

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ
CAMILA TOPANOTT NUNES

ESTUDO DE CASO DE COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE DA PROTEÇÃO DE
SISTEMAS ELÉTRICOS DE UMA INDÚSTRIA

CASCABEL

2018

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ
CAMILA TOPANOTT NUNES

**ESTUDO DE CASO DE COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE DA PROTEÇÃO DE
SISTEMAS ELÉTRICOS DE UMA INDÚSTRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz como requisito parcial para a Obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Ewerson Luiz Poisk.

CASCADEL
2018

CAMILA TOPANOTT NUNES

**ESTUDO DE CASO DE COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE DA PROTEÇÃO DE
SISTEMAS ELÉTRICOS DE UMA INDÚSTRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz como requisito parcial para a Obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

BANCA EXAMINADORA



Orientador: Prof. Ewerson Luiz Poisk
Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz



Prof. Maycon Roberto Boeing
Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz



Prof. Mario Elias Carvalho do Nascimento
Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz

Cascavel, 07 de Dezembro de 2018.

Dedico este trabalho à minha família e amigos que sempre me incentivaram a jamais desistir.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por não me deixarem desistir nos momentos de dificuldade.

Agradeço ao meu namorado Luiz Gustavo Amaral, pela paciência e pela força nos momentos mais difíceis e por me acompanhar nessa jornada tão importante.

Agradeço ao meu professor Ewerson Luiz Poisk pela dedicação e orientação neste projeto.

Agradeço aos meus professores e colegas por me ajudarem a chegar até esta etapa tão importante da minha vida.

"Nunca subestime o poder de sua visão
para mudar o seu mundo." (Caio Carneiro)

RESUMO

No sistema elétrico de uma indústria, as sobrecorrentes podem atingir valores muito elevados causando danos irreversíveis ao sistema elétrico. Portanto, o estudo de coordenação e seletividade é de suma importância para a análise das correntes de curto-circuito, garantindo a proteção e a confiabilidade do sistema elétrico, de forma que os dispositivos atuem rapidamente assegurando que trechos defeituosos sejam removidos do sistema, protegendo os demais equipamentos ligados ao circuito. O presente estudo tem como objetivo analisar os tipos de corrente de curto-circuito, analisar os sistemas de proteção elétrica e coordenação e seletividade de sistemas de proteção. Os valores calculados das correntes de curto-circuito e o programa ETAP – *Electrical Power System Analysis Software*, software de análise de sistema elétrico de potência, foram utilizados como parâmetros para a elaboração do estudo de coordenação e seletividade da planta utilizada como caso para visualizar graficamente as curvas de atuação dos equipamentos existentes. Podendo concluir-se que os ajustes dos dispositivos de proteção não são únicos e que os projetos podem variar de acordo com a decisão de cada profissional.

Palavras-chave: coordenação; seletividade; curto-circuito.

ABSTRACT

In an industry's electrical system, overcurrents can reach very high values causing irreversible damage to the electrical system. Therefore, the study of coordination and selectivity is important for the analysis of short-circuit currents, ensuring the protection and reliability of the electrical system, so that the devices act quickly ensuring that defective parts are removed from the system, protecting the other equipment connected to the circuit. The present study has as objective to analyze the types of short-circuit current, to analyze the systems of electrical protection and coordination and selectivity of protection systems. The calculated values of the short-circuit currents and the ETAP - Electrical Power System Analysis Software were used as parameters for the elaboration of the coordination and selectivity study of the plant used as a case to graphically visualize the curves of performance of the existing equipment. It can be concluded that the adjustments of the protection devices are not unique and that the projects can vary according to the decision of each professional.

Keywords: selectivity; coordination; short circuit.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema básico de funcionamento de um relé de proteção	15
Figura 2 - Curto-circuito trifásico.....	18
Figura 3 - Curto-circuito bifásico	19
Figura 4 - Curto-circuito bifásico terra.....	19
Figura 5 - Curto-circuito monofásico terra.....	20
Figura 6 - Diagrama de sequência positiva	23
Figura 7 - Diagrama de sequência negativa.....	23
Figura 8 - Diagrama de sequência zero	24
Figura 9 - Curva característica de tempo definido	29
Figura 10 - Curva característica de tempo inverso	29
Figura 11 - Relé <i>Schneider</i> Sepam série 20.....	31
Figura 12 - Exemplo de funcionamento da proteção de sobrecorrente	32
Figura 13 - Coordenograma Relé SEPAM.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Falhas no sistema de energia elétrico	17
Tabela 2 - Ocorrência de curtos-circuitos.....	18
Tabela 3 - Dados do transformador da Indústria Ouroform	34
Tabela 4 - Impedância no ponto de entrega da concessionária	34
Tabela 5 - Religador COPEL	34
Tabela 6 - Parâmetros de base	35
Tabela 7- Correntes de Curto Circuito	36
Tabela 8 - Ajustes do relé SEPAM.....	37
Tabela 9 - Corrente de curto-circuito no transformador.....	37

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 ESTUDO DE PROTEÇÃO	14
2.1 ESTRUTURA DO SISTEMA DE PROTEÇÃO	14
2.1.1 Falhas de um sistema de potência.....	16
2.2 REQUISITOS BÁSICOS DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO	16
2.3 CORRENTE DE CURTO CIRCUITO	17
2.3.1 Curto-circuito no gerador.....	17
2.4 TIPOS DE CURTO-CIRCUITO	17
2.4.1 Curto-circuito trifásico.....	18
2.4.2 Curto-circuito bifásico	19
2.4.3 Curto-circuito fase e terra	19
2.5 FORMULAÇÃO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO	20
2.6 FATOR DE ASSIMETRIA	22
2.7 COMPONENTES SIMÉTRICAS	22
2.7.1 Sequência positiva:	22
2.7.2 Sequência negativa:	23
2.7.3 Sequência zero:	23
2.7.4 Expressão Analítica	24
2.7.5 Corrente de sequência zero	25
2.8 VALORES PERCENTUAIS E POR UNIDADE	26
2.9 DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO	27
2.9.1 Transformadores de corrente	27
2.9.2 Transformador de potencial	28
2.9.3 Características dos relés de proteção	28
2.9.4 Relés de Sobrecorrente Instantâneo e Temporizados (50/50N e 51/51N).....	28
2.10 RELÉ <i>SCHNEIDER</i> SEPAM SÉRIE 20	31

2.10.1 Proteção ANSI 50/51	31
2.11 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS RELÉS DE PROTEÇÃO	32
2.11.1 Sobrecorrente temporizada de fase (51) e neutro (51N).....	32
3 MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 DADOS DO SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO	34
3.2 PARÂMETROS DE BASE.....	34
3.3 CIRCUITO ESTUDADO	35
3.3.1 Impedâncias nos ramais	35
3.4 CÁLCULOS DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO	36
4 CONCLUSÃO.....	40
REFERÊNCIAS	41
ANEXO A - RESISTÊNCIAS E REATÂNCIAS INDUTIVAS DOS CABOS UTILIZADOS NO OBJETO DE ESTUDO.....	42
ANEXO B – TABELA ANSI	43
ANEXO C – CURVA DE TEMPO NORMAMENTE INVERSA DO RELÉ	46
ANEXO D – CURVA DE TEMPO MUITO INVERSA DO RELÉ	47
ANEXO E – CURVA DE TEMPO EXTREMAMENTE INVERSA DO RELÉ	48
ANEXO F – CURVA DE TEMPO INVERSA LONGA DO RELÉ	49
ANEXO G – CRITÉRIOS DE AJUSTES DO SISTEMA DE PROTEÇÃO.....	50
ANEXO H – DIAGRAMA UNIFILAR.....	51

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento no mercado industrial cada vez mais vem sendo necessário o estudo da proteção de sistemas elétricos, tendo em vista que grande parte dos defeitos nestes sistemas envolvem uma grande quantidade de energia e se as devidas medidas de segurança e de proteção não forem bem estabelecidas, podem causar danos catastróficos, ou seja, um sistema elétrico de fornecimento de energia deve ser projetado de forma que seja capaz não só de atender a demanda atual, como também atender às demandas futuras e estimadas por seus usuários em uma determinada área garantindo um serviço confiável. Para que isso ocorra, todo o sistema deve ser mantido em operação contínua, ou seja, sem que seja interrompido por falhas ou perturbações que possam causar o seu desligamento a longo prazo. [1]

Por estar sujeito à falhas e anormalidades em sua operação, são instalados equipamentos de proteção a fim de evitar que elementos que compõem o sistema elétrico como transformadores, geradores, cabos e motores, sofram danos, mantendo assim a segurança de todos que usufruem da energia elétrica seja de forma direta ou indireta. [1]

O sistema elétrico industrial deve ser dimensionado garantindo o suprimento das cargas instaladas, bem como a segurança dos equipamentos e máquinas ligados a ele e principalmente do ambiente em que se encontram e de seus operadores. [2]

Para que haja um bom dimensionamento dos equipamentos de proteção no sistema elétrico, deve ser elaborada uma análise global do mesmo, pois, se elaborada setorialmente pode acarretar uma descoordenação em seu funcionamento, causando interrupções de setores de produção que não dependem diretamente da parte afetada. Nessa análise é necessário que seja estudado o curto-circuito em vários pontos do sistema elétrico para poder garantir uma proteção coordenada e seletiva. [2]

Por se tratar de um sistema suscetível a falhas internas, o objetivo principal do estudo de proteção é garantir na presença de faltas, que o local defeituoso seja isolado no menor tempo possível, preservando os equipamentos e evitando acidentes. Para isso, são necessários corretos dimensionamentos dos equipamentos e ajustes dos elementos de proteção, portanto, foi realizada a análise dos parâmetros de proteção que foram aplicados na seletividade e coordenação dos dispositivos já existentes na indústria de plásticos Ouroform Formulários LTDA., o foco do trabalho não foi de projetar o sistema de proteção e sim, de garantir a coordenação e a seletividade dos equipamentos mantendo a integridade do sistema elétrico. [2]

2 ESTUDO DE PROTEÇÃO

Os principais componentes em um sistema de proteção são os fusíveis, que transportam correntes no circuito de forma contínua e são sacrificados quando verificadas anomalias no sistema, transformadores de potência e de corrente, que são responsáveis por medições precisas de valores de tensão e corrente verificando as condições normais e anormais do sistema e relés, que comparam os valores obtidos com seus valores de ajuste e acionam os disjuntores, responsáveis pela abertura do circuito danificado isolando-o dos demais circuitos. [2]

Em um sistema elétrico industrial os dispositivos de proteção têm de ser dimensionados de forma que, na presença de anormalidades, selecionem a parte defeituosa e a isole sem afetar os circuitos sãos, garantindo a integridade dos equipamentos e a confiabilidade de operação do sistema. A proteção de um sistema elétrico é projetada tendo como base os relés e os fusíveis juntamente com um disjuntor. [3]

Foram mostrados neste estudo os transformadores de corrente, transformadores de potência, fusíveis, disjuntores de baixa tensão e relés de proteção. [2]

Normalmente utilizados em sistemas de distribuição de média tensão devido à sua baixa confiabilidade e à dificuldade de se encontrar sistemas seletivos, o fusível faz parte dos dispositivos que são capazes de interromper o circuito ao qual estão ligados. [3]

Já os relés fazem possuem aplicações diversificadas que dependem de sua importância, do seu porte e principalmente, da segurança onde encontram-se instalados e devem atuar diretamente sobre o equipamento responsável pela separação do circuito elétrico afetado dos demais circuitos, normalmente esse equipamento é o disjuntor. [3]

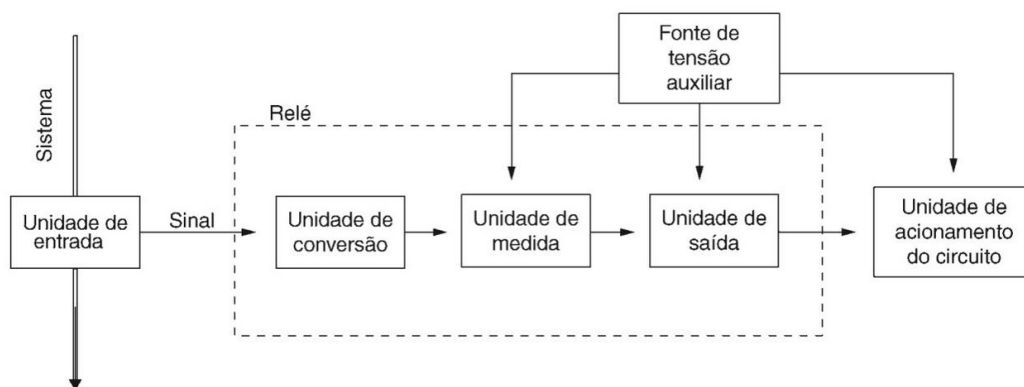
A detecção de um defeito no sistema elétrico pode ser obtida por meio da elevação da corrente, elevação e redução da tensão ou por meio de inversão do sentido da corrente e por meio da alteração da impedância do sistema. [3]

2.1 ESTRUTURA DO SISTEMA DE PROTEÇÃO

Os relés de proteção são capazes de detectar anormalidades no sistema elétrico estabelecendo o mais breve possível que uma ação corretiva é necessária. Há várias formas de se detectar essas anormalidades sendo elas por meio da variação da frequência do sistema, harmônicas, defasagens nos ângulos de tensão e corrente, porém, os parâmetros comumente utilizados, são as variações de tensão e corrente nos terminais dos dispositivos a serem

protegidos. É responsabilidade dos relés de proteção diagnosticar essas variações e avaliar se elas se enquadram em sua faixa de proteção. [4]

Figura 1 - Esquema básico de funcionamento de um relé de proteção



Fonte: [7]

Os transformadores de corrente e de potencial, que são os equipamentos que recebem informações de distúrbios no sistema elétrico fazem parte da unidade de entrada (Figura 1) e enviam sinais à unidade de conversão do relé de proteção. A unidade de entrada também é responsável pela isolamento elétrica entre o sistema e os dispositivos de proteção evitando que tensões e correntes elevadas sejam conduzidas até eles. [3]

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), os valores nominais que caracterizam os transformadores de corrente são corrente e relação nominal, classe de tensão de isolamento nominal, frequência nominal, carga nominal, classe de exatidão, fator de sobrecorrente e fator térmico nominal. [2]

Eles operam com tensões variáveis e por meio de conversão eletromagnética e transformam correntes elevadas em pequenas correntes secundárias. Os transformadores de corrente também permitem o funcionamento correto de instrumentos de medição e proteção, tais como medidores e relés de proteção, sem que os mesmos possuam correntes nominais de acordo com a corrente de carga do circuito em que estão ligados. [5]

O elemento que recebe os sinais dos transformadores de corrente e de potencial e os transforma em sinais com modulação ao nível de funcionamento dos relés, é a unidade de conversão. E ao receber os sinais da unidade de conversão, a unidade de medida compara os módulos de corrente e tensão e ângulo de fase com os valores que foram estipulados inicialmente como referência de operação. Caso haja anormalidade nos sinais de entrada,

apresentando valores superiores aos valores previamente ajustados, a unidade de medida é responsável por enviar um sinal à unidade de saída. [3]

A unidade que fornece energia às unidades de medida e à unidade de saída é denominada fonte de tensão auxiliar e em alguns dispositivos pode ser constituída por um circuito interno que converte a corrente de entrada em uma pequena tensão por meio de um resistor instalado internamente ao dispositivo de proteção. [3]

A unidade de saída pode ser constituída por uma bobina pequena que é acionada por um contato auxiliar ou chave semicondutora. E a unidade de acionamento é ativada em sistemas de proteção com relés secundários, em sistemas com relés primários, a unidade de acionamento é realizada diretamente pelas unidades de entrada. [3]

2.1.1 Falhas de um sistema de potência

O curto-circuito corresponde à falha mais severa no sistema elétrico e é resultante de um defeito na isolação de um ponto qualquer sob tensão da rede considerada ou se uma ação involuntária sobre o sistema. Podem se dar entre as três fases, entre duas fases, entre duas fases e a terra, e entre uma fase e a terra. Já as sobrecargas, são originadas pela operação incorreta da instalação elétrica e caracterizadas pelo aumento da corrente acima de seu valor nominal. [3]

2.2 REQUISITOS BÁSICOS DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO

O dimensionamento e especificação corretos dos equipamentos e dispositivos de proteção são de extrema importância no desempenho de um sistema elétrico, pois, os mesmos são suscetíveis a perturbações como curto-circuito, sobrecargas e variações do nível de tensão e do nível de frequência. [2]

Dentre os requisitos básicos dos equipamentos de proteção, pode-se destacar a preservação de todo o sistema mantendo a continuidade do fornecimento de energia, minimizando danos e custos de manutenção e principalmente, mantendo a segurança dos usuários do sistema elétrico. São de suma importância para detecção e localização antecipadas de possíveis falhas, possibilitando que os equipamentos defeituosos sejam isolados ou retirados de serviço. [1]

2.3 CORRENTE DE CURTO CIRCUITO

Analisar os valores de corrente de curto-circuito dos equipamentos de uma indústria é essencial para a elaboração e execução do projeto de proteção e coordenação. Em um sistema elétrico industrial essas correntes devem ser delimitadas em todos os pontos onde serão instalados equipamentos de proteção, pois, os danos provocados à instalação dependem da intervenção correta dos mesmos. [2]

Os valores das correntes de curto-circuito podem variar entre 10 a 100 vezes o valor da corrente nominal no ponto defeituoso da instalação, picos que podem possuir duração de frações de segundo, ocasionados geralmente, pela perda do isolamento de algum dispositivo energizado do sistema elétrico. Essas correntes podem ser responsáveis por danos como a queima de motores, rompimento de apoios e deformação nos quadros de distribuição. [2]

2.3.1 Curto-circuito no gerador

Uma das principais fontes causadoras das correntes de curto-circuito é o gerador. Nos geradores síncronos, as correntes de curto-circuito possuem valor inicial muito altos e vão diminuindo até alcançar seu valor de regime permanente. Ou seja, o gerador possui uma reatância interna variável. Para realizar a análise das formas de onda de curto-circuito nos terminais do gerador, é importante observar as suas reatâncias limitadoras, a reatância subtransitória, transitória e síncrona. [2]

2.4 TIPOS DE CURTO-CIRCUITO

A contribuição no Brasil, de cada setor para a ocorrência de falhas no sistema de energia elétrico podem ser vistos conforme a Tabela 1. [6]

Tabela 1 - Falhas no sistema de energia elétrico

Setor do Sistema Elétrico	Curto-Circuito (%)
Geração	6%
Subestação	5%
Transmissão	89%

Fonte: [6]

Sendo o curto-circuito trifásico, o mais raro e o curto-circuito monofásico o mais comum conforme a Tabela 2. [6]

Tabela 2 - Ocorrência de curtos-circuitos.

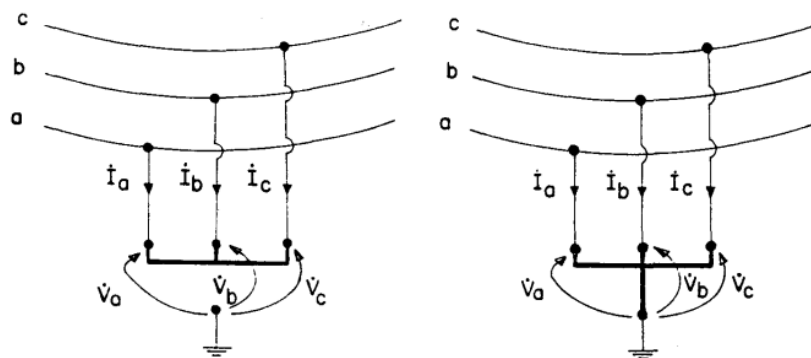
Tipo de curto-circuito	Ocorrência(%)
3ϕ	6
2ϕ	15
2ϕ - terra	16
1ϕ - terra	63

Fonte: [6]

2.4.1 Curto-circuito trifásico

O curto-circuito trifásico ocorre quando todas as correntes são equilibradas conforme Figura 2, portanto suas tensões se anulam em um ponto do sistema elétrico. Fazendo com que não haja diferença entre o curto-circuito 3ϕ e o 3ϕ -terra. [6]

Figura 2 - Curto-circuito trifásico

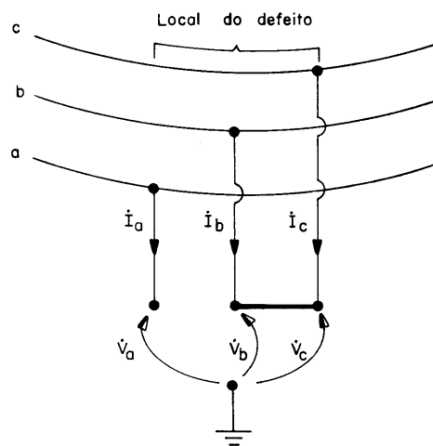


Fonte: [6]

2.4.2 Curto-circuito bifásico

Os curtos-circuitos bifásicos, podem ser o contato entre as fases b e c conforme Figura 3. [6]

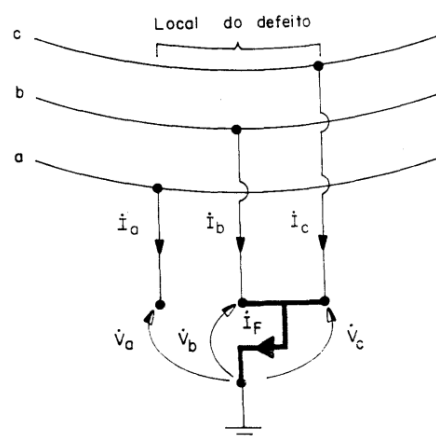
Figura 3 - Curto-circuito bifásico



Fonte: [6]

Os curtos-circuitos bifásicos, podem ser o contato entre as fases b e c e o terra conforme Figura 4. [6]

Figura 4 - Curto-circuito bifásico terra

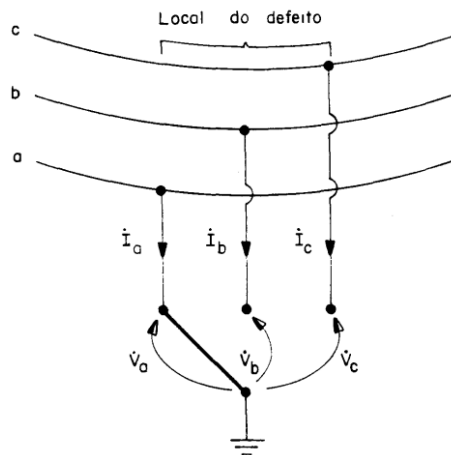


Fonte: [6]

2.4.3 Curto-circuito fase e terra

Curto-circuito em que há contato entre um condutor de fase e o aterramento. [6]

Figura 5 - Curto-circuito monofásico terra



Fonte: [6]

2.5 FORMULAÇÃO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

As correntes de curto-circuito possuem forma de onda senoidal, cujo valor pode ser expresso conforme equação 2.1:[3]

$$I_{cc}(t) = \sqrt{2} \times I_{cs} \times [\sin(\omega t + \beta - \theta) - e^{\left(\frac{-t}{Ct}\right)} \times \sin(\beta - \theta)] \quad (2.1)$$

Onde,

$I_{cc}(t)$: corrente de curto-circuito instantânea;

I_{cs} : corrente de curto-circuito eficaz simétrica;

t : tempo;

R : resistência do circuito;

X : reatância do circuito;

ω : velocidade angular;

f : frequência do sistema,

Ct : constante de tempo;

β : deslocamento angular da tensão;

θ : ângulo entre a resistência e a reatância do sistema.

$$Ct = \frac{X}{2 \times \pi \times f \times R} \quad (2.2)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{X}{R}\right) \quad (2.3)$$

O primeiro termo da equação de curto-circuito representa o valor simétrico da corrente alternada, já o segundo, representa o valor do componente contínuo. Quando o defeito ocorre no ponto nulo de alimentação, β é nulo. Quando a tensão está em seu valor de pico, β é 90° . [2]

Sendo assim para $\beta=0^\circ$

$$I_{cc}(t) = \sqrt{2} \times I_{cs} \times [\sin(\omega t + 0^\circ - 90^\circ) - e^{\left(\frac{-t}{Ct}\right)} \times \sin(0^\circ - 90^\circ)] \quad (2.4)$$

$$I_{cc}(t) = \sqrt{2} \times I_{cs} \times [\sin(\omega t - 90^\circ) + e^{\left(\frac{-t}{Ct}\right)}] \quad (2.5)$$

Para $\beta=90^\circ$

$$I_{cc}(t) = \sqrt{2} \times I_{cs} \times [\sin(\omega t + 90^\circ - 90^\circ) - e^{\left(\frac{-t}{Ct}\right)} \times \sin(90^\circ - 90^\circ)] \quad (2.6)$$

$$I_{cc}(t) = \sqrt{2} \times I_{cs} \times [\sin(\omega t + 0^\circ) - e^{\left(\frac{-t}{Ct}\right)} \times \sin(0^\circ)] \quad (2.7)$$

$$I_{cc}(t) = \sqrt{2} \times I_{cs} \times \sin(\omega t) \quad (2.8)$$

Em circuitos altamente indutivos, a corrente de curto-circuito é formada apenas pela componente simétrica quando a falha ocorre no instante em que a tensão alcança seu pico. A componente contínua enfraquece ao longo dos ciclos da corrente de curto-circuito e o mesmo está ligado ao fator de potência de curto-circuito, ou seja, à relação X/R , que representa a constante de tempo do sistema. [2]

2.6 FATOR DE ASSIMETRIA

O fator de assimetria, relação entre as correntes assimétrica e simétrica, é comumente utilizado para encontrar a corrente de curto-circuito assimétrica. [6]

$$F.A = \frac{I_{ca}}{I_{cs}} \quad (2.9)$$

$$I_{ca} = I_{cs} \times \sqrt{1 + 2 \times e^{-\left(\frac{2 \times t}{Ct}\right)}} \quad (2.10)$$

As correntes de curto-circuito assimétricas são utilizadas para determinar a eficácia de interrupção dos equipamentos de proteção (religadores, chaves-fusíveis, disjuntores) e os valores simétricos, são empregados no estudo da coordenação e seletividade dos mesmos. [7]

2.7 COMPONENTES SIMÉTRICAS

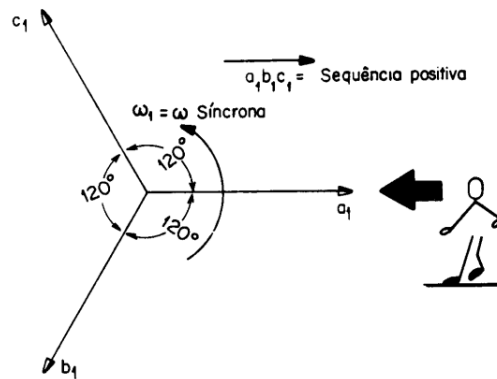
Para que os cálculos de tensão, corrente e impedância sejam desenvolvidos corretamente, é necessário que seja empregado o método de estudo das componentes simétricas. [5]

Desenvolvido pelo Dr. C. L. Fortescue, este método, é utilizado para a análise de circuitos polifásicos, estabelecendo que um sistema com diferentes fasores pode ser decomposto em fasores desequilibrados e equilibrados. Ou seja, cada fase do sistema elétrico trifásico na situação de desequilíbrio, pode ser representada pela soma de suas sequências positiva, negativa e zero. [6]

2.7.1 Sequência positiva:

A sequência positiva é representada por três fasores de mesmo módulo atrasados em 120° conforme Figura 6 e que giram na velocidade síncrona ω do sistema original. É representada pelo índice 1 e seus fasores podem representar tanto os valores de corrente quanto os valores de tensão. [6]

Figura 6 - Diagrama de sequência positiva

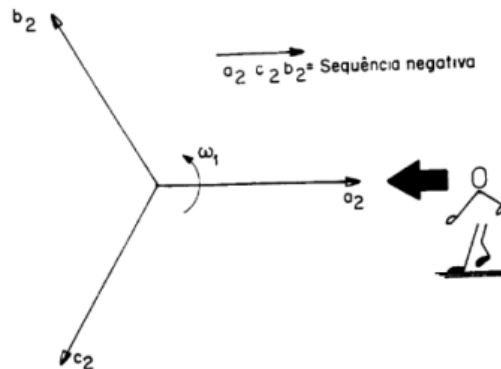


Fonte: [6]

2.7.2 Sequência negativa:

A sequência negativa é representada também por uma sequência de três fasores de mesmo módulo defasados em 120° (Figura 7), porém, estes, giram no sentido contrário ao da sequência positiva. É representada pelo índice 2 e seus fasores podem representar tanto os valores de corrente quanto os valores de tensão. [6]

Figura 7 - Diagrama de sequência negativa

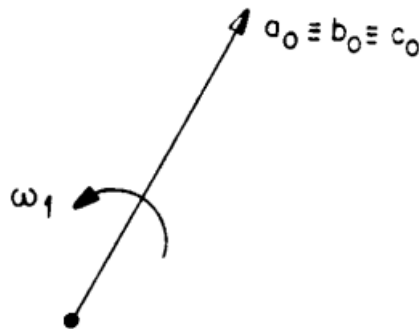


Fonte: [6]

2.7.3 Sequência zero:

A sequência zero é uma sequência de três fasores de mesmo módulo (Figura 8), girando na frequência do sistema desbalanceado e no mesmo sentido da sequência positiva. Recebendo o índice zero. [6]

Figura 8 - Diagrama de sequência zero



Fonte: [6]

2.7.4 Expressão Analítica

Como o sistema trifásico desequilibrado é composto pelos sistemas equilibrados de sequência zero, negativa e positiva, superpondo os mesmos conforme expressão: [1]

$$\begin{aligned}\dot{V}_a &= \dot{V}_{a0} \quad \dot{V}_{a1} \quad \dot{V}_{a2} \\ \dot{V}_b &= \dot{V}_{b0} \quad \dot{V}_{b1} \quad \dot{V}_{b2} \\ \dot{V}_c &= \dot{V}_{c0} \quad \dot{V}_{c1} \quad \dot{V}_{c2}\end{aligned}\tag{2.11}$$

Por se tratar de um sistema trifásico equilibrado, todas as funções podem ser escritas em função de uma única fase: [6]

$$\begin{aligned}\dot{V}_a &= \dot{V}_{a0} \quad \dot{V}_{a1} \quad \dot{V}_{a2} \\ \dot{V}_b &= \dot{V}_{a0} \quad a^2 \dot{V}_{a1} \quad a \dot{V}_{a2} \\ \dot{V}_c &= \dot{V}_{a0} \quad a \dot{V}_{a1} \quad a^2 \dot{V}_{a2}\end{aligned}\tag{2.12}$$

Podendo ser expressa em sua forma matricial: [6]

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix}\tag{2.13}$$

E por fim pode ser representada por uma matriz T , que se trata da transformação das componentes de sequência do sistema original desbalanceado: [6]

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Para se obter as componentes de sequência do sistema desbalanceado, deve-se multiplicar ambos lados da expressão matricial pela inversa da matriz T (T^{-1}): [6]

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

O desenvolvimento do teorema de Fortescue refere-se aos conjuntos de fasores de tensão, mas também pode ser aplicado aos fasores de corrente do sistema trifásico desbalanceado: [6]

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

As componentes simétricas de correntes desequilibradas, originam quedas de tensão de mesma sequência, fator importante para a análise de sistemas equilibrados e que no decorrer de faltas assimétricas, acaba tornando-se desequilibrado. [6]

2.7.5 Corrente de sequência zero

A corrente de sequência zero é de extrema importância e com aplicação direta à proteção do sistema elétrico sendo representada pela expressão que segue: [6]

$$\dot{I}_{a0} = \frac{\dot{I}_N}{3} \quad (2.17)$$

A corrente de sequência zero depende da corrente de neutro, ou seja, quando ligadas em delta ou estrela com neutro isolado ou quando o sistema não estiver aterrado. A soma das correntes de fase é zero quando não há circulação de corrente de sequência zero. [6]

2.8 VALORES PERCENTUAIS E POR UNIDADE

O valor por unidade, pu, é a relação entre o valor de uma grandeza e o seu valor base, escolhido como referência. É comumente utilizado em cálculos de grandezas no sistema de energia elétrica, pois, simplifica a modelagem e resolução do sistema. [8]

$$V = Z\dot{I} \quad (2.18)$$

$$S = V\dot{I} \quad (2.19)$$

São quatro as grandezas elétricas principais em que há mudança de base. Sendo assim, à duas grandezas são atribuídos valores tidos como valores de base e o valor de base das outras duas é obtido utilizando relações matemáticas. Atribuindo um valor de base para potência e tensão, qualquer outra potência e tensão serão expressas como uma fração ou uma porcentagem dessa grandeza. [8]

$$V_{\text{base}} = V1 \quad (2.20)$$

$$S_{\text{base}} = S1 \quad (2.21)$$

Para a corrente e a impedância:[8]

$$I_{\text{base}} = \frac{S_{\text{base}}}{V_{\text{base}}} \quad (2.22)$$

$$Z_{\text{base}} = \frac{V_{\text{base}}}{I_{\text{base}}} = \frac{V_{\text{base}}^2}{S_{\text{base}}} \quad (2.23)$$

2.9 DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

2.9.1 Transformadores de corrente

O transformador de corrente (TC) é instalado para evitar a conexão direta entre o relé e o circuito de alta tensão e também adapta as grandezas existentes no circuito com as grandezas compatíveis com a dos relés acoplados a ele. [9]

Os TCs destinados à proteção e à medição possuem o mesmo princípio de funcionamento, porém, possuem alguns aspectos diferentes. Dentre essas diferenças podem ser destacadas que os TCs destinados à medição possuem classe de exatidão entre 0,3% e 1,2%, já os TCs de proteção possuem classe de exatidão de 10%, ou seja, seu erro se mantém em 10%, com correntes de até 20 vezes sua corrente nominal, desde que sua carga seja menor ou igual à nominal. Os núcleos dos TCs de medição são construídos com materiais de alta permeabilidade magnética (permitindo que haja poucas perdas), porém, satura-se rapidamente. Seu valor de saturação é de aproximadamente quatro vezes sua corrente nominal. [7]

Para uso na proteção, os principais parâmetros de um transformador de corrente são a corrente primária nominal, a relação de transformação de corrente, a classe de exatidão e o fator de sobrecorrente. Para o seu dimensionamento são considerados parâmetros como tensão máxima e nível de isolamento, fator e limite térmico, frequência e carga nominal e limite de corrente de curta duração nominal. [8]

Sendo um dos parâmetros mais importantes, a relação de transformação define o quanto a corrente no primário será reduzida no secundário. [8]

$$RTC = \frac{N_s}{N_p} = \frac{I_p}{I_s} \quad (2.24)$$

N_s : Número de espiras no secundário do transformador;

N_p : Número de espiras no primário do transformador;

I_p : Corrente no primário do transformador;

I_s : Corrente no secundário do transformador ;

2.9.2 Transformador de potencial

O transformador de potencial é responsável pela conversão da tensão do sistema de potência para níveis apropriados para os relés de proteção. Podem ser do tipo indutivo (TPI) ou capacitivo (TPC), os TPIs são usados em sistemas com tensões até 69kV e os TPCs, acima de 138kV. O parâmetro mais importante do TP é a relação de transformação de potencial (RTP). [8]

$$RTP = \frac{N_s}{N_p} = \frac{V_p}{V_s} \quad (2.25)$$

Esta relação define o quanto a tensão do sistema será reduzida. E os parâmetros que devem ser considerados para o dimensionamento dos TPs são carga e potência térmica nominal, nível de isolamento, fator de sobretensão e frequência nominal. [8]

2.9.3 Características dos relés de proteção

O relé é um dispositivo um dispositivo que possui a função de detectar nas linhas ou aparelhos, indesejáveis condições do sistema, e iniciar manobras de chaveamento ou dar aviso adequado. [9]

Os relés podem ser classificados de acordo com suas funções - sobre e subcorrente, tensão ou potência, com seu aspecto construtivo - eletromecânicos, de indução, mecânicos, eletrônicos; com suas grandezas físicas de atuação - elétricas, mecânicas, térmicas, óticas; com a natureza da grandeza a que respondem - corrente, tensão, potência, e quanto a sua temporização - instantâneo, temporizado (mecânica, elétrica ou eletronicamente). [9]

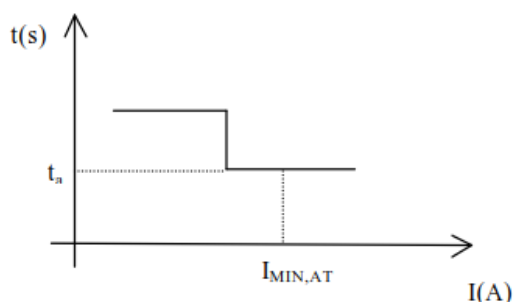
Para que sejam eficientes, os relés devem ser simples, rápidos, ter baixo consumo próprio, possuir alta sensibilidade e poder de discriminação. [9]

2.9.4 Relés de Sobrecorrente Instantâneo e Temporizados (50/50N e 51/51N)

São altamente empregados em sistemas radiais e muito utilizados em sistemas de proteção. Sua atuação está diretamente relacionada à sua curva tempo versus corrente, ou seja, seu ajuste é baseado em seus valores de corrente e tempos de atuação. É dado o nome de corrente de partida ao valor no qual o relé é sensibilizado. [10]

Os relés de sobrecorrente possuem funções de proteção de sobrecorrente em tempo definido (Figura 9) ou tempo inverso e são sensibilizados quando o valor da corrente medida em seus terminais supera o valor de corrente ajustado como padrão, habilitando assim sua função de temporização, determinando o tempo de atuação da proteção. Em curvas de tempo definido, não haverá dependência do tempo de atuação com a magnitude da corrente, ou seja, o tempo de atuação será sempre o mesmo. [5]

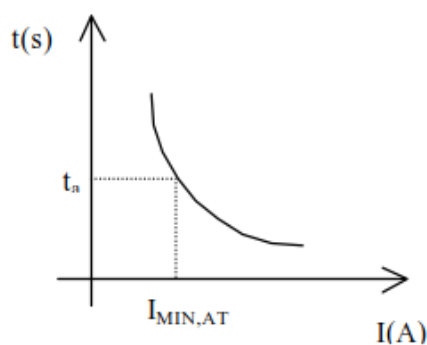
Figura 9 - Curva característica de tempo definido



Fonte: [7]

Nas curvas características de tempo inverso conforme Figura 10, o relé de sobrecorrente atuará em tempos decrescentes quando exposto a valores de corrente iguais ou maiores do que a corrente mínima estipulada para seu acionamento. E esse tipo de curva pode ser classificado como Normalmente Inversa (NI), Muito Inversa (MI) e Extremamente Inversa (EI). [10]

Figura 10 - Curva característica de tempo inverso



Fonte: [7]

A temporização dos relés pode ser obtida por meio das equações: [7]

Característica de tempo normalmente inversa (Tipo A):

$$T = \frac{0,14}{\left(\frac{Im a}{Is}\right)^{0,02} - 1} \cdot Tms \quad (2.26)$$

Característica de tempo muito inversa (Tipo B):

$$T = \frac{13,5}{\left(\frac{Im a}{Is}\right) - 1} \cdot Tms \quad (2.27)$$

Característica de tempo extremamente normal (Tipo C):

$$T = \frac{80}{\left(\frac{Im a}{Is}\right)^2 - 1} \cdot Tms \quad (2.28)$$

Característica de tempo inversa longa (Tipo B):

$$T = \frac{120}{\left(\frac{Im a}{Is}\right)^1 - 1} \cdot Tms \quad (2.29)$$

Onde T é o tempo em segundos , Is é a corrente de ajuste no relé, Ima é a corrente máxima admitida, Tms é o multiplicador de tempo.[5]

Também é possível configurar a operação dos relés de sobrecorrente por meio de um tempo definido, sendo determinados como parâmetros para suas curvas de operação, a corrente de partida e o tempo de atraso. [5]

O valor da corrente de partida, considerando uma margem de segurança, é ajustado acima da corrente padrão de atuação, evitando assim uma atuação indevida do relé e abaixo da mínima corrente de curto-circuito do sistema. [4]

Os relés de sobrecorrente mais utilizados, são os instantâneos (50) e os temporizados (51). Se eles estão ligados para proteção de fase, suas unidades são denominadas como 50 e 51 de fases (50/51). Quando estão realizando a proteção de neutro ou terra, são denominadas como (50N/51N). [7]

2.10 RELÉ *SCHNEIDER* SEPAM SÉRIE 20

A família Sepam série 20 (Figura 11) foi projetada para operação de máquinas e redes de distribuição elétrica nas instalações industriais e subestações dos distribuidores de energia, para todos os níveis de tensão. [10]

Figura 11 - Relé *Schneider* Sepam série 20



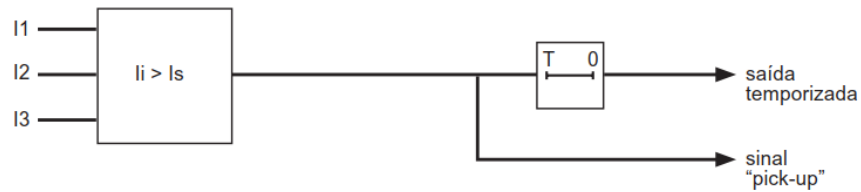
Fonte: [10]

Suas principais funções são proteção de sobrecorrente de fase e fuga à terra com tempo ajustável, detecção de alteração de fase, proteção da taxa de variação da frequência para uma desconexão segura e rápida. [10]

2.10.1 Proteção ANSI 50/51

A proteção sobrecorrente de fase é trifásica, ou seja, é equivalente a três relés monofásicos distintos, portanto, quando uma ou mais correntes ultrapassam o valor pré-estabelecido como I_s o relé irá sinalizar o *pick-up* e entrará na temporização decrescente dependendo da curva de tempo escolhida. Se após o decorrer deste tempo T o valor da corrente I_i em uma ou mais fases ainda for presente, o relé acionará uma das saídas para efetuar o *trip* no disjuntor conforme figura 12. [10]

Figura 12 - Exemplo de funcionamento da proteção de sobrecorrente



Fonte: [10]

2.11 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS RELÉS DE PROTEÇÃO

2.11.1 Sobrecorrente temporizada de fase (51) e neutro (51N)

Estima-se primeiro o valor mínimo para a corrente de atuação do relé, que deverá ser um valor maior do que a corrente de carga máxima multiplicada pelo fator de crescimento de carga e por fim deverá ser dividida pela relação de transformação de corrente do TC. [7]

$$I_{partida} > \frac{k \times I_n}{RTC} \quad (2.30)$$

$I_{partida}$: corrente de partida; [A];

I_n : corrente nominal do transformador; [A];

k : fator de aumento de carga;

RTC : relação da transformação de corrente TC;

O valor dessa corrente também deve ser menor do que o valor da corrente de curto-circuito bifásica na área de proteção do relé. [7]

$$I_{partida} < \frac{I_{cc} \times 2\phi}{RTC} \quad (2.31)$$

$I_{cc}2\phi$: é a corrente de curto-circuito bifásica no final do trecho;

Sendo assim, a corrente temporizada de fase I_{51} é: [7]

$$I_{51} = I_{partida} \times RTC \quad (2.32)$$

Considerando 20% de ajuste entre as fases conforme critérios de ajuste da concessionária COPEL, a corrente temporizada de neutro será: [7]

$$I_{51N} = 0,2 \times I_{51} \quad (2.33)$$

Para evitar os efeitos prejudiciais das altas correntes de curto-circuito, a curva escolhida para a unidade de fase temporizada é a mais baixa viável de modo que possibilite a seletividade e coordenação do relé com os demais equipamentos de proteção existentes no sistema elétrico. A equação 2.34 determina o múltiplo da corrente de atuação para uma corrente I. [7]

$$M = \frac{I}{RTC \times I_{partida}} \quad (2.34)$$

M: múltiplo da corrente de atuação de uma unidade temporizada;

I: valor de corrente a qual pretende-se descobrir o tempo de atuação do relé.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DADOS DO SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO

Neste estudo foram demonstrados os cálculos realizados para encontrar os valores das correntes de curto-circuito no sistema elétrico da indústria de plásticos OUROFORM FORMULÁRIOS LTDA, para isso faz-se necessário o levantamento de dados do transformador instalado na indústria conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Dados do transformador da Indústria Ouroform

Potência (kVA)	Tensão Primária (kV)	Tensão Secundária (V)	Impedância (%)	Refrigeração
500	13,8	380/220	5,78	Óleo

Fonte: O autor

3.2 PARÂMETROS DE BASE

Para a formulação do cálculo das correntes de curto-circuito no sistema elétrico faz-se necessário conhecer a impedância elétrica na entrada de serviço do consumidor, esta impedância foi fornecida pela concessionária de energia elétrica conforme a Tabela 4 e a Tabela 5 com os dados do religador, também fornecidos pela concessionária:

Tabela 4 - Impedância no ponto de entrega da concessionária

Componente de sequência direta	Componente de sequência nula
$R1 = 0,19813$	$R0 = 0,68581$
$X1 = 0,91291$	$X0 = 4,47336$
$Z1 = 0,19813 + j 0,91291 = 0,93 \angle 77,75^\circ$	$Z0 = 0,68581 + j 4,47336 = 4,52 \angle 81,28^\circ$

Fonte: COPEL (2018)

Tabela 5 - Religador COPEL

Dados fornecidos pela COPEL	
Fase: 560A	Curva: E
Neutro: 22A	Curva: P

Fonte: COPEL (2018)

3.3 CIRCUITO ESTUDADO

Os métodos de cálculo utilizados neste estudo são de fácil aplicação na elaboração de um projeto elétrico, com o intuito de obter eficiência e assertividade nos cálculos de correntes de curto-circuito de um sistema elétrico. Os resultados são valores análogos ao das correntes de curto-circuito reais.

Foram utilizados como base os parâmetros conforme Tabela 6:

Tabela 6 - Parâmetros de base

Potência de base	Tensão de base	Corrente de base	Impedância de base
SB = 100MVA	VB = 13,8 kV	IB = 4183,6A	ZB = 1,90 Ω
$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot V_{base}}$		$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}}$	

Fonte: O autor

3.3.1 Impedâncias nos ramais

O valor da impedância no ramal de entrada é a soma entre a impedância do cabo usado na derivação da COPEL e a impedância fornecida pela concessionária.

Esta interligação é constituída por 4 cabos de cobre de 35mm². Com uma distância de 14 metros.

Portanto, ela pode ser expressa:

$$Z_{ramal} = Z_{cabo} + Z_{COPEL} \quad (2.35)$$

Sendo a impedância do cabo:

$$RCA = 0,63\Omega / km \quad (2.36)$$

$$XL = 0,11\Omega / km \quad (2.37)$$

Com isso,

$$Z_{cabo} = Z_{1cabo} = Z_{0cabo} = (0,63 + j0,11) \times 0,014 \quad (2.38)$$

$$Z_{cabo} = (0,009 + j0,002) = 0,009 \angle 12,52^\circ \Omega \quad (2.39)$$

3.4 CÁLCULOS DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

Para se obter o valor das correntes de curto-circuito é necessário realizar uma análise tanto das impedâncias de sequência negativa quanto das impedâncias de sequência positiva presentes no ponto de falha. Elas são obtidas por meio da soma das impedâncias acumuladas nos trechos em que a corrente de curto-circuito percorre, considerando também a impedância da derivação da concessionária.

$$Z_{0ramal} = Z_{cabo} + Z_{0COPEL} \quad (2.40)$$

$$Z_{0ramal} = 0,009 \angle 12,52^\circ \Omega + 4,52 \angle 81,28^\circ \quad (2.41)$$

$$Z_{0ramal} = 4,51 \angle 81,22^\circ \quad (2.42)$$

$$Z_{1ramal} = Z_{cabo} + Z_{1COPEL} \quad (2.43)$$

$$Z_{1ramal} = 0,009 \angle 12,52^\circ \Omega + 0,93 \angle 77,75^\circ \quad (2.44)$$

$$Z_{1ramal} = 0,94 \angle 77,2^\circ \quad (2.42)$$

Os resultados das correntes de curto circuito obtidas constam na Tabela 7.

Tabela 7- Correntes de Curto Circuito

Corrente	Valor (A)
$I_{sim3\phi}$	4441,98
$I_{assim3\phi}$	5403,89
$I_{cc2\phi}$	3846,87
$I_{cc1\phi} \text{ Max}$	1957,08
$I_{cc1\phi} \text{ Min}$	325,9

Fonte: O autor

Os valores essenciais para efetuar a parametrização do relé SEPAM de acordo com a Tabela 8 são a corrente de operação da unidade temporizada do relé, dial de tempo, corrente de

operação da unidade de tempo definido, o tempo de atuação da unidade de tempo definido, a corrente de operação da unidade instantânea e a relação de transformação do transformador de corrente.

Tabela 8 - Ajustes do relé SEPAM

Parâmetro	Ajuste	
	Fase	Neutro
Corrente de partida (A)	335	67
Dial de Tempo	0,1	0,1
Corrente de operação da unidade de tempo definida	2680,00	540,00
Tempo de atuação da unidade de tempo definido	0,1	0,1
Corrente de operação da unidade instantânea	2680,00	540,00
RTC	60	

Fonte: O autor

Como o valor encontrado para a corrente de curto-circuito fase-terra foi de 325,9A, para a corrente de atuação da unidade temporizada de fase, foi utilizado um valor superior. Portanto, adotando o valor de 335A como parâmetro, para correntes acima deste valor, a unidade de tempo definida do relé é acionada. O relé operará após atingir o tempo estipulado eliminando assim a falha elétrica do sistema. Foi utilizado um valor equivalente a 20% do valor da unidade temporizada de fase para o valor da corrente de operação da unidade temporizada do neutro.

Para o Dial de tempo foi considerado o mínimo valor possível para satisfazer as condições de coordenação com a religadora da COPEL.

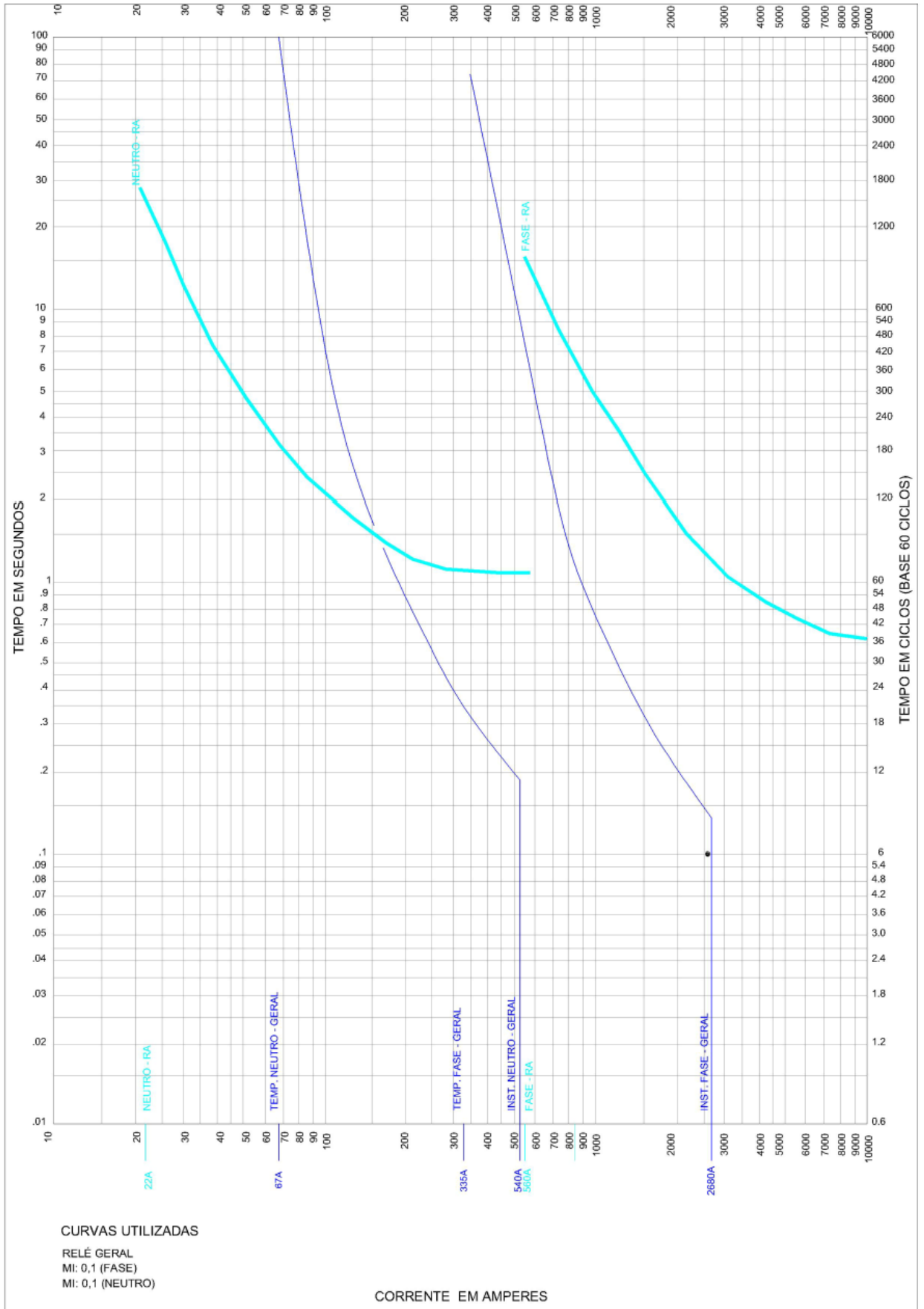
Considerando que a impedância do transformador da indústria é 5,78%, a tensão de base é 13,8kV, potência de base é 500kV A e sua tensão secundária é 380 V. Utilizando as equações para converter a impedância percentual do transformador para os valores de base conforme Tabela 9, têm-se:

Tabela 9 - Corrente de curto-circuito no transformador

Corrente	Valor (A)	Secundário	Primário
$I_{sim3\phi}$	4421,16	13404,21	369,10
$I_{assim3\phi}$	5325,59	22317,24	614,53
$I_{cc2\phi}$	3828,84	11608,38	319,65
$I_{cc1\phi Max}$	748,26	9499,04	261,57

<i>Icc1 ϕ Min</i>	302,95	7455,63	205,30
-----------------------------------	--------	---------	--------

Figura 13 - Coordenograma Relé SEPAM



Fonte: O autor

4 CONCLUSÃO

O estudo de coordenação e seletividade de proteção de sistemas elétricos é importante para a preservação de equipamentos ligados a rede e também das pessoas que têm contato direto com as instalações elétricas. Foi verificado que os dados recolhidos sobre os ramais de alimentação de energia são de extrema importância para se obter valores razoáveis para as correntes de curto-circuito. Portanto, o sistema de proteção elétrica deve ser considerado desde o início do projeto elétrico para reduzir esforços e eventuais custos de manutenção e até mesmo indenizações.

Foi elaborada a análise da seletividade e coordenação do sistema de proteção da indústria de plásticos Ouroform Formulários Ltda., onde encontra-se o transformador de 500kVA. Para isso, foram calculadas as correntes de curto-circuito de média e baixa tensão.

Foi mostrado o estudo teórico dos tipos de proteção utilizados para conter as correntes de curto-circuito e suas peculiaridades. Esse estudo foi utilizado como fundamentação para tratar sobre a utilização do relé de proteção SEPAM.

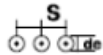
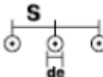
Foi apresentado também o processo utilizado para realizar o estudo de caso. O estudo foi elaborado em etapas que vão desde a escolha dos critérios para realizar o cálculo das correntes de curto-circuito, até o dimensionamento dos TCs. Tendo em vista que um projeto voltado para a coordenação e seletividade pode ser diversificado, ou seja, não há um ajuste ideal e exclusivo para os equipamentos de proteção, o profissional deve propor soluções adequadas ao projeto que está sendo elaborado identificando situações que devem ser priorizadas garantindo diferentes tipos de ajustes aos mesmos.

Compreende-se então, que é de extrema importância que um estudo de coordenação e seletividade deve ser realizado por profissionais capacitados, assegurando que sejam realizados ajustes confiáveis nos equipamentos dos trechos protegidos, garantindo assim, que o ponto do sistema que possuir qualquer defeito seja separado dos demais circuitos no menor tempo possível.

REFERÊNCIAS

- [1] HEWITSON, L.g.; BROWN, Mark; BALAKRISHNAN, Ramesh. **Practical power systems protection**. Burlington: Elsevier, 2005. Disponível em: <<https://catalogue.nla.gov.au/Record/3299721>>. Acesso em: 20 abr. 2018.
- [2] MAMEDE FILHO, João. **Instalações Elétricas Industriais**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2007.
- [3] MAMEDE FILHO, João; MAMEDE, Daniel Ribeiro. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Rio de Janeiro: Grupo Gen, 2011.
- [4] HOROWITZ, Stanley H; PHADKE, Arun G. **Power System Relaying**. Third Edition. Chichester: John Wiley & Sons, 2008
- [5] MAMEDE FILHO, João. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2005.
- [6] KINDERMANN, G. **Curto-circuito**. 2ª ed. Porto Alegre: Sagra Luzzato, 1997
- [7] ALMEIDA, M. A. D. de. **Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos**. Natal: UFRN. 2000.
- [8] OLIVEIRA, Carlos César Barioni de et al. **Introdução a Sistemas Elétricos de Potência: Componentes Simétricas**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2000.
- [9] CAMINHA, Amadeu Casal. **Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.
- [10] ELECTRIC, Schneider. **Parametrizando a função de sobrecorrente de fase nos relés SEPAM série 20, 40 e 80**. Disponível em: <[https://www.schneider-electric.com/resources/sites/SCHNEIDER_ELECTRIC/content/live/FAQS/283000/FA283915/pt_BR/PARAM 50-51.pdf](https://www.schneider-electric.com/resources/sites/SCHNEIDER_ELECTRIC/content/live/FAQS/283000/FA283915/pt_BR/PARAM%2050-51.pdf)>. Acesso em: 20 abr. 2018.
- [11] COPEL. **CRITÉRIOS DE AJUSTES DO SISTEMA DE PROTEÇÃO**: Critérios de Ajustes do Sistema de Proteção. Cascavel: Copel, 2018. <<https://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F28F2A32F6B3B3A5A032574F1005C8FFA>>. Acesso em: 20 abr. 2018.

ANEXO A - RESISTÊNCIAS E REATÂNCIAS INDUTIVAS DOS CABOS UTILIZADOS NO OBJETO DE ESTUDO

Seção (mm ²)	Rcc (A)	CONDUTORES ISOLADOS - CABOS UNIPOLARES AO AR LIVRE ^(B)										Cabos bi e tripolares (B)		Cabo tetrapolar (B)	
		Circuitos 3F										FN / FF / 3F		3F + N / 3F + PE	
		S = de		S = 2 de		S = 10cm		S = 20cm		Trifólio					
												 			
[1]	[2]	Rca	X _L	Rca	X _L	Rca	X _L	Rca	X _L	Rca	X _L	Rca	X _L	Rca	X _L
[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]	[23]	[24]	[25]	[26]		
1,5	12,1	14,48	0,17	14,48	0,23	14,48	0,40	14,48	0,46	14,48	0,16	14,48	0,12	14,48	0,14
2,5	7,41	8,87	0,16	8,87	0,22	8,87	0,38	8,87	0,44	8,87	0,15	8,87	0,12	8,87	0,13
4	4,61	5,52	0,16	5,52	0,22	5,52	0,37	5,52	0,42	5,52	0,14	5,52	0,12	5,52	0,13
6	3,08	3,69	0,15	3,69	0,20	3,69	0,35	3,69	0,40	3,69	0,14	3,69	0,11	3,69	0,12
10	1,83	2,19	0,14	2,19	0,20	2,19	0,34	2,19	0,39	2,19	0,13	2,19	0,10	2,19	0,12
16	1,15	1,38	0,14	1,38	0,19	1,38	0,32	1,38	0,37	1,38	0,12	1,38	0,10	1,38	0,11
25	0,73	0,87	0,13	0,87	0,18	0,87	0,30	0,87	0,35	0,87	0,11	0,87	0,10	0,87	0,11
35	0,52	0,63	0,13	0,63	0,18	0,63	0,29	0,63	0,34	0,63	0,11	0,63	0,09	0,63	0,11
50	0,39	0,46	0,13	0,46	0,18	0,46	0,28	0,46	0,33	0,46	0,11	0,46	0,09	0,46	0,11
70	0,27	0,32	0,12	0,32	0,17	0,32	0,27	0,32	0,32	0,32	0,10	0,32	0,09	0,32	0,10
95	0,19	0,23	0,12	0,23	0,17	0,23	0,25	0,23	0,30	0,23	0,10	0,23	0,09	0,23	0,10
120	0,15	0,19	0,12	0,18	0,17	0,18	0,24	0,18	0,29	0,19	0,10	0,19	0,09	0,19	0,10
150	0,12	0,15	0,12	0,15	0,17	0,15	0,23	0,15	0,29	0,15	0,10	0,15	0,09	0,15	0,10
185	0,099	0,12	0,12	0,12	0,17	0,12	0,23	0,12	0,28	0,12	0,10	0,12	0,09	0,12	0,10
240	0,075	0,09	0,12	0,09	0,17	0,09	0,22	0,09	0,27	0,09	0,10	0,10	0,09	0,09	0,10
300	0,060	0,08	0,11	0,07	0,17	0,07	0,21	0,07	0,26	0,08	0,10	0,08	0,09	0,08	0,10
400	0,047	0,06	0,11	0,06	0,17	0,06	0,20	0,06	0,25	0,06	0,10	—	—	—	—
500	0,037	0,05	0,11	0,05	0,16	0,05	0,19	0,05	0,24	0,05	0,10	—	—	—	—
630	0,028	0,04	0,11	0,04	0,16	0,04	0,18	0,04	0,23	0,04	0,09	—	—	—	—
800	0,022	0,04	0,11	0,03	0,16	0,03	0,16	0,03	0,22	0,04	0,09	—	—	—	—
1000	0,018	0,03	0,11	0,03	0,16	0,03	0,16	0,03	0,21	0,03	0,09	—	—	—	—

Fonte: <http://www.feng.pucrs.br/~fdosreis/ftp/Tese/QEE/QEE_ANEXO1.pdf>. Acesso em: nov de 2018

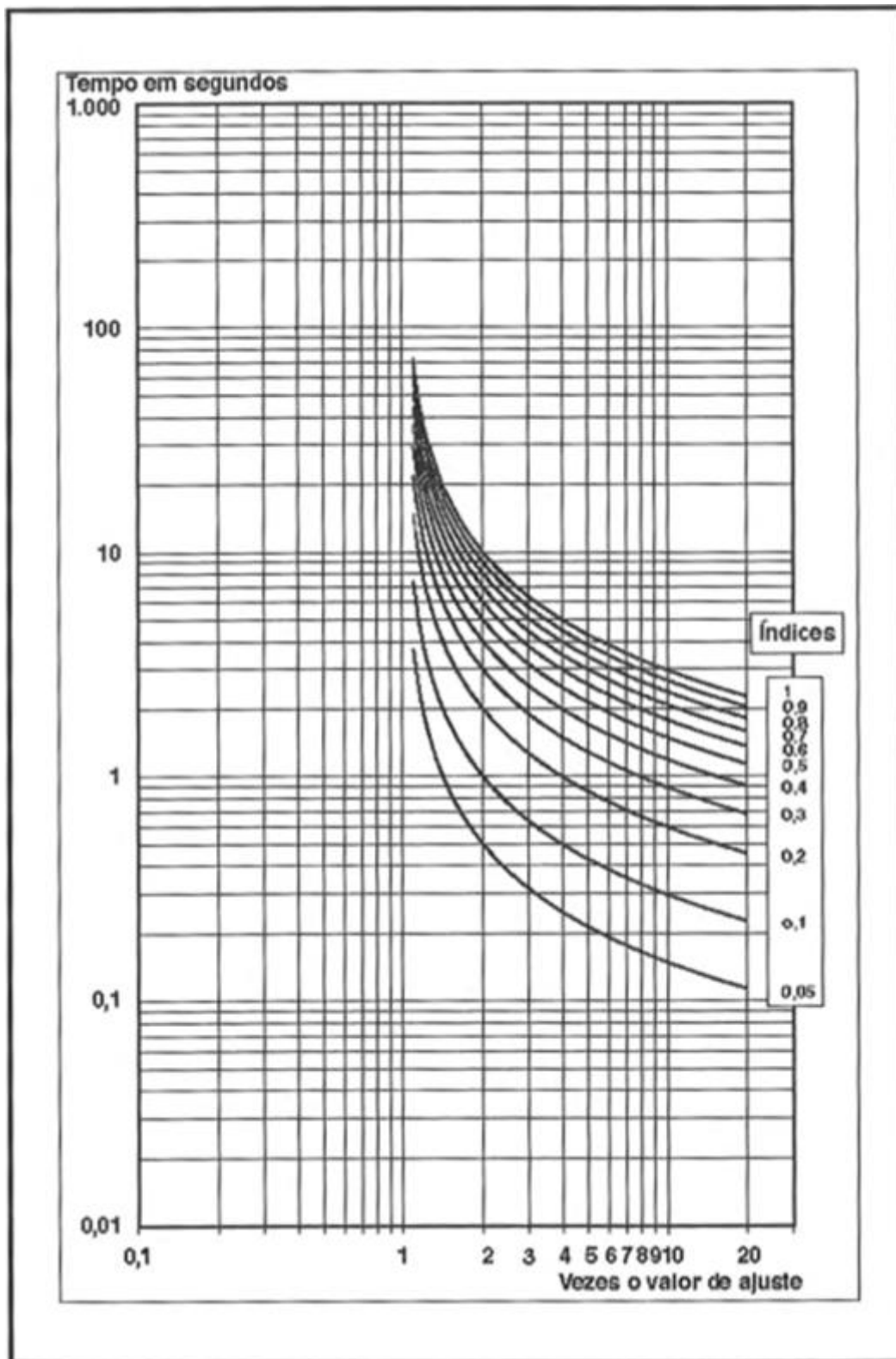
ANEXO B – TABELA ANSI

1	Elemento Principal
2	Relé de partida ou fechamento temporizado
3	Relé de verificação ou interbloqueio
4	Contator principal
5	Dispositivo de interrupção
6	Disjuntor de partida
7	Relé de taxa de variação
8	Dispositivo de desligamento da energia de controle
9	Dispositivo de reversão
10	Chave comutadora de sequência das unidades
11	Dispositivo multifunção
12	Dispositivo de sobrevelocidade
13	Dispositivo de rotação síncrona
14	Dispositivo de subvelocidade
15	Dispositivo de ajuste ou comparação de velocidade e/ou frequência
16	Dispositivo de comunicação de dados
17	Chave de derivação ou descarga
18	Dispositivo de aceleração ou desaceleração
19	Contator de transição partida-marcha
20	Válvula operada eletricamente
21	Relé de distância
22	Disjuntor equalizador
23	Dispositivo de controle de temperatura
24	Relé de sobreexcitação ou Volts por Hertz
25	Relé de verificação de Sincronismo ou Sincronização
26	Dispositivo térmico do equipamento
27	Relé de subtensão
28	Detector de chama
29	Contator de isolamento
30	Relé anunciador
31	Dispositivo de excitação
32	Relé direcional de potência
33	Chave de posicionamento
34	Dispositivo master de sequência
35	Dispositivo para operação das escovas ou curto-circuitar anéis coletores
36	Dispositivo de polaridade ou polarização
37	Relé de subcorrente ou subpotência
38	Dispositivo de proteção de mancal
39	Monitor de condições mecânicas
40	Relé de perda de excitação ou relé de perda de campo
41	Disjuntor ou chave de campo
42	Disjuntor / chave de operação normal
43	Dispositivo de transferência ou seleção manual

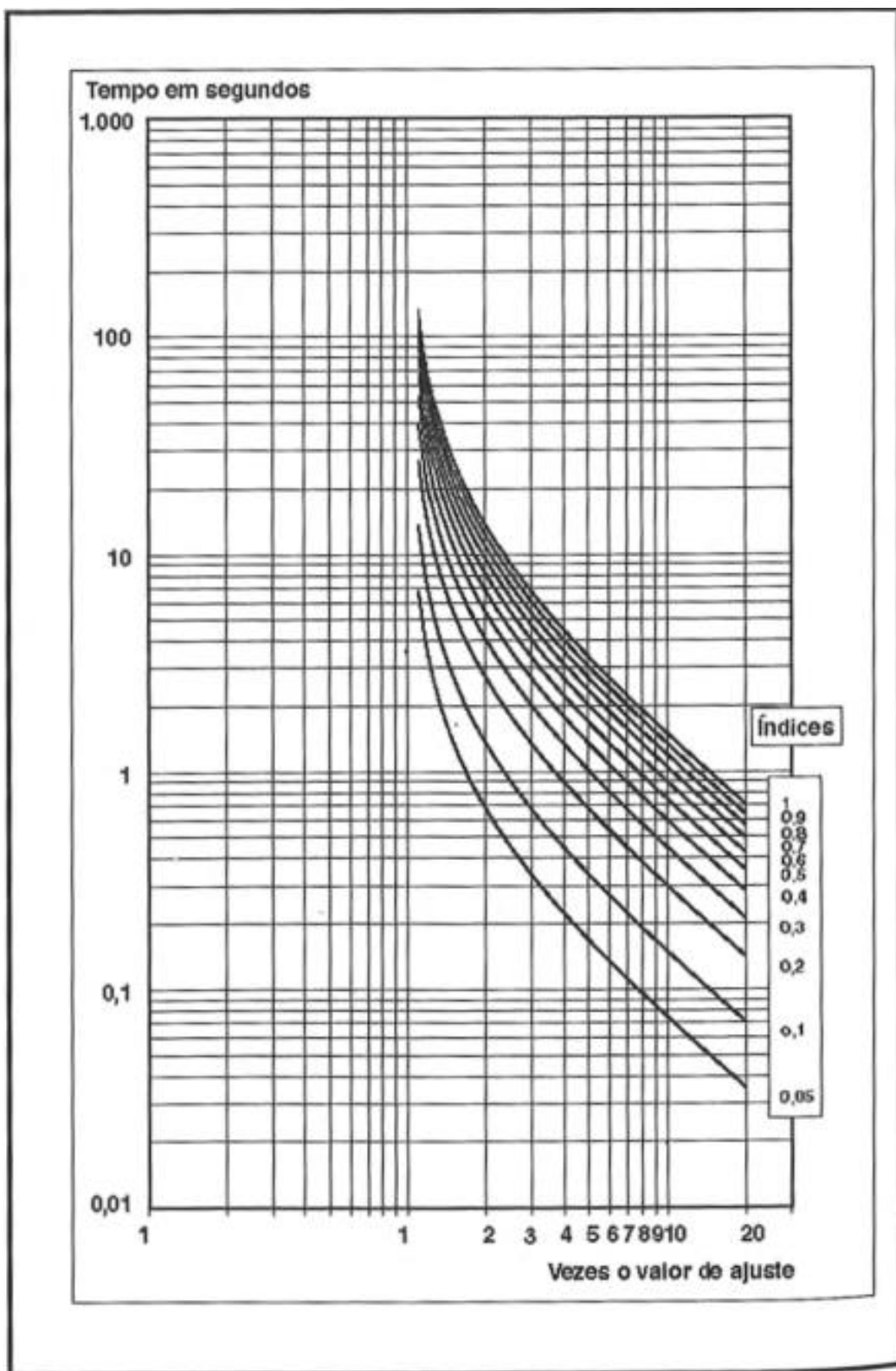
44	Relé de sequência de partida
45	Monitor de condições atmosféricas
46	Relé de reversão ou desbalanceamento de corrente
47	Relé de reversão ou desbalanceamento de tensão
48	Relé de sequência incompleta / partida longa
49	Relé térmico
50	Relé de sobrecorrente instantâneo
51	Relé de sobrecorrente temporizado
52	Disjuntor de corrente alternada
53	Relé para excitatriz ou gerador CC
54	Dispositivo de acoplamento
55	Relé de fator de potência
56	Relé de aplicação de campo
57	Dispositivo de aterramento ou curto-circuito
58	Relé de falha de retificação
59	Relé de sobretensão
60	Relé de balanço de corrente ou tensão
61	Sensor de densidade
62	Relé temporizador
63	Relé de pressão de gás (Buchholz)
64	Relé detetor de terra
65	Regulador
66	Relé de supervisão do número de partidas
67	Relé direcional de sobrecorrente
68	Relé de bloqueio por oscilação de potência
69	Dispositivo de controle permissivo
70	Reostato
71	Dispositivo de detecção de nível
72	Disjuntor de corrente contínua
73	Contator de resistência de carga
74	Relé de alarme
75	Mecanismo de mudança de posição
76	Relé de sobrecorrente CC
77	Dispositivo de telemedição
78	Relé de medição de ângulo de fase / proteção contra falta de sincronismo
79	Relé de religamento
80	Chave de fluxo
81	Relé de frequência (sub ou sobre)
82	Relé de religamento de carga de CC
83	Relé de seleção / transferência automática
84	Mecanismo de operação
85	Relé receptor de sinal de telecomunicação (teleproteção)
86	Relé auxiliar de bloqueio
87	Relé de proteção diferencial
88	Motor auxiliar ou motor gerador

89	Chave seccionadora
90	Dispositivo de regulação (regulador de tensão)
91	Relé direcional de tensão
92	Relé direcional de tensão e potência
93	Contator de variação de campo
94	Relé de desligamento
95	Usado para aplicações específicas
96	Relé auxiliar de bloqueio de barra
97 à 99	Usado para aplicações específicas

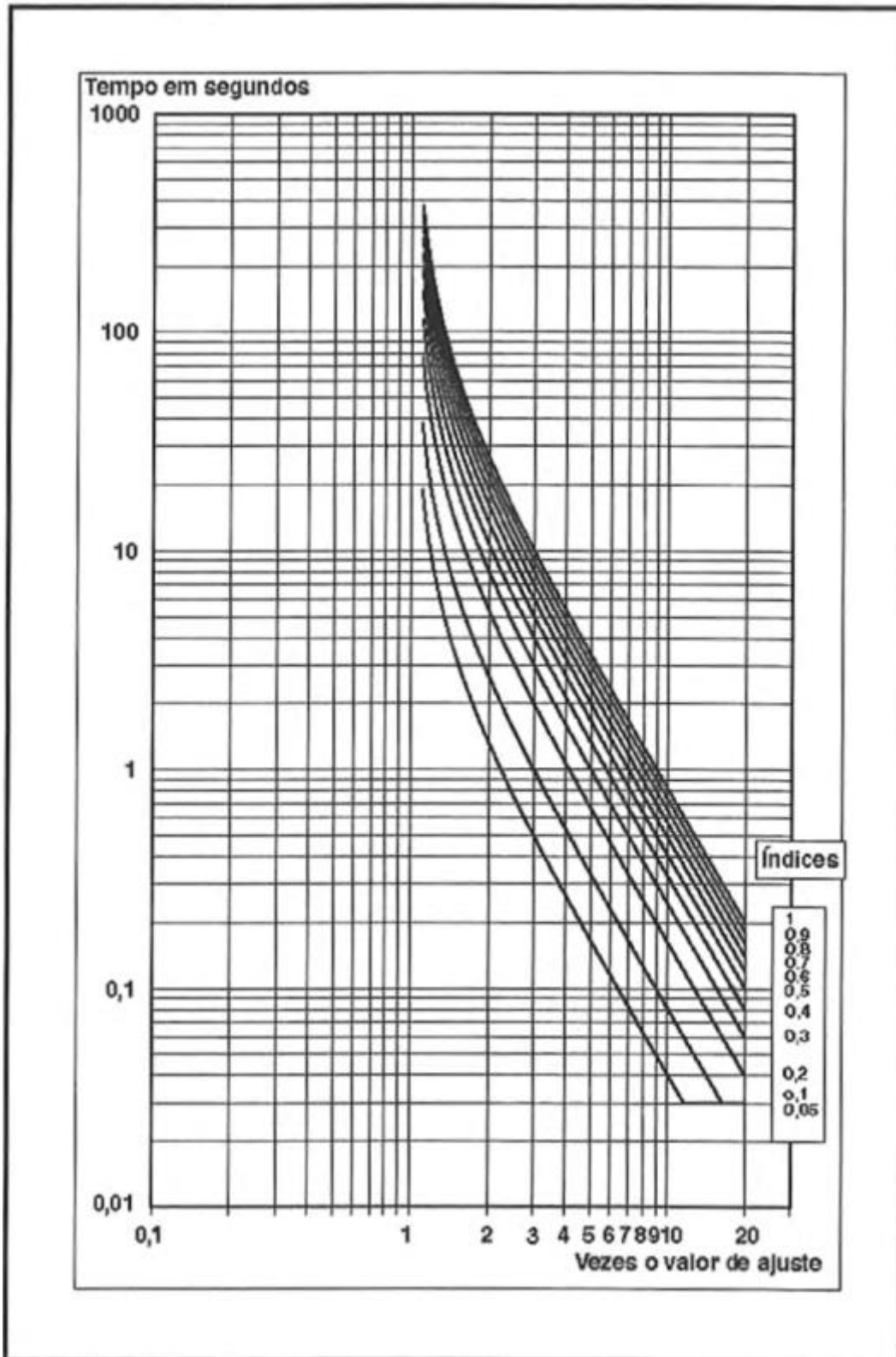
Fonte: <<https://selinc.com/pt/products/tables/ansi/>> Acesso em: nov. de 2018

ANEXO C – CURVA DE TEMPO NORMAMENTE INVERSA DO RELÉ

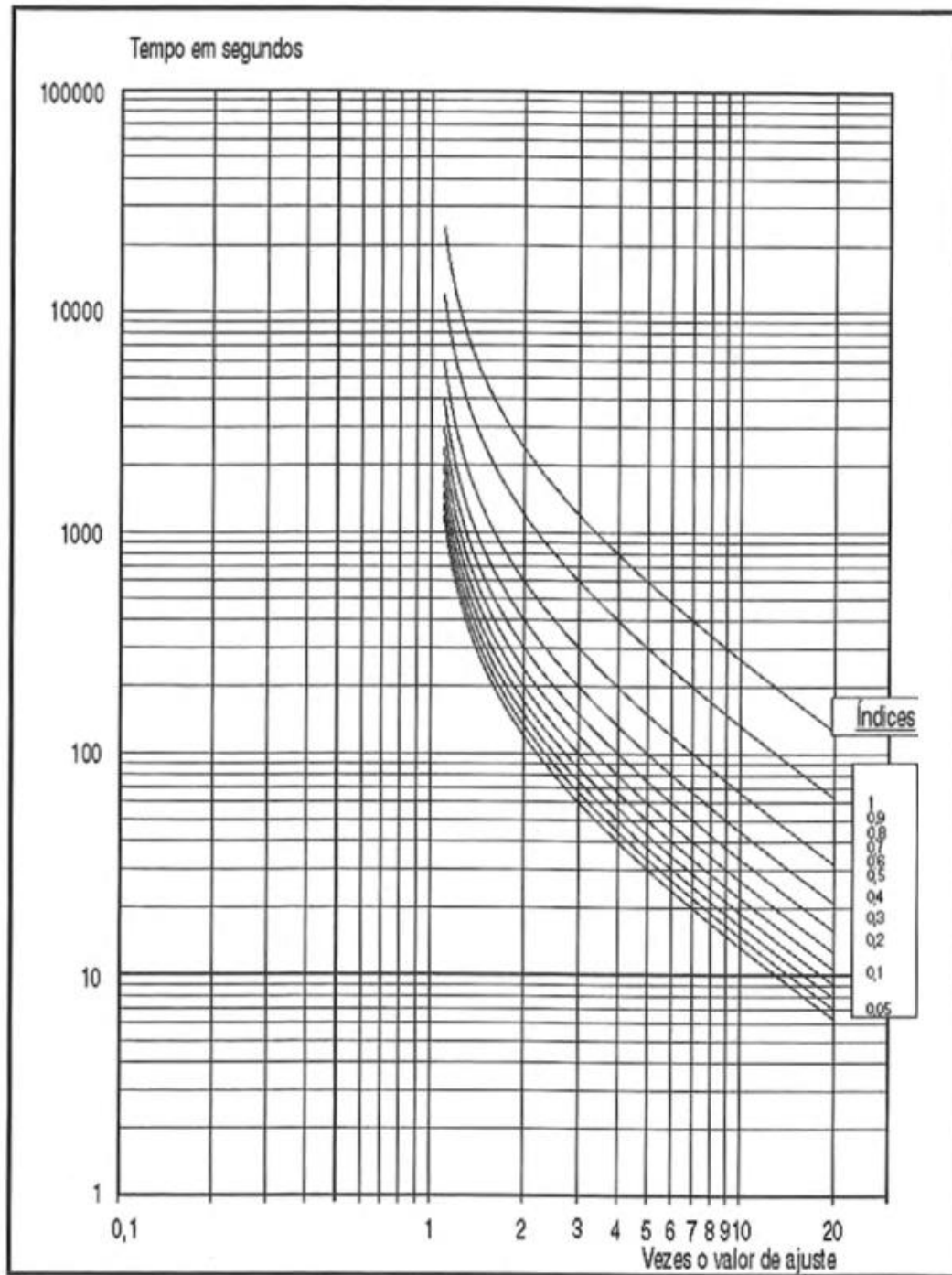
Fonte: [5]

ANEXO D – CURVA DE TEMPO MUITO INVERSA DO RELÉ

Fonte: [5]

ANEXO E – CURVA DE TEMPO EXTREMAMENTE INVERSA DO RELÉ

Fonte: [5]

ANEXO F – CURVA DE TEMPO INVERSA LONGA DO RELÉ

Fonte: [5]

ANEXO G – CRITÉRIOS DE AJUSTES DO SISTEMA DE PROTEÇÃO

1.1. Sistema de Distribuição 13,8kV

1. Unidade temporizada de fase:
 - Até 1000kVA liberar a potência em transformação;
 - Maior que 1000kVA considerar 1,3 x demanda contratada com fator de potência 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 0,3s 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_{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 de 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 protegido através da instalação de fusíveis;
8. Os ajustes adotados devem coordenar com a proteção a montante da Copel.

