelas suas funções ANSI, e em esquemas unifilares conforme figura a seguir.



**Figura 13: diagrama unifilar do esquema de proteção da saída de um alimentador radial.**

**Fonte: Almeida (2000).**

## 5 ESTUDO DE PROTEÇÃO E SELETIVIDADE

### 5.1 PROTEÇÃO ELÉTRICA

Segundo o guia de proteção de redes elétricas da Schneider-Electric (2008), a especificação dos aparelhos de proteção “não é resultado de um estudo isolado”: deve-se, analisar o comportamento de todos os componentes elétricos do sistema “durante as falhas e fenômenos ocorridos”.

#### 5.1.1 Proteção de transformadores de potência

Para garantir a perfeita condição de trabalho e garantir a vida útil dos transformadores de potência, a proteção deve levar em conta falhas do sistema elétrico, avarias no interior do transformador, condições físicas do ambiente ao qual ele está instalado (NOGUEIRA e ALVES, 2009).

##### 5.1.1.1 Corrente de magnetização

“Um fenômeno transitório característico da corrente de magnetização de transformadores é o alto surto de corrente observado ocasionalmente quando um transformador é energizado” (CPFL, 2006). Segundo Mardegan, esta corrente de magnetização circula apenas no enrolamento primário, e depende de algumas características do transformador para verificar sua forma de onda, duração e valor da corrente, tamanho, impedância, propriedades magnéticas do material do núcleo, fluxo remanescente no núcleo devido a última desenergização, valor instantâneo da tensão quando o transformador é energizado, e forma como transformador é energizado.

A corrente de *Inrush* vai decrescendo com o tempo. De acordo com Mardegan, pode ser utilizado 100 ms para fins de proteção como tempo da corrente de *Inrush*. Já para a seletividade, os valores da corrente de *Inrush* variam de acordo com a corrente nominal como mostrado abaixo:

Transformador a óleo < 1,0 MVA,  $Inrush = 10 \times I_n$ ;

Transformador a óleo > 1,0 MVA,  $Inrush = 8 \times I_n$ ;

Transformador a seco – qualquer um,  $Inrush = 14 \times I_n$ ;

Outro fator a ser considerado é o tipo de ligação do transformador (delta-estrela). Para um transformador abaixador com o primário ligado em estrela aterrado, os valores acima devem ser multiplicados por 1,4. Caso o transformador seja elevador com o primário em delta, os valores acima devem ser multiplicados por 1,7 e caso seja um transformador elevador com o primário conectado em estrela aterrada, os valores acima devem ser multiplicados por 2,5 (MARDEGAN, 2010).

Em plantas onde existem diversos transformadores, o cálculo se torna mais complexo, e não existe uma unanimidade quanto aos procedimentos para obtenção do valor da corrente de *Inrush*.

A Copel indica no documento “Apresentação do Estudo de Proteção e Seletividade”, que para o cálculo da corrente de magnetização dos transformadores seja considerado oito vezes a corrente nominal do transformador de maior potência, mais o quádruplo do somatório das correntes dos demais transformadores.

Outras concessionárias poderão utilizar métodos diferentes, como a CPFL (2006), que estabelece coeficientes multiplicadores desenvolvidos em função das diversas características da corrente de *Inrush*; estes coeficientes são apresentados na tabela a seguir, e dependem da quantidade de transformadores energizados paralelamente.

Tabela 6: Fator de multiplicação para se determinar a corrente de “*Inrush*” em 0,1 s.

<b>Número de transformadores</b>	<b>Fator de multiplicação</b>
1	12
2	8,3
3	7,6
4	7,2
5	6,8
6	6,6
7	6,4
8	6,3
9	6,2
10	6,1
>10	6

Fonte: CPFL, (2006).

Deve-se ressaltar ainda, que a corrente de *Inrush* é limitada pela fonte; desta forma, seu valor não poderá ser superior ao valor de curto-circuito trifásico no ponto de instalação

dos transformadores. Nestes casos, deverá ser considerada nos cálculos, a impedância entre a fonte e o os transformadores, e a potência máxima gerada.

### 5.1.1.2 Suportabilidade térmica

Suportabilidade térmica é o limite térmico do transformador. Ele varia de acordo com a norma a qual foi fabricado. A norma ANSI C57.12.00-2000 define quatro categorias de acordo com potência do transformador. Através de dados pré-estabelecidos pode-se construir as curvas de danos. As categorias são divididas da seguinte forma:

- Categoria I – trifásicos de 15 kVA a 500 kVA;
- Categoria I – monofásico de 5 kVA a 500 kVA;
- Categoria II – trifásicos de 501 kVA a 5000 kVA;
- Categoria II – monofásico de 501 kVA a 1667 kVA;
- Categoria III – trifásicos de 5001 kVA a 30000 kVA;
- Categoria III – monofásico de 1668 kVA a 10000 kVA;
- Categoria IV – trifásicos > 30000 kVA;
- Categoria IV – monofásico > 10000 kVA;

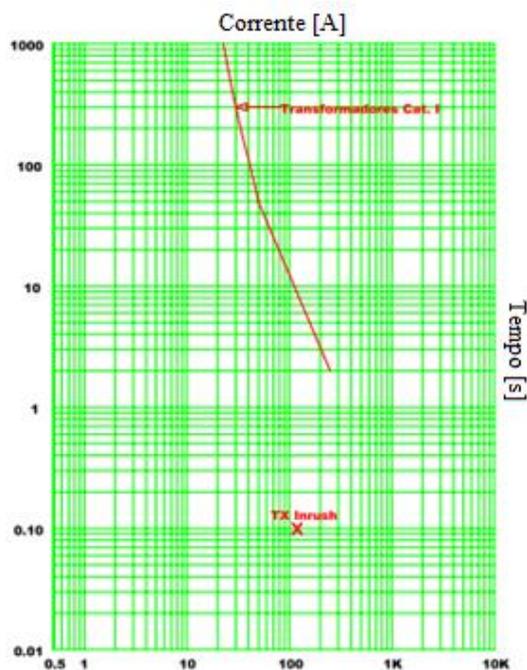


Figura 14: curva da suportabilidade térmica categoria I.

Fonte: Mardegan (2010).

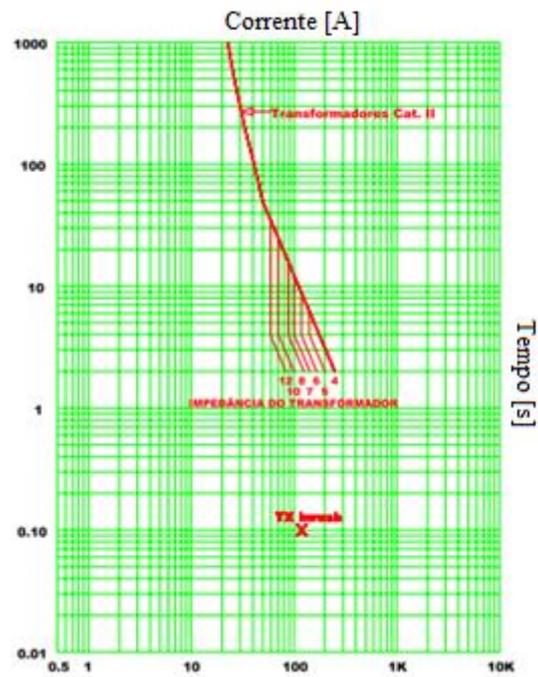


Figura 15 : curva da suportabilidade térmica categoria II.  
 Fonte: Mardegan (2010).

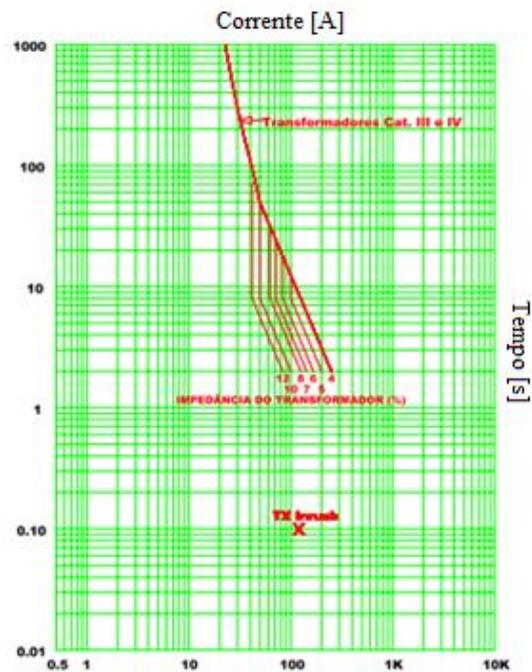


Figura 16 : curva da suportabilidade térmica categorias III e IV.  
 Fonte: Mardegan (2010).

### 5.1.1.3 Curva de danos

A curva de danos dos aparelhos permite comparar dados, de um modo visual, e garantir o perfeito funcionamento das proteções, prolongando a vida útil deles.

A curva de danos apresenta os valores máximos de corrente que o transformador pode suportar por determinados períodos, sem danificar sua estrutura, e assim garantir seu perfeito funcionamento. Assim as proteções devem atuar antes da corrente chegar a este ponto. Se o relé de proteção não permitir este ajuste, então a proteção do transformador deverá ser feita através de fusíveis (DME DISTRIBUIÇÃO, 2014).

De acordo com as normas C57.109 ANSI e C57.12.59 ANSI, a curva de danos nos transformadores pode ser obtida através de cálculos utilizando as tabelas a seguir.

Tabela 7: parâmetros para cálculo da curva de danos em transformadores a óleo, categoria I.

<b>Transformadores a óleo categoria I</b>				
<b>5-500 kVA 1-Ø</b>				
<b>15-500 kVA 3-Ø</b>				
<b>Corrente</b>	<b>Tempo</b>	<b>I<sup>2</sup>t</b>	<b>1-Ø</b>	<b>3-Ø</b>
<b>(A p.u.)</b>	<b>(s)</b>	<b>(A<sup>2</sup> p.u.-s)</b>	<b>(kVA)</b>	<b>(kVA)</b>
2	1800	7200	5-500	15-500
3	300	2700	5-500	15-500
4,75	60	1354	5-500	15-500
6,3	30	1191	5-500	15-500
11,3	10	1277	5-500	15-500
25	2	1250	5-500	15-500
35	1,02	1250	5-100	15-300
40	0,78	1250	5-75	15-75

**Fonte: C57.109 ANSI.**

Tabela 8: parâmetros para cálculo da curva de danos em transformadores a óleo, categoria II.

<b>Transformadores a óleo categoria II</b>		
<b>501-1667 kVA 1-Ø</b>		
<b>501-5000 kVA 3-Ø</b>		
<b>Corrente</b> <b>(A p.u.)</b>	<b>Tempo</b> <b>(s)</b>	<b>I<sup>2</sup>t</b> <b>(A<sup>2</sup> p.u.-s)</b>
2	1800	7200
3	300	2700
4,75	60	1354
6,3	30	1191
11,3	10	1277
25	2	1250

**Fonte: C57.109 ANSI.**

Tabela 9: parâmetros para cálculo da curva de danos em transformadores a óleo, categoria III.

<b>Transformadores a óleo categoria III</b>		
<b>1668-10000 kVA 1-Ø</b>		
<b>5001-30000 kVA 3-Ø</b>		
<b>Corrente</b> <b>(A p.u.)</b>	<b>Tempo</b> <b>(s)</b>	<b>I<sup>2</sup>t</b> <b>(A<sup>2</sup> p.u.-s)</b>
2	1800	7200
3	300	2700
4,75	60	1354
6,3	30	1191
11,3	10	1277
25	2	1250

**Fonte: C57.109 ANSI.**

Tabela 10: parâmetros para cálculo da curva de danos em transformadores a óleo, categoria IV.

<b>Transformadores a óleo categoria IV</b>		
<b>1668-10000 kVA 1-Ø</b>		
<b>5001-30000 kVA 3-Ø</b>		
<b>Corrente</b> <b>(A p.u.)</b>	<b>Tempo</b> <b>(s)</b>	<b>I<sup>2</sup>t</b> <b>(A<sup>2</sup> p.u.-s)</b>
2	1800	7200
3	300	2700
4,75	60	1354
6,3	30	1191
11,3	10	1277
25	2	1250

**Fonte: C57.109 ANSI.**

Tabela 11: parâmetros para cálculo da curva de danos em transformadores a seco, categoria I.

<b>Transformadores a seco categoria I</b>		
<b>5-500 kVA 1-Ø</b>		
<b>15-500 kVA 3-Ø</b>		
<b>Corrente</b> <b>(A p.u.)</b>	<b>Tempo</b> <b>(s)</b>	<b>I<sup>2</sup>t</b> <b>(A<sup>2</sup> p.u.-s)</b>
3,5	100	1250
11,2	300	10
25	60	2

Fonte: C57.12.59 ANSI.

Tabela 12: parâmetros para cálculo da curva de danos em transformadores a seco, categoria II.

<b>Transformadores a seco categoria II</b>		
<b>501-1667 kVA 1-Ø</b>		
<b>501-5000 kVA 3-Ø</b>		
<b>Corrente</b> <b>(A p.u.)</b>	<b>Tempo</b> <b>(s)</b>	<b>I<sup>2</sup>t</b> <b>(A<sup>2</sup> p.u.-s)</b>
3,5	100	1250
11,2	300	10
25	60	2

Fonte: C57.12.59 ANSI.

Para ilustrar o cálculo, serão analisados quatro transformadores: o primeiro de 1500 kVA, tipo seco, o segundo, 1000 kVA a óleo, o terceiro, 500 kVA a óleo, e o quarto de 225 kVA a óleo, todos com tensão no enrolamento primário em 13800 V.

Para encontrar as curvas deve-se identificar a tabela correspondente ao tipo de transformador. O transformador de 1500 kVA seguirá a tabela 12, o de 1000 kVA a tabela 8, e os demais seguirão tabela 7. Os cálculos dos valores das correntes de cada transformador são apresentados a seguir:

$$I_{TR1} = \frac{S_{TR1}}{\sqrt{3} \cdot V_{TR}} = \frac{1500000}{\sqrt{3} \cdot 13800} = 62,755 \text{ A} \quad (23)$$

$$I_{TR2} = \frac{S_{TR2}}{\sqrt{3} \cdot V_{TR}} = \frac{1000000}{\sqrt{3} \cdot 13800} = 41,837 \text{ A} \quad (24)$$

$$I_{TR3} = \frac{S_{TR3}}{\sqrt{3} \cdot V_{TR}} = \frac{500000}{\sqrt{3} \cdot 13800} = 20,918 \text{ A} \quad (25)$$

$$I_{TR4} = \frac{S_{TR4}}{\sqrt{3} \cdot V_{TR}} = \frac{225000}{\sqrt{3} \cdot 13800} = 9,413 \text{ A} \quad (26)$$

De acordo com as tabelas, calcula-se a corrente suportada para cada tempo apresentado. Os valores calculados são apresentados a seguir, e serão utilizados para gerar as curvas apresentadas no item 6.8.

Tabela 13: dados para curva de danos do transformador 1.

<b>Transformador 1</b>	
tempo (s)	corrente (A)
100	219,6441241
10	702,8611973
2	1568,886601

**Fonte: própria.**

Tabela 14: dados para curva de danos dos transformadores 2, 3 e 4.

<b>Transformador 2</b>		<b>Transformador 3</b>		<b>Transformador 4</b>	
tempo (s)	corrente (A)	tempo (s)	corrente (A)	tempo (s)	corrente (A)
1800	83,67395206	1800	41,83697603	1800	18,82663921
300	125,5109281	300	62,75546404	300	28,23995882
60	198,7256361	60	99,36281807	60	44,71326813
30	263,572949	30	131,7864745	30	59,30391352
10	472,7578291	10	236,3789146	10	106,3705116
2	1045,924401	2	522,9622004	2	235,3329902
-	-	1,02	732,1470805	1,02	329,4661186
-	-	0,78	836,7395206	0,78	376,5327843

**Fonte: própria.**

#### 5.1.1.4 Proteção primária e secundária de fase e terra

Três filosofias são verificadas e aplicadas para as proteções de fase e terra, no primário e no secundário do transformador. Estas filosofias são definidas de acordo com a corrente de partida da unidade temporizada, a temporização da unidade temporizada, e a unidade instantânea (MARDEGAN, 2010).

De acordo com Mardegan (2010), o ajuste da corrente de partida da unidade temporizada é de 1,2 a 1,5xIn para proteções primária e secundária de fase. Já para a proteção de terra no secundário, o ajuste irá depender do aterramento e da tensão no secundário. Caso o sistema seja aterrado por resistência, será ajustado para 10% da corrente do resistor. Caso seja solidamente aterrado, o ajuste será de no máximo 1200 A. Para a proteção de terra no primário, muitos fatores influenciam, como tipo do aterramento a montante, transformador, conexão, etc. Portanto a faixa de ajuste fica entre 20 A e 120 A.

Quanto à temporização para proteção secundária de fase, deve existir coordenação com a maior saída do circuito secundário. Já para proteção primária de fase, a temporização deve coordenar com a proteção secundária. Para proteção de terra do secundário, ela deve coordenar com a maior saída da barra. Para média tensão, o protegido será o limite térmico da resistência, caso ele seja aterrado por uma resistência. E para proteção de terra do primário, são adotados os valores abaixo, devido a erros nos TCs e existência de harmônicos no sistema (MARDEGAN, 2010).

Transformador < 1 MVA – pick-up >  $1,0xI_n$ ;

Transformador > 1 MVA – pick-up >  $0,8xI_n$ ;

Quanto à unidade instantânea, para proteção secundária de fase e proteção de terra no secundário, qualquer curto-circuito em qualquer saída causará o desligamento de todas as saídas. Então, para manter o maior grau de proteção, o ajuste deverá ser o mais baixo possível. Para a proteção primária de fase, a unidade instantânea do primário deve ser “ajustada para atuar 10% acima do curto-circuito subtransitório assimétrico no secundário, referido ao primário”. O ajuste também deverá permitir a *Inrush*. Para a proteção de terra do primário, se o transformador for conectado em delta, a componente de sequência zero será um circuito aberto, mas devido aos erros do TC, deve ser ajustado para 1,1 vezes o valor ajustado na temporização da proteção de terra do primário.

### 5.1.2 Proteção de condutores

Quando há a circulação de corrente em um condutor, a temperatura deste eleva-se devido ao efeito Joule. Como o aquecimento é proporcional à intensidade da corrente, para grandes valores de corrente tem-se uma elevada temperatura associada. Baseado nesse efeito, os condutores devem ser inseridos na instalação levando em conta a temperatura em três fases de operação: regime permanente, sobrecarga e curto-circuito.

Para o regime de sobrecarga, a norma de fabricação alerta que não deve superar cem horas consecutivas em um período de um ano, bem como quinhentas horas durante a vida útil do cabo. Já o regime de curto-circuito não deve superar a 5 s durante todo o período de vida do cabo (LUIZ FERNANDO GONÇALVES, 2012).

As curvas de danos em condutores são construídas levando em consideração fatores como: corrente que irá circular em regime de curto-circuito, e o tempo máximo que circulará esta corrente, uma constante que dependerá do tipo de material utilizado na fabricação do cabo, bem como suas características de isolamento. Estas curvas podem ser construídas de acordo com a relação apresentada a seguir.

$$I = \frac{K \cdot S}{\sqrt{t}} \quad (27)$$

sendo I a corrente de curto-circuito suportado pelo cabo, S a seção do cabo em milímetros quadrados, t o tempo de exposição do cabo a corrente em segundos, e K é uma constante que depende do tipo de isolamento do condutor. Esta constante K depende do tipo do material utilizado na fabricação do condutor, do tipo de isolamento, e da temperatura de operação do condutor (MARDEGAN, 2010).

Normalmente os fabricantes fornecem a relação da quantidade de sobretensão que o cabo suporta entre fase-terra ( $U_0$ ) e entre fases (U). Essa especificação é verificada de acordo com o sistema o qual o cabo será inserido. Se no sistema existir a proteção que identifique uma falta a terra, e a elimine dentro de um prazo pré-determinado, serão instalados cabos que atendam a determinada categoria. As categorias são divididas em três: categoria A é curto-circuito fase-terra eliminado em um minuto; categoria B é curto-circuito fase-terra eliminado em uma hora; categoria C são todas as possíveis situações que não se enquadram nas outras duas.

Com as curvas de danos em mãos, pode-se inseri-las na análise da seletividade onde a proteção deve atuar antes da ruptura dos cabos, ou seja, o cabo deve suportar o tempo de operação mais o tempo de interrupção do aparelho de proteção. Caso seja levada em conta a proteção de retaguarda, então o tempo de atuação da proteção de retaguarda também deve ser levado em consideração nesta análise. Normalmente utiliza-se 300 ms para atuação da proteção, ou 600 ms para atuação da proteção principal e de retaguarda (MARDEGAN, 2010).

Outro fator importante é o ponto da corrente de magnetização: pelo cabo possuir uma característica linear, esse ponto deve ser levado em consideração no estudo da seletividade.

Um fato que pode acontecer em indústrias é o trabalho em paralelo dos geradores. Em muitos casos, o aterramento é feito através do transformador de entrada. Caso esse transformador seja desconectado do sistema, o aterramento também será retirado, fazendo

com que as tensões fase-terra se elevem em um fator  $\sqrt{3}$ , igualando-se as tensões fase-fase. Para esta situação, caso os cabos não estejam especificados corretamente, ou o sistema de proteção não opere adequadamente para desligá-lo, haverá a queima dos condutores.

## 5.2 SELETIVIDADE ELÉTRICA

Quando o assunto seletividade elétrica é abordado, deve vir acompanhado pelo termo “continuidade do fornecimento de energia”.

“O objetivo maior de um estudo de seletividade é determinar os ajustes dos aparelhos de proteção, de forma que, na ocorrência de um curto-circuito, opere apenas o aparelho mais próximo da falta, isolando a menor porção do sistema elétrico, no menor tempo possível e ainda protegendo os aparelhos e o sistema”. (MARDEGAN, 2010).

A forma de elaboração do estudo de seletividade está sujeito às características do sistema elétrico em questão; desde o arranjo dos circuitos, distâncias das cargas, e esquemas de distribuição.

Em sistemas elétricos, a existência de circuitos independentes para determinadas cargas, reduzem os efeitos prejudiciais no caso de falhas como um curto-circuito, além de facilitar a localização e a manutenção de um circuito defeituoso sem interferir no funcionamento dos demais, simplificando o estudo de seletividade (SCHNEIDER-ELECTRIC, 2013).

A seletividade poderá ser feita com base em algumas grandezas do sistema em falha, como os níveis de corrente entre diversos pontos, tempo de atuação dos aparelhos de proteção, entre outras.

### 5.2.1 Seletividade amperimétrica

Esta técnica tem como base o ajuste de corrente de disparo das diversas proteções da instalação elétrica. Falhas como sobrecargas ou curtos-circuitos irão sensibilizar diversos aparelhos; o método da seletividade amperimétrica recomenda que os aparelhos mais sensíveis a altas correntes elétricas estejam localizados mais próximos a carga, de forma que em uma falta, a primeira a atuar seja a proteção diretamente a montante do ponto atingido. (SCHNEIDER-ELECTRIC, 2013).

Segundo Mardegan, (2012), a desvantagem da seletividade amperimétrica é que na ocorrência de um curto-circuito entre proteções separadas por curtas distâncias, em que a impedância seja baixa, a proteção mais próxima à falta poderá não ser a primeira a atuar, podendo desnecessariamente interromper circuitos com perfeito funcionamento.

### 5.2.2 Seletividade cronológica

O princípio da seletividade cronológica, diferente da anterior, é o ajuste do tempo de disparo dos diversos aparelhos de proteção. Segundo o “PROGRAMA DE FORMAÇÃO TÉCNICA CONTINUADA” da Schneider-Electric, (2013), as proteções devem ser reguladas de modo que os “relés a jusante tenha tempos de operação mais curtos progressivamente em relação àqueles em direção à fonte” garantindo assim a seletividade e a coordenação entre os aparelhos.

Esta técnica requer investimentos financeiros elevados, já que será necessária a instalação de mecanismos de retardo no tempo de disparo dos disjuntores, além do que deverão ser dimensionados de forma a suportar as correntes de falta, e aos esforços mecânicos durante o tempo pré-definido.

### 5.2.3 Seletividade convencional

A seletividade convencional é a união dos recursos utilizados na seletividade amperimétrica e na seletividade cronológica (MARDEGAN, 2012), porém elimina ou reduz significativamente a zona onde dois aparelhos subsequentes poderiam atuar simultaneamente. (SCHNEIDER-ELECTRIC, 2013).

### 5.2.4 Intervalos de coordenação

Estabelecidos os conceitos sobre seletividade, o próximo passo é estabelecer a coordenação entre os aparelhos de proteção. Este processo inicia-se no projeto e especificação destes.

Segundo Mardegan (2011), intervalo de coordenação é o tempo que garante que o aparelho de proteção mais próximo a falta atue primeiro, desenergizando a menor quantidade possível do sistema.

Segundo a norma IEEE Std 242 (2001), em instalações elétricas, deve-se seguir os seguintes intervalos de coordenação:

Tabela 15: intervalos de coordenação entre aparelhos de proteção.

Dispositivos a jusante	Dispositivos a montante		
	Fusível	Disjuntor de baixa tensão	Relé digital
Fusível	120 ms	120 ms	120 ms
Disjuntor de baixa tensão	120 ms	120 ms	120 ms
Relé digital	250 ms	250 ms	250 ms

**Fonte: IEEE Std 242 (2001).**

## 6 PROCEDIMENTOS PARA ELABORAÇÃO DO ESTUDO DE PROTEÇÃO E SELETIVIDADE

O estudo de proteção e seletividade para aprovação de projetos de entrada de energia, tem como base os dados de proteção, curto-circuito, e impedâncias no ponto de entrega, fornecidos pela concessionária, e diagramas unifilares com especificações dos transformadores e dos circuitos elétricos do consumidor.

Para facilitar o entendimento dos procedimentos, será utilizado, como exemplo, o sistema elétrico de uma indústria real atuante no setor alimentício. Foram fornecidos os projetos necessários para o estudo, porém será necessária a exclusão das informações que identifiquem a indústria. Como forma de identificação, a indústria será nomeada como indústria “A”, registro na Copel nº 0000001.

### 6.1 SOLICITAÇÃO DE DADOS DO PONTO DE ENTREGA

Os dados de curto-circuito e impedâncias do ponto de entrega da unidade consumidora deverão ser solicitados à concessionária. A solicitação poderá ser feita através do *e-mail* do setor de Medição da agência da Copel responsável pela unidade.

Será necessário encaminhamento das informações do cliente, como: nome no cadastro da Copel, endereço, e se não for uma instalação nova, número da unidade consumidora.

No pedido, será necessária a anexação da planta de situação atendendo os critérios para apresentação de projetos de entrada de serviço da norma NTC 900100 (Companhia Paranaense de Energia, 2011), e o documento “Detalhes da Carga Instalada – DCI”, disponível na área de formulários para instalações comerciais e industriais do portal eletrônico da Copel.

O retorno da concessionária apresentará os dados de impedância da alimentação da unidade consumidora, níveis de curto-circuito e impedâncias no ponto de entrega, além das especificações e ajustes da proteção a montante do ponto, a qual deverá ser coordenada com a proteção geral do consumidor.

Os valores de curto-circuito serão apresentados em ampères, bem como os valores de impedância poderão ser apresentados em ohms ou em p.u. com valores base de potência e tensão, respectivamente, 100 MVA e 13,8 kV, trifásicos.

Para a indústria “A”, o retorno da Copel apresentou respectivamente os dados de ajustes da proteção a montante e as impedâncias do ponto de entrega, conforme as tabelas 16 e 17:

Tabela 16: ajustes das proteções da Copel.

<b>Ajustes das proteções da Copel:</b>	
Religador:	Westinghouse
<b>Fases:</b>	
I de partida:	500 A
Curva rápida:	Bloqueada
Curva lenta (EI):	1
<b>Neutro:</b>	
I de partida:	50 A
Curva rápida:	Bloqueada
Curva lenta (EI):	8

**Fonte: Copel, (2013).**

Tabela 17: impedâncias em p.u. do sistema elétrico no ponto de entrega

<b>Impedâncias no ponto de entrega:</b>	
Z1	$(0,10007 + j 0,66276)$ pu
Z0	$(0,49635 + j 3,9792)$ pu

**Fonte: Copel, (2013).**

## 6.2 DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS

A próxima etapa é a elaboração do diagrama de impedâncias; será necessário, além da impedância do ponto de entrega, a impedância dos aparelhos e condutores da instalação até os pontos onde serão calculados os níveis de curto-circuito.

### 6.2.1 Impedâncias dos transformadores

As impedâncias dos transformadores poderão ser obtidas com os fabricantes; normalmente são fornecidas as impedâncias de sequência positiva em valores p.u., com os dados de placa como valores base. Os valores das impedâncias de sequência zero dependem

do tipo do núcleo e tipo de ligações do transformador; para transformadores delta-estrela, é possível considerar que  $Z_0 = Z_1$  (ABB, 2014).

Seguem as informações fornecidas pelos fabricantes dos transformadores da indústria “A”.

Transformador TR1, 13,8 / 0,38 kV, 1000 kVA,  $|Z| = 4,90 \%$ ,  $Z = (0,8451 + j 4,8266) \%$ ;

Transformador TR2, 13,8 / 0,38 kV, 1000 kVA,  $|Z| = 4,83 \%$ ,  $Z = (0,8330 + j 4,7576) \%$ ;

Transformador TR3, 13,8 / 0,38 kV, 1500 kVA,  $|Z| = 6,02 \%$ ,  $Z = (0,9099 + j 5,9508) \%$ ;

Transformador TR4, 13,8 / 0,22 kV, 500 kVA,  $|Z| = 4,50 \%$ ,  $Z = (0,9376 + j 4,4012) \%$ ;

Transformador TR6, 13,8 / 0,38 kV, 225 kVA,  $|Z| = 4,44 \%$ ,  $Z = (1,1040 + j 4,3006) \%$ ;

Transformador TR7, 13,8 / 0,22 kV, 225 kVA,  $|Z| = 4,32 \%$ ,  $Z = (1,0742 + j 4,1843) \%$ ;

Transformador TR8, 13,8 / 0,22 kV, 225 kVA,  $|Z| = 4,54 \%$ ,  $Z = (1,1289 + j 4,3974) \%$ .

Os valores de impedâncias em p.u. apresentados acima possuem os dados de placa como grandezas bases. Para facilitar os cálculos envolvendo as impedâncias, é necessário calculá-las em função das grandezas bases do restante do sistema. Utilizando as equações apresentadas no item 3.1 foram determinadas as impedâncias dos transformadores com  $V_{base} = 13800 [V]$  e  $S_{base} = 100 [MVA]$ , respectivamente os valores base de tensão e potência da Copel.

Transformador TR1,  $Z = 0,8451 + j 4,8266 [pu]$ ;

Transformador TR2,  $Z = 0,8330 + j 4,7576 [pu]$ ;

Transformador TR3,  $Z = 0,6066 + j 3,9672 [pu]$ ;

Transformador TR5,  $Z = 1,8752 + j 8,8024 [pu]$ ;

Transformador TR6,  $Z = 4,9067 + j 19,1138 [pu]$  ;

Transformador TR7,  $Z = 4,7742 + j 18,5969 [pu]$ ;

Transformador TR8,  $Z = 5,0173 + j 19,5441 [pu]$ .

### 6.2.2 Impedâncias dos condutores isolados

Os fabricantes de condutores isolados fornecem os valores de resistência e reatância indutiva em ohms por quilômetro ( $\Omega/km$ ); portanto, para determinar as impedâncias dos circuitos, é imprescindível conhecer os lances dos circuitos de média e baixa tensão pelo

interior da planta. O quadro a seguir apresenta os valores médios de resistência e reatância indutiva por quilômetro de condutores com isolamento para 12/20 kV apresentados pela Ficap.

Tabela 18: resistências e reatâncias indutivas de fios e cabos com isolamento 12/20 kV.

Seção Nominal (mm <sup>2</sup> )	Xc (ohm.km)								
		Em trifólio		dist = 1 diâmetro		dist = 20 cm		Cabo tripolar	
		Rca (ohm/km)	XI (ohm/km)	Rca (ohm/km)	XI (ohm/km)	Rca (ohm/km)	XI (ohm/km)	Rca (ohm/km)	XI (ohm/km)
35	13.215	0,49378	0,17111	0,66834	0,24079	0,66842	0,34236	0,66841	0,15796
50	11.978	0,49380	0,16232	0,49372	0,23201	0,49388	0,32934	0,49384	0,14931
70	10.854	0,34224	0,15405	0,34210	0,22374	0,34243	0,31707	0,34231	0,14161
95	9.769	0,24686	0,14665	0,24662	0,21633	0,24727	0,30463	0,24697	0,13431
120	9.013	0,19611	0,14111	0,19576	0,21079	0,19681	0,29553	0,19626	0,12928
150	8.328	0,15944	0,13587	0,15895	0,20555	0,16058	0,28689	0,15964	0,12475
185	7.762	0,12808	0,13270	0,12742	0,20239	0,12992	0,27942	0,12837	0,12104
240	7.012	0,09853	0,12729	0,09754	0,19698	0,10187	0,26894	0,09894	0,11615
300	6.429	0,07973	0,12335	0,07840	0,19304	0,08518	0,26026	-	-
400	5.755	0,06403	0,11875	0,06219	0,18844	0,07355	0,24948	-	-
500	5.274	0,05193	0,11538	0,04954	0,18506	0,06693	0,24119	-	-

Fonte: Ficap.

Os valores de resistência e reatância apresentados na tabela 18 referem-se as impedâncias de sequências positiva e negativa de condutores isolados; segundo Mardegan (2012), a impedância de sequência zero é encontrada em função do tipo de ligação, tipo de aterramento, isolamento dos condutores, tipos de configurações do circuito; porém, visando a simplificação do estudo, podem ser utilizados alguns fatores baseados em especificações de diversos fabricantes; o *software* PTW (Power Tools For Windows) por exemplo, utiliza os fatores a seguir.

Para condutores instalados em dutos não magnéticos:

$$R_0 = 1,5898. R_1 \quad (28)$$

$$X_0 = 2,5442. X_1 \quad (29)$$

Para condutores instalados em dutos magnéticos:

$$R_0 = 3,15155 R_1 \quad (30)$$

$$X_0 = 2,46274. X_1, \quad (31)$$

sendo,  $R_1$  a resistência se sequência positiva, e  $X_1$  a reatância indutiva de sequência positiva do condutor.

Utilizando as informações de seção e comprimento dos condutores no diagrama unifilar da indústria “A” (anexo E), equações apresentadas no item 3.1, e tabelas de resistência e reatância dos condutores isolados em 12 / 20 kV da Ficap, e isolados para baixa tensão da Prysmian, foram calculados os valores de impedâncias dos condutores isolados; no apêndice A, vide pág 126 são detalhados os cálculos de impedância do condutor C1, como exemplo.

Impedâncias condutor C1 – 3#95 mm<sup>2</sup> - isolação 12 / 20 kV – 22 m

$$R_{1C1} = 0,246860 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$X_{1C1} = 0,146650 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$Z_{1C1} = (0,00285177 + j 0,00169413) \text{ } [pu]$$

$$R_{0C1} = 0,392458 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$X_{0C1} = 0,373107 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$Z_{0C1} = (0,00453376 + j 0,00431020) \text{ } [pu]$$

Impedâncias condutor C2 – 3#95 mm<sup>2</sup> - isolação 12 / 20 kV – 5 m

$$R_{1C2} = 0,246860 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$X_{1C2} = 0,146650 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$Z_{1C2} = (0,00064813 + j 0,00038503) \text{ } [pu]$$

$$R_{0C2} = 0,392458 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$X_{0C2} = 0,373107 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$Z_{0C2} = (0,00103040 + j 0,00097959) \text{ } [pu]$$

Impedâncias condutor C6 – 3#95 mm<sup>2</sup> - isolação 12 / 20 kV – 22 m

$$R_{1C6} = 0,246860 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$X_{1C6} = 0,146650 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$Z_{1C6} = (0,00285177 + j 0,00169413) \text{ } [pu]$$

$$R_{0C6} = 0,392458 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$X_{0C6} = 0,373107 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$Z_{0C6} = (0,00453376 + j 0,00431020) \text{ } [\text{pu}]$$

Impedâncias condutor C7 – 3#35 mm<sup>2</sup> - isolação 12 / 20 kV – 155 m

$$R_{1C7} = 0,493780 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$X_{1C7} = 0,171110 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$Z_{1C7} = (0,04018898 + j 0,01392672) \text{ } [\text{pu}]$$

$$R_{0C7} = 0,785011 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$X_{0C7} = 0,435338 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$Z_{0C7} = (0,06389245 + j 0,03543237) \text{ } [\text{pu}]$$

Impedâncias condutor C10 – 3#2x95 mm<sup>2</sup> - isolação 0,6 / 1 kV – 9 m

$$R_{1C10} = 0,115000 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$X_{1C10} = 0,050000 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$Z_{1C10} = (2,13842975 + j 0,92972066) \text{ } [\text{pu}]$$

$$R_{0C10} = 0,182827 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$X_{0C10} = 0,127210 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$Z_{0C10} = (3,39967562 + j 2,36547521) \text{ } [\text{pu}]$$

Impedâncias condutor C11 – 3#4x95 mm<sup>2</sup> - isolação 0,6 / 1 kV – 9 m

$$R_{1C11} = 0,057500 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$X_{1C11} = 0,025000 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$Z_{1C11} = (1,06921488 + j 0,46487603) \text{ } [\text{pu}]$$

$$R_{0C11} = 0,091414 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$X_{0C11} = 0,063605 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$Z_{0C11} = (1,69983781 + j 1,18273760) \text{ } [\text{pu}]$$

Impedâncias condutor C12 – 3#4x95 mm<sup>2</sup> - isolação 0,6 / 1 kV – 9 m

$$R_{1C12} = 0,057500 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$X_{1C12} = 0,025000 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$Z_{1C12} = (0,35837950 + j 0,56975173) \text{ } [\text{pu}]$$

$$R_{0C12} = 0,091413 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$X_{0C12} = 0,063605 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$Z_{0C12} = (0,56975173 + j 0,39643005) \text{ } [\text{pu}]$$

Impedâncias condutor C13 – 3#4x300 mm<sup>2</sup> - isolação 0,6 / 1 kV – 17 m

$$R_{1C13} = 0,019500 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$X_{1C13} = 0,024250 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$Z_{1C13} = (0,22957064 + j 0,28549169) \text{ } [\text{pu}]$$

$$R_{0C13} = 0,031001 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$X_{0C13} = 0,061687 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$Z_{0C13} = (0,36497140 + j 0,72634796) \text{ } [\text{pu}]$$

Impedâncias condutor C14 – 3#4x300 mm<sup>2</sup> - isolação 0,6 / 1 kV – 17 m

$$R_{1C14} = 0,019500 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$X_{1C14} = 0,024250 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$Z_{1C14} = (0,22957064 + j 0,28549169) \text{ } [\text{pu}]$$

$$R_{0C14} = 0,031001 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$X_{0C14} = 0,061687 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$Z_{0C14} = (0,36497140 + j 0,72634796) \text{ } [\text{pu}]$$

Impedâncias condutor C15 – 3#4x240 mm<sup>2</sup> - isolação 0,6 / 1 kV – 17 m

$$R_{1C15} = 0,023500 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$X_{1C15} = 0,024500 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$Z_{1C15} = (0,11391967 + j 0,11876731) \text{ [pu]}$$

$$R_{0C15} = 0,037360 \text{ [\Omega/km]}$$

$$X_{0C15} = 0,062333 \text{ [\Omega/km]}$$

$$Z_{0C15} = (0,18110949 + j 0,30216780) \text{ [pu]}$$

Impedâncias condutor C16 – 3#4x240 mm<sup>2</sup> - isolação 0,6 / 1 kV – 17 m

$$R_{1C16} = 0,023500 \text{ [\Omega/km]}$$

$$X_{1C16} = 0,024500 \text{ [\Omega/km]}$$

$$Z_{1C16} = (0,11391967 + j 0,11876731) \text{ [pu]}$$

$$R_{0C16} = 0,037360 \text{ [\Omega/km]}$$

$$X_{0C16} = 0,062333 \text{ [\Omega/km]}$$

$$Z_{0C16} = (0,18110949 + j 0,30216780) \text{ [pu]}$$

Impedâncias condutor C17 – 3#4x240 mm<sup>2</sup> - isolação 0,6 / 1 kV – 15 m

$$R_{1C17} = 0,023500 \text{ [\Omega/km]}$$

$$X_{1C17} = 0,024500 \text{ [\Omega/km]}$$

$$Z_{1C17} = (0,72830578 + j 0,75929752) \text{ [pu]}$$

$$R_{0C17} = 0,037360 \text{ [\Omega/km]}$$

$$X_{0C17} = 0,062333 \text{ [\Omega/km]}$$

$$Z_{0C17} = (1,15786053 + j 1,93180475) \text{ [pu]}$$

### 6.2.3 Impedâncias dos condutores aéreos

Normalmente em instalações aéreas são utilizados condutores nus: suas impedâncias de sequência positiva e negativa são fornecidas pelos fabricantes em ohms por quilometro ( $\Omega/\text{km}$ ). A seguir, algumas características elétricas de cabos de alumínio fornecidos pela Nexans.

Tabela 19: resistências e reatâncias indutivas e capacitivas de cabos de alumínio nu com alma de aço (valores em  $\Omega/\text{km}$ ).

Resistência elétrica ( $\Omega/\text{km}$ )		Raio médio geométrico (m)	Reatância		Ampacidade (A)	Bitola AWG ou MCM
CC 20°C	CA - 60 Hz 75°C		Indutiva ( $\Omega/\text{km}$ )	Capacitiva ( $\text{M}\Omega.\text{km}$ )		
2,1532	2,6769	0,00193	0,4712	0,2857	118	6
1,7041	2,1193	0,00271	0,4624	0,2801	136	5
1,3526	1,7119	0,00244	0,4537	0,2746	156	4
1,0714	1,3558	0,00274	0,4449	0,269	181	3
0,85	1,1023	0,00308	0,4362	0,2635	206	2
0,6742	0,8867	0,00346	0,4274	0,2579	237	1
0,534	0,709	0,00388	0,4186	0,2524	273	1/0
0,4243	0,5773	0,00436	0,41	0,2469	312	2/0
0,3364	0,4741	0,00489	0,4012	0,2414	354	3/0
0,2667	0,3797	0,0055	0,3925	0,2358	408	4/0

Fonte: Nexans (2013).

Em condutores aéreos nus, bem como em condutores isolados, é necessário alguns cálculos para determinar a impedância de sequência zero. Segundo Mardegan (2012) será necessário algumas informações referentes à disposição física das linhas.

Primeiramente, será necessário determinar a distância média entre os condutores das fases (*GMD*): é obtido através da raiz cúbica do somatório das distâncias  $d$  entre as fases, de forma que:

$$GMD = \sqrt[3]{d_{ab} + d_{bc} + d_{ca}} \quad (32)$$

Além do *GMD*, o raio médio geométrico de um condutor (*GMR*) também será necessário, este dado pode ser obtido diretamente com o fabricante, como apresentado na Tabela 19, e em caso de vários condutores para a mesma fase, deverá ser calculado o espaçamento médio geométrico entre condutores. Neste caso, a seguinte equação poderá ser utilizada.

$$GMS = \sqrt[n]{GMR \cdot D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{1n}} \quad (33)$$

Com estes e os dados de resistência e reatância de sequência positiva dos condutores, será possível calcular a impedância de sequência negativa.

$$R_0 = R_1 + 0,002961 \cdot f \quad (34)$$

$$X_0 = X_a + X_e - 2 \cdot X_d \quad (35)$$

$$X_a = 0,002894 \cdot f \cdot \log\left(\frac{0,304}{GMR}\right) \quad (36)$$

$$X_e = 0,004341 \cdot f \cdot \log\left(\frac{4665600 \cdot \rho}{f}\right) \quad (37)$$

$$X_a = 0,002894 \cdot f \cdot \log\left(\frac{GMD}{0,304}\right), \quad (38)$$

sendo  $f$  a frequência da instalação,  $R_1$  a resistência de sequência positiva do condutor, e  $\rho$  a resistividade elétrica do material do condutor.

Utilizando as informações de comprimento de condutores da indústria “A” (anexo E), as equações apresentadas no item 3.1 e tabelas de resistência e reatância dos condutores aéreos fornecidos pela Nexans, foram calculados os valores de impedâncias dos condutores aéreos, no Apêndice B são detalhados os cálculos de Impedância do Condutor C3.

Impedâncias condutor C3 – 3#2 AWG - 296 m

$$R_{1C3} = 1,0503 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$X_{1C3} = 0,502895 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$Z_{1C3} = (0,17133666 + j 0,08964973) \text{ } [\text{pu}]$$

$$R_{0C3} = 1,227960 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$X_{0C3} = 1,833078 \text{ } [\Omega/\text{km}]$$

$$Z_{0C3} = (0,19086125 + j 0,28494434) \text{ } [\text{pu}]$$

Impedâncias condutor C4 – 3#2 AWG - 45 m

$$\begin{aligned}
 R_{1C4} &= 1,0503 \text{ } [\Omega/\text{km}] \\
 X_{1C4} &= 0,502895 \text{ } [\Omega/\text{km}] \\
 Z_{1C4} &= (0,02481805 + j 0,01188315) \text{ } [\text{pu}] \\
 R_{0C4} &= 1,227960 \text{ } [\Omega/\text{km}] \\
 X_{0C4} &= 1,833078 \text{ } [\Omega/\text{km}] \\
 Z_{0C4} &= (0,02901607 + j 0,04331469) \text{ } [\text{pu}]
 \end{aligned}$$

Impedâncias condutor C5 – 3#2 AWG - 156 m

$$\begin{aligned}
 R_{1C5} &= 1,0503 \text{ } [\Omega/\text{km}] \\
 X_{1C5} &= 0,502895 \text{ } [\Omega/\text{km}] \\
 Z_{1C5} &= (0,08603592 + j 0,04119493) \text{ } [\text{pu}] \\
 R_{0C5} &= 1,227960 \text{ } [\Omega/\text{km}] \\
 X_{0C5} &= 1,833078 \text{ } [\Omega/\text{km}] \\
 Z_{0C5} &= (0,10058904 + j 0,15015761) \text{ } [\text{pu}]
 \end{aligned}$$

Impedâncias condutor C9 – 3#2 AWG - 66 m

$$\begin{aligned}
 R_{1C9} &= 1,0503 \text{ } [\Omega/\text{km}] \\
 X_{1C9} &= 0,502895 \text{ } [\Omega/\text{km}] \\
 Z_{1C9} &= (0,03639981 + j 0,01742862) \text{ } [\text{pu}] \\
 R_{0C9} &= 1,227960 \text{ } [\Omega/\text{km}] \\
 X_{0C9} &= 1,833078 \text{ } [\Omega/\text{km}] \\
 Z_{0C9} &= (0,04255690 + j 0,06352822) \text{ } [\text{pu}]
 \end{aligned}$$

### 6.3 ESTUDO DE CURTO-CIRCUITO

A partir das impedâncias calculadas anteriormente, é possível calcular as correntes de curto-circuito simétricas e assimétricas.

No documento da Copel, “Apresentação do Estudo de Proteção e Seletividade”, anexo A, página 110 deste trabalho, é solicitado o cálculo das correntes de curto-circuito monofásico mínima simétricas na média tensão, curto-circuito trifásico máxima simétrica na baixa-tensão

vista pela média, além dos valores das correntes de curto-circuito nos locais de instalação dos TCs.

Portanto, o cálculo deverá ser executado em diversos pontos da planta. Para a indústria “A” foram definidos 17 pontos, além do ponto de entrega da Copel.

Para o cálculo das correntes de falta monofásicas, bifásicas e trifásicas simétricas e assimétricas, serão utilizadas as equações (8), (9), (10) e (11); as correntes de curto-circuito mínimas serão calculadas considerando uma resistência de falta  $3 \cdot R_f = 21 + j 0$  [pu], os cálculos detalhados do curto-circuito no ponto 0 são apresentados no Apêndice C, página 128, como exemplo

#### Ponto 0 - COPEL

$$Z_{1COPEL} [pu] = (0,100070 + j 0,662760) [pu]$$

$$Z_{0COPEL} [pu] = (0,496350 + j 3,979200) [pu]$$

Tabela 20: correntes de curto-circuito ponto 0 - COPEL.

Ponto 0	Curto-circuito máximo		Curto-circuito Mínimo	
	Corrente (A)	Ângulo	Corrente (A)	Ângulo
Icc3Ø sim.	6242	-81,4°	6242	-81,4°
Icc3Ø ass.	8315		8315	
Icc2Ø sim.	5406	-171,4°	5406	-171,4°
Icc2Ø ass.	7201		7201	
Icc1Ø sim.	2346	-82,5°	562	-82,5°
Icc1Ø ass.	3214		562	

Fonte: Própria.

#### Ponto 1 – CAB. MEDIÇÃO/PROTEÇÃO

$$Z_{1PONTO1} [pu] = Z_{1COPEL} [pu] + Z_{1C1} [pu]$$

$$Z_{1PONTO1} [pu] = (0,102922 + j 0,664454) [pu]$$

$$Z_{0PONTO1} [pu] = Z_{0COPEL} [pu] + Z_{0C1} [pu]$$

$$Z_{0PONTO1} [pu] = (0,500884 + j 3,983510) [pu]$$

Tabela 21: correntes de curto-circuito ponto 1 – CAB. MEDIÇÃO/PROTEÇÃO.

Ponto 1	Curto-circuito máximo		Curto-circuito Mínimo	
	Corrente (A)	Ângulo	Corrente (A)	Ângulo
Icc3Ø sim.	6222	-81,2°	6222	-81,2°
Icc3Ø ass.	8245		8245	
Icc2Ø sim.	5389	-171,2°	5389	-171,2°
Icc2Ø ass.	7140		7140	
Icc1Ø sim.	2342	-82,4°	2342	-82,4°
Icc1Ø ass.	3200		3200	

Fonte: Própria.

### Ponto 2 – CAB. SECCIONAMENTO

$$Z_{1PONTO2} [pu] = Z_{1COPEL} [pu] + Z_{1C1} [pu] + Z_{1C2} [pu]$$

$$Z_{1PONTO2} [pu] = (0,103570 + j 0,664839) [pu]$$

$$Z_{0PONTO2} [pu] = Z_{0COPEL} [pu] + Z_{0C1} [pu] + Z_{0C2} [pu]$$

$$Z_{0PONTO2} [pu] = (0,501914 + j 3,984490) [pu]$$

Tabela 22: correntes de curto-circuito ponto 2 – CAB. SECCIONAMENTO.

Ponto 2	Curto-circuito máximo		Curto-circuito Mínimo	
	Corrente (A)	Ângulo	Corrente (A)	Ângulo
Icc3Ø sim.	6218	-81,1°	6218	-81,1°
Icc3Ø ass.	8229		8229	
Icc2Ø sim.	5385	-171,1°	5385	-171,1°
Icc2Ø ass.	7126		7126	
Icc1Ø sim.	2341	-82,4°	562	-13,8°
Icc1Ø ass.	3197		562	

Fonte: Própria.

### Ponto 3 – CAB. TRANSFORMAÇÃO (A)

$$Z_{1PONTO3} [pu] = Z_{1COPEL} [pu] + Z_{1C1} [pu] + Z_{1C2} [pu] + Z_{1C6} [pu]$$

$$Z_{1PONTO3} [pu] = (0,106422 + j 0,666533) [pu]$$

$$Z_{0PONTO3} [pu] = Z_{0COPEL} [pu] + Z_{0C1} [pu] + Z_{0C2} [pu] + Z_{0C6} [pu]$$

$$Z_{0PONTO3} [pu] = (0,506448 + j 3,988800) [pu]$$

Tabela 23: correntes de curto-circuito ponto 3 – CAB. TRANSFORMAÇÃO (A).

Ponto 3	Curto-circuito máximo		Curto-circuito Mínimo	
	Corrente (A)	Ângulo	Corrente (A)	Ângulo
Icc3Ø sim.	6198	-80,9°	6218	-80,9°
Icc3Ø ass.	8161		8229	
Icc2Ø sim.	5368	-170,9°	5385	-170,9°
Icc2Ø ass.	7067		7126	
Icc1Ø sim.	2337	-82,3°	562	-13,8°
Icc1Ø ass.	3184		562	

Fonte: Própria.

#### Ponto 4 – CAB. TRANSFORMAÇÃO (B)

$$Z_{1PONTO4} [pu] = Z_{1COPEL} [pu] + Z_{1C1} [pu] + Z_{1C2} [pu] + Z_{1C6} [pu] + Z_{1C7} [pu]$$

$$Z_{1PONTO4} [pu] = (0,146611 + j 0,680460) [pu]$$

$$Z_{0PONTO4} [pu] = Z_{0COPEL} [pu] + Z_{0C1} [pu] + Z_{0C2} [pu] + Z_{0C6} [pu] + Z_{0C7} [pu]$$

$$Z_{0PONTO4} [pu] = (0,570340 + j 4,024232) [pu]$$

Tabela 24: correntes de curto-circuito ponto 4 – CAB. TRANSFORMAÇÃO (B).

Ponto 4	Curto-circuito máximo		Curto-circuito Mínimo	
	Corrente (A)	Ângulo	Corrente (A)	Ângulo
Icc3Ø sim.	6010	-77,8°	6218	-77,8°
Icc3Ø ass.	7402		8229	
Icc2Ø sim.	5205	-167,8°	5385	-167,8°
Icc2Ø ass.	6410		7126	
Icc1Ø sim.	2301	-80,9°	562	-13,8°
Icc1Ø ass.	3027		562	

Fonte: Própria.

#### Ponto 5 – POSTE 1

$$Z_{1PONTO5} [pu] = Z_{1COPEL} [pu] + Z_{1C1} [pu] + Z_{1C2} [pu] + Z_{1C8} [pu]$$

$$Z_{1PONTO5} [pu] = (0,105255 + j 0,665840) [pu]$$

$$Z_{0PONTO5} [pu] = Z_{0COPEL} [pu] + Z_{0C1} [pu] + Z_{0C2} [pu] + Z_{0C8} [pu]$$

$$Z_{0PONTO5} [pu] = (0,504593 + j 3,987037) [pu]$$

Tabela 25: correntes de curto-circuito ponto 5 – POSTE 1.

Ponto 5	Curto-circuito máximo		Curto-circuito Mínimo	
	Corrente (A)	Ângulo	Corrente (A)	Ângulo
Icc3Ø sim.	6206	-81°	6218	-81°
Icc3Ø ass.	8188		8229	
Icc2Ø sim.	5375	-171°	5385	-171°
Icc2Ø ass.	7091		7126	
Icc1Ø sim.	2339	-82,3°	562	-13,8°
Icc1Ø ass.	3189		562	

Fonte: Própria.

### Ponto 6 – POSTE 2

$$Z_{1PONTO6} [pu] = Z_{1COPEL} [pu] + Z_{1C1} [pu] + Z_{1C2} [pu] + Z_{1C8} [pu] + Z_{1C3} [pu]$$

$$Z_{1PONTO6} [pu] = (0,268503 + j 0,744005) [pu]$$

$$Z_{0PONTO6} [pu] = Z_{0COPEL} [pu] + Z_{0C1} [pu] + Z_{0C2} [pu] + Z_{0C8} [pu] + Z_{0C3} [pu]$$

$$Z_{0PONTO6} [pu] = (0,695454 + j 4,271951) [pu]$$

Tabela 26: correntes de curto-circuito ponto 6 – POSTE 2.

Ponto 6	Curto-circuito máximo		Curto-circuito Mínimo	
	Corrente (A)	Ângulo	Corrente (A)	Ângulo
Icc3Ø sim.	5289	-70,2°	5289	-70,2°
Icc3Ø ass.	5811		8229	
Icc2Ø sim.	4581	-160,2°	5385	-160,2°
Icc2Ø ass.	5033		7126	
Icc1Ø sim.	2131	-77,9°	562	-14,5°
Icc1Ø ass.	2628		562	

Fonte: Própria.

### Ponto 7 – POSTE 3

$$Z_{1PONTO7} [pu] = Z_{1COPEL} [pu] + Z_{1C1} [pu] + Z_{1C2} [pu] + Z_{1C8} [pu] + Z_{1C3} [pu] + Z_{1C4} [pu]$$

$$Z_{1PONTO7} [pu] = (0,293321 + j 0,755888) [pu]$$

$$Z_{0PONTO7} [pu] = Z_{0COPEL} [pu] + Z_{0C1} [pu] + Z_{0C2} [pu] + Z_{0C8} [pu] + Z_{0C3} [pu] + Z_{0C4} [pu]$$

$$Z_{0PONTO7} [pu] = (0,724470 + j 4,315266) [pu]$$

Tabela 27: correntes de curto-circuito ponto 7 – POSTE 3.

Ponto 7	Curto-circuito máximo		Curto-circuito Mínimo	
	Corrente (A)	Ângulo	Corrente (A)	Ângulo
Icc3Ø sim.	5160	-68,8°	5160	-68,8°
Icc3Ø ass.	5592		5592	
Icc2Ø sim.	4469	-158,8°	4469	-158,8°
Icc2Ø ass.	4843		4843	
Icc1Ø sim.	2101	-77,3°	2101	-14,6°
Icc1Ø ass.	2562		2562	

**Fonte: Própria.**

#### Ponto 8 – POSTE 4

$$Z_{1PONTO8} [pu] = Z_{1COPEL} [pu] + Z_{1C1} [pu] + Z_{1C2} [pu] + Z_{1C8} [pu] + Z_{1C3} [pu] + Z_{1C4} [pu] + Z_{1C9} [pu]$$

$$Z_{1PONTO8} [pu] = (0,329720 + j 0,773317) [pu]$$

$$Z_{0PONTO8} [pu] = Z_{0COPEL} [pu] + Z_{0C1} [pu] + Z_{0C2} [pu] + Z_{0C8} [pu] + Z_{0C3} [pu] + Z_{0C4} [pu] + Z_{0C9} [pu]$$

$$Z_{0PONTO8} [pu] = (0,767027 + j 4,378794) [pu]$$

Tabela 28: correntes de curto-circuito ponto 8 – POSTE 4.

Ponto 8	Curto-circuito máximo		Curto-circuito Mínimo	
	Corrente (A)	Ângulo	Corrente (A)	Ângulo
Icc3Ø sim.	4977	-66,9°	4977	-66,9°
Icc3Ø ass.	5307		5307	
Icc2Ø sim.	4310	-156,9°	4310	-156,9°
Icc2Ø ass.	4596		4596	
Icc1Ø sim.	2059	-76,5°	541	-14,8°
Icc1Ø ass.	2472		541	

**Fonte: Própria.**

#### Ponto 9 – POSTE 5

$$Z_{1PONTO9} [pu] = Z_{1COPEL} [pu] + Z_{1C1} [pu] + Z_{1C2} [pu] + Z_{1C8} [pu] + Z_{1C3} [pu] + Z_{1C4} [pu] + Z_{1C5} [pu]$$

$$Z_{1PONTO9} [pu] = (0,379357 + j 0,797083) [pu]$$

$$Z_{0PONTO9} [pu] = Z_{0COPEL} [pu] + Z_{0C1} [pu] + Z_{0C2} [pu] + Z_{0C8} [pu] + Z_{0C3} [pu] + Z_{0C4} [pu] + Z_{0C5} [pu]$$

$$Z_{0PONTO9} [pu] = (0,825059 + j 4,465423) [pu]$$

Tabela 29: correntes de curto-circuito ponto 9 – POSTE 5.

Ponto 9	Curto-circuito máximo		Curto-circuito Mínimo	
	Corrente (A)	Ângulo	Corrente (A)	Ângulo
Icc3Ø sim.	4739	-65,5°	4739	-65,5°
Icc3Ø ass.	4972		4972	
Icc2Ø sim.	4104	-154,4°	4104	-154,4°
Icc2Ø ass.	4306		4306	
Icc1Ø sim.	2004	-76,5°	537	-15°
Icc1Ø ass.	2360		537	

Fonte: Própria.

#### Ponto 10 – ETDI

$$Z_{1PONTO10} [pu] = Z_{1COPEL} [pu] + Z_{1C1} [pu] + Z_{1C2} [pu] + Z_{1C8} [pu] + Z_{1C3} [pu] + Z_{1C4} [pu] + Z_{1C5} [pu] + Z_{1C12} [pu] + Z_{1TR6} [pu]$$

$$Z_{1PONTO10} [pu] = (5,644403 + j 20,066678) [pu]$$

$$Z_{0PONTO10} [pu] = Z_{0C12} [pu] + Z_{0TR6} [pu]$$

$$Z_{0PONTO10} [pu] = (5,476418 + j 19,510208) [pu]$$

Tabela 30: correntes de curto-circuito ponto 10 – ETDI.

Ponto 10	Curto-circuito máximo		Curto-circuito Mínimo	
	Corrente (A)	Ângulo	Corrente (A)	Ângulo
Icc3Ø sim.	7289	-104,3°	7289	-104,3°
Icc3Ø ass.	8442		8442	
Icc2Ø sim.	6312	-164,3°	6312	-164,3°
Icc2Ø ass.	7311		7311	
Icc1Ø sim.	7357	-104,3°	7357	-104,3°
Icc1Ø ass.	8253		8253	

Fonte: Própria.

#### Ponto 11 – TR3 (Bornes de BT)

$$Z_{1PONTO11} [pu] = Z_{1COPEL} [pu] + Z_{1C1} [pu] + Z_{1C2} [pu] + Z_{1C6} [pu] + Z_{1C7} [pu] + Z_{1TR3} [pu]$$

$$Z_{1PONTO11} [pu] = (0,753211 + j 4,647670) [pu]$$

$$Z_{0PONTO11} [pu] = Z_{0TR3} [pu]$$

$$Z_{0PONTO11} [pu] = (0,606600 + j 3,967200) [pu]$$

Tabela 31: correntes de curto-circuito ponto 11 – TR3 (Bornes de BT).

Ponto 11	Curto-circuito máximo		Curto-circuito Mínimo	
	Corrente (A)	Ângulo	Corrente (A)	Ângulo
Icc3Ø sim.	32269	-110,8°	32269	-110,8°
Icc3Ø ass.	42351		42351	
Icc2Ø sim.	27946	-170,8°	27946	-170,8°
Icc2Ø ass.	36677		36677	
Icc1Ø sim.	33940	-110,9°	33940	-110,9°
Icc1Ø ass.	44705		44705	

Fonte: Própria.

#### Ponto 12 – CCM-1

$$Z_{1PONTO12} [pu] = Z_{1COPEL} [pu] + Z_{1C1} [pu] + Z_{1C2} [pu] + Z_{1C6} [pu] + Z_{1C7} [pu] + \\ + Z_{1TR3} [pu] + Z_{1C15} [pu]$$

$$Z_{1PONTO12} [pu] = (0,867130 + j 4,766427) [pu]$$

$$Z_{0PONTO12} [pu] = Z_{0TR3} [pu] + Z_{0C15} [pu]$$

$$Z_{0PONTO12} [pu] = (0,7877909 + j 4,269368) [pu]$$

Tabela 32: correntes de curto-circuito ponto 12 – CCM-1.

Ponto 12	Curto-circuito máximo		Curto-circuito Mínimo	
	Corrente (A)	Ângulo	Corrente (A)	Ângulo
Icc3Ø sim.	31361	-109,7°	31361	-109,7°
Icc3Ø ass.	40133		40133	
Icc2Ø sim.	27160	-169,7°	27160	-169,7°
Icc2Ø ass.	34757		34757	
Icc1Ø sim.	32486	-109,6°	32486	-109,6°
Icc1Ø ass.	41327		41327	

Fonte: Própria.

#### Ponto 13 – CCM-2

$$Z_{1PONTO13} [pu] = Z_{1COPEL} [pu] + Z_{1C1} [pu] + Z_{1C2} [pu] + Z_{1C6} [pu] + Z_{1C7} [pu] +$$

$$+ Z_{1TR3} [pu] + Z_{1C16} [pu]$$

$$Z_{1PONTO13} [pu] = (0,867130 + j 4,766427) [pu]$$

$$Z_{0PONTO13} [pu] = Z_{0TR3} [pu] + Z_{0C16} [pu]$$

$$Z_{0PONTO13} [pu] = (0,7877909 + j 4,269368) [pu]$$

Tabela 33: correntes de curto-circuito ponto 13 – CCM-2.

Ponto 13	Curto-circuito máximo		Curto-circuito Mínimo	
	Corrente (A)	Ângulo	Corrente (A)	Ângulo
Icc3Ø sim.	31361	-109,7°	31361	-109,7°
Icc3Ø ass.	40133		40133	
Icc2Ø sim.	27160	-169,7°	27160	-169,7°
Icc2Ø ass.	34757		34757	
Icc1Ø sim.	32486	-109,6°	32486	-109,6°
Icc1Ø ass.	41532		41532	

Fonte: Própria.

Ponto 14 – QDG-380 V (A)

$$Z_{1PONTO14} [pu] = Z_{1COPEL} [pu] + Z_{1C1} [pu] + Z_{1C2} [pu] + Z_{1C6} [pu] + Z_{1C13} [pu] + Z_{TR1} [pu]$$

$$Z_{1PONTO14} [pu] = (1,181092 + j 5,778625) [pu]$$

$$Z_{0PONTO14} [pu] = Z_{0C13} [pu] + Z_{TR1} [pu]$$

$$Z_{0PONTO14} [pu] = (1,210071 + j 5,552948) [pu]$$

Tabela 34: correntes de curto-circuito ponto 14 – QDG-380 V (A).

Ponto 14	Curto-circuito máximo		Curto-circuito Mínimo	
	Corrente (A)	Ângulo	Corrente (A)	Ângulo
Icc3Ø sim.	25760	-108,4°	25760	-108,4°
Icc3Ø ass.	32109		32109	
Icc2Ø sim.	22309	-168,4°	22309	-168,4°
Icc2Ø ass.	27808		27808	
Icc1Ø sim.	26077	-108,2°	26077	-108,2°
Icc1Ø ass.	32347		32347	

Fonte: Própria.

Ponto 15 – QDG-380 V (B)

$$Z_{1PONTO15} [pu] = Z_{1COPEL} [pu] + Z_{1C1} [pu] + Z_{1C2} [pu] + Z_{1C6} [pu] + Z_{1C14} [pu] + Z_{TR2} [pu]$$

$$Z_{1PONTO15} [pu] = (1,168992 + j 5,709625) [pu]$$

$$Z_{0PONTO15} [pu] = Z_{0C14} [pu] + Z_{TR2} [pu]$$

$$Z_{0PONTO15} [pu] = (1,197971 + j 5,483948) [pu]$$

Tabela 35: correntes de curto-circuito ponto 15 – QDG-380 V (B).

Ponto 15	Curto-circuito máximo		Curto-circuito Mínimo	
	Corrente (A)	Ângulo	Corrente (A)	Ângulo
Icc3Ø sim.	26069	-108,4°	26069	-108,4°
Icc3Ø ass.	32482		32482	
Icc2Ø sim.	22577	-168,4°	22577	-168,4°
Icc2Ø ass.	28131		28131	
Icc1Ø sim.	26394	-108,2°	26394	-108,2°
Icc1Ø ass.	32725		32725	

Fonte: Própria.

Ponto 16 – QDG-220 V

$$Z_{1PONTO16} [pu] = Z_{1COPEL} [pu] + Z_{1C1} [pu] + Z_{1C2} [pu] + Z_{1C6} [pu] + Z_{1C17} [pu] + Z_{TR5} [pu]$$

$$Z_{1PONTO16} [pu] = (2,709927 + j 10,228223) [pu]$$

$$Z_{0PONTO16} [pu] = Z_{0C17} [pu] + Z_{0TR5} [pu]$$

$$Z_{0PONTO16} [pu] = (3,033060 + j 10,734205) [pu]$$

Tabela 36: correntes de curto-circuito ponto 16 – QDG-220 V.

Ponto 16	Curto-circuito máximo		Curto-circuito Mínimo	
	Corrente (A)	Ângulo	Corrente (A)	Ângulo
Icc3Ø sim.	24802	-105,2°	24802	-105,2°
Icc3Ø ass.	29120		29120	
Icc2Ø sim.	21479	-165,2°	21479	-165,2°
Icc2Ø ass.	25218		25218	
Icc1Ø sim.	24363	-104,8°	24363	-104,8°
Icc1Ø ass.	28457		28457	

Fonte: Própria.

Ponto 17 – REFEITÓRIO

$$Z_{1PONT17} [pu] = Z_{1COPEL} [pu] + Z_{1C1} [pu] + Z_{1C2} [pu] + Z_{1C8} [pu] + Z_{1C3} [pu] + \\ + Z_{1C10} [pu] + Z_{1TR7} [pu] +$$

$$Z_{1PONT17} [pu] = (7,181155 + j 20,270646) [pu]$$

$$Z_{0PONT17} [pu] = Z_{0C10} [pu] + Z_{0TR7} [pu]$$

$$Z_{0PONT17} [pu] = (8,173899 + j 20,962364) [pu]$$

Tabela 37: correntes de curto-circuito ponto 17 – REFEITÓRIO.

Ponto 17	Curto-circuito máximo		Curto-circuito Mínimo	
	Corrente (A)	Ângulo	Corrente (A)	Ângulo
Icc3Ø sim.	12203	-100,5°	12203	-100,5°
Icc3Ø ass.	13456		13456	
Icc2Ø sim.	10568	-160,5°	10568	-160,5°
Icc2Ø ass.	11654		11654	
Icc1Ø sim.	12019	-99,9°	12019	-99,9°
Icc1Ø ass.	13167		13167	

Fonte: Própria.

#### Ponto 18 – PR-SUL

$$Z_{1PONT17} [pu] = Z_{1COPEL} [pu] + Z_{1C1} [pu] + Z_{1C2} [pu] + Z_{1C8} [pu] + Z_{1C3} [pu] + \\ + Z_{1C4} [pu] + Z_{1C9} [pu] + Z_{1C11} [pu] + Z_{1TR8} [pu] +$$

$$Z_{1PONT17} [pu] = (6,173158 + j 19,835082) [pu]$$

$$Z_{0PONT17} [pu] = Z_{0C11} [pu] + Z_{0TR8} [pu]$$

$$Z_{0PONT17} [pu] = (6,474060 + j 19,779626) [pu]$$

Tabela 38: correntes de curto-circuito ponto 18 – PR-SUL.

Ponto 18	Curto-circuito máximo		Curto-circuito Mínimo	
	Corrente (A)	Ângulo	Corrente (A)	Ângulo
Icc3Ø sim.	12633	-102,7°	12633	-102,7°
Icc3Ø ass.	14309		14309	
Icc2Ø sim.	10941	-162,7°	10941	-162,7°
Icc2Ø ass.	12392		12392	
Icc1Ø sim.	12625	-102,4°	12625	-102,4°
Icc1Ø ass.	14249		14249	

Fonte: Própria.

#### 6.4 CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO DOS TRANSFORMADORES

Segundo a Copel, no documento “Apresentação do Estudo de Proteção e Seletividade”, para o cálculo da corrente de magnetização, ou *Inrush* dos transformadores, é considerada oito vezes a corrente nominal do transformador; no caso de vários transformadores, deve-se considerar oito vezes a corrente nominal do de maior potência, mais o quádruplo do somatório das correntes dos demais transformadores.

A indústria “A” possui um transformador a seco de 1500 kVA e os demais a óleo, sendo, dois de 1000 kVA, um de 500 kVA, e três de 225 kVA; portanto a corrente de *Inrush* é dada pela seguinte expressão:

$$I_{nrush} = \frac{1500 \text{ kVA}}{13,2 \text{ kV} \cdot \sqrt{3}} \cdot 8 + \frac{(1000 + 1000 + 500 + 225 + 225 + 225) \text{ kVA}}{13,2 \text{ kV} \cdot \sqrt{3}} \cdot 4$$

$$I_{nrush} = 65,61 \text{ A} \cdot 8 + 138,87 \text{ A} \cdot 4$$

$$I_{nrush} = 524,86 \text{ A} + 555,48 \text{ A}$$

$$I_{nrush} \approx 1080 \text{ A}$$

#### 6.5 CÁLCULO DA CORRENTE DE PARTIDA

O cálculo da corrente de partida, ou de *pick-up*, poderá ser calculada de acordo com a equação (18), página 45; porém, um dos “Critérios de Ajustes do Sistema de Proteção” da Copel (anexo B), determina que para unidades consumidoras com potência de transformação de até 1000 kVA, a corrente de partida será a própria corrente nominal do transformador. Em instalações com mais de 1000 kVA instalados, será utilizada a equação (22) página 48, com a demanda contratada multiplicada por 1,3 e o fator de potência 0,92.

A capacidade de transformação da indústria “A” é de 4675 kVA e a demanda contratada 3100 kW; desta forma, a corrente de partida ou de *pick-up* será:

$$\frac{4675 \cdot \text{kVA}}{\sqrt{3} \cdot 13,2 \text{ kV}} \geq I_{\text{pick-up}} \geq \frac{3100 \cdot \text{kW} \cdot 1,3}{\sqrt{3} \cdot 13,2 \text{ kV} \cdot 0,92}$$

$$204,48 A \geq I_{\text{Pick-up}} \geq 191,59 A$$

Neste caso, será adotado o valor de 200 A para a corrente de partida ou de *pick-up*.

$$I_{\text{Pick-up}} = 200 A$$

## 6.6 DIMENSIONAMENTO DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE PROTEÇÃO

O dimensionamento do transformador de corrente de proteção dar-se-á de acordo com os conceitos apresentados no item 4.1 deste trabalho, primeiramente determinando a corrente primária e secundária do TC, e, em seguida, a tensão máxima induzida no secundário, para que seja evitada a saturação do aparelho.

Primeiramente, segundo a Copel, a corrente primária do TC deverá ser superior a corrente de carga, que, neste caso, será considerada igual à corrente de partida  $I_{\text{Pick-up}}$ . Portanto, até este ponto, 200 A é a corrente mínima para o primário do TC.

O transformador de corrente não deverá saturar para vinte vezes a corrente nominal do primário, e deverá suportar a corrente de curto-circuito trifásico simétrica calculada em seu ponto de instalação (ponto 1). A tabela 21 apresenta o seguinte valor:

$$I_{CC \ 3\phi \ sim. \ PONTO \ 1} = 6222 [-81,2^\circ A.$$

Da equação (15):

$$20 \cdot I_{np} > 6222 A.$$

Logo,

$$I_{np} > 311,1 A.$$

Portanto, a corrente nominal mínima para o enrolamento primário do TC será 350 A. O relé de proteção secundária MRI1-IE fabricado pela SEG (Schaltanlagen-Elektronik-Geräte

GmbH & Co. KG) foi o aparelho selecionado pela indústria “A”, e, segundo seu manual, a corrente nominal do relé poderá ser parametrizada em 1 A ou 5 A; porém, como a segunda é mais usual, o TC especificado deverá ter a relação 350 / 5 A.

Para determinar a saturação do TC, deverá ser conhecida a carga instalada a jusante de seu enrolamento secundário, segundo o manual do relé MRI1-IE, este aparelho terá consumo máximo de 0,12 VA para corrente nominal em 5 A; logo, a impedância do aparelho será inferior a 0,0048  $\Omega$ . Considerando dez metros de condutor 2,5 mm<sup>2</sup>, tendo em vista que a instalação do relé deverá ser próxima ao ponto onde é instalado o TC, a impedância do condutor será aproximadamente 0,0887  $\Omega$ . Desta forma, da equação (14) página 35, tem-se que:

$$FS \cdot I_{ns} \cdot Z_{Burden} < V_s$$

$$20 \cdot 5 \cdot (0,0048 + 0,0887) < V_s$$

$$9,36 < V_s$$

Desta forma, transformadores de corrente 10B20 com relação 350/5 A, seriam suficientes para esta instalação; porém, na indústria “A”, por critério do projetista, foram instalados transformadores de corrente 10B100 com relação 400/5 A, que podem ser considerados aptos para utilização no sistema de proteção.

## 6.7 AJUSTES DO RELÉ DE PROTEÇÃO

Os ajustes do relé de proteção responsável pela proteção geral da unidade consumidora deverão ser tomados de acordo com o documento da Copel “Critérios de Ajustes do Sistema de Proteção”. Deve-se ter em conta que, devido às características do sistema, algumas das exigências da Copel poderão não ser atendidas apenas com as funções do relé de proteção; em alguns casos, portanto, deverão ser utilizados outros aparelhos de proteção, ou até outros relés com as mesmas funções operando em conjunto.

Deverão ser parametrizadas as características das unidades temporizadas e instantâneas de fase e neutro do relé, sempre seguindo as diretrizes da Copel.

### 6.7.1 Unidade temporizada de fase

A unidade temporizada de fase será responsável pelo ajuste referente a corrente mínima de atuação do relé. Em instalações elétricas de até 1000 kVA, será regulada de forma a liberar toda a potência de transformação. Caso a soma das potências dos transformadores for maior que este valor, deverá ser considerado com ajuste da unidade temporizada de fase, o mesmo valor calculado para corrente de partida, apresentado no item 6.5.

Desta forma, para a indústria “A”, o valor ajustado para unidade temporizada de fase será 200 A.

### 6.7.2 Unidade instantânea de fase

A parametrização da unidade instantânea de fase é responsável pela atuação do relé em casos onde a corrente nominal é elevada bruscamente. Neste ajuste, a corrente deverá ser superior aos valores de *Inrush*, e da maior corrente de curto-circuito simétrico na baixa tensão.

Foi calculado o valor da corrente de magnetização, ou *Inrush* para a indústria “A” no item 6.4, e apontado o valor de 1080 A; porém, como citado anteriormente, a corrente de magnetização em sistemas elétricos com diversos transformadores energizados ao mesmo tempo, depende de alguns fatores além da potência nominal dos aparelhos; desta forma, calculando *Inrush* através de outros métodos (PTW), chega-se a valores próximos a 1700 A; este valor deverá ser considerado no ajuste instantâneo de fase.

O maior valor de curto-circuito trifásico simétrico da baixa tensão é 32.269 A, encontrado nos bornes de baixa tensão do transformador TR3 (ponto 11); referido ao primário, esta corrente de falta será de 888,58 A.

Portanto, de forma a não atuar para a corrente de magnetização dos transformadores ou correntes de curto-circuito na baixa tensão, o ajuste instantâneo de fase será fixado em 2000 A.

### 6.7.3 Curva temporizada de fase

Segundo os critérios de ajuste da Copel, a curva temporizada de fase deverá proporcionar um tempo máximo de 0,3 s para o maior valor da corrente curto-circuito trifásico simétrica na baixa tensão, e coordenar com a proteção a montante da concessionária.

Desta forma, na indústria “A” foi escolhida a curva extremamente inversa com dial de tempo fixado em 0,1 s, que é a curva com atuação mais rápida proporcionada pelo MRI1-IE. Esta curva será apresentada no item 6.8.

### 6.7.4 Unidade temporizada de neutro

A Copel recomenda um ajuste de 20 % da unidade temporizada de fase (200 A), desde que esteja abaixo do ajuste de neutro do religador, que neste caso é 50 A e não seja inferior a 10 % da corrente nominal do TC (400 A).

Logo, atendendo a todos os critérios, a unidade temporizada de neutro será ajustada em 40 A.

### 6.7.5 Unidade instantânea de neutro

Para a unidade instantânea de neutro, a Copel também recomenda adotar 20 % do ajuste da unidade instantânea de fase, advertindo, que este ajuste deverá ser inferior ao menor valor de corrente de curto-circuito monofásico simétrica na alta tensão. O valor encontrado foi 537 A, no ponto 9.

A unidade instantânea de neutro para a indústria “A” será ajustada em 400 A.

### 6.7.6 Curva temporizada de neutro

Segundo a Copel, não há necessidade de coordenação com as proteções do secundário; desta forma, poderá ser utilizada a menor curva possível.

Para a indústria “A”, a curva temporizada de neutro terá ajuste de tempo definido em 0,3 s, coordenando, assim, com a curva do religador.

## 6.8 ESTUDOS DE SELETIVIDADE

A partir dos ajustes especificados no item 6.7, foram geradas as curvas tempo x corrente de curto-circuito trifásico e monofásico, e a curva de danos dos transformadores conforme solicitação da Copel no documento “Apresentação do Estudo de Proteção e Seletividade em Entradas de Serviço” (anexo A).

A figura 17, a seguir, “curto-circuito trifásico”, apresenta a curva de fase do relé, identificada pela cor azul escuro; níveis de curto-circuito trifásico, *Inrush*, danos no condutor do ramal de entrada (95 mm<sup>2</sup>), representados pela cor vermelha, e curva característica do religador da Copel, representado em azul claro. Verifica-se, neste gráfico, a coordenação entre os aparelhos, e proteção contra as faltas na alta tensão, permitindo a energização dos transformadores sem comprometer o funcionamento do sistema.

A figura 18, “Curto-circuito monofásico”, apresenta a curva de neutro do relé, identificada pela cor azul escuro; níveis de curto-circuito monofásico, e curva de neutro do religador, identificada pela cor azul claro. Assim como na figura anterior, esta apresenta a correta coordenação entre os aparelhos, além da proteção contra curtos-circuitos monofásicos.

A figura 19, “Proteção dos transformadores” apresenta as curvas de danos dos transformadores, identificadas pela cor vermelha, e curvas dos fusíveis, identificadas pela cor verde. Verifica-se que a curva do relé não protege de forma satisfatória os transformadores; desta forma, surge à necessidade da utilização de fusíveis. Nota-se que para um tempo mais elevado, a curva do fusível deixa de proteger o transformador; porém, a função do fusível é limitar a corrente em casos de curto-circuito; as proteções de sobrecarga serão feitas no enrolamento secundário por disjuntores de baixa tensão.

### Curto-circuito trifásico

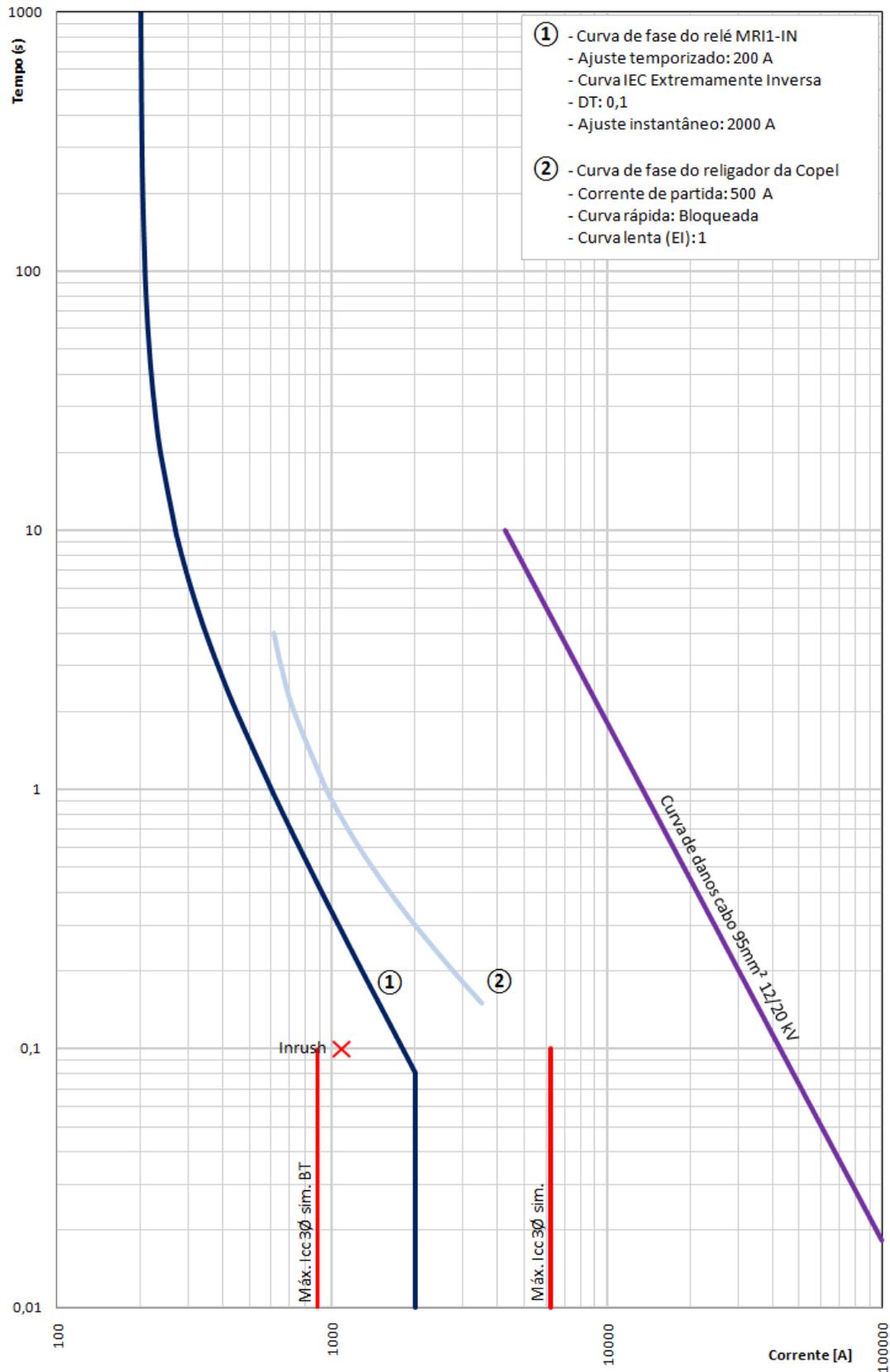
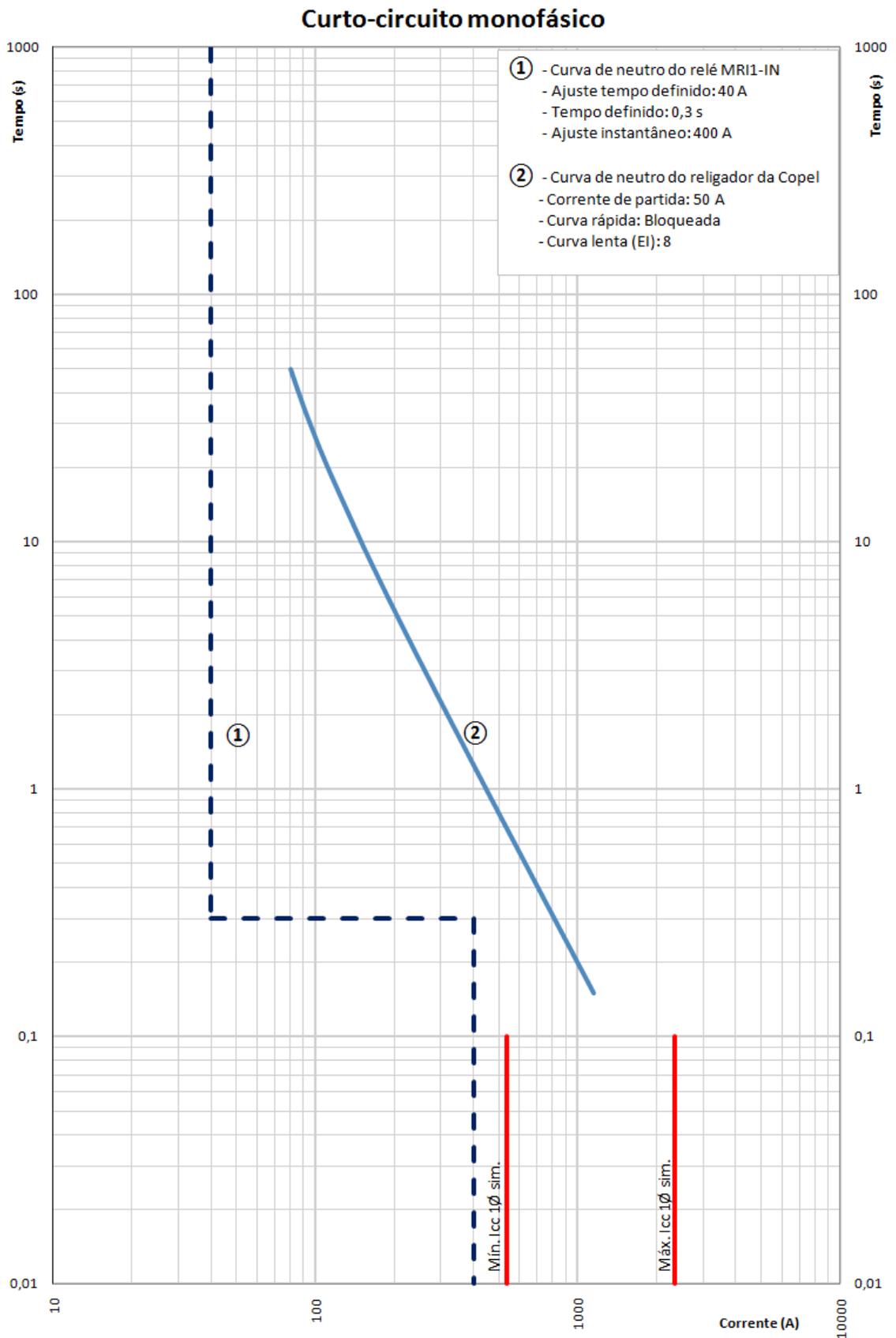


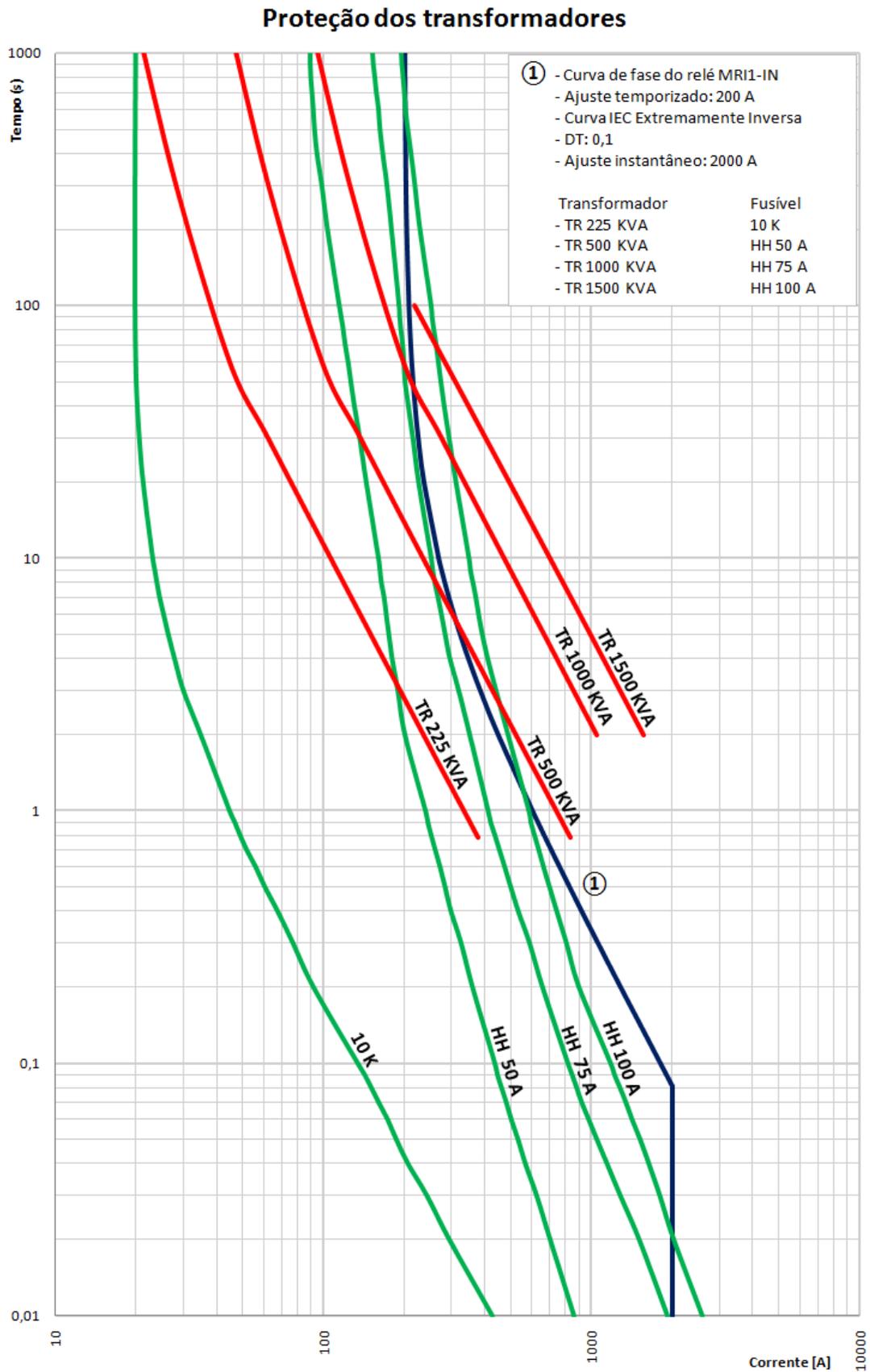
Figura 17 : curto-circuito trifásico.

Fonte: própria.



**Figura 18 : curto-circuito monofásico.**

**Fonte: própria.**



**Figura 19 : proteção dos transformadores.**

**Fonte: própria.**

## 6.9 RESUMO DO ESTUDO DE PROTEÇÃO

Na apresentação do estudo de proteção e seletividade, a Copel exige uma ficha resumo, contendo os cálculos de curto-circuito, especificações dos transformadores de corrente, e ajustes do relé de proteção.

A seguir é apresentada a ficha de resumo contendo os valores de curto-circuito nos principais pontos da instalação, ajustes do relé MRI1-IE, e relação de transformação dos transformadores de corrente, conforme modelo da Copel. Vale ressaltar que, nos campos de ajustes dos relés, os valores apresentados são fatores multiplicativos da corrente nominal do enrolamento primário do transformador de corrente.

## RESUMO COM DADOS DO ESTUDO DE PROTEÇÃO

CONSUMIDOR:	Indústria A
-------------	-------------

PONTO	PRIMARIO						SECUNDARIO					
	V <sub>base</sub> = 13,8 kV						V <sub>base</sub> = 13,8 kV (refletido ao primário)					
	Transformador (kVA)	I <sub>cc3esim</sub> (A)	I <sub>cc1esim</sub> (A)	I <sub>cc2esim</sub> (A)	I <sub>cc3esim</sub> (A)	I <sub>cc1esim</sub> (A)	I <sub>cc3esim</sub> (A)	I <sub>cc1esim</sub> (A)	I <sub>cc2esim</sub> (A)	I <sub>cc3esim</sub> (A)	I <sub>cc1esim</sub> (A)	I <sub>cc2esim</sub> (A)
Ponto de Entrega	NA	6242 /-81,4°	2346 /-82,5°	562 /-13,7°	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Cab. Medição/Proteção TR1/TR2/TR5	NA	6222 /-81,2°	2342 /-82,4°	562 /-13,7°	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Transformadores TR1/TR2/TR5	1000	6218 /-81,1°	2341 /-82,4°	562 /-13,8°	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Transformador TR3	1500	6010 /-77,8°	2301 /-80,9°	557 /-13,8°	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Transformador TR6	225	4739 /-64,5°	2004 /-75,4°	537 /-15,0°	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Transformador TR7	225	5289 /-70,2°	2131 /-77,9°	546 /-14,5°	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Transformador TR8	225	4977 /-66,9°	2059 /-76,5°	541 /-14,8°	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
QDG-380 V (A)	NA	NA	NA	NA	709 /-108,4°	414 /-108,2°	25760 /-108,4°	26077 /-108,2°	NA	NA	NA	NA
QDG-380 V (B)	NA	NA	NA	NA	718 /-108,4°	420 /-108,2°	26069 /-108,4°	26394 /-108,2°	NA	NA	NA	NA
Bornes de BT do TR3	NA	NA	NA	NA	889 /-110,8°	540 /-110,9°	32269 /-110,8°	33940 /-110,9°	NA	NA	NA	NA
CCM 1 / CCM 2	NA	NA	NA	NA	863 /-109,7°	516 /-109,6°	31361 /-109,7°	32486 /-109,6°	NA	NA	NA	NA
QDG-220 V	NA	NA	NA	NA	395 /-105,2°	224 /-104,8°	NA	NA	24802 /-105,2°	NA	NA	NA
ETDI	NA	NA	NA	NA	201 /-104,3°	117 /-104,3°	7289 /-104,3°	7357 /-104,3°	NA	NA	NA	NA
Refeitório	NA	NA	NA	NA	186 /-100,5°	105 /-99,9°	NA	NA	12203 /-100,5°	NA	NA	12019 /-99,9°
PR-SUL	NA	NA	NA	NA	201 /-102,7°	116 /-102,4°	NA	NA	12633 /-102,7°	NA	NA	12625 /-102,4°

I magnetização (A):	1080	I demanda contratada (A):	192
I nominal (A):	204		

Temporizado Fase I >	Ajuste e Tipo de Curva Temporizado Fase	Ajuste de Tempo Definido Fase	Tempo Definido Fase [s]	Instantâneo Fase I >>	Tempo Instantâneo Fase	Temporizado Neutro IN >	Ajuste e Tipo de Curva Temporizado Neutro	Ajuste de Tempo Definido Neutro	Tempo Definido Neutro [s]	Instantâneo Neutro IN >>	Tempo Instantâneo Neutro
200	0,10 EI (IEC)	-	-	2000	Não	-	-	30	0,3	200	Não
0,5		-		5		-		0,075		0,5	

ELO FUSIVEL	
RTC	80
RELE	SEG MRI1-IE
Corrente nominal do Relé	5 A

## **7 FERRAMENTA PARA ESTUDO DE PROTEÇÃO E SELETIVIDADE (EPS v1.0)**

Através dos conceitos apresentados anteriormente, visando o auxílio na elaboração de estudos de proteção e seletividade destinados a aprovação de projetos de entrada de energia na Copel, foi desenvolvida a ferramenta denominada Estudo de Proteção e Seletividade (EPS v1.0).

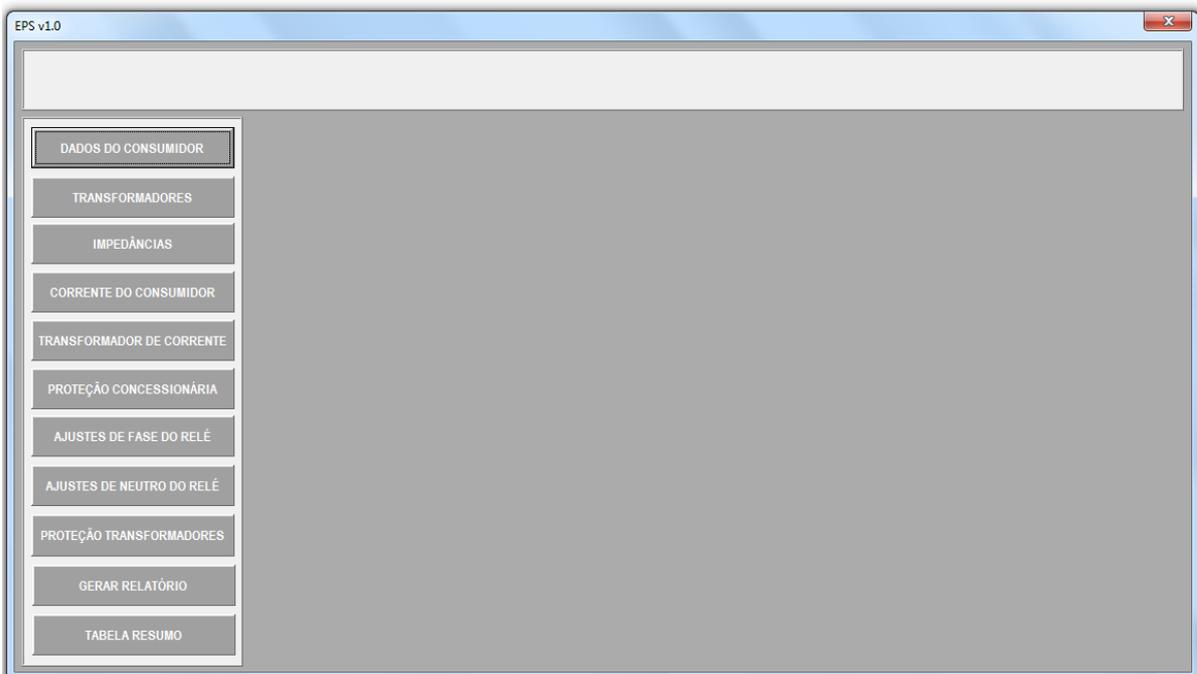
A ferramenta EPS v1.0 foi desenvolvida através dos recursos do Visual Basic for Applications (VBA) em seus elementos de programação, com o Microsoft Office Excel utilizado como banco de dados e o processador de textos Microsoft Office Word para a geração do relatório.

Sua interface tem o propósito de estimular o usuário a adota a sequência de procedimentos apresentados no item 6 deste trabalho; o processo do estudo é dividido em três etapas: a primeira é a inserção das informações do consumidor em questão, desde o fornecimento dos dados dos transformadores, indicação das impedâncias, tanto do ponto de entrega da concessionária quanto dos elementos internos da instalação elétrica; a segunda etapa é a determinação da corrente do consumidor e os transformadores de corrente; e finalmente, inicia-se o estudo da seletividade, através da análise gráfica, com o ajuste das proteções e suas curvas de atuação, e das curvas de suportabilidade térmica dos transformadores.

### **7.1 FUNÇÕES DA FERRAMENTA**

A ferramenta EPS v1.0 é capaz de auxiliar a elaboração de estudos de proteção e seletividade para instalações elétricas atendidas em 13,8 kV, pela rede primária de distribuição da Copel. Porém, a utilização da ferramenta exige o conhecimento técnico em instalações elétricas prediais e industriais e em sistemas elétricos de potência, bem como as diretrizes das normas da Copel destinadas a estes consumidores.

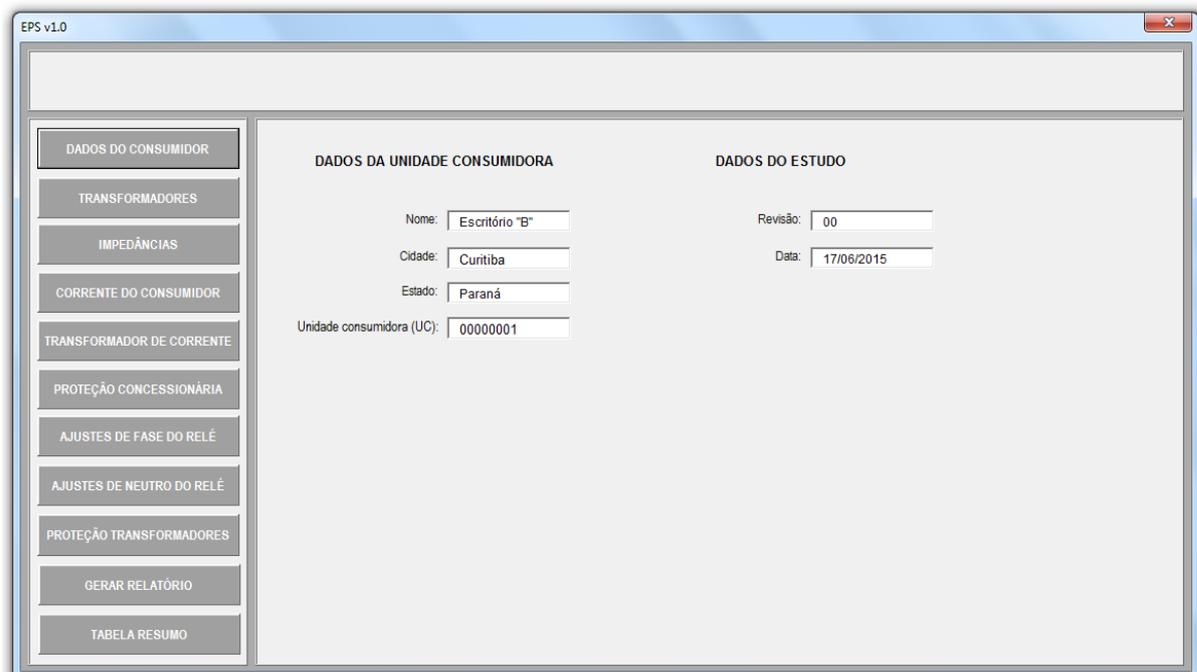
A figura 20 a seguir, apresenta a interface da ferramenta EPS v1.0; ao lado esquerdo da tela, encontram-se os botões, que são dispostos na sequência ideal para elaboração de um estudo de proteção e seletividade utilizando esta ferramenta.



**Figura 20: início da EPS v1.0.**

**Fonte: própria.**

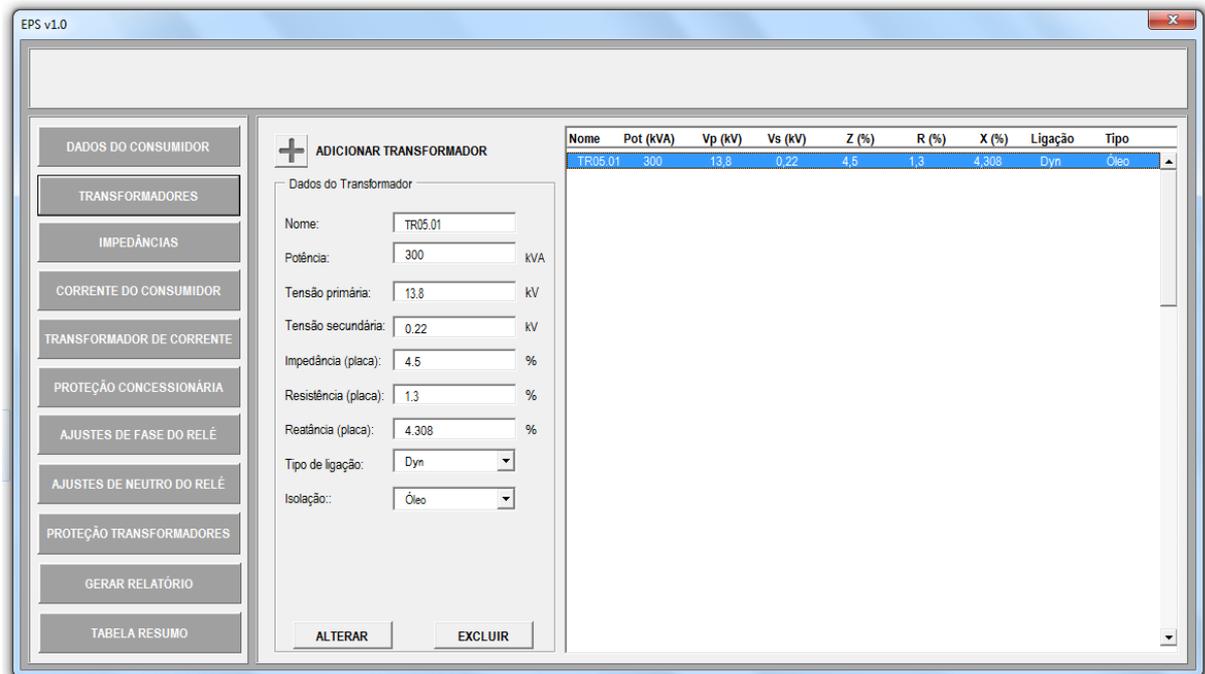
O primeiro passo na elaboração de um estudo de proteção e seletividade com auxílio desta ferramenta é a inserção dos dados da unidade consumidora em questão, conforme apresentado na figura 21 a seguir; estes dados serão utilizados ao final do estudo, para identificar o relatório gerado.



**Figura 21: guia “dados do consumidor”.**

**Fonte: própria.**

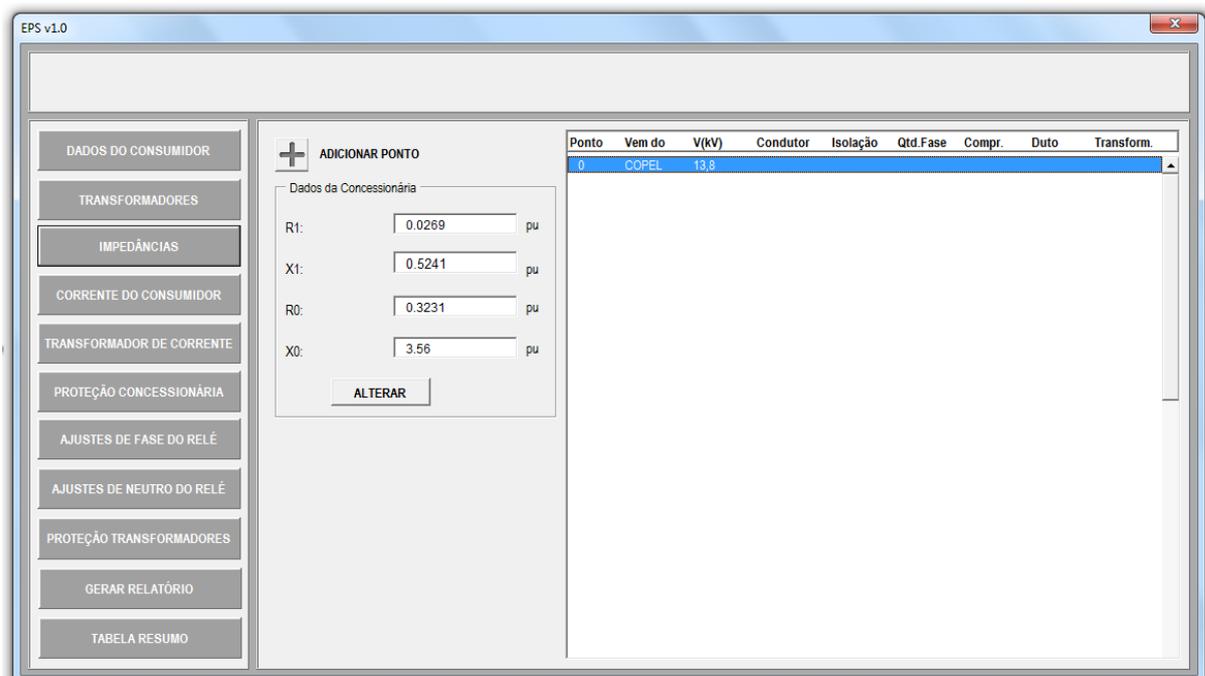
A partir desta guia, deverão ser inseridas as informações do sistema elétrico da instalação, iniciando pelo cadastro dos transformadores de potência, conforme figura 22.



**Figura 22:** guia “transformadores”.

**Fonte:** própria.

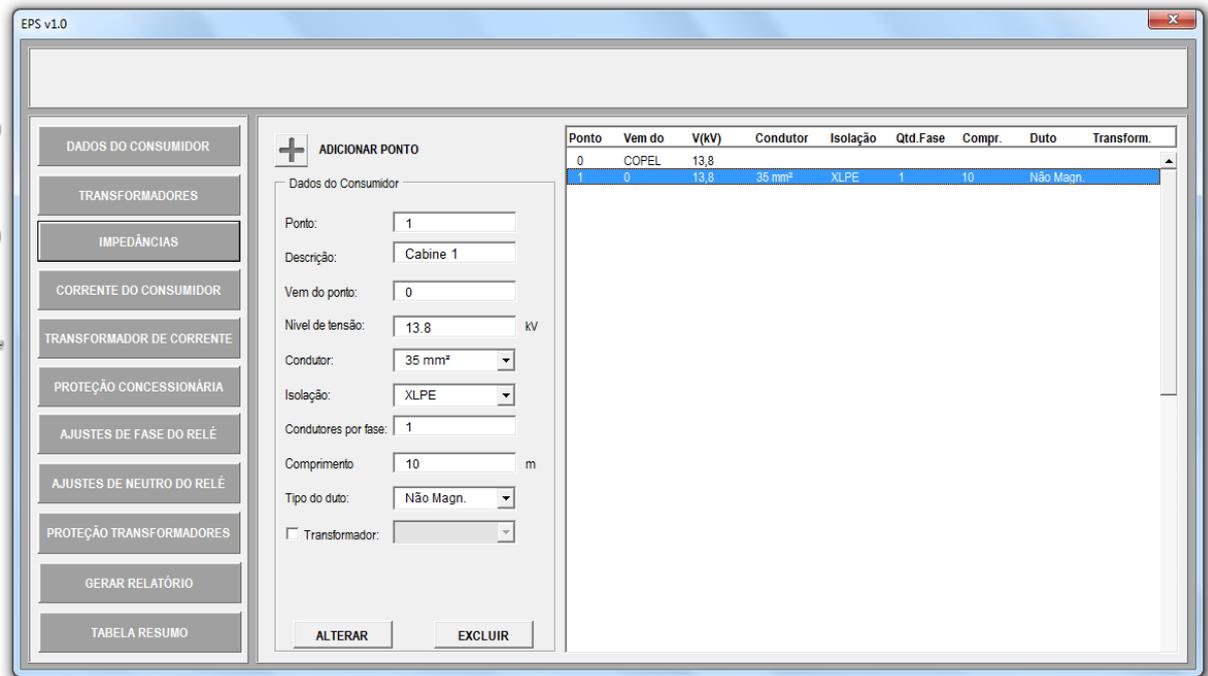
A guia “impedâncias” é responsável pela estruturação do sistema elétrico; será inserido inicialmente o valor de impedância no ponto de entrega, conforme figura 23.



**Figura 23:** guia “impedâncias”, dados da concessionária.

**Fonte:** própria.

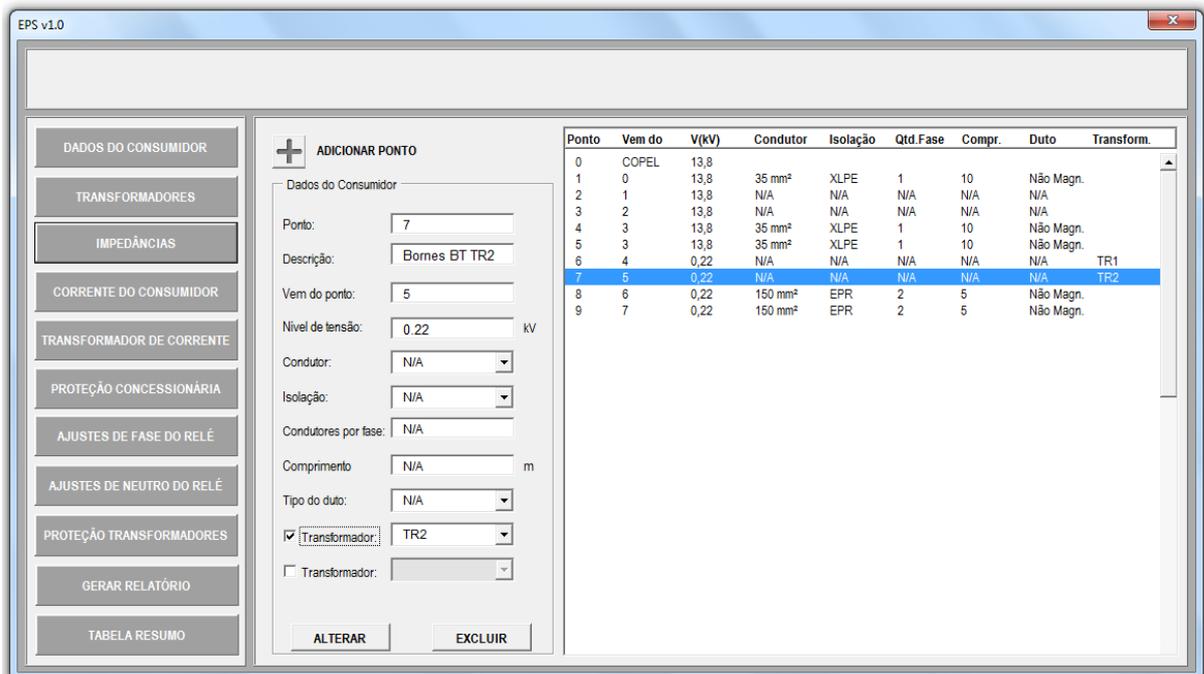
Ainda na guia “impedâncias” serão inseridos os demais componentes do sistema elétrico; para isto, é necessário ter em posse o diagrama unifilar das instalações elétricas, contendo as especificações e comprimento dos condutores elétricos. Cada barramento existente no sistema deverá ser numerado para facilitar a inserção dos pontos, visto que será necessário indicar para cada ponto, o ponto imediatamente a montante deste, a figura 24 a seguir, apresenta o cadastro do ponto “cabine 1”, numerado como “1”, derivado do ponto “0”.



**Figura 24:** guia “impedâncias”, condutores.

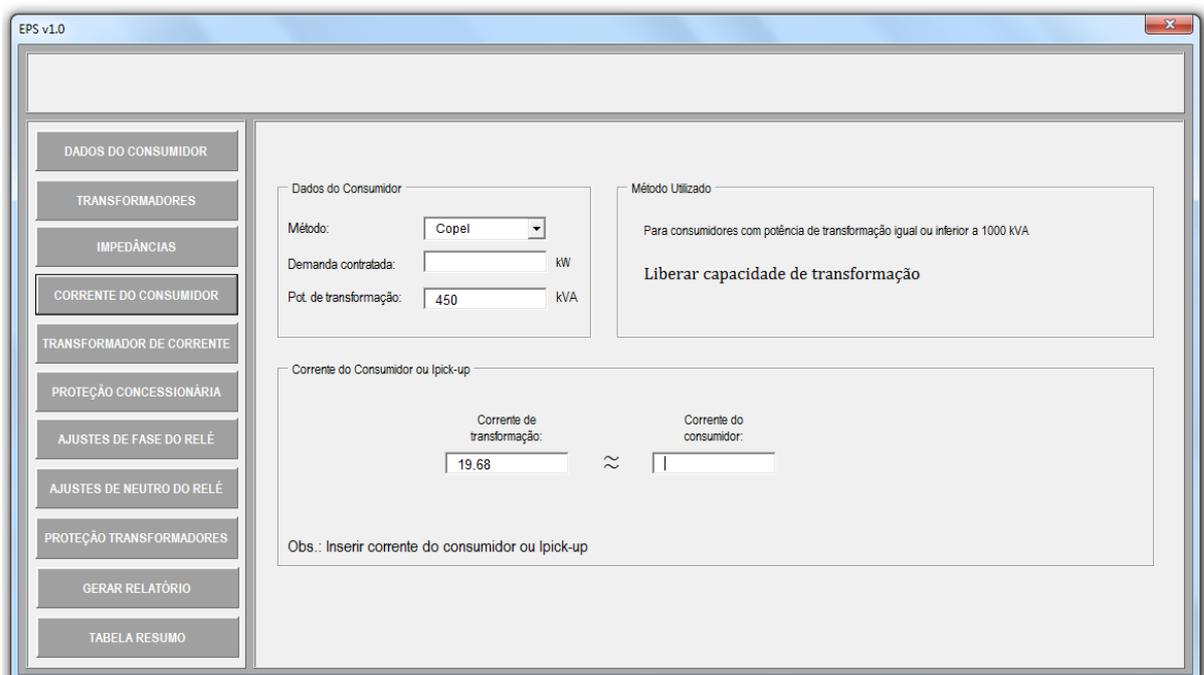
**Fonte:** própria.

Assim como os circuitos elétricos, serão indicadas as localizações dos transformadores de potência no sistema, conforme demonstra a figura 25. É importante ressaltar que esta etapa só deverá ser executada após o cadastro de todos os transformadores na guia anterior.



**Figura 25:** guia “impedâncias”, transformadores.  
**Fonte:** própria.

A seguir, será determinada a “corrente do consumidor” ou corrente de partida do relé de sobrecorrente; deverá ser selecionado o método para o cálculo de acordo com a concessionária a qual se destina o estudo. O valor da corrente do consumidor deverá ser determinado pelo usuário, atendendo as recomendações da EPS v1.0, conforme figura 26.



**Figura 26:** guia “corrente do consumidor”.  
**Fonte:** própria.

Os transformadores de corrente serão dimensionados a partir dos dados do relé utilizado e dos valores calculados de curto-circuito da instalação. O TC indicado pela ferramenta, através do botão “calcular TC” apresenta os requisitos mínimos do aparelho; porém, o usuário da ferramenta possui a opção de alterar suas características conforme sua necessidade. A figura 27 apresenta a guia “transformador de corrente”.

The screenshot shows the 'transformador de corrente' (current transformer) configuration window in the EPS v1.0 software. The window is divided into several sections:

- Left Sidebar:** A vertical list of buttons for navigation: DADOS DO CONSUMIDOR, TRANSFORMADORES, IMPEDÂNCIAS, CORRENTE DO CONSUMIDOR, TRANSFORMADOR DE CORRENTE (highlighted), PROTEÇÃO CONCESSIONÁRIA, AJUSTES DE FASE DO RELÉ, AJUSTES DE NEUTRO DO RELÉ, PROTEÇÃO TRANSFORMADORES, GERAR RELATÓRIO, and TABELA RESUMO.
- Dados da instalação:** A section for entering installation data with the following fields:
  - Relé: URP 7104
  - Condutor TC/relé: 2,5 mm<sup>2</sup>
  - Distância TC/relé: 10 m
  - Corrente nominal do relé: 5 A
  - Exatidão do TC: 10 %
  - A button labeled 'CALCULAR TC' is located below these fields.
- Dados do TC:** A section for entering CT data with the following fields:
  - Corrente no primário: 250 A
  - Corrente no secundário: 5 A
  - Tensão máxima no secundário: 20 V
  - Text below: 'O transformador de corrente 10B20 250/5 A é compatível com a instalação.'
- Novo Relé:** A section for adding a new relay with the following fields:
  - Adicionar relé
  - Relé: [text input]
  - Impedância interna: [text input] Ohm
  - Fabricante: [text input]
- Table:** A table listing relay specifications:
 

Relé	Impedância	Fabricante
MRI1-IE	0,048	SEG
URP 7104	0,008	Pextron

**Figura 27:** guia “transformador de corrente”.

**Fonte:** própria.

Com os dados da subestação responsável pela unidade consumidora, será preenchida a próxima guia, “proteção concessionária”, serão necessários os dados dos ajustes de fase e neutro do religador, e a indicação do maior elo fusível possível para este ponto de entrega. Esta guia inicia a análise gráfica das proteções, conforme apresentado na figura 28.

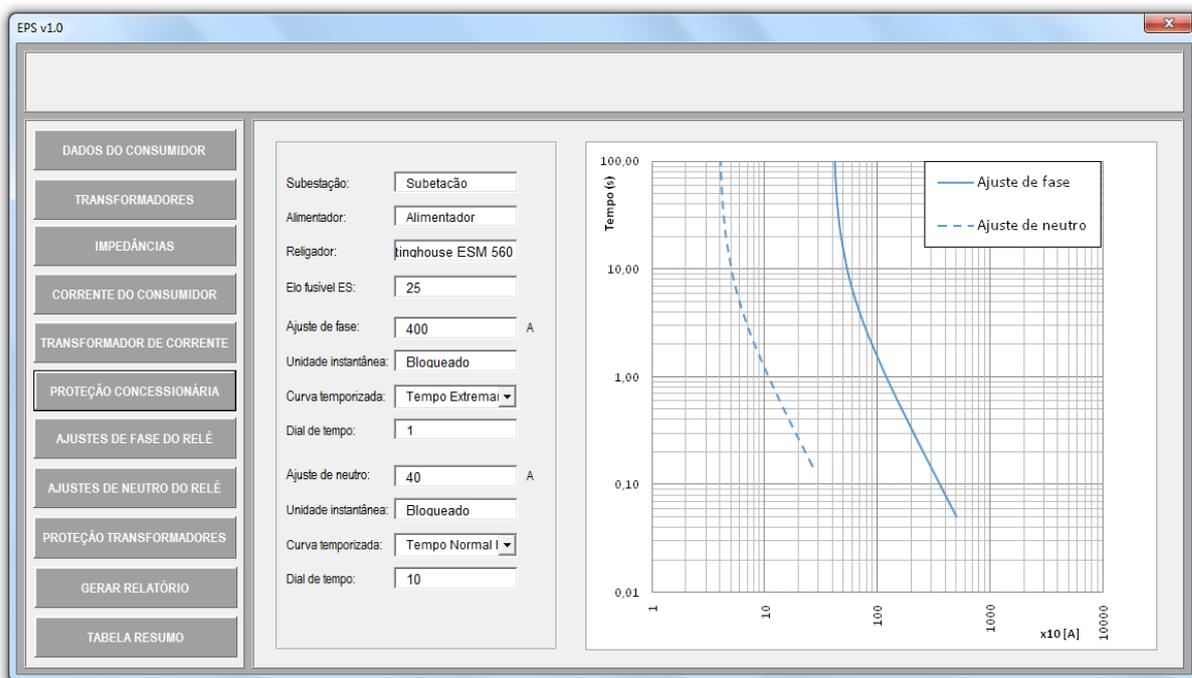


Figura 28: guia “proteção concessionária”.

Fonte: própria.

As guias seguintes, “ajustes de fase do relé”, “ajustes de neutro do relé” e “proteção transformadores”, caracterizam o estudo de seletividade, e deverão ser iniciadas após o preenchimento das anteriores. A primeira análise será sobre as correntes de curto-circuito trifásico, conforme apresentado na figura 29 a seguir.

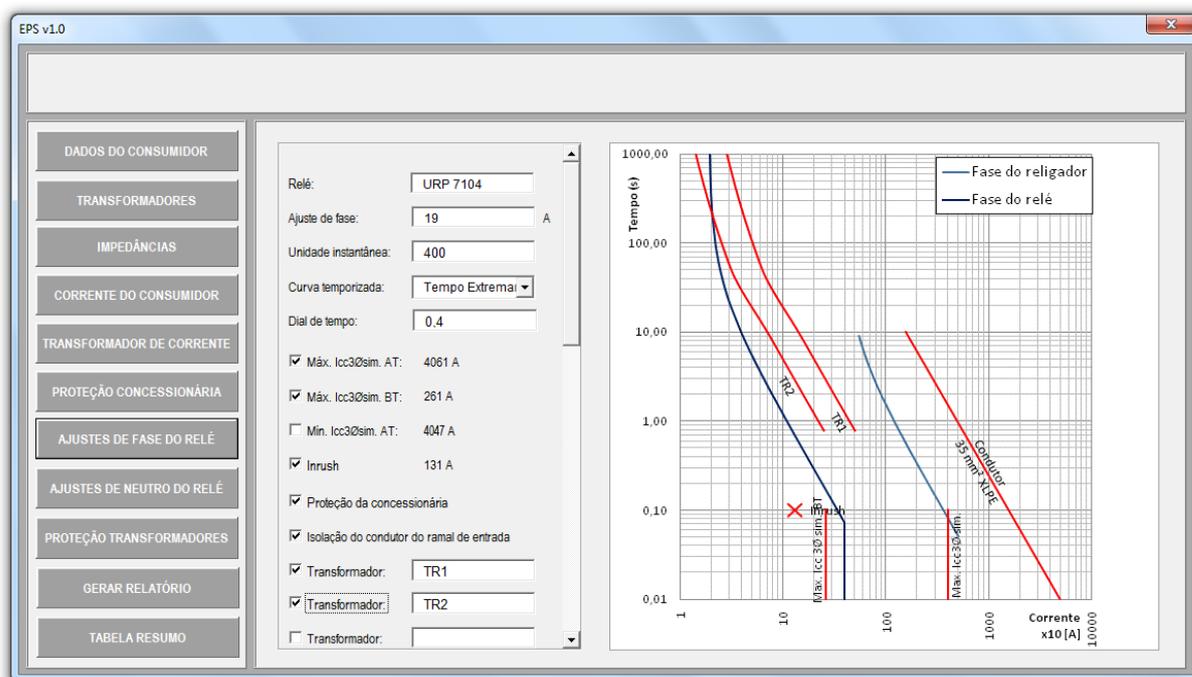
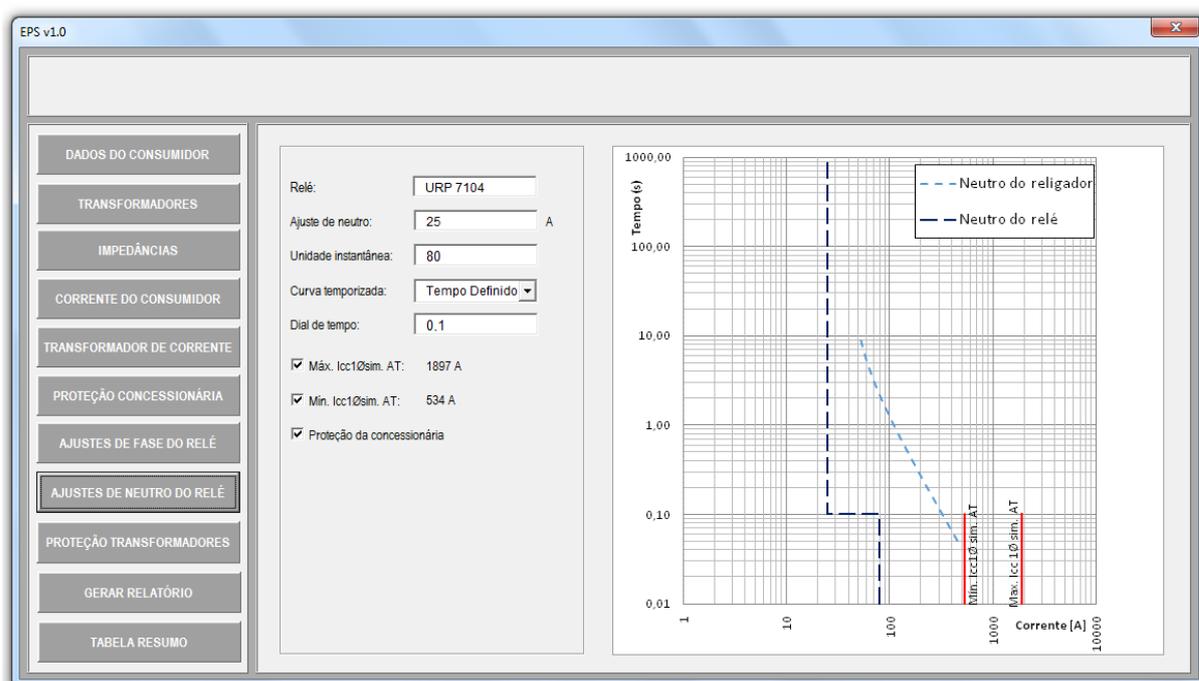


Figura 29: guia “ajustes de fase do relé”.

Fonte: própria.

Na guia “ajustes de fase do relé”, é possível selecionar as informações convenientes à apresentação do estudo na concessionária, como curva de danos dos transformadores ou da isolamento do condutor do ramal de entrada; observa-se que o gráfico configurado será idêntico ao apresentado no relatório final.

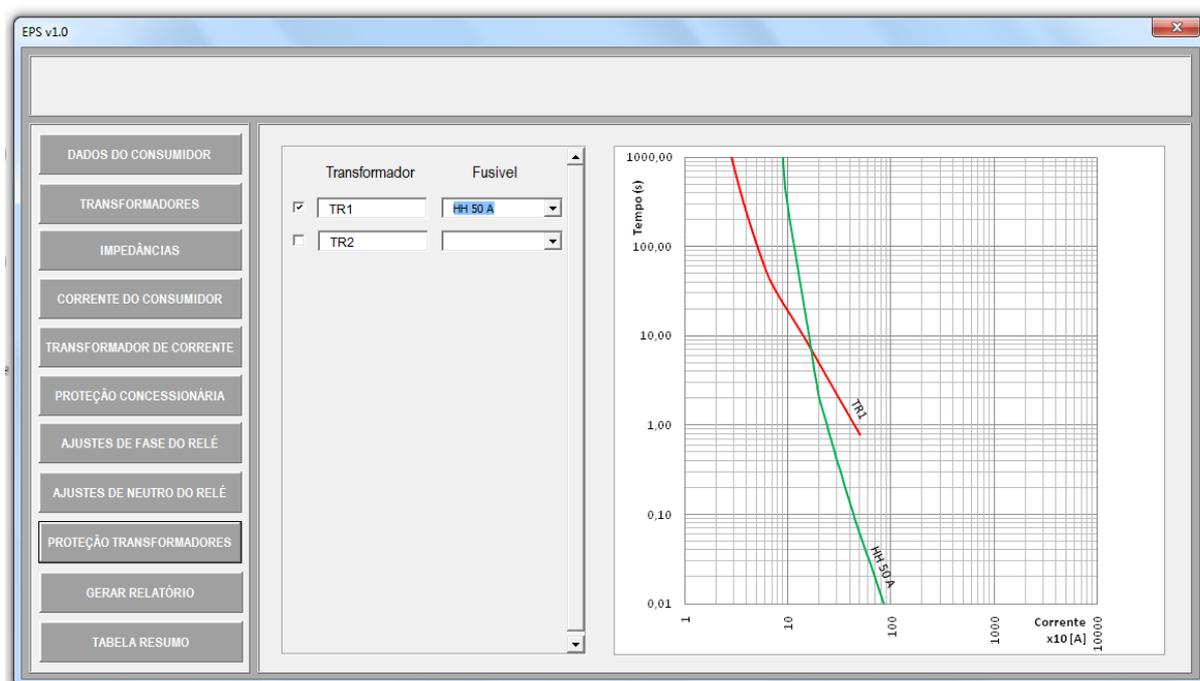
A guia “ajustes de neutro do relé” possui as mesmas condições da anterior; porém, a análise é feita sobre os valores das correntes de curto-circuito monofásico e os ajustes são sobre o relé de sobrecorrente de neutro, conforme é apresentada na figura 30 a seguir.



**Figura 30:** guia “ajustes de neutro do relé”.

**Fonte:** própria.

Finalizando os estudos, encontra-se a guia “proteção dos transformadores” que é necessária apenas nos casos onde os ajustes do relé de sobrecorrente não são capazes de proteger todos os transformadores da instalação; neste caso, a proteção deverá ser feita através de fusíveis de alta capacidade de ruptura ou por elos fusíveis; a figura 31 apresenta esta guia.



**Figura 31:** guia “proteção transformadores”.

**Fonte:** própria.

Os botões “gerar relatório” e “tabela resumo” são responsáveis pela elaboração do relatório final do estudo de proteção e seletividade através dos dados e resultados obtidos através da ferramenta EPS v1.0. As tabelas, textos, e gráficos do relatório gerado, poderão ser totalmente editados de acordo com as necessidades do usuário da ferramenta. É apresentado no apêndice D o resultado final de um estudo elaborado através da ferramenta EPS v1.0.

## 7.2 VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA

São apresentados dois estudos de proteção e seletividade para o mesmo sistema elétrico, o primeiro (anexo F), elaborado através do *software* Power Tools for Windows (PTW) e o segundo (apêndice D) através da ferramenta Estudo de Proteção e Seletividade (EPS v1.0). A unidade consumidora em questão é um prédio utilizado como escritório para a indústria “A”, utilizada como base no estudo feito no item 6 deste trabalho, e será denominado escritório “B”, registro na Copel nº 0000002, situado em Curitiba, Paraná; foram alterados os elementos que possam identificar este consumidor.

Os elementos textuais, componentes dos dois relatórios, não serão comparados, visto que o *software* PTW utilizado no estudo original do escritório “B” não gera o relatório final, apenas fornece o estudo de seletividade através das curvas tempo x corrente e o estudo de

curto-circuito para cada ponto da instalação. Logo, serão analisados os resultados dos cálculos de curto-circuito, corrente de magnetização dos transformadores, corrente do consumidor, especificação dos transformadores de corrente, e ajustes dos relés de sobrecorrente.

### 7.2.1 Dados iniciais

Os dois relatórios foram elaborados a partir das informações contidas no diagrama unifilar do escritório “B” (anexo G) página 125, em que, encontram-se comprimento e seção transversal dos condutores desde o ponto de entrega da concessionária, até os dois painéis de distribuição de baixa tensão da unidade, além de indicar a potência, impedância, resistência e reatância dos transformadores de potência da unidade.

O sistema elétrico do escritório “B” é composto por dois transformadores de potência a óleo, um de 300 kVA e outro de 150 kVA, abrigados em subestação semi-enterrada com cinco módulos, o primeiro, destinado a medição da concessionária, possui transformadores de corrente e de potencial de medição, fornecidos pela Copel, além de chave seccionadora tripolar, tipo bucha de passagem, responsável pelo seccionamento geral da instalação; o “módulo 2” é destinado a proteção geral da unidade consumidora, encontra-se neste módulo, disjuntor de alta tensão e transformadores de corrente e de potencial de proteção; o “módulo 3” possui duas chaves seccionadoras tripolares, uma para cada transformador de potência; no módulo 4 o transformador de 300 kVA e no módulo 5 o de 150 kVA. A partir dos enrolamentos secundários dos transformadores, são alimentados os quadros de baixa tensão, “QP 1” e “QP 2”.

### 7.2.2 Comparação dos cálculos

A comparação entre os dois estudos inicia-se a partir do cálculo da corrente de magnetização dos transformadores, neste caso, existe divergência entre os valores, visto que no estudo original utilizou-se um fator de multiplicação de 12 vezes para o maior transformador da instalação (300 kVA), e a corrente de partida do menor (150 kVA) foi desconsiderada no cálculo, este método não se justifica, tendo em vista que a energização dos dois transformadores dar-se-á ao mesmo tempo; porém, como citado anteriormente, os métodos de cálculos da corrente de magnetização divergem entre concessionárias, bem como é impossível encontrar o valor exato desta corrente; considera-se, portanto, que os dois

valores assumidos, 150,61 A no primeiro, e 131 A no segundo estudo, são compatíveis a instalação e por serem próximos, não causam grandes divergências na sequência do estudo.

O cálculo da corrente do consumidor não é apresentado no relatório proveniente do PTW, porém é indicado com o valor de 18,8 A na tabela resumo apresentada; definiu-se através da ferramenta EPS v1.0, o valor de 19 A para a corrente do consumidor; este valor varia de acordo com critérios do projetista, porém deve estar próximo, mas não superior ao valor da soma das correntes dos transformadores, de 19,68 A, considerando alimentação em 13,2 kV nominal trifásico, e capacidade de transformação do consumidor de 450 kV; desta forma, os valores indicados nos dois estudos atendem as diretrizes da Copel.

As especificações dos transformadores de corrente de proteção dos dois estudos foram idênticas, propondo instalação de TC 10B20 com relação de transformação de 250 / 5 A; ressalta-se que a instalação já possuía TC 10B100 com esta mesma relação de transformação, logo, sendo desnecessária sua substituição.

Eram esperadas pequenas divergências quanto aos valores calculados das correntes de curto-circuito, tendo em vista as diferenças entre os valores de resistência e reatância indutiva especificados para os condutores, nos *softwares* PTW e EPS v1.0; comparando os resultados, nota-se que são mínimas estas divergências, tanto para os valores das correntes de falta trifásicas, quanto para monofásicas; porém, deve-se ressaltar que, o primeiro relatório não apresenta os valores de curto-circuito monofásico mínimo, conforme é solicitado pela Copel no documento “Apresentação do Estudo de Proteção e Seletividade em Entradas de Serviço”, anexo A deste trabalho.

Através destas comparações, conclui-se que a ferramenta EPS é apta a execução dos cálculos necessários para um estudo de proteção e seletividade destinado a unidades consumidoras atendidas pela rede Copel em tensão primária de distribuição 13,8 kV.

### 7.2.3 Comparação dos gráficos

Os gráficos solicitados pela Copel são os de curto-circuito trifásico e curto-circuito monofásico, onde se pode analisar a seletividade entre as proteções da concessionária e as do consumidor. Os ajustes das proteções são determinados de acordo com critérios adotados pelo projetista, preferencialmente seguindo algumas orientações da concessionária.

Na comparação entre os dois estudos podem-se verificar algumas divergências quanto aos critérios utilizados na determinação dos ajustes do relé de sobrecorrente, principalmente nos ajustes de neutro.

As curvas de fase do relé são similares nos dois estudos, visto que permitem a magnetização dos transformadores, não atuam instantaneamente para curtos-circuitos a jusante do enrolamento secundário do transformador e coordenam com a proteção da concessionária.

A Copel adverte que a curva de neutro do relé não necessita de coordenação com as proteções a jusante; logo, o ajuste poderá ser o menor possível para este relé, porém indica que este ajuste não deve ser inferior a 10 % da corrente nominal do enrolamento primário dos transformadores de corrente, e este requisito não é atendido no primeiro estudo, visto que o ajuste temporizado de neutro está em 10 A e a corrente nominal do TC é 250 A; desta forma, no estudo realizado com a EPS v1.0, foi definido ajuste temporizado de neutro em 25 A.

As comparações indicam que a ferramenta EPS v1.0 são capazes de fornecer corretamente as curvas das proteções, danos nos transformadores e condutores; porém, ressalta-se a importância da ciência por parte do projetista, quanto as normas da concessionária à qual destina-se o estudo de proteção e seletividade.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo de proteção e seletividade torna-se necessário desde a elaboração de novos projetos de instalações elétricas de médio e grande porte (potência de transformação superior a 300 kVA), à atualização dos mesmos perante a concessionária de energia elétrica, bem como é útil em ampliações do sistema elétrico existente, visto que alguns aparelhos de proteção são dimensionados levando em conta os níveis das correntes de curto-circuito; por exemplo, disjuntores de baixa tensão.

Embora a elaboração deste estudo necessite em grande parte de conhecimentos relacionados a cálculos de curto-circuito, correntes de magnetização e das recomendações da concessionária pela qual se deseja aprovar o estudo, existe a possibilidade de que dois estudos para a mesma unidade consumidora sejam parcialmente diferentes; isto ocorre devido às diversas considerações e premissas adotadas durante seu processo de elaboração, como a determinação da corrente de magnetização dos transformadores ou a indicação da impedância dos condutores, que diferem entre cada fabricante. Isto evidencia que, além dos conhecimentos teóricos em proteção de sistemas elétricos, é necessária a prática e a experiência por parte do profissional atuante nesta área, o que adiciona confiabilidade ao sistema de proteção.

Em contrapartida, em instalações industriais ou comerciais de grande porte, acaba se tornando indispensável à utilização de ferramentas computacionais para a elaboração dos estudos de proteção e seletividade; no entanto, pode ser onerosa a aquisição de um *software* destinado a análises complexas em sistemas elétricos. A ferramenta “Estudo de Proteção e Seletividade” (EPS v1.0), fruto deste trabalho, vem suprir a necessidade quando o estudo trata de consumidores atendidos pela Copel em tensão primária de distribuição 13,8 kV.

Através da comparação do relatório gerado pela EPS v1.0 com relatórios já aprovados pela Copel, conclui-se que os ajustes do relé de sobrecorrente, propostos pela ferramenta, são adequados as exigências da concessionária, bem como as informações fornecidas através da análise do sistema elétrico, são eficientes caso o objetivo do estudo seja conhecer as características das correntes elétricas na ocorrência de diversos fenômenos a jusante da entrada de energia.

## 9 REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, **NBR 6856** – Transformador de Corrente. Rio de Janeiro, 1992.

ALMEIDA, Marcos A. D. de, **Proteção de Sistemas Elétricos**. Natal, 2000, 133f Apostila.

AMON F°, Jorge, **Equipamentos elétricos – especificação e aplicação em subestações de alta tensão**. Rio de Janeiro: Furnas, 1985.

CARDOSO, Ghendy Jr. **Proteção de sistemas de distribuição de energia elétrica: notas de aula**. Rio Grande do Sul, 2009.

PEREIRA, Clever S. Filho. Notas de aula no curso de especialização de Proteção de SEP. Curso promovido pela UFMG. Belo Horizonte.

CUNHA, Lívia. Radiografia – Poder de Manobra. **O Setor Elétrico**. Ed. 50, mar. 2010. Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/web/a-revista/revista-eletronica/book/7-marco2010/3-2010.html>. Acesso em 06 de fev. 2015.

DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ELETRICIDADE DE POÇOS DE CALDAS, **NT 07 05 008** – Metodologia de Proteção e Análise de Impacto no Sistema Elétrico. 2014.

FICAP, **Cabos Fibep Média Tensão**. Disponível em: < [http://www.eleetrotrafo.com/eleetrotrafo/upload/downloads/1347352394fibep\\_bf.pdf](http://www.eleetrotrafo.com/eleetrotrafo/upload/downloads/1347352394fibep_bf.pdf) Acesso em: 06 de fev. 2015. 14:06.

GONÇALVES, Luiz Fernando. Notas de aula no curso de engenharia elétrica. Curso promovido pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Porto Alegre, 2012.

GORA, Anton Jr. **Fusíveis**. Curitiba, 2002. Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/piazza/materiais/AntonJunior.pdf> Acessado em 05 fev. 2015, 17:00.

INEBRASA, **Fusíveis**. Disponível em: < <http://inebrasa.com.br/> Acesso em: 06 de fev. 2015. 13:56.

INTERNATIONAL ENGINEERING CONSORTIUM, **IEC 60909** – Short-circuit currents in three-phase a.c. systems. Suíça, 2001

INSTITUTE OF ELECTRIC AND ELECTRONIC Engineers, **IEEE C37.2** – Standard Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms and Contact Designations. 2008.

\_\_\_\_\_, **IEEE C37.90** – Standard for Relays and Relay Systems Associated with Electric Power Apparatus. 2006.

\_\_\_\_\_, **IEEE C37.112** – Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays. 1996.

- \_\_\_\_\_, **IEEE C57.109** – Transformer Through-Fault-Current Duration. 1983.
- \_\_\_\_\_, **IEEE C57.12.59** – Dry-Type Transformer Through-Fault Current Duration. 2002.
- \_\_\_\_\_, **IEEE Std-551** – Recommended Practice for Calculating AC Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems. 2006.
- IPEM – Instituto de Pesos e Medidas, **SI** – Sistema Internacional de Unidades, 1960.
- KINDERMANN, Geraldo. **Curto – Circuito**. 2.ed. SAGRA LUZZATO, 1997
- MARDEGAN, Cláudio. **Proteção e seletividade em sistemas elétricos industriais**. 1. ed. São Paulo: Atitude Editorial Ltda, 2012.
- MARDEGAN, Cláudio. Proteção e seletividade. **O Setor Elétrico**. Edição 64, 2011.
- TEM – Ministério do Trabalho e Emprego, **NR-10** – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade. ed 2004.
- NEXANS. **Alumínio Condutores Nus**. Catálogo. Rio de Janeiro, 2013.
- NISKIER, Julio; MACINTYRE, Archibald Joseph. **Instalações elétricas**. 4.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 550p. ISBN 85-216-1250-8
- NOGUEIRA, Daniel da Silva; ALVES, Diego Prandino. **Trasformadores de potencia – teoria e aplicação. Tópicos especiais**. 2009. 212f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2009.
- NORMA TÉCNICA COPEL, **NTC 810032** – Elo Fusível de Distribuição. Curitiba, 2009.
- \_\_\_\_\_, **NTC 811215** – Disjuntor Tripolar – 15 kV – 600 A PVO - Instalação Interna. Curitiba, 2014.
- \_\_\_\_\_, **NTC 811216** – Disjuntor Tripolar à Vácuo 15 kV - 600 A - Motorizado. Curitiba, 2010.
- \_\_\_\_\_, **NTC 900100** – Projetos de Entrada de Serviço – Critérios de Apresentação. Curitiba, 2011.
- \_\_\_\_\_, **NTC 901110** – Atendimento a Edificações de Uso Coletivo. Curitiba 2011.
- \_\_\_\_\_, **NTC 903100** – Fornecimento em Tensão Primária de Distribuição. Curitiba, 2013.
- PEXTRON, **Manual de Operação URPE 7104T** Ver. 8.20 Rev. 01. São Paulo, 2011.
- SCHNEIDER ELECTRIC, **Curso Básico de Proteção de Sistemas Elétricos**. Filosofia da Proteção de Sistemas Elétricos. Jurubatuba, 2013.

SIEMENS, **Transformador de Corrente**: catálogo. 2015. Disponível em: <  
<http://w3.siemens.com.br/automation/br/pt/dispositivos-baixa-tensao/transformadores/transformadores-de-corrente/pages/transformador-de-corrente.aspx>  
Acesso em: 06 de fev. 2015.

STEVENSON Jr., William D. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. 1.ed. São Paulo: McGRAW-HILL DO BRASIL LTDA, 1978.

## ANEXO A – Apresentação do estudo de proteção e seletividade em entradas de serviço

1. Apresentação do estudo de proteção e seletividade em entradas de serviço
  - 1.1 Sistema de distribuição 13,8 kV
    1. Diagrama unifilar de impedâncias com a indicação de cada ponto considerado no estudo de proteção;
    2. Impedâncias dos componentes do sistema a serem apresentadas:
 

Transformadores:

      - Informar Z, tipo de ligação, a potência e tensão de cada enrolamento;

Rede de distribuição interna superior a 100 m :

      - Informar distância;
      - Tipo de cabo;
      - Impedâncias
    3. Cálculo da  $I_{cc3\phi}$  simétrica no ponto de instalação dos TCs;
    4. Cálculo da  $I_{cc1\phi}$  simétrica no ponto de instalação dos TCs;
    5. Cálculo da  $I_{cc1\phi}$  mínima simétrica na rede interna de alta tensão adotando no mínimo a resistência de falta  $3xR_f = 21+j0$  pu para tensão base 13,8 kV;
    6. Cálculo do maior valor de  $I_{cc3\phi}$  simétrica na baixa tensão com referência ao primário;
    7. Cálculo mínimo da corrente de magnetização (Inrush) total dos transformadores:
      - Considerar  $8xI_N$  para transformador único;
      - Para mais de um transformador utilizar  $8xI_N$  para o maior transformador e  $4xI_N$  para os demais.
    - 10 O transformador de corrente especificado deve atender aos seguintes critérios:
      - A corrente nominal primária ser maior que a corrente de carga;
      - Não saturar com a maior  $I_{cc}$  trifásica simétrica considerando a carga máxima no secundário do TC;
      - O fator de sobrecorrente (FS) igual a 20.
    - 11 Ficha de resumo dos ajustes conforme modelo anexo;
    - 12 Apresentar esquema trifilar de ligação dos relés e circuito de abertura do disjuntor;
    - 13 Enviar catálogo dos relés (quando solicitado);
    - 14 Enviar as curvas tempo x corrente utilizadas, sendo:
      - Curto-circuito trifásico: em folha A4, contendo as curvas (identificadas por cores distintas) de fase e de neutro do relé e do religador, fusíveis, curva de dano dos transformadores, Inrush e correntes de curto-circuito em linha vertical cortando as curvas dos equipamentos.
    - 15 A Alimentação do relé e do circuito de disparo do disjuntor deverá ser através de fontes capacitivas distintas. É vedada a utilização de “No Break”.

Nota: O TP auxiliar poderá ser instalado antes ou após a chave seccionadora AT. Quando instalado após a chave seccionadora deverá ser utilizado exclusivamente para a finalidade de proteção com quadro exclusivo. Quando o TP auxiliar for utilizado simultaneamente para alimentação do sistema de proteção e serviços auxiliares deverão existir circuitos distintos para a proteção e serviços auxiliares.

## ANEXO B – Critérios de ajustes do sistema de proteção

### 1. Critérios de ajustes do sistema de proteção

#### 1.1. Sistema de distribuição 13,8 kV

1. Unidade temporizada de fase:
  - Até 1000 kVA liberar a potência em transformação;
  - Maior que 1000 kVA considerar 1,3 x demanda contratada com fator de 0,92, desde que:
    - $1000 \text{ kVA} \leq I_{\text{ajuste}} \leq \text{Pot. Total em transformação}$ .
    - **Alerta:** no ajuste considerar o escalonamento da demanda
2. Unidade instantânea de fase:
  - $I_{\text{ajuste inst. Fase}} > I_{\text{inrush total e}}$ ;
  - $I_{\text{ajuste inst. Fase}} > \text{Maior } I_{\text{cc}3\phi} \text{ simétrico na BT}$ .
3. Curva temporizada de fase:
  - A curva escolhida deve proporcionar um tempo máximo de 0,3 s para o maior valor da  $I_{\text{cc}3\phi}$  simétrico na baixa tensão;
  - No caso de um único transformador adotar a menor curva, desde que fique liberado o  $I_{\text{inrush}}$ .
4. Unidade temporizada de neutro:
  - Recomendamos adotar 20% do ajuste da unidade temporizada de fase, desde que esteja abaixo do valor de ajuste de neutro do religador e;
  - Preferencialmente não efetuar ajuste inferior a 10% da corrente nominal do TC, garantindo a precisão do TC.
5. Unidade instantânea do neutro:
  - Preferencialmente adotar 20% do ajuste da unidade instantânea de fase, sendo  $I_{\text{ajuste inst.}} < I_{\text{cc}1\phi} \text{ mínima simétrica no primário}$ ;
6. Curva temporizada de neutro:
  - Adotar a menor curva disponível no rele, pois não há necessidade de coordenar com outra proteção no secundário.
7. Quando o ajuste do relé secundário não proteger o transformador (curva de dano), este deverá ser protegidos através da instalação de fusíveis;
8. Os ajustes adotados devem coordenar com a proteção a montante da Copel.

## ANEXO C – Elos fusíveis de distribuição

NTC PADRÃO	CODIGO COPEL	DESCRIÇÃO	CARACTERÍSTICAS PADRONIZADAS			
			FORMA CONSTRUTIVA	TIPO	CORRENTE NOMINAL(A)	GRUPO DA CORRENTE NOMINAL
813884	813884-2	ELO FUSÍVEL DE DISTRIBUIÇÃO	OLHAL	H	0,5	-
813885	817821-6				1	-
813810	734914-9				0,5	-
813811	301700-1		BOTÃO		1	-
813812	301701-0				2	-
813813	301702-8				3	-
813814	301703-6			5	-	
813815	301704-4			6	A	
813816	301705-2		BOTÃO	K	8	B
813817	301706-0				10	A
813818	734915-7				12	B
813819	301707-9				15	A
813820	301715-0				20	B
813821	301708-7				25	A
813822	301716-8				30	B
813823	301709-5				40	A
813824	301710-9				50	B
813825	301711-7				65	A
813826	734916-5				80	B
813827	734896-7				100	A
813828	734897-5				140	A
813829	734898-3		200	A		

## ANEXO D – Valores limites de correntes de fusão para elos fusíveis tipo “H” e tipo “K”

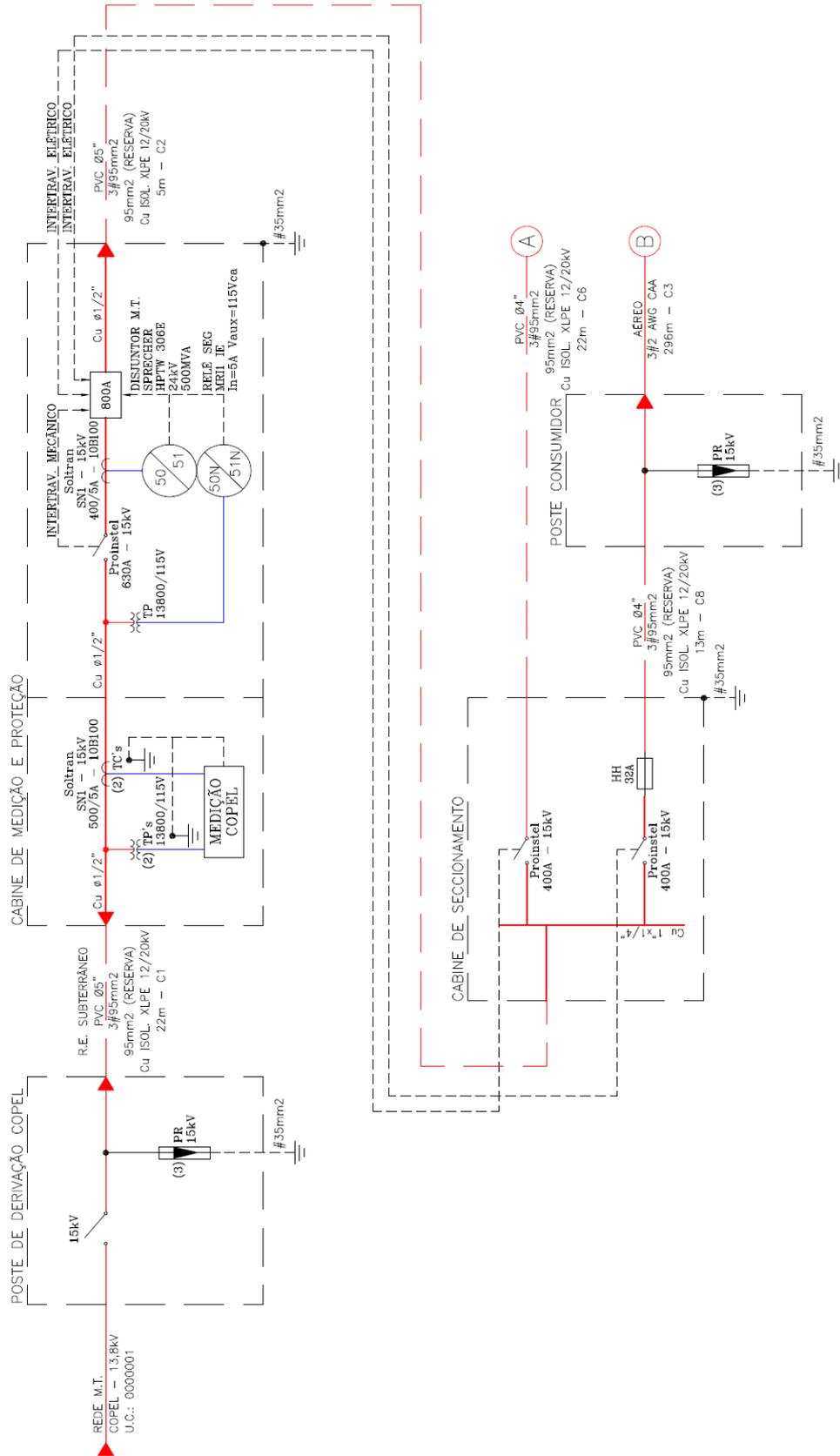
## Tipo “H”

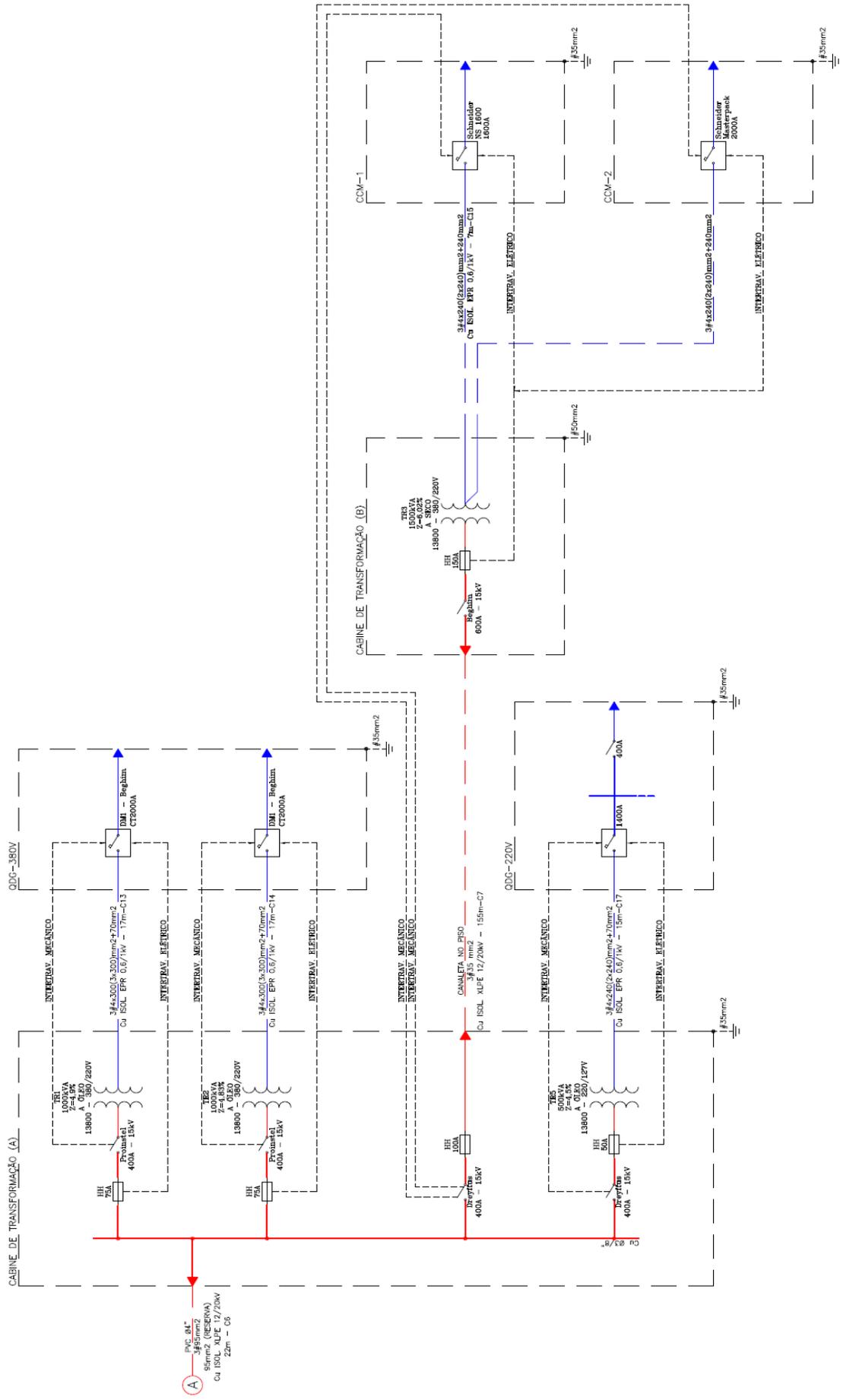
CORRENTE NOMINAL (A)	CORRENTE DE FUSÃO (A)					
	300 s		10 s		0,1 s	
	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO
0,5	1,6	2,3	4,0	5,2	40	55
1	2,5	3,3	6,8	8,6	53	80
2	3,5	4,3	9,2	12,0	89	130
3	4,7	5,9	11,3	14,5	89	130
5	7,4	9,2	15,3	18,5	89	130

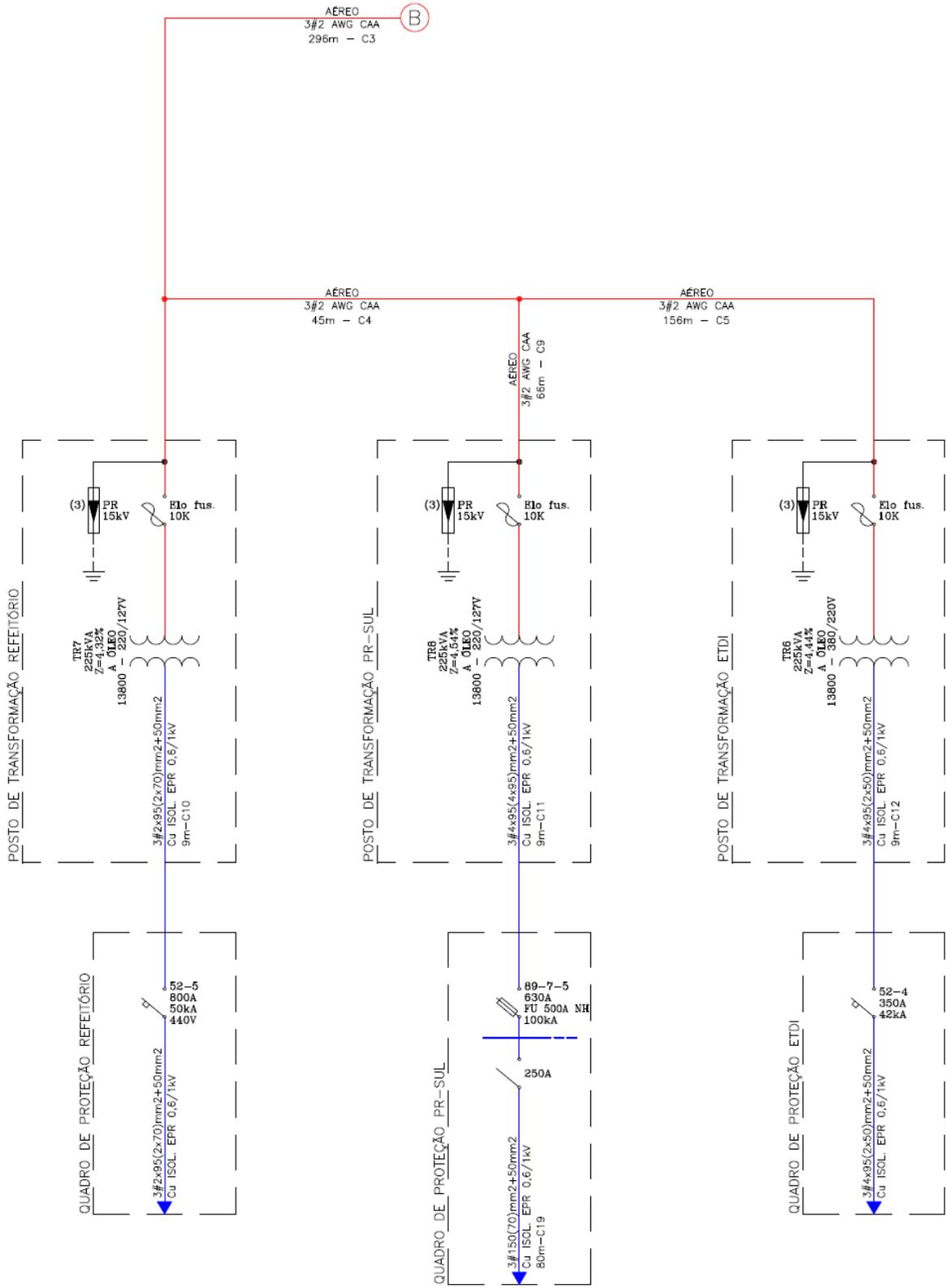
## Tipo “K”

GRUPO	CORRENTE NOMINAL (A)	CORRENTE DE FUSÃO (A)						RELAÇÃO DE RAPIDEZ
		300 ou 600 s (*)		10 s		0,1 s		
		MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO	
A	6	12,0	14,4	13,5	20,5	72	86,4	6,0
	10	19,5	23,4	22,5	34,0	128	154,0	6,6
	15	31,0	37,2	37,0	55,0	215	258,0	6,9
	25	50,0	60,0	60,0	90,0	350	420,0	7,0
	40	80,0	96,0	98,0	146,0	565	680,0	7,1
	65	128,0	153,0	159,0	237,0	918	1100,0	7,2
	100	200,0	240,0	258,0	388,0	1520	1820,0	7,6
	140	310,0	372,0	430,0	650,0	2470	2970,0	8,0
B	200	480,0	576,0	760,0	1150,0	3880	4656,0	8,1
	8	15,0	18,0	18,0	27,0	97,0	116,4	6,5
	12	25,0	30,0	29,5	44,0	166,0	199,4	6,6
	20	39,0	47,0	48,0	71,0	273,0	328,0	7,0
	30	63,0	76,0	77,5	115,0	447,0	546,0	7,1
	50	101,0	121,0	126,0	188,0	719,0	862,0	7,1
1	80	160,0	192,0	205,0	307,0	1180,0	1420,0	7,4
	2	3	4	5	6	7	8	9

ANEXO E – Diagrama unifilar da indústria “A”







## ANEXO F – Estudo de proteção e seletividade escritório “B” – PTW

**Cálculo de Curto Circuito e Estudo de Seletividade****Escritório "B"****Curitiba - PR**

Revisão	Elaboração	Data	Verificação	Data	Aprovação	Data	Observações
0							

## Introdução

### Objetivo:

O presente Estudo visa apresentar os níveis de curto-circuito e os parâmetros a serem utilizados nos relés de proteção a serem instalados

### Software Utilizado:

Para a realização deste estudo foi utilizado o software PTW32 versão 6.5.1.0 desenvolvido pela SKM System Analysis Inc. módulos DAPPER para o cálculo de curto circuito e CAPTOR para o estudo de seletividade.

### Informações Apresetadas neste Estudo:

Tendo em vista a utilização deste software, o presente estudo não apresentará análises matemáticas tais como fórmulas para o cálculo de impedâncias equivalentes, porém todos os valores estarão devidamente expostos nas tabelas do estudo, bem como apresentado no diagrama unifilar junto ao seu respectivo componente.

O presente Estudo será composto por:

- 1 - Impedâncias dos Componentes do Sistema em PU
- 2 - Impedâncias Equivalentes para cada ponto e seus respectivos níveis de Curto
- 3 - Corrente de Magnetização (Inrush) do sistema
- 4 - Dimensionamento do TC de Proteção de Entrada
- 5 - Diagrama Unifilar apresentando as impedâncias equivalentes, níveis de curto e ajustes de Proteção de cada componente.
- 6 - Coordenogramas de Proteção
- 7 - Filosofia de Proteção - Ajuste dos Relés Direcionais - Geradores
- 8 - RESUMO COM OS DADOS DE PROTEÇÃO (PADRÃO COPEL - INSTALAÇÃO COM GERADORES)

## 1 - Impedâncias dos Componentes do Sistema em PU

### Bases

Pot Base	100MVA
Tensão Base	13.8kV

### Concessionária

	Rpos (pu)	Xpos (pu)	Rzero (pu)	Xzero (pu)
Rede Copel	0.1278	1.0223	0.5651	4.5207

### Cabos

	Cabos/Fase	Bitola (mm <sup>2</sup> )	Distância (m)	Rpos (pu)	Xpos (pu)	Rzero (pu)	Xzero (pu)
CB01	1	35	10.0	0.0035	0.0009	0.0111	0.0021
CB04.02	1	35	10.0	0.0035	0.0009	0.0111	0.0021
CB04.01	1	35	10.0	0.0035	0.0009	0.0111	0.0021
CB08.01	2	150	5.0	0.8409	0.5114	1.3368	1.3011
CB07.01	2	150	5.0	0.8409	0.5114	1.3368	1.3011

### Transformadores

	Pot. Nom. (kVA)	Tensão Prim. (V)	Tensão Sec. (V)	Z% (%)	Rpos (pu)	Xpos (pu)	Rzero (pu)	Xzero (pu)
TR06.01 - TR2	150.0	13800	220	3.5000	9.1113	21.4807	9.1113	21.4807
TR05.01 - TR1	300.0	13800	220	4.5000	4.3333	14.3603	4.3333	14.3603

## 2 - Impedâncias Equivalentes e Níveis de Curto-Circuito em Cada Ponto

### Impedâncias de Sequência Positiva e Curtos Circuitos Trifásicos Simétricos e Assimétricos

Barramento	Tensão	Zequ. pos. - (pu)	Icc 3F sim. - (A)	X/R -	Icc 3F assim. - (A)
B01.01 - Ponto de Entrega	13800	1.0302	4061.10	2.58	4401.57
B02 - Cabine 1 - Medição	13800	1.0323	4052.91	2.56	4385.98
B03 - Cabine 2 - Proteção	13800	1.0323	4052.86	2.56	4385.91
B04 - Cabine 3 - Seccionamento	13800	1.0323	4052.81	2.56	4385.85
B05 - Cabine 4 - Transformação	13800	1.0344	4044.62	2.53	4370.42
B05.01 - Sec. Trafo TR1	220	16.0310	16370.31	3.25	18589.74
B06 - Cabine 5 - Transformação	13800	1.0344	4044.62	2.53	4370.42
B06.01 - Sec. Trafo TR2	220	24.3672	10769.88	2.36	11500.58
B07 - QP1	220	16.7797	15639.86	2.85	17280.05
B08 - QP2	220	25.1723	10425.43	2.22	11024.60

### Impedâncias de Sequência Zero e Curtos Circuitos Fase-Terra

Barramento	Bus/Dev Volts	Zequ. zero. - (pu)	Icc F-T - (A)
B01.01 - Ponto de Entrega	13800	4.5801	1896.70
B02 - Cabine 1 - Medição	13800	4.5843	1894.37
B03 - Cabine 2 - Proteção	13800	4.5843	1894.36
B04 - Cabine 3 - Seccionamento	13800	4.5843	1894.34
B05 - Cabine 4 - Transformação	13800	4.5886	1892.00
B05.01 - Sec. Trafo TR1	220	14.9999	16729.01
B06 - Cabine 5 - Transformação	13800	4.5886	1892.00
B06.01 - Sec. Trafo TR2	220	23.3331	10924.42
B07 - QP1	220	16.6563	15678.47
B08 - QP2	220	25.0634	10440.54

## 3 - Corrente de Magnetização dos Transformadores

### Transformadores

	Pot = (kVA)	Inom prim (A)	Contribuição
TR06.01 - TR2	150	6,28	
TR05.01 - TR1	300	12,55	x12

Imag =	150,61 A
--------	----------

## 4 - Dimensionamento dos TCs

### 4.1 - Análise do Pior Caso - TC de Entrada

TC Escolhido: 250/5

#### 4.1.1 - Análise da Corrente Nominal

Corrente Nominal do Sistema 18,83 A

Corrente Demandada 16,37 A

Corrente Primária do TC 250 A

Corrente Secundária do TC 5 A

Análise: O TC de proteção neste caso poderá operar com um erro superior a 10% em virtude de estar fora da faixa de corrente do primário, porém, tendo em vista que a corrente de curto-circuito calculada é superior a 4kA, isso não oferecerá problemas quanto a proteção.

#### 4.1.2 - Análise da Saturação

Corrente de Curto-Circuito: 4061,00 A

Análise:

Considerando-se que o TC utilizado 10B100 saturaria para uma tensão de 100V no secundário, e levando em consideração que o Burden dos relés no máximo a 6 VA temos que:

$$I_{cc3\phi sim.m\acute{a}x} \text{ no s\acute{e}c do TC: } 4061/50=81.22A$$

Saturação do TC:

$$20 \times I_n \times Z_{burden} =$$

$$20 \times 5A \times 1 \text{ ohm} = 100 \text{ V}$$

Até aqui concluímos que o TC saturaria em 20 vezes a corrente nominal caso tivéssemos uma carga de 1 ohm

Considerando agora os valores

Burden dos Relés + Cabos = 6 VA

$$Z_{burden} = 6VA / I_n^2$$

$$Z_{burden} = 6 / 25 = 0,24 \text{ ohm}$$

Tensão no Secundário do TC

$$81.22A \times 0,24 \text{ ohm} = 19.49V$$

Logo concluímos que o TC não irá saturar para uma corrente de curto circuito assimétrica de 4061A

## FILOSOFIA DE PROTEÇÃO

### 1. Introdução:

O presente descritivo trata sobre a metodologia aplicada para definição dos parâmetros de proteção do sistema da indústria a ser implantada.

### 2. Descritivo do Funcionamento do Sistema:

O gerador não funcionará em paralelo (nem momentâneo) com a concessionária.

### 3. Coordenação da Proteção do Sistema:

Conforme as curvas de proteção apresentadas, as proteções de sobrecorrente (50, 51 e 67) deverão atuar de maneira a proteger a instalação e evitando que em caso de faltas que venham a ocorrer no interior da planta venham a acionar as proteções contra sobrecorrente da concessionária (Religador e/ou chaves fusível.). Da mesma maneira deverão funcionar as funções contra sobrecorrente de neutro (50N, 51N e Religador)

### 4. Ajustes das Proteções:

#### 4.1. Sobrecorrente Temporizado – Função 51

Esta proteção de sobrecorrente foi ajustada para atuar de forma temporizada para valores de corrente superiores a ajustada.  
 Existe a coordenação com o relé de sobrecorrente temporizado da concessionária, a fim de garantir que o relé do consumidor atue em caso de uma falta no interior de suas instalações isolando a Indústria do sistema da concessionária.  
 Observa-se também uma coordenação com o relé de sobrecorrente reversa (função 67), a fim de garantir que o mesmo atue antes do relé de sobrecorrente temporizado (função 51) para o caso de sobrecorrentes com fluxo no sentido consumidor – concessionária, evitando também durante o paralelismo os geradores contribuam com um eventual curto-circuito na linha.

#### 4.2. Sobrecorrente Instantâneo – Função 50

Esta proteção de sobrecorrente foi ajustada para atuar de forma instantânea para valores de corrente superiores a ajustada.  
 Levando-se em conta que a corrente de magnetização do sistema é inferior ao valor ajustado, notamos que não haverá atuação indevida da proteção no momento da ligação do sistema.

#### 4.3. Sobrecorrente Temporizado de Neutro – Função 51N

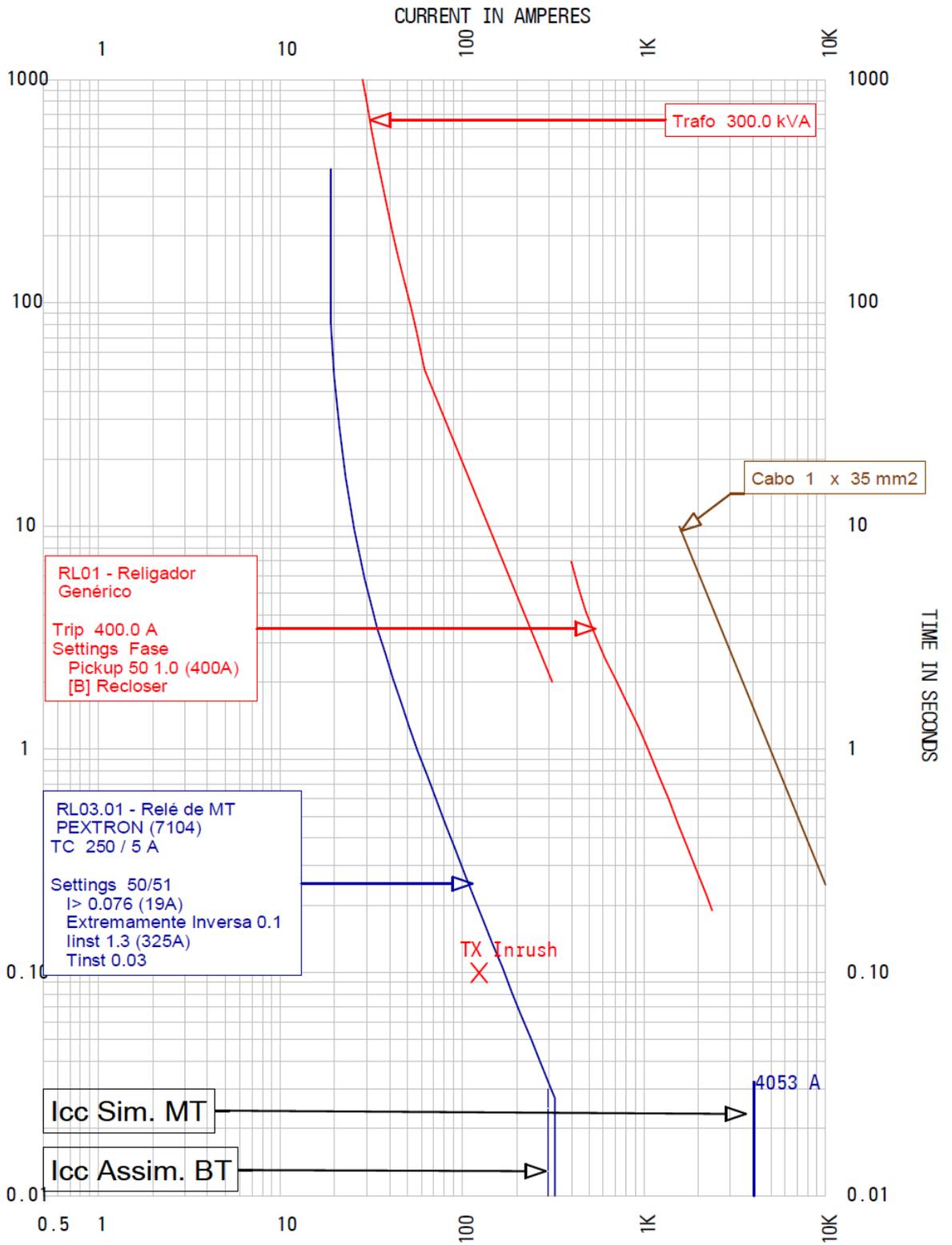
Esta proteção de sobrecorrente foi ajustada para atuar de forma temporizada para valores de corrente de neutro superiores a ajustada, corrente esta que é correspondente a aproximadamente 20% da escolhida para o ajuste da função 51.  
 Este valor foi escolhido a fim de atuar em caso de sobrecorrente fase-terra, tendo em vista que a corrente de curto circuito fase-terra mínima calculada do sistema é superior a ajustada.

Existe a coordenação com o relé de sobrecorrente temporizado de neutro da concessionária, a fim de garantir que o relé do consumidor atue em caso de uma falta no interior de suas instalações isolando a Indústria do sistema da concessionária.

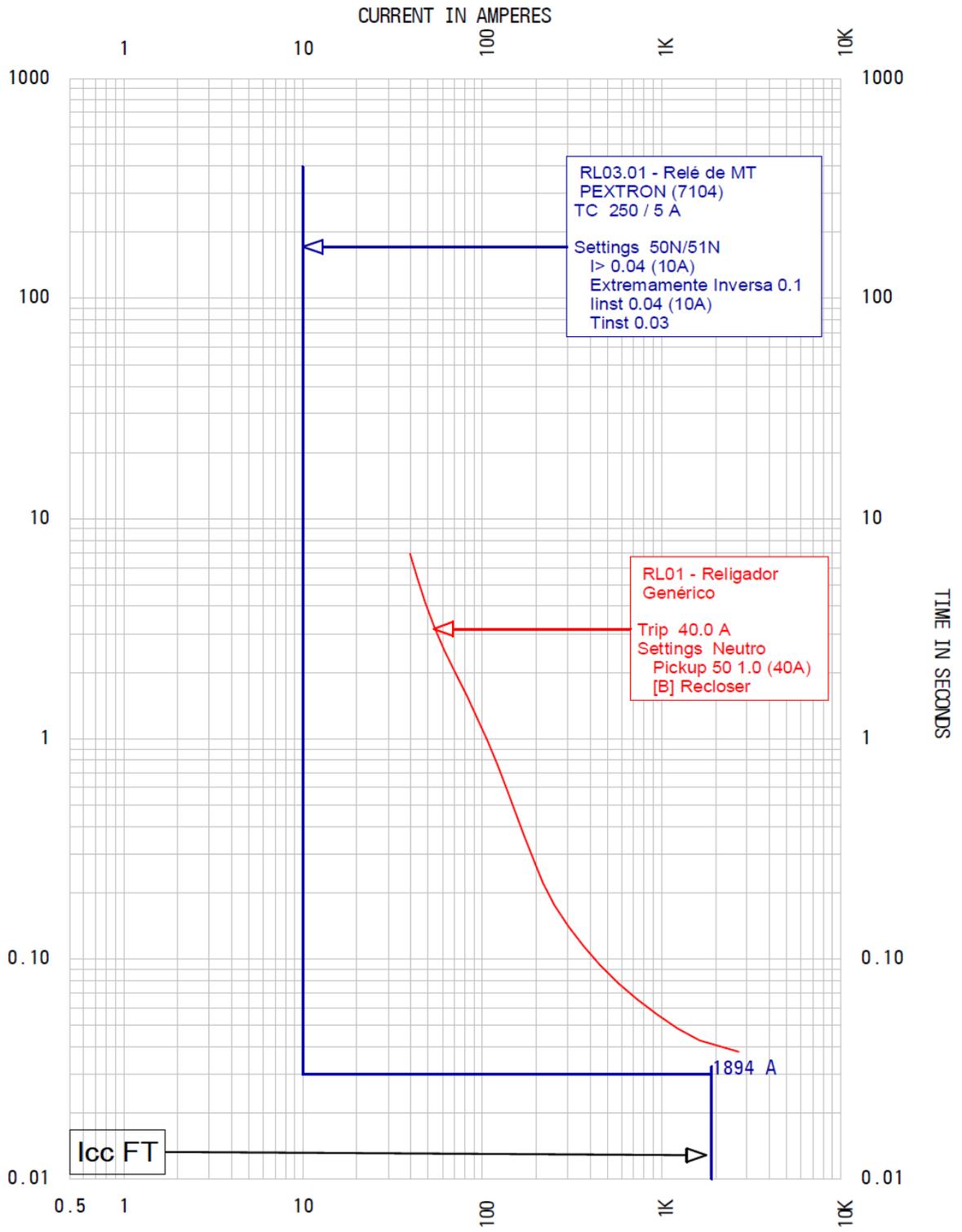
#### 4.4. Sobrecorrente Instantâneo de Neutro – Função 50N

Esta proteção de sobrecorrente foi ajustada para atuar de forma instantânea para valores de corrente de neutro superiores ao ajustado, corrente esta que é correspondente a 20% da escolhida para o ajuste da função 50. Este valor foi escolhido a fim de atuar em caso de sobrecorrente fase-terra.  
 Este relé de sobrecorrente instantâneo de neutro garante que o disjuntor do consumidor atue em caso de uma falta no interior de suas instalações isolando a Indústria do sistema da concessionária.

01-Entrada - Fase - Ref. Voltage Base Project 13800



01-Entrada - Neutro - Ref. Voltage Base Project 13800



**RESUMO COM DADOS DO ESTUDO DE PROTEÇÃO**

CONSUMIDOR:		Escritório "B"											
Ponto	Transf. (kVA)	Vbase= 13800 V					Vbase= 13800 V						
		Icc30sim,	Icc30assim,	Icc10sim, Copel	Icc10sim, Cliente	Icc10min, Copel	Icc30sim,	Icc30assim,	Icc10sim,	Icc10assim,	Tensão Sec		
B01 - SE Copel		4061.00	5615.17	1897.00	1897.00								
B01.01 - Ponto de Entrega		2728.38	3063.27	1455.47	1455.47								
B02 - Cabine 1 - Medição		2724.98	3055.09	1454.11	1454.11								
B03 - Cabine 2 - Proteção		2724.96	3055.06	1454.10	1454.10								
B04 - Cabine 3 - Seccionamento		2724.94	3055.02	1454.09	1454.09								
B05 - Cabine 4 - Transformação		2721.54	3046.91	1452.73	1452.73								
B05.01 - Sec. Trato TR1	300										263.0 A	261.1 A	15869.64
B06 - Cabine 5 - Transformação		2721.54	3046.91	1452.73	1452.73								
B06.01 - Sec. Trato TR2	150										168.3 A	171.8 A	10564.11
B07 - OP1											242.1 A	245.0 A	15184.25
B08 - OP2											163.0 A	164.3 A	10224.07

Inominal: 18,8 A  
 Imagnetização: 150,6 A

I demanda Contratada: 16,4 A  
 kW - Demanda Contratada: 360,0 kW

**RESUMO DOS AJUSTES - RELE MÉDIA TENSÃO**

**FUNÇÃO 50/51 50N/51N**

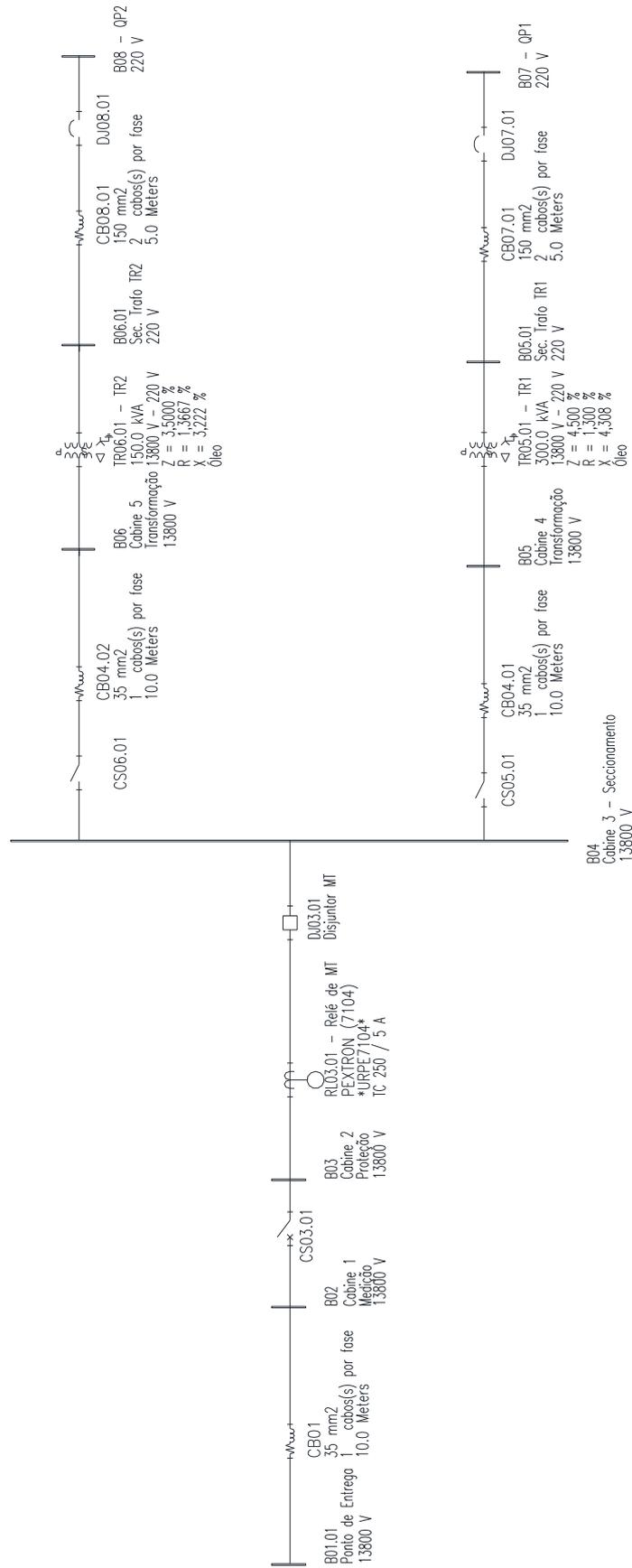
50 50 e 50N/51N	Temp. de Fase b	Ajuste e Tipo de Curva Temp. de Fase	Tempo Defín, Fase b->	Tempo Defín, [s] Fase b->	Instant, Fase b->>	Tempo Instant, Fase	Temp. de Neutro Ito->	Ajuste e Tipo de Curva Temp. de Neutro Ito->	Tempo Defín, Neutro Ito->>	Tempo Defín, [s] Fase b->	Instantâneo Neutro Ito->>	Tempo Instant, Neutro
Valores em Ampères	25,00 A	0,1 EI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ajustes no Relé	0,10	0,1 EI	-	-	1,26	Não	0,05	0,1 EI	-	-	62,50	Não

RTC

RELE

250/5  
 Pextron LRIP 7104

ANEXO G – Diagrama unifilar escritório “B”



## APÊNCIDE A – Detalhes dos cálculos de impedância do Condutor C1

Impedâncias Condutor C1 – 3#95 mm<sup>2</sup> - Isolação 12 / 20 kV – 22 m

$$V_{base} = 13800 [V]$$

$$Z_{base} = 1,9044 [\Omega]$$

$$R_{1C1} = 0,246860 [\Omega/\text{km}]$$

$$X_{1C1} = 0,146650 [\Omega/\text{km}]$$

$$Z_{1C1} = 0,022 \cdot (0,246860 + j 0,146650) = (0,00543092 + j 0,00322630) [\Omega]$$

$$Z_{1C1} = \frac{(0,00543092 + j 0,00322630)}{1,9044} [pu]$$

$$Z_{1C1} = (0,00285177 + j 0,00169413) [pu]$$

$$R_{0C1} = 1,5898 \cdot R_1 [\Omega/\text{km}]$$

$$R_{0C1} = 0,392458 [\Omega/\text{km}]$$

$$X_{0C1} = 2,5442 \cdot X_1 [\Omega/\text{km}]$$

$$X_{0C1} = 0,373107 [\Omega/\text{km}]$$

$$Z_{0C1} = 0,022 \cdot (0,392458 + j 0,373107) = (0,00863408 + j 0,00820835) [\Omega]$$

$$Z_{0C1} = \frac{0,00863408 + j 0,00820835}{1,9044} [pu]$$

$$Z_{0C1} = (0,00453376 + j 0,00431020) [pu]$$

## APÊNCIDE B – Detalhes dos cálculos de impedância do Condutor C3

Impedâncias Condutor C3 – 3#2AWG - 296 m

$$V_{base} = 13800 [V]$$

$$Z_{base} = 1,9044 [\Omega]$$

$$f = 60 [Hz]$$

$$GMD = \sqrt[3]{1 + 1 + 2} = 1,414214 [m]$$

$$GMR = 0,001270 [km]$$

$$\rho = 28,264 [\Omega \cdot km]$$

$$R_{1C3} = 1,0503 [\Omega/km]$$

$$X_{1C3} = 0,502895 [\Omega/km]$$

$$Z_{1C3} = 0,296 \cdot (1,050300 + j 0,502895) = (0,31088880 + j 0,14885692) [\Omega]$$

$$Z_{1C3} = \frac{0,31088880 + j 0,14885692}{1,9044} [pu]$$

$$Z_{1C3} = (0,17133666 + j 0,08964973) [pu]$$

$$R_{0C3} = 0,002961 \cdot 60 + R_1 [\Omega/km]$$

$$R_{0C3} = 1,227960 [\Omega/km]$$

$$X_{aC3} = 0,002894 \cdot 60 \cdot \log\left(\frac{0,304}{0,001270}\right) [\Omega/km]$$

$$X_{eC3} = 0,004341 \cdot 60 \cdot \log\left(\frac{4665600 \cdot 28,264}{60}\right) [\Omega/km]$$

$$X_{dC3} = 0,002894 \cdot 60 \cdot \log\left(\frac{1,414214}{0,304}\right) [\Omega/km]$$

$$X_{0C3} = X_a + X_e - 2 \cdot X_d [\Omega/km]$$

$$X_{0C3} = 1,833078 [\Omega/km]$$

$$Z_{0C3} = 0,296 \cdot (1,227960 + j 1,833078) = (0,36347616 + j 0,54259105) [\Omega]$$

$$Z_{0C3} = \frac{0,36347616 + j 0,54259105}{1,9044} [pu]$$

$$Z_{0C3} = (0,19086125 + j 0,28494434) [pu]$$

## APÊNCIDE C – Detalhes dos cálculos das correntes de curto-circuito no Ponto 0

Ponto 0 - COPEL

$$V_{base} = 13800 [V]$$

$$S_{base} = 0,246860 [\Omega/\text{km}]$$

$$I_{base} = 4183,698 [A]$$

$$R_{1COPEL [pu]} = 0,100070 [pu]$$

$$X_{1COPEL [pu]} = 0,662760 [pu]$$

$$Z_{1COPEL [pu]} = (0,100070 + j 0,662760) [pu]$$

$$R_{0COPEL [pu]} = 0,496350 [pu]$$

$$X_{0COPEL [pu]} = 3,979200 [pu]$$

$$Z_{0COPEL [pu]} = (0,496350 + j 3,979200) [pu]$$

Cálculo da corrente de curto-circuito trifásico simétrica:

$$I_{cc\ 3\phi\ sim.\ COPEL [pu]} = \frac{V_{[pu]}}{Z_{1COPEL [pu]}}$$

$$I_{cc\ 3\phi\ sim.\ COPEL} = I_{cc\ 3\phi\ COPEL [pu]} \cdot I_{base} [A]$$

$$I_{cc\ 3\phi\ sim.\ COPEL} = \frac{I_{base}}{Z_{1COPEL [pu]}} [A]$$

$$I_{cc\ 3\phi\ sim.\ COPEL} = \frac{4183,698}{(0,100070 + j 0,662760)} [A]$$

$$I_{cc\ 3\phi\ sim.\ COPEL} = 6242 [-81,4^\circ] [A]$$

Cálculo da corrente de curto-circuito bifásico simétrica:

$$I_{cc\ 2\phi\ sim.\ COPEL} = \frac{\sqrt{3}V_F}{\sum Z_1 + \sum Z_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{cc\ 3\phi\ COPEL} [A]$$

$$I_{cc\ 2\phi\ sim.\ COPEL} = \frac{\sqrt{3}V_F}{\sum Z_1 + \sum Z_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{cc\ 3\phi\ COPEL} [A]$$

$$I_{cc\ 2\phi\ sim.\ COPEL} = 5406 [-171,4^\circ] [A]$$

Cálculo da corrente de curto-circuito monofásico simétrica:

$$I_{cc\ 1\emptyset\ sim.\ COPEL\ [pu]} = \frac{3 \cdot V_{[pu]}}{Z_{1COPEL\ [pu]} + Z_{2COPEL\ [pu]} + Z_{0COPEL\ [pu]}} [pu]$$

$$I_{cc\ 1\emptyset\ sim.\ COPEL} = I_{cc\ 1\emptyset\ COPEL\ [pu]} \cdot I_{base} [A]$$

$$I_{cc\ 1\emptyset\ sim.\ COPEL} = \frac{3 \cdot I_{base}}{Z_{1COPEL\ [pu]} + Z_{2COPEL\ [pu]} + Z_{0COPEL\ [pu]}} [pu]$$

$$I_{cc\ 1\emptyset\ sim.\ COPEL} = \frac{3 \cdot 4183,698}{2 \cdot (0,100070 + j\ 0,662760) + (0,496350 + j\ 3,979200)} [pu]$$

$$I_{cc\ 1\emptyset\ sim.\ COPEL} = 2346 [-82,5^\circ] [A]$$

Cálculo da corrente curto-circuito monofásico simétrica mínima:

$$I_{cc\ 1\emptyset\ sim.\ mín.\ COPEL} = \frac{3 \cdot I_{base}}{Z_{1COPEL\ [pu]} + Z_{2COPEL\ [pu]} + Z_{0COPEL\ [pu]} + 3 \cdot R_f} [pu]$$

$$I_{cc\ 1\emptyset\ sim.\ mín.\ COPEL} = \frac{3 \cdot 4183,698}{2 \cdot (0,10007 + j\ 0,66276) + (0,49635 + j\ 3,9792) + 21} [pu]$$

$$I_{cc\ 1\emptyset\ sim.\ COPEL} = 562 [-13,7^\circ] [A]$$

Cálculo do fator de assimetria para correntes de curto-circuito trifásico e bifásico assimétricas:

$$F_{assimetria-RMS} = \sqrt{1 + 2 \cdot e^{-\frac{2\pi}{\left(\frac{X}{R}\right)}}$$

$$F_{assimetria-RMS} = \sqrt{1 + 2 \cdot e^{-\frac{2\pi}{\left(\frac{X_1}{R_1}\right)}}$$

$$F_{assimetria-RMS} = \sqrt{1 + 2 \cdot e^{-\frac{2\pi}{\left(\frac{0,662760}{0,100070}\right)}}$$

$$F_{assimetria-RMS} = \sqrt{1 + 2 \cdot e^{-\frac{2\pi}{\left(\frac{0,662760}{0,100070}\right)}}$$

$$F_{assimetria-RMS} = 1,333100$$

$$I_{cc\ 3\emptyset\ ass.\ COPEL} = I_{cc\ 3\emptyset\ sim.\ COPEL} \cdot F_{assimetria-RMS} [A]$$

$$I_{cc\ 3\emptyset\ ass.\ COPEL} = 8315 [A]$$

$$I_{cc\ 2\emptyset\ ass.\ COPEL} = I_{cc\ 2\emptyset\ sim.\ COPEL} \cdot F_{assimetria-RMS} [A]$$

$$I_{cc\ 2\phi\ ass.\ COPEL} = 7201 [A]$$

Cálculo do fator de assimetria para correntes de curto-circuito monofásico assimétricas:

$$F_{assimetria-RMS} = \sqrt{1 + 2 \cdot e^{-\frac{2\pi}{\left(\frac{X}{R}\right)}}$$

$$F_{assimetria-RMS} = \sqrt{1 + 2 \cdot e^{-\frac{2\pi}{\left(\frac{X_1+X_2+X_0}{R_1+R_2+R_0}\right)}}$$

$$F_{assimetria-RMS} = 1,369856$$

$$I_{cc\ 1\phi\ ass.\ COPEL} = I_{cc\ 1\phi\ sim.\ COPEL} \cdot F_{assimetria-RMS} [A]$$

$$I_{cc\ 3\phi\ ass.\ COPEL} = 3214 [A]$$

Cálculo do fator de assimetria para correntes de curto-circuito monofásico assimétricas mínimas:

$$F_{assimetria-RMS} = \sqrt{1 + 2 \cdot e^{-\frac{2\pi}{\left(\frac{X}{R}\right)}}$$

$$F_{assimetria-RMS} = \sqrt{1 + 2 \cdot e^{-\frac{2\pi}{\left(\frac{X_1+X_2+X_0+3 \cdot R_f}{R_1+R_2+R_0}\right)}}$$

$$F_{assimetria-RMS} = 1,0$$

$$I_{cc\ 1\phi\ ass.\ COPEL} = I_{cc\ 1\phi\ sim.\ COPEL} \cdot F_{assimetria-RMS} [A]$$

$$I_{cc\ 3\phi\ ass.\ mín.\ COPEL} = 562 [A]$$

APÊNCIDE D – Estudo de proteção e seletividade escritório “B” – EPS

**Escritório "B"**  
**Curitiba - Paraná**

**ESTUDO DE PROTEÇÃO E SELETIVIDADE**  
Rev.: 00

<b>Data</b>	<b>Revisão</b>	<b>Observações</b>
17/06/2015	00	Emissão inicial

## ESTUDO DE PROTEÇÃO E SELETIVIDADE

### 1 INTRODUÇÃO

O presente estudo foi elaborado em 17/06/2015 visando calcular a amplitude das correntes de curto-circuito e apresentar uma proposta de ajustes do relé de proteção geral da entrada de energia do sistema elétrico do consumidor Escritório "B" (UC: 00000002) em Curitiba, Paraná.

### 2 CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO

#### 2.1 DADOS DO SISTEMA ELÉTRICO

- Impedâncias em pu do sistema elétrico no ponto de entrega, fornecidas pela Copel, com tensão base 13,8 kV e potência base 100 MVA:

$$Z_1 = 0,37264 + j 0,96043 \text{ pu}$$

$$Z_0 = 0,86223 + j 4,49824 \text{ pu}$$

$$3 R_t = 21 \text{ pu}$$

- Ajustes das proteções da Copel:

Subestação:	Subestação
Alimentador:	Alimentador
Religador:	Westinghouse ESM 560
<b>Fases:</b>	
Ajuste de fase:	400 A
Unidade instantânea:	Bloqueado
Curva temporizada:	Tempo Extremamente Inverso
Dial de tempo:	1
<b>Neutro:</b>	
Ajuste de neutro:	40 A
Unidade instantânea:	Bloqueado
Curva temporizada:	Tempo Normal Inverso
Dial de tempo:	10

Tabela 1: ajustes das proteções da Copel.

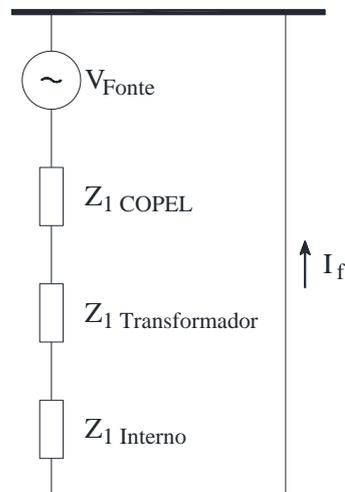
- Impedâncias percentuais dos transformadores, fornecidas pelos fabricantes, na tensão base 13,8 kV:

Transformador TR1, 220 V, 300 kVA:  $|Z| = 4,5 \%$ ,  $Z = (1,3000 + j 4,3080) \%$ .

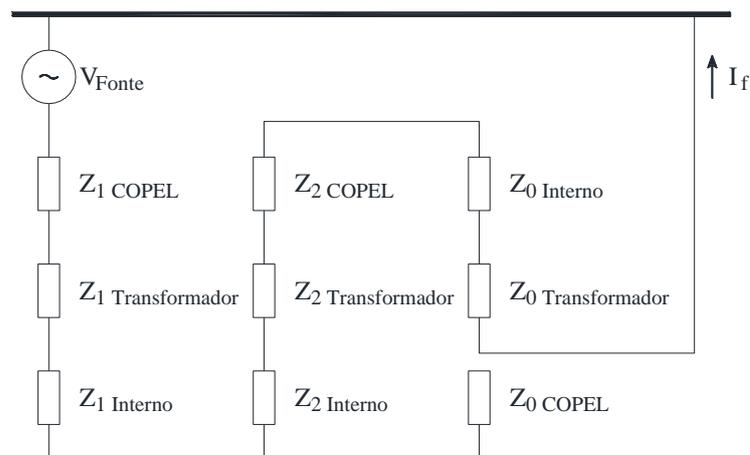
Transformador TR2, 220 V, 150 kVA:  $|Z| = 3,5 \%$ ,  $Z = (1,3667 + j 3,2220) \%$ .

## 2.2 DIAGRAMAS DE IMPEDÂNCIAS E FORMULAS UTILIZADAS

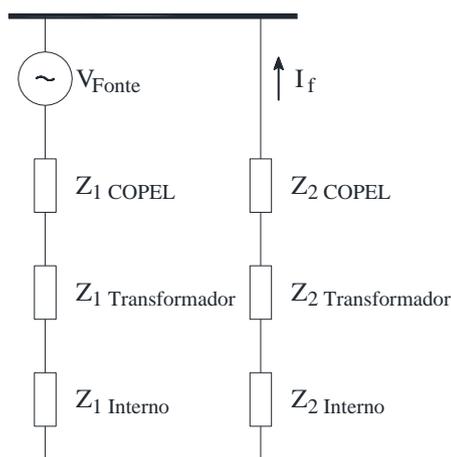
- Diagramas de impedâncias para os cálculos de curto-circuito trifásicos, bifásicos e monofásicos:



**Figura 1: diagrama típico de sequência positiva para cálculo da corrente de curto-circuito trifásico.**



**Figura 2: diagrama típico de sequência positiva, negativa e zero para cálculo da corrente de curto-circuito monofásico.**



**Figura 3: diagrama típico de sequência positiva e negativa para cálculo da corrente de curto-circuito bifásico.**

- Para o cálculo das correntes de curto-circuito trifásicas será utilizada a fórmula:

$$I_{cc\ 3\phi} = \frac{V_F}{\sum Z_1}$$

- Para o cálculo das correntes de curto-circuito fase-terra é utilizada a fórmula:

$$I_{cc\ 1\phi} = \frac{3 \cdot V_F}{\sum Z_1 + \sum Z_2 + \sum Z_0}$$

- Para o cálculo das correntes de curto-circuito fase-fase é utilizada a fórmula:

$$I_{cc\ 2\phi} = \frac{\sqrt{3}V_F}{\sum Z_1 + \sum Z_2}$$

### 2.3 VALORES DE CURTOS-CIRCUITOS CALCULADOS

A tabela a seguir apresenta os valores das correntes de curto-circuito calculados para os diversos pontos da instalação elétrica.

Ponto		Tensão (kV)	Descrição	Curto-circuito máximo		Curto-circuito mínimo	
				Corrente (A)	Ângulo	Corrente (A)	Ângulo
Ponto 0	Concessionária	13,8	Icc3Ø sim.:	4061	-68,8°	4061	-68,8°
			Icc3Ø ass.:	4402		4402	
			Icc2Ø sim.:	3517	-158,8°	3517	-158,8°
			Icc2Ø ass.:	3812		3812	
			Icc1Ø sim.:	1897	-75,9°	534	-15,9°
			Icc1Ø ass.:	2256		534	
Ponto 1	Cabine 1	13,8	Icc3Ø sim.:	4054	-68,7°	4054	-68,7°
			Icc3Ø ass.:	4389		4389	
			Icc2Ø sim.:	3511	-158,7°	3511	-158,7°
			Icc2Ø ass.:	3801		3801	
			Icc1Ø sim.:	1895	-75,9°	534	-15,9°
			Icc1Ø ass.:	2251		534	
Ponto 2	Cabine 2	13,8	Icc3Ø sim.:	4054	-68,7°	4054	-68,7°
			Icc3Ø ass.:	4389		4389	
			Icc2Ø sim.:	3511	-158,7°	3511	-158,7°
			Icc2Ø ass.:	3801		3801	
			Icc1Ø sim.:	1895	-75,9°	534	-15,9°
			Icc1Ø ass.:	2251		534	
Ponto 3	Cabine 3	13,8	Icc3Ø sim.:	4054	-68,7°	4054	-68,7°
			Icc3Ø ass.:	4389		4389	
			Icc2Ø sim.:	3511	-158,7°	3511	-158,7°
			Icc2Ø ass.:	3801		3801	
			Icc1Ø sim.:	1895	-75,9°	534	-15,9°
			Icc1Ø ass.:	2251		534	
Ponto 4	Cabine 4	13,8	Icc3Ø sim.:	4047	-68,6°	4047	-68,6°
			Icc3Ø ass.:	4377		4377	
			Icc2Ø sim.:	3505	-158,6°	3505	-158,6°
			Icc2Ø ass.:	3791		3791	
			Icc1Ø sim.:	1893	-75,8°	534	-15,9°
			Icc1Ø ass.:	2246		534	
Ponto 5	Cabine 5	13,8	Icc3Ø sim.:	4047	-68,6°	4047	-68,6°
			Icc3Ø ass.:	4377		4377	
			Icc2Ø sim.:	3505	-158,6°	3505	-158,6°
			Icc2Ø ass.:	3791		3791	
			Icc1Ø sim.:	1893	-75,8°	534	-15,9°
			Icc1Ø ass.:	2246		534	

Ponto		Tensão (kV)	Descrição	Curto-circuito máximo		Curto-circuito mínimo	
				Corrente (A)	Ângulo	Corrente (A)	Ângulo
Ponto 6	Bornes BT TR1	0,22	Icc3Ø sim.:	16371	-102,9°	16371	-102,9°
			Icc3Ø ass.:	18592		18592	
			Icc2Ø sim.:	14178	-162,9°	14178	-162,9°
			Icc2Ø ass.:	16101		16101	
			Icc1Ø sim.:	16730	-103°	16730	-103°
			Icc1Ø ass.:	19024		19024	
Ponto 7	Bornes BT TR2	0,22	Icc3Ø sim.:	10770	-97,1°	10770	-97,1°
			Icc3Ø ass.:	11502		11502	
			Icc2Ø sim.:	9327	-157,1°	9327	-157,1°
			Icc2Ø ass.:	9961		9961	
			Icc1Ø sim.:	10925	-97,1°	10925	-97,1°
			Icc1Ø ass.:	11664		11664	
Ponto 8	QP 1	0,22	Icc3Ø sim.:	15480	-70,9°	15480	-70,9°
			Icc3Ø ass.:	17156		17156	
			Icc2Ø sim.:	13406	-160,9°	13406	-160,9°
			Icc2Ø ass.:	14858		14858	
			Icc1Ø sim.:	15434	-70,9°	12865	-52°
			Icc1Ø ass.:	17092		12959	
Ponto 9	QP 2	0,22	Icc3Ø sim.:	10357	-66°	10357	-66°
			Icc3Ø ass.:	10969		10969	
			Icc2Ø sim.:	8970	-156°	8970	-156°
			Icc2Ø ass.:	9500		9500	
			Icc1Ø sim.:	10336	-65,9°	9063	-53,2°
			Icc1Ø ass.:	10944		9145	

Tabela 2: correntes de curtos-circuitos calculadas.

### 3 CÁLCULO DA CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO DOS TRANSFORMADORES

Para o cálculo da corrente de magnetização, ou *Inrush* dos transformadores, é considerada oito vezes a corrente nominal do transformador; no caso de vários transformadores, deve-se considerar oito vezes a corrente nominal do de maior potência, mais o quádruplo do somatório das correntes dos demais transformadores

- Maior transformador da instalação: 300 kVA
- Somatório da potência dos demais transformadores: 150 kVA

$$I_{nrush} = \frac{300 \text{ kVA}}{13,2 \text{ kV} \cdot \sqrt{3}} \cdot 8 + \frac{150 \text{ kVA}}{13,2 \text{ kV} \cdot \sqrt{3}} \cdot 4$$

$$I_{nrush} = 13,1 \text{ A} \cdot 8 + 6,5 \text{ A} \cdot 4$$

$$I_{nrush} = 105 \text{ A} + 26 \text{ A}$$

$$I_{nrush} \approx 131 \text{ A}$$

#### 4 CÁLCULO DA CORRENTE DO CONSUMIDOR

A corrente de partida, ou de *pick-up*, é o menor valor para o qual o relé irá atuar: é calculada através da capacidade de transformação do consumidor, de modo que:

$$\frac{\text{Capac. de Transf. [kVA]}}{\sqrt{3} \cdot V_L} \geq I_{\text{Pick-up}}$$

Sendo, a capacidade de transformação do consumidor, de 450 kVA, substituindo na equação acima, teremos:

$$\frac{450 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 13,2 \text{ kV}} \geq I_{\text{Pick-up}}$$

$$19,68 \text{ A} \geq I_{\text{Pick-up}}$$

Neste caso, será adotado o valor de 19 A para a corrente de partida ou de *pick-up*.

$$I_{\text{Pick-up}} = 19 \text{ A}$$

## 5 ESPECIFICAÇÃO DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE PROTEÇÃO

O dimensionamento do transformador de corrente de proteção dar-se-á, primeiramente, determinando a corrente primária e secundária do TC, e, em seguida, a tensão máxima induzida no secundário, para que seja evitada a saturação do aparelho.

Primeiramente, a corrente primária do TC deverá ser superior a corrente de carga, que, neste caso, será considerada igual à corrente de partida  $I_{Pick-up}$ . Portanto, 19 A é a corrente mínima para o primário do TC; porém, os seguintes critérios também deverão ser atendidos.

O transformador de corrente não deverá saturar para vinte vezes a corrente nominal do primário, e deverá suportar a corrente de curto-circuito trifásico simétrica calculada em seu ponto de instalação:

$$I_{CC\ 3\phi\ sim.} = 4061\ A.$$

$$20 \cdot I_{np} > 4061\ A.$$

Logo,

$$I_{np} > 203,05\ A.$$

Para determinar a saturação do TC, deverá ser conhecida a carga instalada a jusante de seu enrolamento secundário, segundo o manual do relé URP 7104, este aparelho terá consumo máximo de 0,2 VA para corrente nominal em 5 A; logo, a impedância do aparelho será 0,008  $\Omega$ . Considerando 10 m de condutor 2,5 mm<sup>2</sup>, tendo em vista que a instalação do relé deverá ser próxima ao ponto onde é instalado o TC, a impedância do condutor será aproximadamente 0,0887  $\Omega$ . Desta forma, tem-se que:

$$FS \cdot I_{ns} \cdot Z_{Burden} < V_s$$

$$20 \cdot 5 \cdot (0,008 + 0,0887) < V_s$$

$$9,67 < V_s$$

Desta forma, o TC deverá possuir as características mínimas de 250 A no primário e suportar no mínimo 10 V de tensão induzida em seu secundário. O TC escolhido foi:

10B20 com relação de transformação 250 / 5.

## 6 CRITÉRIOS E AJUSTES DOS RELÉS DE PROTEÇÃO

- O relé de proteção geral de entrada de energia é o modelo microprocessado URP 7104 da Pextron, apropriado para desempenhar as funções 50/51 e 50N/51N.
- As curvas de atuação do relé são apresentadas na tensão base 13,8 kV.
- Procurou-se obter sempre um intervalo de tempo entre curvas igual de acordo com a seguinte tabela, para assegurarmos a seletividade:

Dispositivos a jusante	Dispositivos a montante	
	Fusível	Relé digital
Fusível	120 ms	120 ms
Disjuntor de baixa tensão	120 ms	120 ms
Relé digital	250 ms	250 ms

Tabela 3: intervalos de coordenação entre aparelhos de proteção.

### 15.1 AJUSTES DO RELÉ DE PROTEÇÃO

Os ajustes do relé de proteção responsável pela proteção geral da unidade consumidora deverão ser tomados de acordo com o documento da Copel “Critérios de Ajustes do Sistema de Proteção”.

#### 15.1.1 Unidade temporizada de fase

A unidade temporizada de fase será responsável pelo ajuste referente a corrente mínima de atuação do relé. Em instalações elétricas de até 1000 kVA, será regulada de forma a liberar toda a potência de transformação. Caso a soma das potências dos transformadores for

maior que este valor, deverá ser considerado com ajuste da unidade temporizada de fase, o mesmo valor calculado para corrente de partida.

Desta forma, para o consumidor Escritório "B", o valor ajustado para unidade temporizada de fase será 19 A.

#### 15.1.2 Unidade instantânea de fase

A parametrização da unidade instantânea de fase é responsável pela atuação do relé em casos onde a corrente nominal é elevada bruscamente. Neste ajuste, a corrente deverá ser superior aos valores de *Inrush*, e da maior corrente de curto-circuito simétrico na baixa tensão.

Portanto, de forma a não atuar para a corrente de magnetização dos transformadores ou correntes de curto-circuito na baixa tensão, o ajuste instantâneo de fase do relé será fixado em 400 A.

#### 15.1.3 Curva temporizada de fase

Segundo os critérios de ajuste da Copel, a curva temporizada de fase deverá proporcionar um tempo máximo de 0,3 s para o maior valor da corrente curto-circuito trifásico simétrica na baixa tensão, e coordenar com a proteção a montante da concessionária.

Desta forma, foi escolhida a curva Tempo Extremamente Inverso com dial de tempo 0,4.

#### 15.1.4 Unidade temporizada de neutro

A Copel recomenda um ajuste de 20 % da unidade temporizada de fase, desde que esteja abaixo do ajuste de neutro do religador, e não seja inferior a 10 % da corrente nominal do TC.

Logo, atendendo a todos os critérios, a unidade temporizada de neutro será ajustada em 25 A.

#### 15.1.5 Unidade instantânea de neutro

Para a unidade instantânea de neutro, a Copel também recomenda adotar 20 % do ajuste da unidade instantânea de fase, advertindo, que este ajuste deverá ser inferior ao menor valor de corrente de curto-circuito monofásico simétrica na alta tensão.

A unidade instantânea de neutro será ajustada em 80 A.

#### 15.1.6 Curva temporizada de neutro

Na determinação da curva temporizada de neutro, não há necessidade de coordenação com as proteções do secundário; desta forma poderá ser utilizada a menor curva possível.

Desta forma, foi escolhida a curva de Tempo Definido com ajuste de tempo em 0,1 s.

### 15.2 ESTUDOS DE SELETIVIDADE

A partir dos ajustes especificados no item 6.1, foram geradas e são apresentadas a seguir, respectivamente as curvas tempo x corrente de curto-circuito trifásico e monofásico, e curva de danos dos transformadores.

## Curto-circuito trifásico

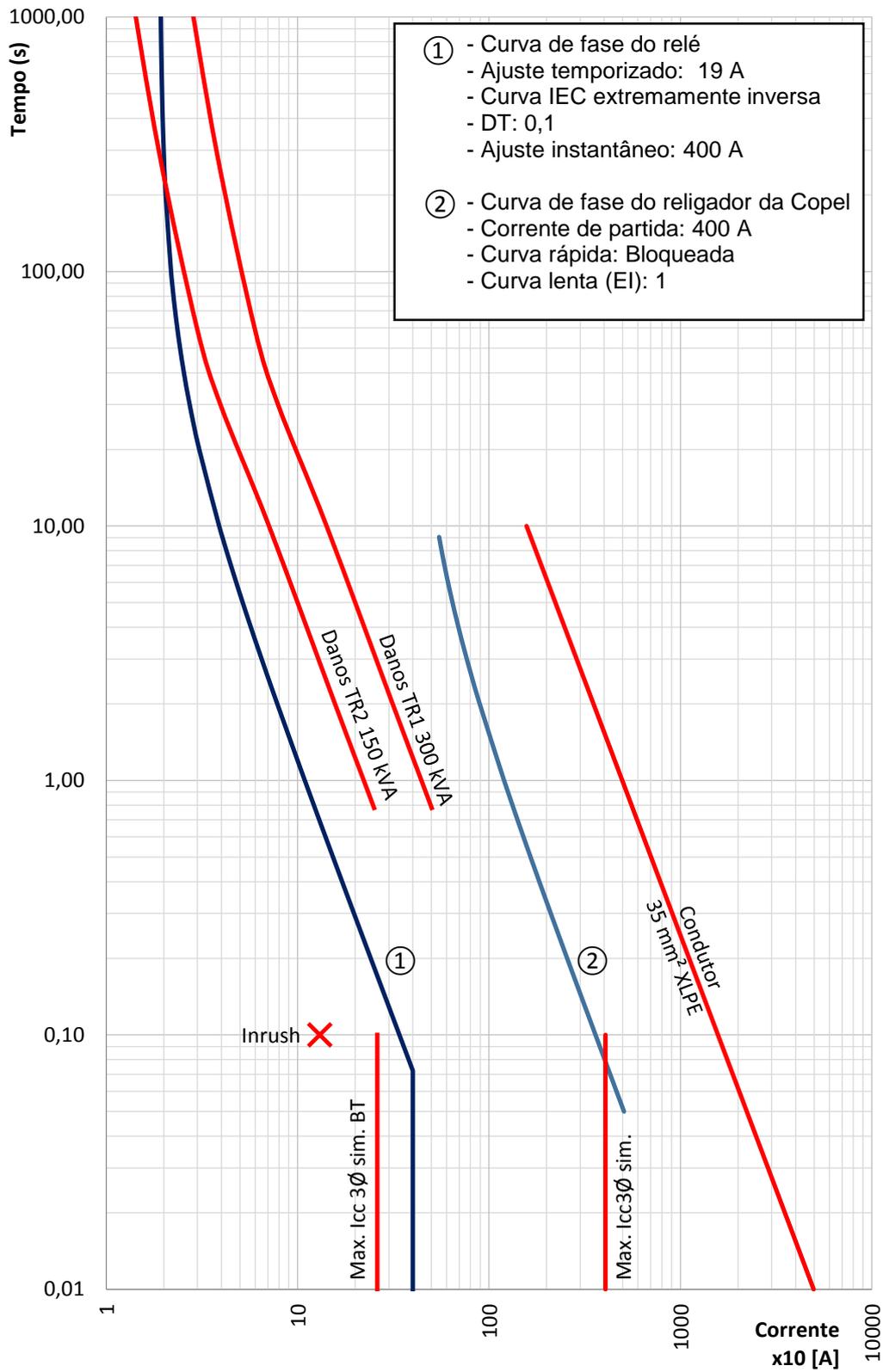


Figura 4: curto-circuito trifásico.

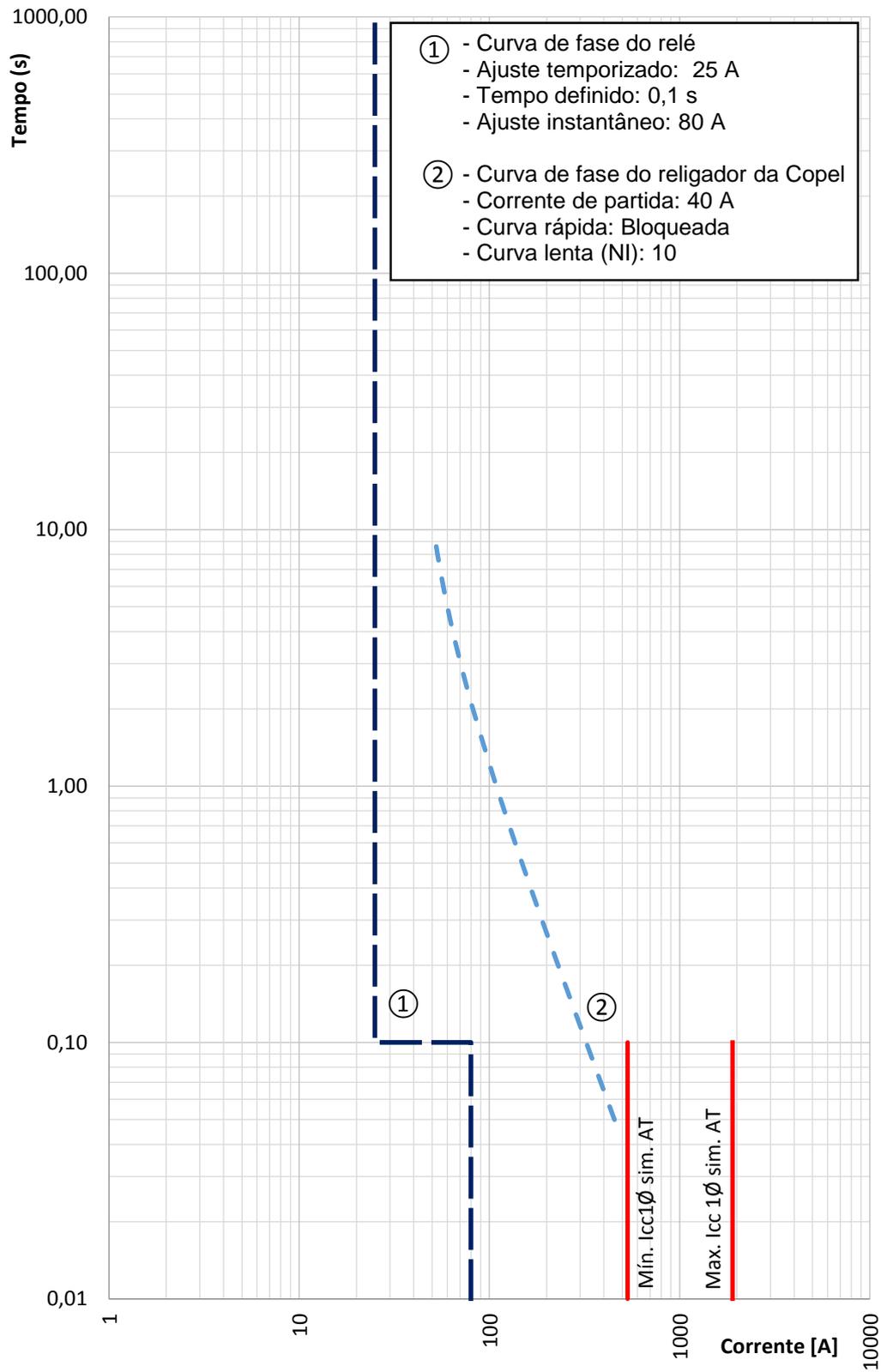


Figura 5: curto-circuito

## RESUMO COM DADOS DO ESTUDO DE PROTEÇÃO

CONSUMIDOR: Escritório "B"

PONTO	PRIMÁRIO						SECUNDÁRIO				
	Vbase = 13,8 kV						Vbase = 13,8 kV (Refletido ao primário)				
	Transformador	lcc3øsim	lcc1øsim	lcc1ømin	lcc3øsim	lcc1øsim	lcc3øsim	lcc1øsim	lcc3øsim	lcc1øsim	Vbase = 0,22 kV
Concessionária	N A	4061 /-68,8°	1897 /-75,9°	534 /-15,9°	534 /-15,9°	N A	N A	N A	N A	N A	N A
Cabine 1	N A	4054 /-68,7°	1895 /-75,9°	534 /-15,9°	534 /-15,9°	N A	N A	N A	N A	N A	N A
Cabine 2	N A	4054 /-68,7°	1895 /-75,9°	534 /-15,9°	534 /-15,9°	N A	N A	N A	N A	N A	N A
Cabine 3	N A	4054 /-68,7°	1895 /-75,9°	534 /-15,9°	534 /-15,9°	N A	N A	N A	N A	N A	N A
Cabine 4	N A	4047 /-68,6°	1893 /-75,8°	534 /-15,9°	534 /-15,9°	N A	N A	N A	N A	N A	N A
Cabine 5	N A	4047 /-68,6°	1893 /-75,8°	534 /-15,9°	534 /-15,9°	N A	N A	N A	N A	N A	N A
Bornes BT TR1	300	N A	N A	N A	N A	261 /-102,9°	172 /-97,1°	267 /-103°	16371 /-102,9°	16730 /-103°	
Bornes BT TR2	150	N A	N A	N A	N A	174 /-97,1°	246 /-70,9°	174 /-97,1°	10770 /-97,1°	10925 /-97,1°	
QP 1	N A	N A	N A	N A	N A	247 /-70,9°	165 /-66°	246 /-70,9°	15480 /-70,9°	15434 /-70,9°	
QP 2	N A	N A	N A	N A	N A	165 /-66°	165 /-65,9°	165 /-66°	10357 /-66°	10336 /-65,9°	

I magnetização (A): 131  
 I nominal (A): 20

I demanda contratada (A): 16,4  
 Demanda contratada (kW): 360

Temp. de fase I >	Ajuste de curva temp. de fase	Ajuste de tempo definido fase	Tempo definido (s) fase	Instant. fase I >>	Tempo instant. fase	Temporizado neutro In >	Ajuste e tipo de curva temp. neutro	Ajuste de tempo definido neutro	Tempo definido (s) neutro	Instant. neutro IN >>	Tempo instant. neutro
19	0,4 EI (IEC)	-	-	400	Não	-	-	30	0,1	80	Não
Ajustes no rele	0,076	-	-	1,6		-	-	0,12		0,32	

Elo fusível 50  
 RTC URP 7104  
 RELÉ 5  
 Corrente nominal do Relé