



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Natan Bernardo Coelho

**Um Estudo de Caso Sobre a Parametrização de Um Relé Digital de Sobrecorrente**

Florianópolis  
2025

Natan Bernado Coelho

**Um Estudo de Caso Sobre a Parametrização de Um Relé Digital de Sobrecorrente**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Nelson Sadowski

Florianópolis

2025

Bernardo Coelho, Natan

Um Estudo de Caso Sobre a Parametrização de Um Relé Digital de Sobrecorrente / Natan Bernardo Coelho ; orientador, Nelson Sadowski, 2025.

70 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Proteção. 3. Relé Digital. 4. Sobrecorrente. 5. Curto-Circuito. I. Sadowski, Nelson. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Natan Bernado Coelho

**Um Estudo de Caso Sobre a Parametrização de Um Relé Digital de Sobrecorrente**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aceito, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 18 de agosto de 2025.

---

Prof. Roberto Francisco Coelho Dr.  
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Nelson Sadowski  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Miguel Moreto  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Eng. Eletric. Jose Vinicius de Oliveira Pfiffer  
Phase Engenharia Eletrica e Obras LTDA

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, por sempre terem me dado todo o amor, carinho e dedicação necessários. Foram os primeiros a acreditarem em mim, incentivando meus estudos desde a infância e tornando possível cada etapa dessa jornada.

À minha namorada Isabella, minha base e companheira, por ter me dado todo o apoio e carinho nos momentos mais desafiadores. Sempre acreditando em mim e me mostrando que eu seria capaz de superar todos os desafios.

Aos meus avós por todo o cuidado, sempre me recebendo em suas casas durante o período da graduação.

Aos meus sogros, cunhadas e irmão, por todo suporte, conselhos e apoio oferecidos ao longo do caminho.

Aos meus amigos Gabriel de Fraga, Pedro Gonzaga e Pedro Oliveira, por estarem sempre disponíveis quando precisei, dando força e torcendo por mim.

A todos os colegas de graduação, em especial aos amigos Nelson Eduardo e Matheus Vicente, por todas as horas de estudo compartilhadas, trabalhos e projetos feitos juntos.

Por fim, ao professor Nelson Sadowski e ao engenheiro Vinícius Pfiffer por todos os ensinamentos durante a elaboração deste trabalho.

## RESUMO

Na proteção de transformadores em instalações industriais, é utilizado um dispositivo chamado relé de sobrecorrente. A parametrização do relé envolve algumas etapas, como o cálculo das correntes de inrush, o cálculo dos pontos ANSI dos transformadores, o cálculo das correntes de curto-circuito, a análise das curvas a montante do relé e o dimensionamento do transformador de corrente. Este trabalho apresenta a parametrização de um relé de sobrecorrente em uma instalação industrial, detalhando cada uma dessas etapas. Por fim, com a análise dessas etapas, apresenta-se um coordenograma com o tempo de atuação do relé em função da corrente. Todo o estudo é feito com base nas normas técnicas e nas exigências da concessionária de energia. Os resultados demonstram que a atuação do relé é seletiva, com um tempo baixo ou instantâneo para altas correntes, e com uma atuação com um tempo um pouco mais alto para correntes de menor valor, o que faz com que o relé não atue para pequenas oscilações, que não apresentam riscos à instalação, mas continue protegendo contra correntes perigosas.

**Palavras-chave:** Relé; Proteção; Sobrecorrente.

## ABSTRACT

In the protection of transformers in industrial facilities, a device called an overcurrent relay is used. The relay setting involves several steps, such as the calculation of inrush currents, the determination of transformer ANSI points, the calculation of short-circuit currents, the analysis of upstream curves of the relay, and the sizing of the current transformer. This work presents the parameterization of an overcurrent relay in an industrial installation, detailing each of these steps. Finally, based on the analysis, a coordination graph is presented, showing the relay operating time as a function of current. The entire study is conducted based on technical standards and the requirements of the electric utility company. The results demonstrate that the relay operates selectively, with a short or instantaneous time for high currents, and a slightly longer time for lower currents. This ensures that the relay does not operate for small oscillations that pose no risk to the installation, while still providing protection against hazardous currents.

**Keywords:** Relay; Protection; Overcurrent.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Relé Digital da Marca Pextron.....	16
Figura 2. Diagrama Fasorial de Sequência Positiva.....	19
Figura 3. Diagrama Fasorial de Sequência Negativa.....	20
Figura 4. Diagrama Fasorial de Sequência Zero.....	20
Figura 5. Curto-Circuito nos Terminais do Gerador.....	23
Figura 6. Curto-Circuito Longe dos Terminais do Gerador.....	23
Figura 7. Circuito de Sequência Positiva.....	24
Figura 8. Circuito de Sequência Negativa.....	24
Figura 9. Circuito de Sequência Zero.....	25
Figura 10. Ligação do Modelo de Sequência Para o Curto-Circuito Trifásico.....	26
Figura 11. Ligação do Modelo de Sequência Para o Curto-Circuito Monofásico.....	27
Figura 12. Ligação do Modelo de Sequência Para o Curto-Circuito Bifásico.....	27
Figura 13. Ligação do Modelo de Sequência Para o Curto-Circuito Bifásico Terra.....	28
Figura 14. Gráfico X/R em Função da Potência Aparente do Transformador.....	32
Figura 15. Diagrama Representativo de um Transformador de Corrente.....	34
Figura 16. Gráfico ilustrativo de saturação dos transformadores de corrente.....	35
Figura 17. Diagrama Unifilar TC de Proteção.....	36
Figura 18. Característica de Tempo Definido.....	42
Figura 19. Curva Extremamente Inversa.....	44
Figura 20. Característica de Atuação Instantânea.....	45
Figura 21. Coordenograma Exemplo.....	46
Figura 22. Relé Schneider Eletric.....	47
Figura 23. Diagrama de Ligação dos Relés.....	48
Figura 24. Coordenograma das Curvas da Concessionária.....	61
Figura 25. Coordenograma do Tempo de Atuação do Relé 1.....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação da Reatância e Resistência do Transformador de acordo com a Potência	32
Tabela 2 - Coeficientes da Expressão do Tempo de Atuação do Relé .....	43
Tabela 3 - Dados da Concessionária.....	49
Tabela 4 - Dados da Instalação .....	50
Tabela 5 - Dados dos Transformadores .....	50
Tabela 6 - Correntes de Curto-circuito na Barra de Média Tensão.....	50
Tabela 7 - Impedância do Transformador Base Nova.....	52
Tabela 8 - Impedância Total.....	53
Tabela 9 - Curto-Circuito nas Barras de Baixa Tensão .....	58

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVO PRINCIPAL .....	16
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	16
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	17
<b>2 REVISÃO TEÓRICA.....</b>	<b>18</b>
2.1 VALOR POR UNIDADE .....	18
2.2 COMPONENTES SIMÉTRICOS .....	19
2.3 CURTO-CIRCUITO .....	22
2.3.1 <i>Curto-Circuito Trifásico</i> .....	25
2.3.2 <i>Curto-Circuito Monofásico</i> .....	26
2.3.3 <i>Curto-Circuito Bifásico</i> .....	27
2.3.4 <i>Curto-Circuito Bifásico Terra</i> .....	28
2.3.5 <i>Fator de Assimetria</i> .....	29
2.4 A IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DO TRANSFORMADOR .....	29
2.4.1 <i>Transformador</i> .....	30
2.4.2 <i>Corrente de Inrush</i> .....	30
2.4.3 <i>Ponto ANSI</i> .....	31
2.4.4 <i>Impedância Percentual do Transformador (Z%)</i> .....	31
2.5 TRANSFORMADOR DE CORRENTE (TC).....	33
2.5.1 <i>Funcionamento dos TCs</i> .....	33
2.5.2 <i>Classificação</i> .....	34
2.5.3 <i>Erro e Saturação</i> .....	34
2.5.4 <i>TC de Proteção</i> .....	35
2.5.5 <i>Corrente Nominal</i> .....	36
2.6 RELÉS DE PROTEÇÃO .....	38
2.6.1 <i>Classificação dos Relés</i> .....	39
2.6.2 <i>Relé Digital de Sobrecorrente</i> .....	39
2.6.3 <i>Fonte de Alimentação do Relé Digital</i> .....	39
2.6.4 <i>Estudo de Proteção com Relé Digital de Sobrecorrente</i> .....	40
2.6.5 <i>Curva de Proteção</i> .....	40
2.6.6 <i>Unidade Temporizada de Fase de Tempo Definido</i> .....	41
2.6.7 <i>Unidade Temporizada de Fase de Tempo Inverso</i> .....	42
2.6.8 <i>Unidade Instantânea</i> .....	44

<b>3</b>	<b>PARAMETRIZAÇÃO DO RELÉ DIGITAL DE SOBRECORRENTE .....</b>	<b>47</b>
3.1	VALORES DE BASE.....	49
3.2	DADOS DA CONCESSIONÁRIA.....	49
3.3	DADOS DA INSTALAÇÃO .....	48
3.4	CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO NAS BARRAS DE MÉDIA TENSÃO.....	50
3.5	CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO NAS BARRAS DE BAIXA TENSÃO.....	51
3.5.1	<i>Impedância do Transformador.....</i>	<i>51</i>
3.5.2	<i>Impedância Total.....</i>	<i>53</i>
3.5.3	<i>Corrente de Curto-Circuito Trifásica Simétrica .....</i>	<i>54</i>
3.5.4	<i>Corrente de Curto-Circuito Trifásica Assimétrica .....</i>	<i>54</i>
3.5.5	<i>Corrente de Curto-Circuito Monofásica Simétrica.....</i>	<i>55</i>
3.5.6	<i>Corrente de Curto-Circuito Monofásica Assimétrica .....</i>	<i>56</i>
3.5.7	<i>Corrente de curto-circuito fase-terra mínima (com resistência de falta considerada)...</i>	<i>57</i>
3.6	DIMENSIONAMENTO DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE.....	58
3.7	CORRENTE DE <i>INRUSH</i> DOS TRANSFORMADORES .....	59
3.8	PONTO ANSI DOS TRANSFORMADORES .....	59
3.9	AJUSTES DAS CURVAS DE PROTEÇÃO .....	60
3.9.1	<i>Unidades de Fase (50/51).....</i>	<i>62</i>
3.9.2	<i>Unidades de Neutro (50N/51N).....</i>	<i>63</i>
3.10	RESULTADOS .....	63
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>67</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é fundamental na vida dos seres humanos, pois viabiliza os serviços que beneficiam a sociedade. Segundo o IEMA (2025), a energia elétrica é muito importante para a refrigeração de vacinas, medicamentos e alimentos, além de ser fundamental para que possa ocorrer o bombeamento de água potável e para que se tenha iluminação.

Apesar de sua importância, a energia elétrica também apresenta um sério risco se não for tratada da maneira correta. Em função disso, existem normas e dispositivos responsáveis pela segurança e proteção em instalações elétricas. Porém, o dimensionamento incorreto de uma instalação ou a parametrização incorreta de alguns dispositivos pode resultar em danos a equipamentos, incêndios e riscos à vida (MAMEDE; MAMEDE FILHO, 2013).

Um dos principais componentes responsáveis pela proteção de instalações elétricas é o relé de proteção, dispositivo que pode ser visto na figura 1. Existem diversas funções que um relé pode desempenhar, porém este trabalho se limita a explicar a parametrização das funções 50/51 e 50N/51N, que são as funções de sobrecorrente instantâneas e temporizadas de fase e de neutro (MAMEDE; MAMEDE FILHO, 2013).

O relé de sobrecorrente é responsável por detectar sobrecorrentes no sistema e acionar o disjuntor, quando necessário, dessa forma, eliminando o curto-circuito e garantindo a continuação do uso dos serviços essenciais provenientes da energia elétrica de maneira segura. As características principais do relé são sua sensibilidade, capacidade de detectar os valores das grandezas que estão acima dos valores de ajustes na instalação, mesmo que seja um pequeno valor acima, e sua seletividade, capacidade de atuar apenas no ponto onde isso foi identificado (MAMEDE; MAMEDE FILHO, 2013).

Figura 1. Relé Digital da Marca Pextron.



Fonte: PEXTRON (2020)

## 1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVO PRINCIPAL

Ao acompanhar o caso de um incêndio causado pela não atuação de um relé digital de sobrecorrente, por conta da falta de alimentação do relé durante um curto-circuito e os danos decorrentes disso, foi possível compreender a importância e a responsabilidade técnica envolvidas na parametrização desse dispositivo. Surgiu, então, o interesse no estudo do tema, buscando entender detalhadamente seus cálculos, sua parametrização e os fenômenos elétricos em torno do seu funcionamento. Além disso, é evidente que se trata de um importante dispositivo de proteção, amplamente presente nas instalações. Nesse contexto, é fundamental que um bom engenheiro eletricista domine a parametrização de relés de proteção.

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal do trabalho desenvolvido é demonstrar de forma clara e detalhada os cálculos e fenômenos pertinentes à parametrização do relé digital de sobrecorrente. Como resultado a ser alcançado, espera-se proporcionar um melhor entendimento sobre a parametrização dos relés, trazendo, assim, mais segurança e confiabilidade para as instalações.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Descrever as características do funcionamento do relé de sobrecorrente;
- Realizar o levantamento das correntes de curto-circuito;
- Detalhar o cálculo das correntes de *inrush* e do ponto ANSI dos transformadores;
- Dimensionar o transformador de corrente (TC);
- Parametrizar o relé digital de sobrecorrente;
- Analisar o coordenograma das curvas de proteção do relé.

## 2 REVISÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são apresentados os tópicos necessários para a compreensão da parametrização do relé de proteção. Inicialmente, é feita uma apresentação dos valores por unidade e dos componentes simétricos, para que, em seguida, seja possível compreender os cálculos referentes às correntes de curto-circuito, as quais são de fundamental importância na parametrização do relé.

Em seguida, é realizado um estudo sobre o transformador, detalhando como as correntes de *inrush* e o ponto ANSI também devem ser levados em consideração na parametrização do relé.

Também é apresentada uma explicação sobre o transformador de corrente, em que seus cálculos e o fenômeno de saturação são abordados.

O capítulo é finalizado com um estudo sobre o relé digital de sobrecorrente, em que as unidades de fase e de neutro são abordadas, assim como a curva de atuação do relé.

### 2.1 VALOR POR UNIDADE

A fim de simplificar a comparação de grandezas elétricas, no sistema elétrico de potência, são utilizados os valores por unidade (pu), definidos como a divisão do valor real de uma grandeza por um valor de base. Essas grandezas, geralmente corrente, impedância, tensão e potência, passam então a ser representadas em pu. Assim, quando se deseja obter o valor real de uma grandeza, basta multiplicá-la pelo valor de base (SALGADO, 2022).

$$Valor_{PU} = \frac{Valor_{real}}{Valor_{base}} \quad (2.1)$$

Geralmente, os valores que são escolhidos como base são aqueles encontrados nas placas dos equipamentos ou correspondem aos valores nominais das instalações. Conhecendo-se a tensão e a potência de base, é possível calcular corrente e impedância de base. Nas instalações, a tensão, impedância e corrente de base variam de acordo com o lado transformador, primário ou secundário, enquanto a potência permanece constante (MARDEGAN, 2020).

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \times V_{base}} \quad (2.2)$$

$$Z_{base} = \frac{(V_{base})^2}{S_{base}} \quad (2.3)$$

Quando se deseja referir a uma base diferente, é necessário fazer a mudança de base com a fórmula a seguir (SALGADO, 2022):

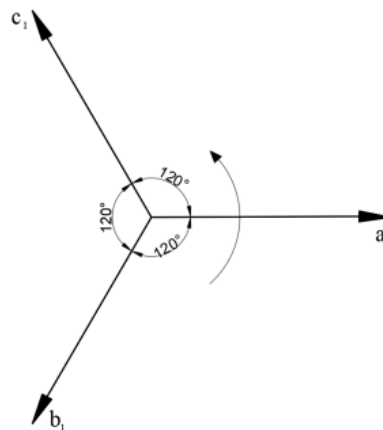
$$Z_{novo}^{pu} = Z_{antigo}^{pu} \left( \frac{S_{base\_novo}}{S_{base\_antigo}} \right) \left( \frac{V_{base\_antigo}}{V_{base\_novo}} \right)^2 \quad (2.4)$$

## 2.2 COMPONENTES SIMÉTRICOS

Em 1918, o Dr. C. L. Fortescue realizou um estudo que resultou na conclusão de que um sistema de três fasores desbalanceados poderia ser decomposto em três sistemas de três fasores balanceados. Os sistemas de fasores balanceados são: sequência zero, sequência negativa e sequência positiva. Embora o teorema tenha sido formulado em função do fasor tensão, ele também se aplica à corrente (KINDERMANN, 1997).

A sequência positiva consiste em três fasores de mesmo módulo, defasados em 120 graus. Um observador veria esses fasores girando com uma frequência angular igual a  $2\pi f$  no sentido anti-horário passando na ordem “a-b-c” (MARDEGAN, 2020).

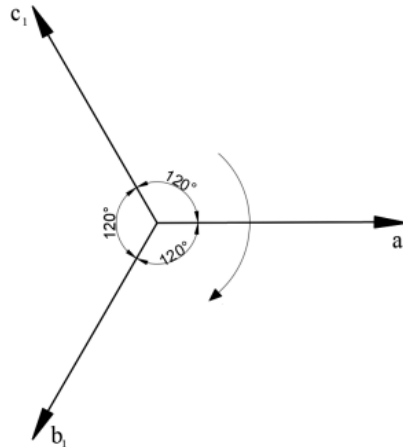
Figura 2. Diagrama Fasorial de Sequência Positiva



Fonte: O Autor, a partir de MARDEGAN (2020)

A sequência negativa consiste em três fasores de mesmo módulo, defasados em 120 graus. Um observador veria esses fasores girando com uma frequência angular igual a  $2\pi f$  no sentido horário passando na ordem “a-c-b” (MARDEGAN, 2020).

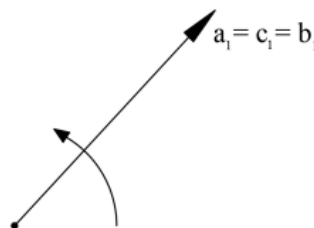
Figura 3. Diagrama Fasorial de Sequência Negativa



Fonte: O Autor, a partir de MARDEGAN (2020)

A sequência zero é composta por três fasores de mesmo módulo e sem defasagem entre si. Um observador veria esses três fasores passando juntos, girando com uma frequência angular igual a  $2\pi f$  no sentido anti-horário (MARDEGAN, 2020).

Figura 4. Diagrama Fasorial de Sequência Zero.



Fonte: O Autor, a partir de MARDEGAN (2020)

Dessa forma, o fasor desbalanceado pode ser representado por meio de fasores balanceados, utilizando as equações a seguir, as quais indicam que o fasor real é a soma dos fasores de sequência zero, positiva e negativa.

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \quad (2.5)$$

$$I_b = I_{b0} + I_{b1} + I_{b2} \quad (2.6)$$

$$I_c = I_{c0} + I_{c1} + I_{c2} \quad (2.7)$$

Utiliza-se um cálculo matricial para essa representação, onde o uso do operador rotacional  $a$  é usado para construir a matriz  $T$ , mostrando a defasagem angular nas sequências positiva e negativa (MARDEGAN, 2020).

$$a = 1 \angle 120^\circ$$

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

Para realizar a representação analítica dos valores do fasor original em função dos fasores de sequência, basta multiplicar a matriz pelos respectivos valores de sequência. Como todos terão o mesmo módulo e apenas a defasagem de 120 graus, os fasores de  $I_b$  e  $I_c$  também são representados por  $I_{a1}$ ,  $I_{a2}$  e  $I_{a0}$ , sendo a defasagem introduzida por meio da multiplicação pelo operador  $a$  (MARDEGAN, 2020).

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \quad (2.9)$$

$$I_b = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} \quad (2.10)$$

$$I_a = I_{a0} + aI_{a1} + a^2I_{a2} \quad (2.11)$$

Onde:

$I_{a0}$  é a corrente de sequência zero

$I_{a1}$  é a corrente de sequência positiva

$I_{a2}$  é a corrente de sequência negativa

$I_a$  é a corrente do fasor a

$I_b$  é a corrente do fasor b

$I_c$  é a corrente do fasor c

### 2.3 CURTO-CIRCUITO

Em um sistema elétrico de potência, pode ocorrer um fenômeno chamado curto-circuito. Esse fenômeno consiste em uma impedância de valor muito baixo entre dois pontos com diferença de potencial, gerando correntes de valores elevados. O curto-circuito é algo indesejado no sistema elétrico, devido aos danos que ele pode causar aos equipamentos. Ele pode acontecer em transformadores, geradores ou nas linhas de transmissão e distribuição, devendo ser eliminado rapidamente pelo sistema de proteção (MEDEIROS, 2017).

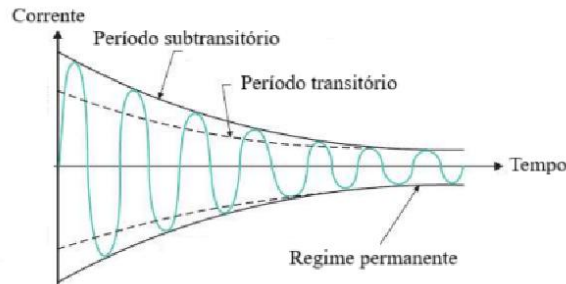
O estudo do curto-circuito nesse trabalho se faz necessário, pois os relés de proteção têm a função de proteger a instalação contra ele. Com o cálculo do valor do curto-circuito é possível definir seus valores de ajuste, de forma que não permitam a ocorrência de curtos na instalação.

O curto-circuito também é chamado de falta. As faltas podem ser transitórias, quando o sistema de proteção atua e, em seguida, com o auxílio do religador, o fornecimento de energia é restabelecido. As faltas também podem ser permanentes, quando, mesmo após a tentativa de restabelecer o fornecimento de energia, verifica-se que o curto-circuito ainda persiste. Nesse caso, é preciso manter o sistema desligado para uma eventual manutenção (SALGADO, 2022).

A corrente de curto-circuito nos terminais do gerador apresenta um valor inicial elevado, que vai diminuindo até atingir o regime permanente, como pode ser visto na figura 5. Esse comportamento acontece devido a reatância transitória do eixo direto do gerador, que inicialmente apresenta um valor pequeno e, com o tempo, atinge um valor constante, quando o

gerador entra em regime permanente. Os períodos da corrente são chamados de subtransitário, transitório e permanente (MAMEDE FILHO, 2007).

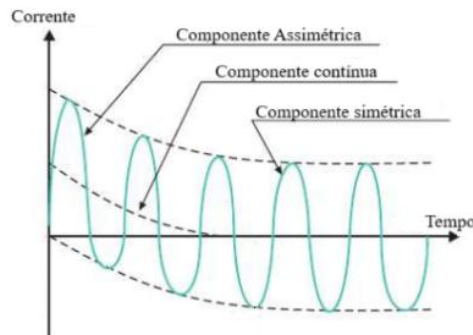
Figura 5. Curto-Circuito nos Terminais do Gerador



Fonte: MAMEDE FILHO (2007)

Quando o curto-circuito ocorre longe dos terminais do gerador, que é o caso do estudo, o comportamento da corrente é diferente do mostrado da figura 5, isso acontece pois nesse caso a impedância da linha de transmissão é muito maior que a impedância do gerador. Nessa situação a corrente é composta por uma componente assimétrica e uma componente simétrica. A componente simétrica apresenta um comportamento permanente. Já a componente assimétrica possui o mesmo valor da componente simétrica, mas somado a uma componente contínua de valor decrescente, como pode ser visto na figura 6. Essa componente contínua ocorre devido a propriedade do fluxo magnético, que não pode variar bruscamente, e depende da relação entre a resistência e a reatância do circuito e do momento da tensão senoidal no instante da falta (MAMEDE FILHO, 2007).

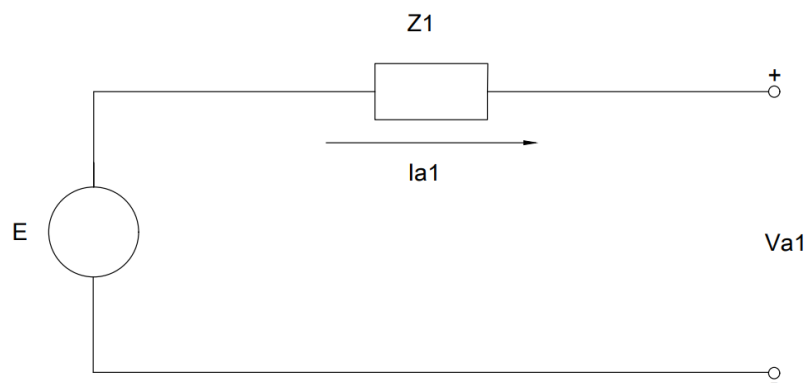
Figura 6. Curto-Circuito Longe dos Terminais do Gerador



Fonte: MAMEDE FILHO (2007)

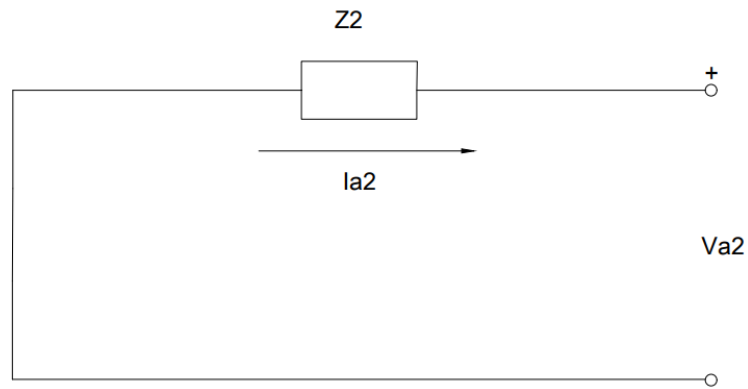
Os curtos-circuitos podem envolver um ou mais elementos e são classificados em fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra e trifásicos. Para o cálculo das correntes de curto circuito, utilizam-se as componentes simétricas e os circuitos de sequência, que podem ser vistos nas figuras 7, 8 e 9. Dessa forma, cada tipo de curto-circuito possui um esquema de ligação diferente, do qual é possível obter a equação da corrente de curto-circuito (MARDEGAN, 2020).

Figura 7. Circuito de Sequência Positiva



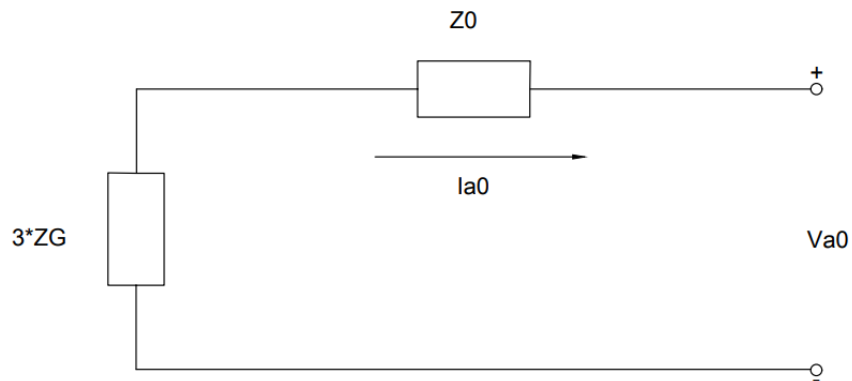
Fonte: O Autor, a partir de MARDEGAN (2020)

Figura 8. Circuito de Sequência Negativa



Fonte: O Autor, a partir de MARDEGAN (2020)

Figura 9. Circuito de Sequência Zero

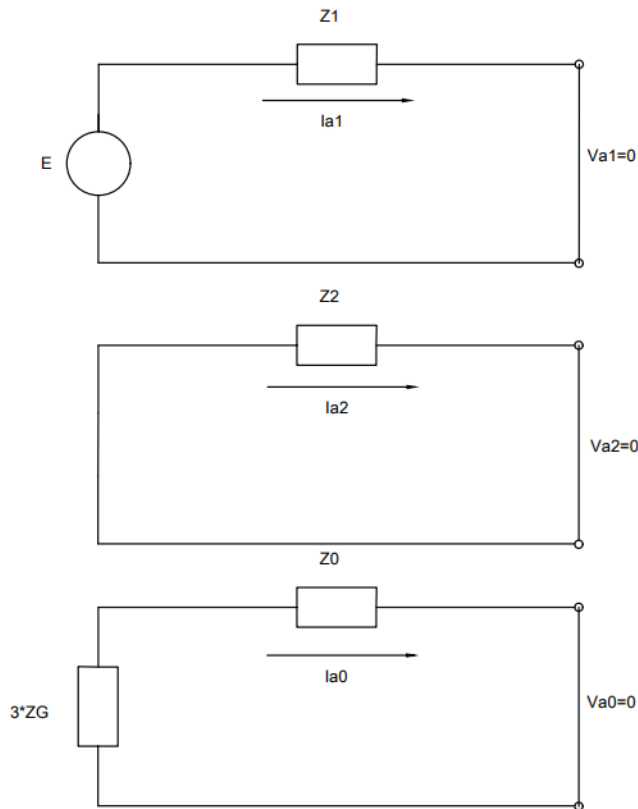


Fonte: O Autor, a partir de MARDEGAN (2020)

### 2.3.1 Curto-Circuito Trifásico

As correntes de curto-circuito trifásico são as de maior valor, por isso seu estudo é tão importante, já que alguns dos componentes de proteção devem ser dimensionados para suportar a maior corrente do sistema. Ao analisar o esquema de sequência do curto circuito trifásico da figura 10, é possível notar que  $V_{a1}$ ,  $V_{a2}$  e  $V_{a0}$  são iguais a 0. Conseqüentemente, as correntes  $I_{a2}$  e  $I_{a0}$  também são nulas, restando apenas a corrente  $I_{a1}$ , cujo valor é definido pela razão entre a tensão  $E$  e a impedância de sequência positiva. Por meio da equação 2.8, é possível determinar o valor da corrente curto-circuito trifásico (MARDEGAN, 2020; MAMEDE FILHO, 2007).

Figura 10. Ligação do Modelo de Sequência Para o Curto-Circuito Trifásico



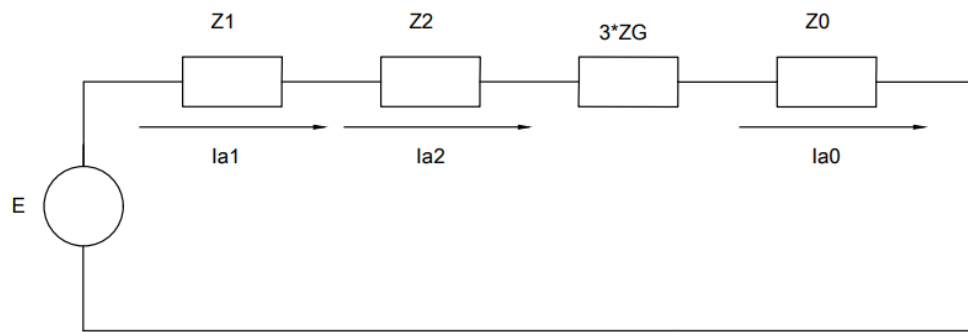
Fonte: O Autor, a partir de MARDEGAN (2020)

$$I_{cc_{3\phi}} = \frac{E}{Z1} \quad (2.12)$$

### 2.3.2 Curto-Circuito Monofásico

As correntes de curto-circuito monofásico são importantes, pois são utilizadas nos ajustes dos valores mínimos dos dispositivos de proteção. Ao analisar o circuito da figura 11, observa-se que  $I_{a1}$ ,  $I_{a2}$  e  $I_{a0}$  são iguais, e são dados pela razão entre tensão  $E$  e a impedância equivalente do circuito, que é obtida com a soma das impedâncias de sequência zero, positiva e negativa. Por meio da equação 2.8, é possível determinar o valor da corrente curto-circuito monofásico (MARDEGAN, 2020; MAMEDE FILHO, 2007).

Figura 11. Ligação do Modelo de Sequência Para o Curto-Circuito Monofásico



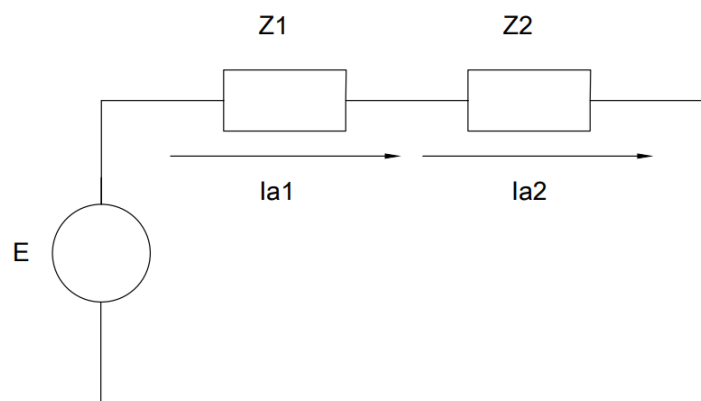
Fonte: O Autor, a partir de MARDEGAN (2020)

$$I_{cc_{1\phi}} = \frac{3E}{Z_1 + Z_2 + 3Z_G + Z_0} \quad (2.13)$$

### 2.3.3 Curto-Circuito Bifásico

Ao analisar o circuito da figura 12, observa-se que  $I_{a0}$  é igual a 0, pois não existe contato com a terra. As correntes  $I_{a1}$  e  $I_{a2}$  são iguais e determinadas pela razão entre a tensão  $E$  e a impedância equivalente do circuito, obtida com a soma das impedâncias de sequência negativa e positiva. Por meio da equação 2.8, é possível determinar o valor da corrente curto-circuito bifásico (MARDEGAN, 2020).

Figura 12. Ligação do Modelo de Sequência Para o Curto-Circuito Bifásico



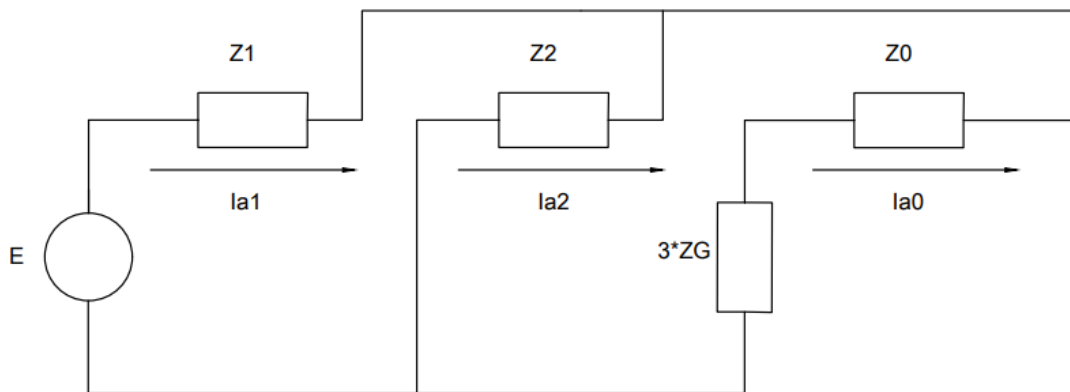
Fonte: O Autor, a partir de MARDEGAN (2020)

$$I_{cc_{2\phi}} = \frac{\sqrt{3}E}{Z_1 + Z_2} \quad (2.14)$$

### 2.3.4 Curto-Circuito Bifásico Terra

Ao analisar o circuito da figura 13, observa-se que  $I_{a1}$  é igual a razão entre a tensão  $E$  e a impedância  $Z_1$ , em série com a associação em paralelo da impedância  $Z_2$  com a associação em série de  $Z_0$  com  $3Z_G$ . Além disso, a corrente  $I_{a2}$  é igual a razão entre a tensão  $V_{a2}$  e  $Z_2$ . Ainda observa-se que  $I_{a0}$  é obtida a partir soma da  $I_{a1}$  com  $I_{a2}$ , com a inversão do sentido. Por meio da equação 2.8, é possível determinar o valor da corrente de curto-circuito bifásico terra (MARDEGAN, 2020).

Figura 13. Ligação do Modelo de Sequência Para o Curto-Circuito Bifásico Terra



Fonte: O Autor, a partir de MARDEGAN (2020)

$$I_{cc_{2\phi T}} = 3 \left( \frac{E - Z_1 \left( \frac{E}{Z_1 + \frac{(Z_0 + 3Z_G) \times Z_2}{(Z_0 + 3Z_G) + Z_2}} \right)}{(Z_0 + 3Z_G)} \right) \quad (2.15)$$

### 2.3.5 Fator de Assimetria

O instante em que estava a tensão no momento do curto e a relação entre a resistência e a reatância do circuito definem a assimetria de uma corrente de curto-circuito. A corrente de curto-circuito é denominada assimétrica quando sua envoltória não é simétrica em relação aos eixos dos tempos. Para esse caso, utiliza-se o fator de assimetria, a fim de estimar a corrente de curto-circuito assimétrica a partir de correntes de curto-circuito simétricas (MARDEGAN, 2020).

$$F_a = \sqrt{1 + 2^{-2\pi \frac{R}{X}}} \quad (2.16)$$

$$Icc_{1\phi A} = F_a \times Icc_{1\phi} \quad (2.17)$$

$$Icc_{2\phi A} = F_a \times Icc_{2\phi} \quad (2.18)$$

$$Icc_{3\phi A} = F_a \times Icc_{3\phi} \quad (2.19)$$

## 2.4 A IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DO TRANSFORMADOR

O transformador é uma máquina que está sempre presente em um sistema elétrico de potência, pois, para que a energia elétrica seja transmitida, é necessário manipular os níveis de tensão e corrente. Após geração da energia, os transformadores fazem a elevação do seu nível de tensão, pois quando a tensão é elevada a corrente é reduzida, e por consequência a bitola dos cabos utilizados é menor, o que diminui os custos e as perdas de energia por efeito joule durante a transmissão. Quando a energia chega no ponto de consumo, o transformador é utilizado novamente para reduzir a tensão para o valor desejado. O estudo do transformador neste trabalho é importante para que possamos entender alguns fenômenos pertinentes ao relé de sobrecorrente (KOTHARI; NAGRATH, 2011).

### 2.4.1 Transformador

Os transformadores têm a função de modificar os níveis de tensão e de corrente entre dois circuitos elétricos. Quando uma tensão senoidal é aplicada entre as duas extremidades da bobina primária do transformador, uma corrente também senoidal percorre os seus enrolamentos, gerando um fluxo magnético variável. Esse fluxo, por meio do acoplamento magnético, é captado pela bobina secundária do transformador que, de acordo com a Lei de Faraday, induz uma tensão nos terminais secundários da bobina, resultando no surgimento de uma corrente (RIES, 2007).

Nas instalações industriais, os transformadores até 300 kVA são protegidos por chaves seccionadoras, os transformadores até 2000 kVA são protegidos por relés digitais de sobrecorrente, com as unidades 50/51 e 50/51N. Para transformadores acima de 2000 kVA, além das proteções de sobrecorrente, são necessárias as proteções de gás, nível de óleo, pressão entre outras (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2013).

### 2.4.2 Corrente de *Inrush*

Quando um transformador é energizado, há o surgimento de uma corrente transitória de magnetização, conhecida como corrente de *inrush*. O valor dessa corrente depende da posição da tensão senoidal no momento da energização, podendo atingir valores entre 8 e 12 vezes a corrente nominal. A duração da corrente de *inrush* é, geralmente 0,1 segundo. Além disso, essa corrente possui predominância na segunda harmônica (KINDERMANN, 2014).

O estudo da corrente de *inrush* nesse trabalho se faz necessário, pois o relé de proteção deve usar esse valor para definir a sua curva de atuação. O relé não deve atuar para os valores da corrente de *inrush*, já que elas acontecem por um instante muito pequeno e são necessárias para a energização dos transformadores.

É importante destacar que a corrente de *inrush* não deve ser confundida com a corrente de magnetização do transformador. Essa última consiste em uma corrente pequena, que normalmente é apenas 0,25% da corrente nominal do transformador (DUARTE, 2018).

De acordo com a (CELESC, 2016), a corrente de *inrush* dos transformadores à óleo até 2000KVA deve ser considerada oito vezes a corrente nominal. Para transformadores com isolamento e encapsulamento em epóxi, deve ser considerado catorze vezes a corrente nominal. Já para transformadores acima de 2000KVA, essa informação deve vir do fabricante.

### 2.4.3 Ponto ANSI

O estudo do ponto ANSI dos transformadores nesse trabalho se faz necessário, pois o relé de proteção deve usar esse valor para definir a sua curva de atuação. O relé deve atuar sempre antes dos valores dos pontos ANSI. Dessa forma, evitando qualquer risco aos transformadores.

O ponto ANSI representa o valor máximo de corrente ao qual um transformador pode ser submetido, por um determinado intervalo de tempo, sem que ele seja danificado. Os valores das correntes e dos tempos admissíveis, seguem as equações a seguir (FONTANA; FURLANETTO; BENEDET, 2020).

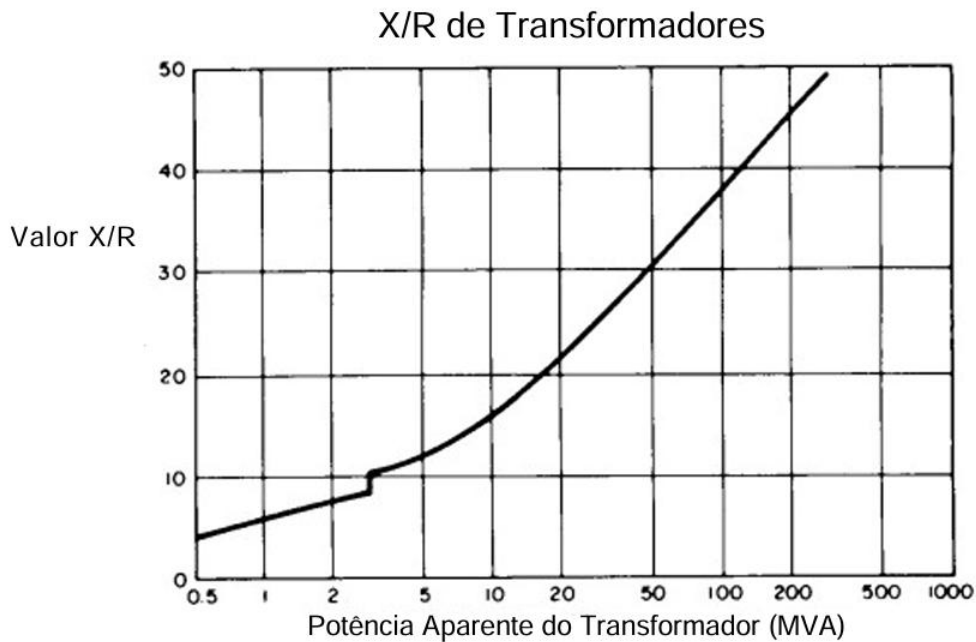
$$I_{ANSI} = \frac{100}{Z\%} \times I_{nom} \quad (2.20)$$

$$T_{ANSI} = \frac{Z\%^2}{8} \quad (2.21)$$

### 2.4.4 Impedância Percentual do Transformador (Z%)

A impedância percentual do transformador é a sua impedância em pu, sendo esse valor obtido por meio do ensaio de curto circuito. O valor dela equivale ao módulo da impedância do transformador em pu. Para determinar o ângulo da impedância, é necessário saber o valor da resistência e da reatância. Quando esses valores não são informados, utiliza-se um gráfico obtido no IEE Std 141-1993, que está sendo mostrado na figura 14, onde a relação entre a reatância e a resistência é apresentada de acordo com a potência do transformador. Os valores de X/R dos transformadores do estudo são mostrados na tabela 1 (MARDEGAN, 2020).

Figura 14. Gráfico X/R em Função da Potência Aparente do Transformador



Fonte: O Autor, a partir de IEEE Std 141 (1993)

Tabela 1 - Relação da Reatância e Resistência do Transformador de acordo com a Potência

S(KVA)	X/R
500	3,5
750	5,0
1000	5,5
1500	7,0

Fonte: O Autor, a partir de IEEE Std 141 (1993)

Com os valores da resistência e da reatância é possível determinar o ângulo da impedância de sequência positiva. Os valores das impedâncias de sequência positiva e negativa no transformador são iguais, por se tratar de um elemento passivo. A impedância de sequência zero depende do tipo de ligação do transformador e do tipo de núcleo. Em transformadores com conexão delta estrela aterrado, a impedância de sequência zero equivale, a aproximadamente 85% do valor da impedância de sequência positiva (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2013).

$$Z_{1_{PU}} = \frac{Z\%}{100} \angle \theta \quad (2.22)$$

Onde:

$$\theta = \arctan(X/R)$$

$$Z2_{PU} = Z1_{PU} \quad (2.23)$$

$$Z0_{PU} = 0,85 \times Z1_{PU} \quad (2.24)$$

As impedâncias de sequência positiva, negativa e zero do transformador são usadas para calcular as correntes de curto-circuito nas barras de baixa tensão do estudo.

## 2.5 TRANSFORMADOR DE CORRENTE (TC)

O estudo do transformador de corrente é necessário, pois a CELESC solicita o seu dimensionamento no estudo de proteção do relé.

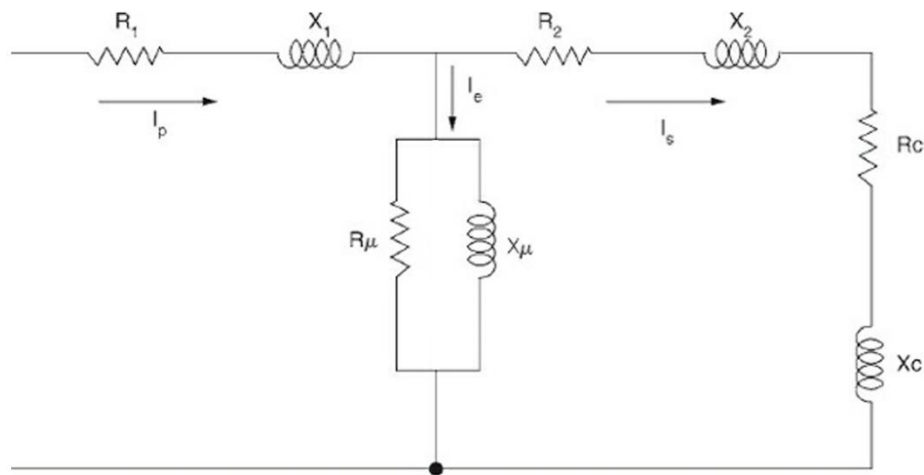
O transformador de corrente (TC) é um equipamento responsável por reduzir os valores da corrente elétrica a níveis adequados para a medição. Essa redução permite que os instrumentos operem com correntes menores, o que se faz necessário, já que os dispositivos de medição e proteção são mais sensíveis e precisam de correntes menores. Além disso, os TCs proporcionam um isolamento entre os aparelhos de medição e proteção e o restante do circuito. Os TCs ainda garantem que a corrente no secundário mantenha a proporção da corrente do primário, sem que haja saturação ou erros acima do previsto em projeto (KINDERMANN, 2005).

### 2.5.1 Funcionamento dos TCs

O funcionamento de um transformador de corrente pode ser explicado com a figura 15. A presença de uma carga no circuito provoca o surgimento de uma corrente primária  $I_p$ , que circula pela impedância do enrolamento primário do TC, representada por  $R1 + jX1$ . A corrente secundária  $I_s$ , por sua vez, percorre a impedância  $R2 + jX2$ , em série com a impedância da carga,  $Rc + jXc$ , provocando uma queda de tensão. Essa queda de tensão altera o fluxo principal e exige uma corrente de magnetização  $I_e$ , que circula pela impedância do ramo de magnetização  $Rm + jXm$ , a corrente  $I_e$  é proporcional a queda de tensão do secundário. Desse

modo, em um transformador de corrente com relação de transformação 1:1, a corrente  $I_p$  é o somatório das correntes  $I_s$  e  $I_e$ . Desse modo, o principal responsável pelo erro de um TC é a corrente de magnetização (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2013).

Figura 15. Diagrama Representativo de um Transformador de Corrente.



(Fonte: MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2013)

### 2.5.2 Classificação

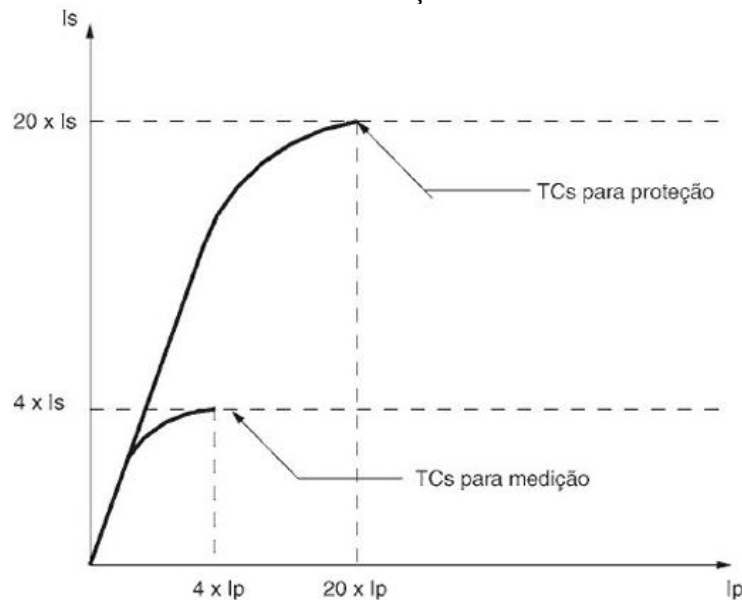
Transformadores de Corrente (TCs) podem ser classificados, de acordo com a impedância, em dois tipos: de baixa impedância e de alta impedância. Os TCs de baixa impedância têm apenas uma espira no enrolamento primário, são classificados pela norma ANSI com a letra L e pela NBR 6856 com a letra B. Os TCs de alta impedância possuem várias espiras no primário, são classificados pela ANSI com a letra H e pela NBR 6856 com a letra A (KINDERMANN, 2005).

### 2.5.3 Erro e Saturação

Os TCs podem ser classificados em TCs de proteção e TCs de medição. Os TCs de proteção são aqueles com uma saturação que só acontece em correntes vinte vezes maiores que a nominal, e com erros chegando em até em 10%. Já os TCs de medição são aqueles que saturam em correntes menores e apresentam erros chegando em até 0,3% (FONTANA; FURLANETTO; BENEDET, 2020).

Para TCs de proteção, é necessário que não aconteça a saturação em altas correntes. Embora na maior parte do tempo, o TC de proteção opere em corrente nominal, em caso de curto-circuito, a corrente que passa pelo TC superará em muitas vezes a corrente nominal. Se, quando isso acontecer, houver uma saturação do TC, os dispositivos de proteção não identificarão a sobrecorrente e não atuarão. Dessa forma o TC de proteção, segundo a NBR 6856, deve apresentar um valor de saturação em pelo menos 20 vezes a corrente nominal. É válido mencionar que quanto maior a saturação, maior a corrente de magnetização, sendo assim o TC de proteção apresenta erros de 2,5%, 5% ou 10% durante o curto-circuito. Quando o TC de proteção opera com a corrente dentro do valor nominal, apresenta valores de precisão similares ao TC de medição (KINDERMANN, 2005; MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2013).

Figura 16. Gráfico ilustrativo de saturação dos transformadores de corrente.

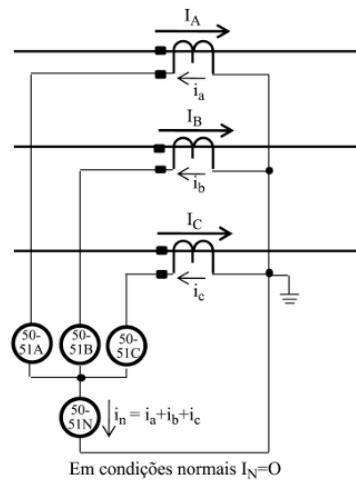


(Fonte: MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2013)

#### 2.5.4 TC de Proteção

A figura 17 apresenta o uso do TC de proteção reduzindo a corrente que chega nos relés de sobrecorrente. desse modo, são usados 3 TCs, um em cada fase, a fim de medir as correntes de fase e compara-las com os valores de ajuste de fase do relé. A corrente resultante de um eventual desequilíbrio passa, já reduzida, pela unidade de neutro do relé, onde ele também faz análise comparando com seus valores de ajuste de neutro (DUARTE 2018).

Figura 17. Diagrama Unifilar TC de Proteção



Fonte: DUARTE (2018)

### 2.5.5 Corrente Nominal

Os TCs são padronizados com 5A no secundário, então a padronização mediante a corrente nominal é referenciada ao primário. A ABNT NBR 6856 afirma que as correntes primárias do TC são de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000, 6000 e 8000A. A norma americana, ANSI afirma que as correntes primárias do TC são de 10, 15, 25, 40, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800, 1200, 3000 e 4000A (KINDERMANN 2005).

Para o cálculo da corrente nominal do TC são analisadas a corrente nominal da instalação e a exigência de não saturação, para melhor compreensão as equações são apresentadas de acordo com (FONTANA; FURLANETTO; BENEDET, 2020; KINDERMANN, 2005).

Em uma instalação industrial, normalmente se tem duas informações de potência, a demanda contratada e a potência instalada. Como o TC precisa suportar a maior corrente que poderá passar por ele, calculam-se as duas correntes, a fim de identificar qual apresentará maior valor.

$$I_n = \frac{P_{\text{demanda Contratada}}}{V \times FP \times \sqrt{3}} \quad (2.25)$$

$$In = \frac{S_{instalada}}{V \times \sqrt{3}} \quad (2.26)$$

É necessário, então, analisar qual das correntes apresenta o maior valor e multiplicá-la pelo FS (fator de serviço). O fator de serviço é utilizado para considerar possíveis alterações na rede da concessionária, o que poderia aumentar o valor do curto circuito. Além disso, o FS também prevê um possível aumento de carga, caso um aumento da potência das instalações ou da demanda contratada aconteça.

$$In_{TC} = In \times FS \quad (2.27)$$

Dessa forma, a corrente nominal do primário do TC é escolhida sendo o primeiro valor padronizado, superior ao calculado, entre os listados pela norma. Como explicado anteriormente, é necessário que não aconteça a saturação no relé, mesmo que a corrente de curto circuito seja 20 vezes maior do que a corrente nominal. Para saber se o valor escolhido foi respeitado, calcula-se o fator de sobrecorrente (FS). É importante salientar que esse FS não é o fator de serviço, mencionado anteriormente. Para calcular, basta dividir a maior corrente de curto circuito, que será a corrente de curto circuito assimétrica, pela corrente escolhida como nominal do TC, se esse valor for inferior a 20 não haverá problemas, caso seja superior, a nova corrente nominal do TC deverá ser a corrente de curto circuito trifásica assimétrica dividida por vinte.

$$FS = \frac{I_{cc_{3\phi A}}}{In_{TC}} \quad (2.28)$$

É necessário determinar a tensão máxima no secundário do TC, e em seguida calcular a potência que se pode conectar no secundário do TC. Para os cálculos de tensão e potência é preciso do Zburden, que é a soma das impedâncias das cargas no secundário do TC (MARDEGAN, 2020; KINDERMANN, 2005).

$$V_{\max\_secundário} = \frac{I_{cc_{3\phi A}}}{RTC} \times Z_{burden} \quad (2.29)$$

No cálculo da potência, é usada a corrente nominal do secundário do TC, que normalmente é 5A. O resultado da equação será o máximo valor de potência aparente consumido pela carga no secundário (KINDERMANN, 2005).

$$S_{secundário} = Z_{burden} \times I_{nominal\_secundário}^2 \quad (2.30)$$

A equação (2.29) segue o padrão ANSI, enquanto a equação (2.30) está de acordo com o padrão da ABNT.

## 2.6 RELÉS DE PROTEÇÃO

Os primeiros relés que surgiram foram os relés eletromecânicos de indução. Eram relés robustos, e em algumas instalações mais antigas ainda podem ser encontrados. Posteriormente, surgiram os relés eletrônicos ou estáticos, estes não obtiveram muito sucesso, pois apresentaram muitas falhas. Por essa razão, o mercado continuou usando os relés eletromecânicos de indução. Por fim, os relés digitais revolucionaram o mercado, apresentando confiabilidade e inovação, e dessa forma passaram a ser usados em todas as instalações. No relé digital as informações de entrada, analógicas, são convertidas em digitais através dos microprocessadores e além de todas as funções dos outros relés, ele ainda apresenta maior velocidade e sensibilidade (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2013).

Os relés de proteção têm a função de coordenar a retirada de operação de determinados elementos aos quais ele protege, sempre que os mesmos forem submetidos a condições anormais às quais eles foram projetados para funcionar. Em geral, o relé faz a medição de uma ou mais grandezas específicas e compara com os valores de ajuste. Baseado nessa comparação ele faz ou não o acionamento dos disjuntores, a fim de proteger a instalação. Os relés devem ser sensíveis, para perceber qualquer anomalia no sistema, seletivos, para tirar de operação apenas componentes defeituosos e rápidos, para não permitir nenhum dano aos componentes (DUARTE, 2018).

### **2.6.1 Classificação dos Relés**

A ANSI (*American National Standards Institute*) elaborou uma tabela em que números representam diferentes funções de proteção. As funções detalhadas neste trabalho são as funções 50/51, relé de sobrecorrente instantâneo e relé de sobrecorrente temporizado, e 50N/51N, relé de sobrecorrente instantâneo de neutro e relé de sobrecorrente temporizado de neutro (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2013).

Os relés também são classificados quanto ao seu aspecto construtivo, podendo ser digitais, eletromecânicos e eletrônicos. No entanto, nas novas instalações só são utilizados relés digitais. Os relés digitais são classificados como relés secundários, pois utilizam do TC para fazer a leitura da corrente. Além disso, tem o seu tempo de atuação de maneira instantânea e temporizada (KINDERMANN, 2005).

### **2.6.2 Relé Digital de Sobrecorrente**

Os relés digitais são gerenciados por microprocessadores, eles fazem a leitura de uma grandeza analógica e convertem em digital, a fim de comparar com os valores de ajuste. Além de desempenhar a função de proteção, ele apresenta a função de monitoramento, onde as informações das grandezas medidas são mostradas em um display. As informações de monitoramento podem ser recebidas, remotamente, por um computador, com a utilização de fibras óticas. A inserção dos ajustes no relé pode ser feita com o auxílio de um computador, onde os ajustes são enviados através de um cabo, ou ainda no próprio relé, já que ele apresenta alguns botões, que em conjunto com o display permitem a navegação pelo menu do relé (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2013; KINDERMANN, 2005).

### **2.6.3 Fonte de Alimentação do Relé Digital**

Durante um curto circuito, a tensão dos transformadores pode cair bruscamente, comprometendo a alimentação dos relés de proteção. Em virtude disso, segundo (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2013), os relés de proteção podem ser alimentados por um banco de baterias em conjunto com um retificador. Em alguns casos, para aumentar a confiabilidade, utilizam-se dois retificadores em paralelo, onde cada retificador tem capacidade para suprir sozinho a demanda das baterias.

De acordo com a (CELESC, 2016), a alimentação do relé precisa contar, obrigatoriamente, com uma fonte capacitiva. Essa fonte deve garantir um funcionamento adequado do relé se faltar alimentação de corrente alternada. Dessa forma a alimentação do relé, em Santa Catarina, pode ser feita exclusivamente com a fonte capacitiva ou com uma fonte capacitiva associada a uma bateria, alimentada por um retificador, a fim de ter mais segurança durante a ocorrência de curtos.

#### 2.6.4 Estudo de Proteção com Relé Digital de Sobrecorrente

A (CELESC, 2016) define que, para a parametrização do relé de proteção, deve ser realizado um estudo de proteção. Esse estudo deve apresentar o cálculo das correntes de curto-circuito fase-terra, fase-terra mínimo, fase-terra assimétrica, trifásica e trifásica assimétrica. Além disso, é necessário calcular os pontos ANSI dos transformadores, as correntes de *inrush* e a parametrização do transformador de corrente, garantido o nível de saturação adequado.

Para determinar o tempo de atuação do relé, se faz o uso de um gráfico bilogarítmico, onde o tempo de atuação do relé é dado de acordo com a corrente. A CELESC disponibiliza a curva de proteção do seu próprio relé, localizado a montante da instalação, que deve aparecer no estudo de proteção. Na parametrização do tempo de atuação do relé, são utilizadas a unidade temporizada de tempo inverso, a unidade temporizada de tempo definido e a unidade instantânea. Com essas unidades, são definidas as curvas de fase, referentes aos curtos envolvendo apenas as fases, e as curvas de neutro, referentes aos curtos envolvendo a terra (CELESC, 2016).

#### 2.6.5 Curva de Proteção

As curvas devem estar posicionadas abaixo do ponto ANSI, garantindo a operação sem danificar os transformadores. Além disso, devem estar acima da corrente nominal, para que se possa operar sem a atuação do relé em condições normais. As curvas também devem permitir que a corrente de *inrush*, calculada em projeto, aconteça sem a atuação do relé. Por fim, devem proteger a instalação de todas as correntes de curto circuito, em caso de curto circuito na instalação, devem atuar 0,2 segundo antes do relé da concessionária (CELESC, 2016).

O funcionamento do relé se inicia a partir do momento em que é identificado que a corrente da instalação ultrapassou o valor da corrente de partida, também chamada de corrente

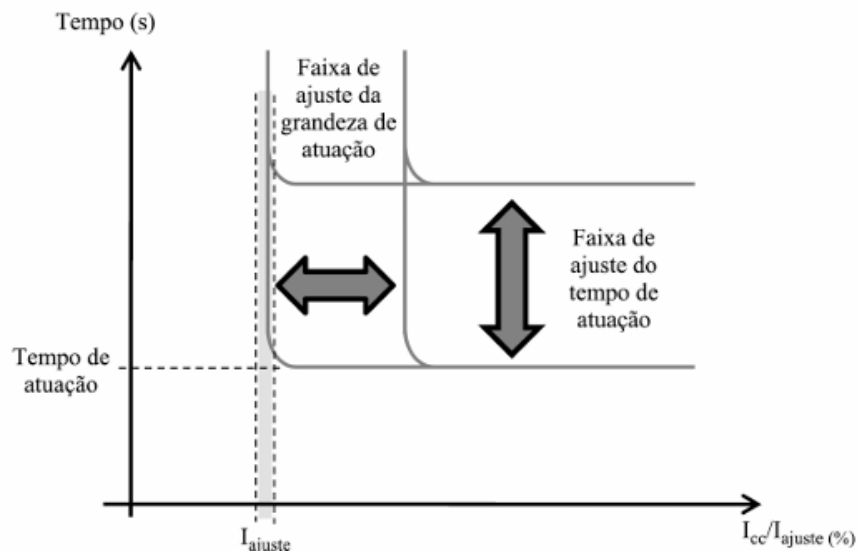
de *trip*. A partir disso, o relé inicia uma contagem, onde o tempo de atuação dependerá do valor da corrente. Em geral, para correntes menores se tem uma temporização maior de atuação do relé, isso permite uma margem de tempo para que a corrente retorne a um valor menor do que o da corrente de partida e pare a contagem, evitando, assim, a atuação do relé desnecessariamente. Quando se tem um valor alto de corrente, a atuação acontece com uma temporização mais baixa ou de forma instantânea. Para definição dos tempos de atuação são utilizadas a unidade temporizada de tempo inverso, a unidade temporizada de tempo definido e a unidade instantânea. É importante ressaltar que cada projeto apresenta necessidades diferentes em relação ao tempo de atuação, por isso o engenheiro deve analisar cada caso de maneira particular (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2013; KINDERMANN, 2005).

O relé atua para curtos-circuitos envolvendo a terra com as unidades temporizadas e instantâneas de neutro. Durante uma falta envolvendo a terra, acontece um desequilíbrio entre as correntes nas fases, esse desequilíbrio faz com que surja uma corrente resultante. Essa corrente é identificada pelas unidades de neutro, por conta da ligação dos 3 TCs em estrela, como foi apresentado na figura 17. A fim de proteger a instalação, o relé atua para os valores de corrente resultante maiores do que os valores de ajuste de neutro (KINDERMANN, 2005).

#### **2.6.6 Unidade Temporizada de Fase de Tempo Definido**

Nessa característica o relé atua em um tempo definido para um determinado valor de corrente de ajuste. Assim, sempre que a corrente ultrapassar a corrente de ajuste, o tempo é contado. Caso ela retorne a um valor de corrente inferior ao do ajuste, a contagem é interrompida e nada acontece. Porém, se continuar em um valor de corrente acima do ajuste por período maior que o período de ajuste, acontece o acionamento do disjuntor. O tempo e corrente de ajuste dessa unidade são escolhidos pelo engenheiro, seguindo os critérios estabelecidos anteriormente (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2013).

Figura 18. Característica de Tempo Definido



Fonte: DUARTE (2018)

### 2.6.7 Unidade Temporizada de Fase de Tempo Inverso

Característica onde a corrente de curto circuito determina o tempo de atuação. Nessa unidade, utiliza-se uma curva de atuação, onde o tempo de atuação é inversamente proporcional à corrente de curto circuito, por isso a nomenclatura de tempo inverso. A curva de atuação segue uma fórmula, onde os fatores variam de acordo com a norma e o tipo de curva desejado, as normas mais conhecidas são a IEC e a IEEE. A tabela 2 mostra os coeficientes de acordo com a norma e o tipo de curva. Os tipos de curva são classificados de acordo com quão inversas elas são, quanto mais inversa for a curva, mais rápida será a atuação do relé (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2013; KINDERMANN, 2005).

Tabela 2 - Coeficientes da Expressão do Tempo de Atuação do Relé

Norma	Tipo de Curva	K	$\alpha$	L	$\beta$
IEC	Inversa	0,14	0,02	0	1
	Moderadamente Inversa	0,05	0,04	0	1
	Muito Inversa	13,5	1	0	1
	Extremamente Inversa	80	2	0	1
IEEE	Moderadamente Inversa	0,515	0,02	1,14	1
	Muito Inversa	196,1	2	4,91	1
	Extremamente Inversa	282	2	1,217	1

Fonte: KINDERMANN (2005)

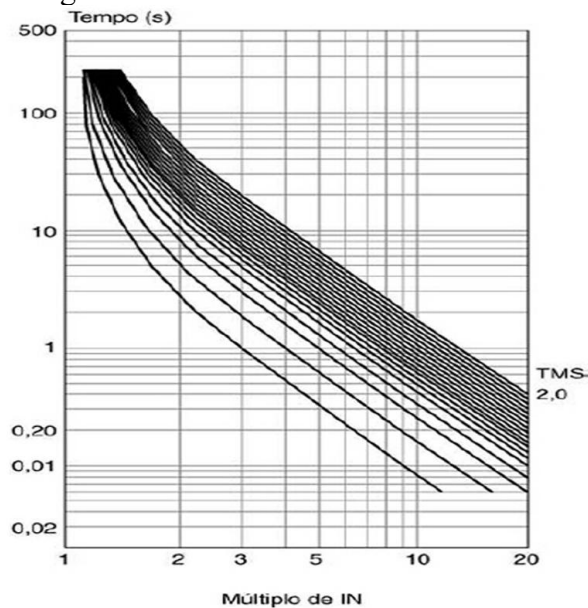
$$t_{atuação\_do\_relé} = T_{curva} \left( \frac{K}{\left( \frac{I_{medido}}{I_{partida}} \right)^{\alpha} - \beta} + L \right) \quad (2.31)$$

Onde:

 $t_{atuação\_do\_relé}$  é o tempo que o relé leva para atuar $T_{curva}$  é o *dial time* $I_{medido}$  é a corrente que passa pelo circuito $I_{partida}$  é a corrente de *trip*

Os valores que não são tabelados na fórmula são o  $T_{curva}$ , também chamado de *dial time*, e o  $I_{partida}$ . Deve-se escolher o *dial time* de forma que o tempo de atuação do relé respeite os critérios estabelecidos anteriormente. Como o  $T_{curva}$  multiplica a curva de atuação, quanto menor ele for, mais rápida será a atuação do relé. A figura 18 mostra a variação da curva extremamente inversa de acordo com variação do *dial time*. (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2013)

Figura 19. Curva Extremamente Inversa



(Fonte: MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2013)

Para definição do  $I_{partida}$  da unidade de fase, calcula-se a corrente nominal da instalação, com base na demanda contratada, e multiplica-se esse valor por um fator K. Esse fator é utilizado para que a contagem do relé aconteça em um valor um pouco acima da corrente nominal, K pode ser até 1,3 para relés digitais. É importante comentar que, se ocorrer um aumento da demanda contratada maior que 20%, uma nova parametrização do relé deve ser feita. Isso é exigido, pois influencia no aumento da corrente nominal (CELESC, 2016).

$$I_{partida} = I_n \times K \quad (2.32)$$

Segundo a (CELESC, 2024), o  $I_{partida\_neutro}$  deve ser 10% da corrente de partida de fase.

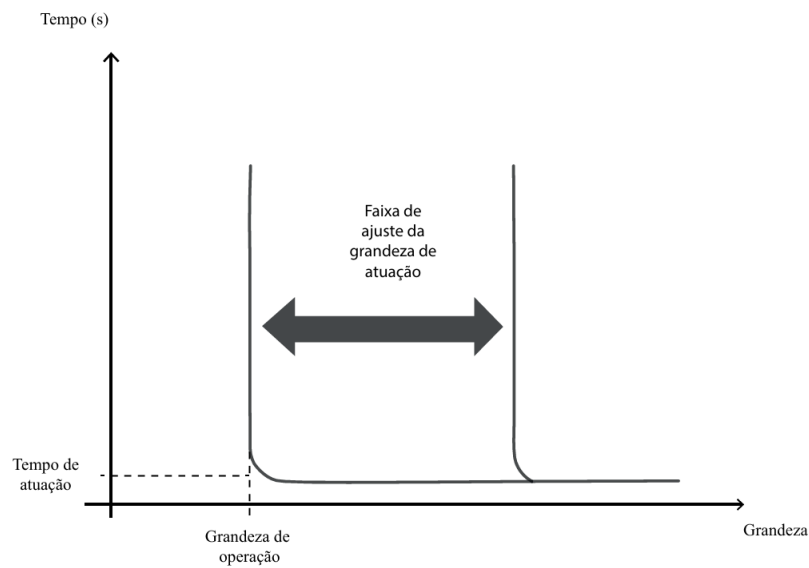
$$I_{partida\_neutro} = I_{partida} \times 0,1 \quad (2.33)$$

### 2.6.8 Unidade Instantânea

Característica onde o relé atua no momento em que a corrente ultrapassa a corrente de ajuste, sem contagem de tempo. Esse valor de ajuste é chamado de corrente instantânea. De acordo com a (CELESC, 2016), deve-se considerar a corrente instantânea sendo o valor da

maior corrente de *inrush*, referente ao transformador que apresentar a maior valor, somada às correntes nominais dos demais transformadores. O resultado dessa soma deve ser multiplicado por um fator de 1,4. Esse cálculo é feito para que, quando os transformadores estiverem sendo energizados, não aconteça a atuação do relé de maneira desnecessária. A corrente Instantânea de neutro deve ser calculada sendo 20% da corrente instantânea de fase. (FONTANA; FURLANETTO; BENEDET, 2020)

Figura 20. Característica de Atuação Instantânea



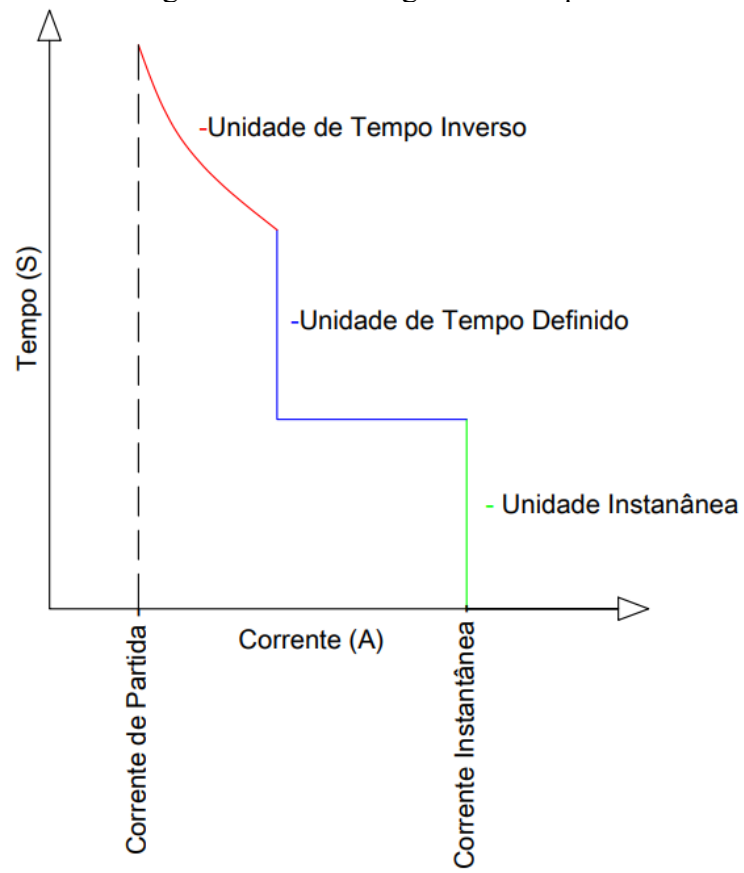
Fonte: DUARTE (2018)

$$I_{\text{instantâneo}} = \left( I_{\text{inrush\_maior\_transformador}} + \sum I_n(\text{outros\_transformadores}) \right) \times 1,4 \quad (2.34)$$

$$I_{\text{instantâneo\_de\_neutro}} = 0,2 \times I_{\text{instantâneo}} \quad (2.35)$$

Com as unidades temporizadas e instantâneas definidas, é possível definir o coordenograma com o tempo de atuação do relé digital de sobrecorrente. O projeto pode combinar as três unidades para garantir os critérios estabelecidos anteriormente.

Figura 21. Coordenograma Exemplo



(Fonte: O Autor, a partir de MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2013)

### 3 PARAMETRIZAÇÃO DO RELÉ DIGITAL DE SOBRECORRENTE

Foi feita a análise de um estudo de caso real do projeto de parametrização de um relé de sobrecorrente em uma instalação industrial do setor de bebidas, cujo nome será preservado por questões de confidencialidade. No estudo de proteção da empresa, foi necessário que um engenheiro desenvolvesse a parametrização do relé de proteção, o que será detalhado no decorrer deste capítulo. O projeto apresentado foi aprovado pela CELESC no ano de 2024.

As parametrizações são feitas através de softwares, e o utilizado nesta parametrização foi o Supercoord. O uso de softwares é importante pela quantidade de etapas que os cálculos exigem durante a parametrização, além de minimizar possíveis erros. A fim de compreender o que deve ser feito na parametrização do relé, todos os cálculos serão descritos de maneira detalhada durante este capítulo.

O relé escolhido para a instalação foi o Vamp 11F, da Schneider Electric, um relé compacto e confiável, usado principalmente para proteção de transformadores em redes de média tensão. Ele apresenta as funções 50/51 e 50N/51N.

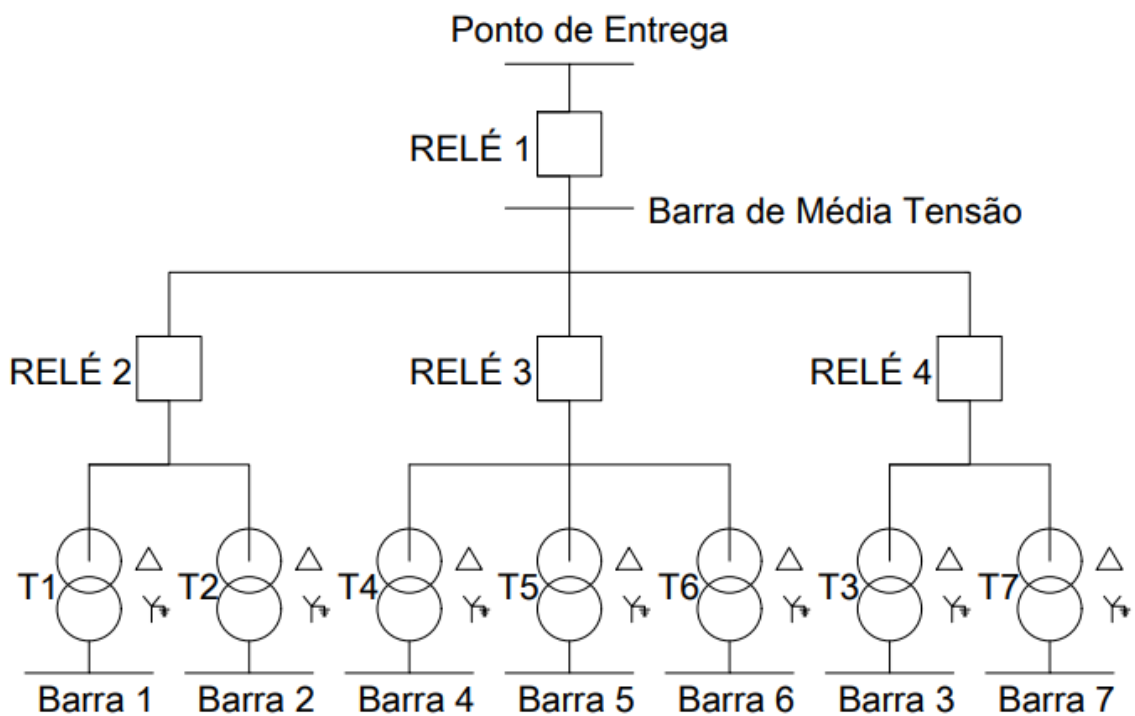
Figura 22. Relé Schneider Electric



Fonte: Schneider Electric

A Figura 23 mostra como é feita a ligação do ponto de entrega da concessionária até as barras de baixa tensão dos transformadores. A tensão na barra de média tensão é 13,8 Kv e na barra de baixa tensão 380 V. Embora a instalação possua quatro relés de proteção, o estudo é baseado apenas no Relé 1, que se trata do relé principal, responsável por proteger toda a instalação. O Relé 1 atua em casos de curto-circuito nas barras de média e baixa tensão. Porém, como ele está a montante dos demais relés, é esperado que, em caso de curto-circuito nas barras de baixa tensão, atue apenas como retaguarda, no caso de uma eventual falha dos Relés 2, 3 e 4, ou seja, só deve operar nessas condições se um dos demais não atuar adequadamente.

Figura 23. Diagrama de Ligação dos Relés



Fonte: O Autor

### 3.1 VALORES DE BASE

Antes de começar os cálculos, foi necessário definir os valores de base. A tensão de base utilizado foi 13,8 kV, pois é a tensão do lado de média e a potência de base foi definida em 100 MVA. A impedância e corrente de base foram calculadas de acordo com as equações 2.2 e 2.3.

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \times V_{base}} = \frac{100M}{\sqrt{3} \times 13800} = 4184A$$

$$Z_{base} = \frac{(v_{base})^2}{S_{base}} = \frac{(13800)^2}{100M} = 1,91\Omega$$

### 3.2 DADOS DA CONCESSIONÁRIA

Foi necessário levantar alguns dados, entre eles as impedâncias, as correntes de curto-circuito no ponto de entrega e as curvas do relé de proteção da concessionária. Esses dados foram fornecidos pela CELESC e estão na tabela 3.

Tabela 3 - Dados da Concessionária

Dados da Concessionária	
Impedância da Rede	1,487+j3,46 PU
Impedância da Malha de Terra	2,807+j14,70 PU
Resistência de Falta	40 $\Omega$
Corrente de Curto-circuito Trifásica Simétrica	1110 A
Corrente de Curto-circuito Trifásica Assimétrica	1182 A
Corrente de Curto-circuito Fase-Terra	561 A
Corrente de Curto-circuito Fase-terra Assimétrica	657 A
Corrente de Curto-circuito Fase-terra Mínima	174 A

Fonte: O Autor

### 3.3 DADOS DA INSTALAÇÃO

Também foram necessários os dados da instalação, como demanda contratada, potência instalada, fator de potência e informações dos transformadores. Esses dados são mostrados nas tabelas 4 e 5. Como é apresentado na tabela 5, a instalação possui sete transformadores de potências variadas.

Tabela 4 - Dados da Instalação

Dados da Instalação	
Demanda Contratada	5500 kW
Potência Instalada	8250 kVA
Fator de Potência	0,92

Fonte: O Autor

Tabela 5 - Dados dos Transformadores

Transformador	Potência Aparente	Corrente Nominal	Tensão (Lado Baixa)	Impedância Percentual	Tipo de Ligação
Transformador 1	1500 kVA	62,8 A	380V	5,50%	D-Ya
Transformador 2	1500 kVA	62,8 A	380V	4,50%	D-Ya
Transformador 3	1500 kVA	62,8 A	380V	4,50%	D-Ya
Transformador 4	1000 kVA	41,8 A	380V	4,50%	D-Ya
Transformador 5	1000 kVA	41,8 A	380V	4,50%	D-Ya
Transformador 6	1000 kVA	41,8 A	380V	4,50%	D-Ya
Transformador 7	750 kVA	31,4 A	380V	4,50%	D-Ya

Fonte: O Autor

### 3.4 CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO NA BARRA DE MÉDIA TENSÃO

A concessionária de energia fornece os dados de curto circuito no ponto de entrega, do lado de média tensão. Como a impedância entre o ponto de entrega e o transformador é muito pequena, não é levada em conta para o cálculo. Assim, as correntes de curto circuito do lado de média tensão são as mesmas fornecidas pela concessionária de energia.

Tabela 6 - Correntes de Curto-circuito na Barra de Média Tensão

Barra de Média Tensão	
Corrente de Curto-circuito Trifásica Simétrica	1110 A
Corrente de Curto-circuito Trifásica Assimétrica	1182 A
Corrente de Curto-circuito Fase-Terra	561 A
Corrente de Curto-circuito Fase-terra Assimétrica	657 A
Corrente de Curto-circuito Fase-terra Mínima	174 A

Fonte: O Autor

### 3.5 CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO NAS BARRAS DE BAIXA TENSÃO

Para o dimensionamento do relé, é necessário também saber as correntes de curto-circuito nas barras de baixa tensão, a fim de que se proteja o circuito contra elas.

#### 3.5.1 Impedância do Transformador

Para calcular as correntes de curto-circuito na barra de baixa tensão, é necessário levar em conta as impedâncias dos transformadores. Para isso, é preciso calcular a impedância de sequência positiva, negativa e zero dos trafos, utilizando o  $Z\%$ . Como ele está na base de potência do próprio transformador, é necessário realizar a mudança de base, utilizando a nova potência adotada no início dos cálculos. Para isso, foi utilizada a equação 2.4, apresentada novamente abaixo.

$$Z_{novo}^{pu} = Z_{antigo}^{pu} \left( \frac{S_{base\_novo}}{S_{base\_antigo}} \right) \left( \frac{V_{base\_antigo}}{V_{base\_novo}} \right)^2$$

$$Z_{novo\_transformador1}^{pu} = 0,055 \left( \frac{100M}{1,5M} \right) \left( \frac{13800}{13800} \right)^2 = 3,667 pu$$

$$Z_{novo\_transformador2\_e\_3}^{pu} = 0,045 \left( \frac{100M}{1,5M} \right) \left( \frac{13800}{13800} \right)^2 = 3,0 pu$$

$$Z_{novo\_transformador4,5\_e\_3}^{pu} = 0,045 \left( \frac{100M}{1M} \right) \left( \frac{13800}{13800} \right)^2 = 4,5 pu$$

$$Z_{novo\_transformador7}^{pu} = 0,045 \left( \frac{100M}{0,75M} \right) \left( \frac{13800}{13800} \right)^2 = 6,0 pu$$

Como explicado no capítulo dois, o valor de  $Z\%$  é o módulo de  $Z1$  do trafo e para achar o ângulo é necessário usar a relação entre a reatância e a impedância, valores que estão na tabela 1. Também é explicado que, na conexão triângulo estrela aterrado, a impedância de

sequência 0 equivale a 0,85 vezes a impedância de sequência positiva e que a impedância de sequência positiva e negativa apresentam o mesmo valor. Foram utilizadas as equações 2.22, 2.23 e 2.24 para calcular as impedâncias dos trafos.

$$Z1_{transformador1}^{pu} = Z\% \angle \tan^{-1} \theta = 3,667 \angle \tan^{-1} 7 = 3,667 \angle 81,86^\circ pu$$

$$Z0_{transformador1}^{pu} = 0,85 \times Z1 = 0,85 \times 3,667 \angle 81,86^\circ = 3,117 \angle 81,86^\circ pu$$

$$Z1_{transformador2\_e\_3}^{pu} = Z\% \angle \tan^{-1} \theta = 3 \angle \tan^{-1} 7 = 3 \angle 81,86^\circ pu$$

$$Z0_{transformador2\_e\_3}^{pu} = 0,85 \times Z1 = 0,85 \times 3 \angle 81,86^\circ = 2,550 \angle 81,86^\circ pu$$

$$Z1_{transformador4,5\_e\_6}^{pu} = Z\% \angle \tan^{-1} \theta = 4,5 \angle \tan^{-1} 5,5 = 4,5 \angle 79,69^\circ pu$$

$$Z0_{transformador4,5\_e\_6}^{pu} = 0,85 \times Z1 = 0,85 \times 4,5 \angle 79,69^\circ = 3,825 \angle 79,69^\circ pu$$

$$Z1_{transformador7}^{pu} = Z\% \angle \tan^{-1} \theta = 6 \angle \tan^{-1} 5 = 6 \angle 78,69^\circ pu$$

$$Z0_{transformador7}^{pu} = 0,85 \times Z1 = 0,85 \times 6 \angle 78,69^\circ = 5,1 \angle 78,69^\circ pu$$

Os valores das impedâncias dos transformadores estão apresentados na tabela 6. É importante salientar que os mesmos cálculos foram feitos para os transformadores 2 e 3, e para os transformadores 4, 5 e 6, pois eles apresentavam as mesmas grandezas para os cálculos de impedância.

Tabela 7 - Impedância do Transformador Base Nova

Transformador	Impedância Z1 e	Impedância Z1 e	Impedância Z0	Impedância Z0
	Z2 (Polar)	Z2 (Retangular)	(Polar)	(Retangular)
1	3,667∠81,86° pu	0,519 + j3,63 pu	3,117∠81,86° pu	0,441 + j3,09 pu
2	3,000∠81,86° pu	0,425 + j2,97 pu	2,550∠81,86° pu	0,361 + j 2,52 pu
3	3,000∠81,86° pu	0,425 + j2,97 pu	2,550∠81,86° pu	0,361 + j 2,52 pu

4	$4,500\angle 79,69^\circ$ pu	$0,805 + j 4,42$ pu	$3,825\angle 79,69^\circ$ pu	$0,685 + j3,76$ pu
5	$4,500\angle 79,69^\circ$ pu	$0,805 + j 4,42$ pu	$3,825\angle 79,69^\circ$ pu	$0,685 + j3,76$ pu
6	$4,500\angle 79,69^\circ$ pu	$0,805 + j 4,42$ pu	$3,825\angle 79,69^\circ$ pu	$0,685 + j3,76$ pu
7	$6,000\angle 78,69^\circ$ pu	$1,177 + j5,88$ pu	$5,100\angle 78,69^\circ$ pu	$1,000 + j5,00$ pu

Fonte: O Autor

### 3.5.2 Impedância Total

Em seguida, foi necessário calcular a impedância total Z2, Z1 e Z0. Para a impedância de sequência positiva total foi somado o valor de sequência positiva da rede com a de sequência positiva dos transformadores. A impedância de sequência negativa total tem o mesmo valor da impedância de sequência positiva total. Como apenas o lado de baixa dos transformadores é aterrado, a impedância de sequência zero total é apenas a impedância de sequência zero dos próprios transformadores. A tabela 7 mostra as impedâncias totais.

Tabela 8 - Impedância Total

Impedância	Impedância Z1 e		Impedância Z0	
	Z2 (Polar)	Z2 (Retangular)	(Polar)	(Retangular)
Impedância 1	$7,368\angle 74,20^\circ$ pu	$2,006 + j7,09$ pu	$3,117\angle 81,86^\circ$ pu	$0,441 + j3,09$ pu
Impedância 2	$6,708\angle 73,43^\circ$ pu	$1,912 + j6,43$ pu	$2,550\angle 81,86^\circ$ pu	$0,361 + j 2,52$ pu
Impedância 3	$6,708\angle 73,43^\circ$ pu	$1,912 + j6,43$ pu	$2,550\angle 81,86^\circ$ pu	$0,361 + j 2,52$ pu
Impedância 4	$8,206\angle 73,78^\circ$ pu	$2,292 + j7,88$ pu	$3,825\angle 79,69^\circ$ pu	$0,685 + j3,76$ pu
Impedância 5	$8,206\angle 73,78^\circ$ pu	$2,292 + j7,88$ pu	$3,825\angle 79,69^\circ$ pu	$0,685 + j3,76$ pu
Impedância 6	$8,206\angle 73,78^\circ$ pu	$2,292 + j7,88$ pu	$3,825\angle 79,69^\circ$ pu	$0,685 + j3,76$ pu
Impedância 7	$9,710\angle 74,08^\circ$ pu	$2,664 + j9,34$ pu	$5,100\angle 78,69^\circ$ pu	$1,000 + j5,00$ pu

Fonte: O Autor

Com as impedâncias totais calculadas é possível calcular as correntes de curto-circuito exigidas pela CELESC.

### 3.5.3 Corrente de Curto-Circuito Trifásica Simétrica

Com a equação 2.12, é possível calcular o curto-circuito trifásico. Como o valor da impedância está em pu, a tensão utilizada na equação também é em pu. A tensão tem valor de 13,8 kV, por conta disso, ao ser dividida pela tensão de base de mesmo valor, será igual a 1. Além disso, a equação está multiplicando o valor da corrente de base, a fim de se encontrar o valor real da corrente. Ainda é preciso explicar que os transformadores 2 e 3 e os transformadores 4, 5 e 6 possuem os mesmos valores e por isso os mesmos cálculos.

$$E^{pu} = \frac{Valor_{real}}{Valor_{base}} = \frac{13800}{13800} = 1$$

$$I_{cc_{3\phi\_barra1}} = \frac{E}{Z1} \times I_{base} = \frac{1}{7,368} \times 4184 = 567,86 A$$

$$I_{cc_{3\phi\_barra2\_e\_3}} = \frac{E}{Z1} \times I_{base} = \frac{1}{6,708} \times 4184 = 623,73 A$$

$$I_{cc_{3\phi\_barra4,5\_e\_6}} = \frac{E}{Z1} \times I_{base} = \frac{1}{8,206} \times 4184 = 509,87 A$$

$$I_{cc_{3\phi\_barra7}} = \frac{E}{Z1} \times I_{base} = \frac{1}{9,710} \times 4184 = 430,89 A$$

### 3.5.4 Corrente de Curto-Circuito Trifásica Assimétrica

Para o cálculo da corrente de curto-circuito trifásica assimétrica, foi utilizada a equação 2.19, onde a corrente de curto-circuito trifásico é multiplicada pelo fator de assimetria, que utiliza a resistência e reatância que é encontrada na tabela 8, com a forma retangular da impedância Z1. Desse modo, foi preciso calcular o valor do fator de assimetria, utilizando a equação 2.16.

$$F_{a\_corrente1} = \sqrt{1 + 2^{-2\pi^{\frac{R}{X}}}} = \sqrt{1 + 2^{-2\pi^{\frac{2,006}{7,09}}}} = 1,157$$

$$Icc_{3\phi A\_barra1} = F_a \times Icc_{3\phi} = 567,86 \times 1,157 = 657,01A$$

$$F_{a\_corrente2\_e\_3} = \sqrt{1 + 2^{-2\pi^{\frac{R}{X}}}} = \sqrt{1 + 2^{-2\pi^{\frac{1,912}{6,43}}}} = 1,144$$

$$Icc_{3\phi A\_barra2\_e\_3} = F_a \times Icc_{3\phi} = 523,73 \times 1,144 = 713,55A$$

$$F_{a\_corrente4,5\_e\_6} = \sqrt{1 + 2^{-2\pi^{\frac{R}{X}}}} = \sqrt{1 + 2^{-2\pi^{\frac{2,292}{7,88}}}} = 1,150$$

$$Icc_{3\phi A\_barra4,5\_e\_6} = F_a \times Icc_{3\phi} = 509,87 \times 1,150 = 586,35A$$

$$F_{a\_corrente7} = \sqrt{1 + 2^{-2\pi^{\frac{R}{X}}}} = \sqrt{1 + 2^{-2\pi^{\frac{2,664}{9,34}}}} = 1,154$$

$$Icc_{3\phi A\_barra7} = F_a \times Icc_{3\phi} = 430,89 \times 1,154 = 497,25A$$

### 3.5.5 Corrente de Curto-Circuito Monofásica Simétrica

Com a equação 2.13, é possível calcular o curto-circuito monofásico. Assim como no curto-circuito trifásico, o valor da tensão de linha, em pu, é igual a 1. Porém, como a tensão usada nesse curto é a tensão de fase, deve ser dividida por  $\sqrt{3}$ . Além disso, a equação está multiplicando o valor da corrente de base, a fim de se encontrar o valor real de corrente. Ainda é preciso salientar que, nesse curto, a impedância de falta da rede não está sendo considerada, por conta disso ZG tem seu valor igual a 0.

$$Icc_{1\phi\_barra1} = \frac{3E}{(Z1 + Z2 + Z0)} \times \frac{I_{base}}{\sqrt{3}} = \frac{3}{17,83} \times \frac{4184}{\sqrt{3}} = 406,44A$$

$$I_{cc_{1\phi\_barra2\_e\_3}} = \frac{3E}{(Z1+Z2+Z0)} \times \frac{I_{base}}{\sqrt{3}} = \frac{3}{15,94} \times \frac{4184}{\sqrt{3}} = 454,64A$$

$$I_{cc_{1\phi\_barra4,5\_e\_6}} = \frac{3E}{(Z1+Z2+Z0)} \times \frac{I_{base}}{\sqrt{3}} = \frac{3}{20,22} \times \frac{4184}{\sqrt{3}} = 358,40A$$

$$I_{cc_{1\phi\_barra7}} = \frac{3E}{(Z1+Z2+Z0)} \times \frac{I_{base}}{\sqrt{3}} = \frac{3}{24,52} \times \frac{4184}{\sqrt{3}} = 295,55A$$

### 3.5.6 Corrente de Curto-Circuito Monofásica Assimétrica

Para o cálculo da corrente de curto-circuito trifásica assimétrica, foi utilizada a equação 2.17, onde a corrente de curto-circuito monofásica é multiplicada pelo fator de assimetria. Desse modo, foi preciso calcular o valor do fator de assimetria utilizando a equação 2.16. A resistência e a reatância utilizadas para o cálculo do fator de assimetria são encontradas com a forma retangular da associação em serie de Z1, Z2 e Z0.

$$F_{a\_corrente1} = \sqrt{1+2^{-2\pi\frac{R}{X}}} = \sqrt{1+2^{-2\pi\frac{4,453}{17,27}}} = 1,181$$

$$I_{cc_{1\phi A\_barra1}} = F_a \times I_{cc_{1\phi}} = 406,44 \times 1,181 = 480,01A$$

$$F_{a\_corrente2\_e\_3} = \sqrt{1+2^{-2\pi\frac{R}{X}}} = \sqrt{1+2^{-2\pi\frac{4,185}{15,38}}} = 1,167$$

$$I_{cc_{1\phi A\_barra2\_e\_3}} = F_a \times I_{cc_{1\phi}} = 454,64 \times 1,167 = 530,56A$$

$$F_{a\_corrente4,5\_e\_6} = \sqrt{1+2^{-2\pi\frac{R}{X}}} = \sqrt{1+2^{-2\pi\frac{5,269}{19,52}}} = 1,169$$

$$I_{cc_{1\phi A\_barra4,5\_e\_6}} = F_a \times I_{cc_{1\phi}} = 358,40 \times 1,169 = 418,97A$$

$$F_{a\_corrente7} = \sqrt{1 + 2^{-2\pi \frac{R}{X}}} = \sqrt{1 + 2^{-2\pi \frac{6,334}{23,69}}} = 1,171$$

$$Icc_{1\phi A\_barra7} = F_a \times Icc_{1\phi} = 295,55 \times 1,171 = 346,08 A$$

### 3.5.7 Corrente de curto-circuito fase-terra mínima (com resistência de falta considerada)

Esse curto-circuito segue as mesmas condições que o curto-circuito monofásico simétrico, porém com a impedância de falta sendo considerada. Antes de calcular a corrente, é necessário passar a impedância de falta para pu, utilizando a expressão 2.1.

$$Z_G = Z_{falta} = \frac{Z_{real}}{Z_{base}} = \frac{40}{1,90} = 21 pu$$

$$Icc_{1\phi\_barra1} = \frac{3E}{(Z1 + Z2 + Z0 + 3Z_G)} \times \frac{I_{base}}{\sqrt{3}} = \frac{3}{69,62} \times \frac{4184}{\sqrt{3}} = 104,09 A$$

$$Icc_{1\phi\_barra2\_e\_3} = \frac{3E}{(Z1 + Z2 + Z0 + 3Z_G)} \times \frac{I_{base}}{\sqrt{3}} = \frac{3}{68,92} \times \frac{4184}{\sqrt{3}} = 105,15 A$$

$$Icc_{1\phi\_barra4,5\_e\_6} = \frac{3E}{(Z1 + Z2 + Z0 + 3Z_G)} \times \frac{I_{base}}{\sqrt{3}} = \frac{3}{71,00} \times \frac{4184}{\sqrt{3}} = 102,06 A$$

$$Icc_{1\phi\_barra7} = \frac{3E}{(Z1 + Z2 + Z0 + 3Z_G)} \times \frac{I_{base}}{\sqrt{3}} = \frac{3}{73,26} \times \frac{4184}{\sqrt{3}} = 98,92 A$$

A tabela 9 mostra todos os curtos-circuitos referentes às barras de baixa tensão, exigidos pela concessionária.

Tabela 9 - Curto-Circuito nas Barras de Baixa Tensão

Barra	$I_{cc_{3\phi}}$	$I_{cc_{3\phi A}}$	$I_{cc_{1\phi}}$	$I_{cc_{1\phi A}}$	$I_{cc_{1\phi}}(RF)$
Barra 1	567,86 A	657,01 A	406,44 A	480,01 A	104,09 A
Barra 2	623,73 A	713,55 A	454,64 A	530,56 A	105,15 A
Barra 3	623,73 A	713,55 A	454,64 A	530,56 A	105,15 A
Barra 4	509,87 A	586,35 A	358,40 A	418,97 A	102,06 A
Barra 5	509,87 A	586,35 A	358,40 A	418,97 A	102,06 A
Barra 6	509,87 A	586,35 A	358,40 A	418,97 A	102,06 A
Barra 7	430,89 A	497,25 A	295,55 A	346,08 A	98,92 A

Fonte: O Autor

### 3.6 DIMENSIONAMENTO DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE

Para o dimensionamento do TC, foram calculadas as correntes nominais de acordo com a demanda contratada e com a potência instalada, a fim de se descobrir o maior valor de corrente, usando as expressões 2.25 e 2.26.

$$I_n = \frac{P_{\text{demanda\_Contratada}}}{V \times FP \times \sqrt{3}} = \frac{5500k}{13800 \times 0,92 \times \sqrt{3}} = 250,1A$$

$$I_n = \frac{S_{\text{instalada}}}{V \times \sqrt{3}} = \frac{8250k}{13800 \times \sqrt{3}} = 345,2A$$

Como o valor da corrente calculado com base na potência instalada foi o maior, ele foi utilizado para o cálculo da corrente nominal do TC. Adotou-se um fator de serviço de 1,5, a fim de prever possíveis alterações na rede da concessionária e um eventual aumento de carga na instalação. Para o cálculo da corrente nominal do TC, foi utilizada a expressão 2.27.

$$I_{n_{TC}} = I_n \times FS = 345,2 \times 1,5 = 517,7A$$

Para conferir se esse valor atende ao critério da saturação, dividiu-se a maior corrente de curto circuito encontrada por ele, utilizando a equação 2.28. A maior corrente de curto-circuito foi a trifásica assimétrica da barra de média tensão.

$$FS = \frac{I_{cc_{3\phi A}}}{I_{n_{TC}}} = \frac{1182}{517,7} = 2,3$$

Como o critério foi atendido, utilizou-se como corrente o valor normativo mais próximo do valor calculado, sendo então o TC de 600/5. Em seguida, foi calculada a tensão máxima do secundário, onde o  $Z_{burden}$  tem valor de 0,350 ohms, valor da impedância do relé, cabos de conexão e do TC, e também a potência máxima no secundário, utilizando as equações 2.29 e 2.30.

$$V_{\max\_secundário} = \frac{I_{cc_{3\phi A}}}{RTC} \times Z_{burden} = \frac{1183}{\frac{600}{5}} \times Z_{burden} = 3,4V$$

$$S_{\text{secundário}} = Z_{burden} \times I_{\text{nominal\_secundário}}^2 = 0,350 \times 5^2 = 8,8VA$$

### 3.7 CORRENTE DE *INRUSH* DOS TRANSFORMADORES

Foi necessário analisar qual transformador apresentava a maior corrente de magnetização transitória. As maiores correntes de *inrush* foram dos três primeiros transformadores, que apresentaram K igual a 14, conforme definido na norma da CELESC, pois possuem isolamento e encapsulamento em epóxi. A corrente nominal deles é igual a 62,8 A.

### 3.8 PONTO ANSI DOS TRANSFORMADORES

Foram calculados as correntes e os tempos para definir os pontos ANSI dos transformadores. Para isso, foram utilizadas as equações 2.20, e 2.21. Os pontos ANSI são utilizados, para que na definição do tempo de atuação do relé, se saiba onde os transformadores podem ser danificados e dessa forma seja ajustada a atuação do relé antes desse ponto.

$$I_{ANSI\_transformador1} = \frac{100}{Z\%} \times I_{nom} = \frac{100}{5,5} \times 62,8 = 1141,8A$$

$$I_{ANSI\_transformador2\_e\_3} = \frac{100}{Z\%} \times I_{nom} = \frac{100}{4,5} \times 62,8 = 1395,6A$$

$$I_{ANSI\_transformador4,5\_e\_6} = \frac{100}{Z\%} \times I_{nom} = \frac{100}{4,5} \times 41,8 = 928,9A$$

$$I_{ANSI\_transformador7} = \frac{100}{Z\%} \times I_{nom} = \frac{100}{4,5} \times 31,4 = 697,7A$$

$$T_{ANSI\_transformador1} = \frac{Z\%^2}{8} = \frac{5,5^2}{8} = 3,8S$$

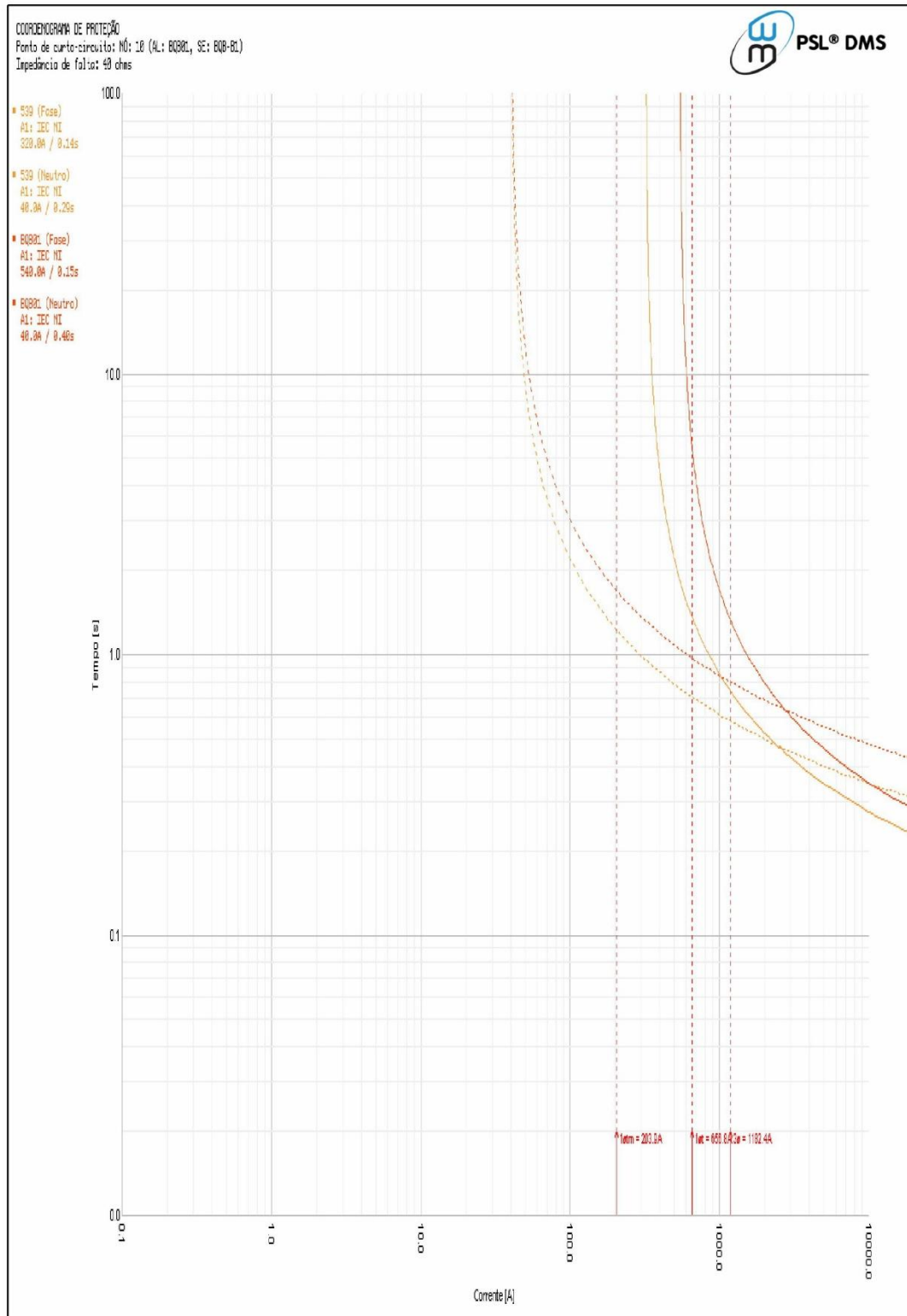
$$T_{ANSI\_transformador2,3,4,5,6\_e\_7} = \frac{Z\%^2}{8} = \frac{4,5^2}{8} = 2,5S$$

### 3.9 AJUSTE DAS CURVAS DE PROTEÇÃO

Com todos os dados calculados, é possível definir as curvas de proteção, seguindo os critérios de ficar abaixo do ponto ANSI, ficar acima da corrente nominal, permitir que a corrente de *inrush* calculada em projeto aconteça, proteger a instalação de todas as correntes de curto-circuito e, ainda, em caso de curto-circuito, atuar antes do relé da concessionária.

A figura 24 mostra o coordenograma das curvas da concessionária. As curvas laranja e vermelha são as curvas dos dois relés da CELESC, a figura foi fornecida pela própria concessionária e os dados para sua representação em outros programas estão descritos na figura. O relé do estudo deve atuar 0,2 segundo antes dessas curvas em todos os pontos, são duas curvas normalmente inversas.

Figura 24. Coordenograma das Curvas da Concessionária.



Fonte: CELESC

### 3.9.1 Unidades de Fase (50/51)

Primeiramente, foi calculada a corrente de partida, corrente na qual o relé começa a contagem para o acionamento do disjuntor. Foi utilizada a expressão 2.32, com um K escolhido de 1,1, por um questão de escolha do projetista. Dessa forma, a contagem do relé se inicia sempre que a corrente ultrapassar em 10% a corrente nominal. A corrente nominal foi calculada de acordo com a demanda contratada, seguindo a expressão 2.25.

$$I_{partida} = I_n \times K = 250,1 \times 1,1 = 275,1 A$$

A unidade usada para os menores valores de corrente foi a unidade temporizada de tempo inverso. Desse modo, foi usada a equação 2.31. A CELESC tem solicitado, nos seus projetos, um *dial time* de 0,2 e o uso da curva extremamente inversa. Dessa forma, foi escolhida a curva extremamente inversa pela norma da IEC e o dial time de 0,2. Se definiu que essa unidade atuaria entre 275,1 A e 300 A, pois, caso contrário, a curva acabaria passando pelos pontos ANSI dos transformadores. Observou-se que o tempo de atuação seria relativamente longo, acima 84 segundos, o que é algo aceitável, já que essa faixa de corrente não apresenta nenhum risco à instalação. Como essa curva começa apenas em 84 segundos, não será possível perceber-la com precisão no coordenograma.

$$t_{atuação\_do\_relé} = T_{curva} \left( \frac{K}{\left( \frac{I_{medido}}{I_{partida}} \right)^{\alpha} - \beta} + L \right) = 0,2 \left( \frac{80}{\left( \frac{I_{medido}}{275,1} \right)^2 - 1} + 0 \right)$$

Por conta dos pontos ANSI dos transformadores, definiu-se que a unidade de tempo definido atuaria para valores acima de 300 A e menores do que o valor da corrente de ajuste instantâneo, que posteriormente foi definida em 1626,24 A. Para qualquer valor acima de 300 A e abaixo da corrente de ajuste instantâneo, haverá a atuação do relé no tempo de 0,3 segundos, tempo escolhido por não apresentar risco à instalação, por respeitar a coordenação com as curvas a montante e por proteger os pontos ANSI dos transformadores.

Para calcular a corrente de ajuste instantâneo, foi utilizada a equação 2.34, onde foi somado o valor da maior corrente de *inrush* com a corrente nominal dos demais transformadores. Esse valor foi multiplicado por 1,4, como definido em norma. Dessa forma a energização dos transformadores não causará acionamento do disjuntor. Qualquer valor acima da corrente de instantânea fará com que o relé atue sem contagem de tempo.

$$I_{\text{instantâneo}} = \left( I_{\text{inrush\_maior\_transformador}} + \sum I_{n(\text{outros\_transformadores})} \right) \times 1,4$$

$$I_{\text{instantâneo}} = ((14 \times 62,8) + 62,8 + 62,8 + 41,8 + 41,8 + 41,8 + 31,4) \times 1,4 = 1626,24 A$$

### 3.9.2 Unidades de Neutro (50N/51N)

Primeiramente, foi calculada a corrente de partida de neutro, utilizando a expressão 2.33, nesse valor de corrente se inicia a contagem de tempo.

$$I_{\text{partida\_neutro}} = I_{\text{partida}} \times 0,1 = 275,1 \times 0,1 = 27,5 A$$

A unidade usada para os menores valores de corrente também foi a unidade temporizada de tempo inverso. Desse modo, foi usada a equação 2.31, onde foi escolhida a curva extremamente inversa pela norma da IEC e também um *dial time* de 0,2.

$$t_{\text{atuação\_do\_relé}} = T_{\text{curva}} \left( \frac{K}{\left( \frac{I_{\text{medido}}}{I_{\text{partida}}} \right)^{\alpha} - \beta} + L \right) = 0,2 \left( \frac{80}{\left( \frac{I_{\text{medido}}}{27,5} \right)^2 - 1} \right)$$

A partir de 100 A, observou-se que não seria respeitada a condição de diferença de tempo de 0,2 segundos entre as curvas da concessionária e do relé de estudo com essa equação. Por conta disso, utilizou-se a unidade temporizada de tempo definido. Foi escolhido o tempo

de 1 segundo para as correntes entre 40 A e 120 A, pois esse valor respeita a diferença de tempo e protege a instalação contra curtos-circuitos.

Entre 120 A e o valor da corrente de ajuste instantânea, que posteriormente foi definida em 325,1 A, utilizou-se novamente a unidade temporizada de tempo inverso, calculada anteriormente. Nesses valores de corrente, a diferença de 0,2 segundos foi respeitada sem problemas.

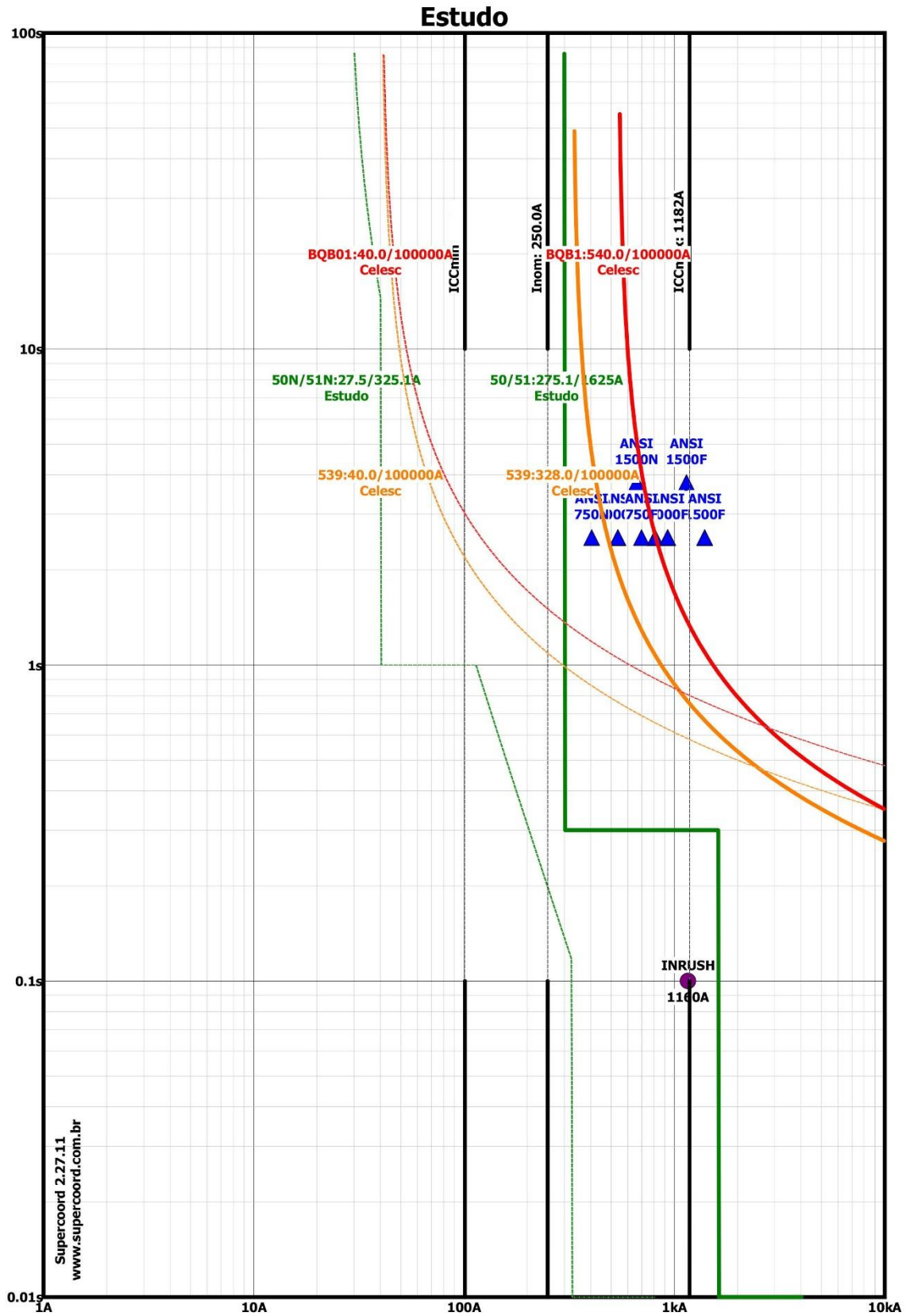
Por fim, foi calculada a corrente de ajuste instantânea, onde foi utilizada a equação 2.35. Para os valores acima da unidade instantânea de neutro, o relé atuará sem contagem de tempo.

$$I_{\text{instantâneo\_de\_neutro}} = 0,2 \times I_{\text{instantâneo}} = 0,2 \times 1626,24 = 325,24$$

### 3.10 COORDENOGRAMA

A figura 25 apresenta o coordenograma feito com base nos cálculos das unidades temporizadas e instantânea de fase e neutro. O coordenograma apresenta as curvas dos relés da CELESC, em laranja e vermelho, os pontos ANSI dos transformadores, em azul, e a corrente de *inrush*, em roxo. As curvas em verde são as curvas das unidades de fase e de neutro.

Figura 25. Coordenograma do Tempo de Atuação do Relé 1



Fonte: O Autor

Ao analisar o coordenograma, é possível perceber que todos os critérios foram respeitados. Em todos os pontos da curva, o relé do estudo atua em pelo menos 0,2 segundos antes dos relés a montante. O ponto mais crítico acontece um pouco antes da corrente instantânea de fase, por volta de 1600 A, mas, mesmo nesse ponto, o relé do estudo atua 0,3 segundo antes do relé da CELESC.

Todos os pontos ANSI dos transformadores estão protegidos pela curva do relé do estudo. Dessa forma, os transformadores nunca serão danificados. É válido salientar que foi necessário utilizar a unidade temporizada de tempo definido para respeitar essa condição, como visto no capítulo 3.

A corrente de *insrush* acontece no tempo calculado em projeto, de maneira segura. É possível perceber que o relé atuará de maneira instantânea apenas para um valor 40% maior do que a corrente de *inrush*. Dessa forma, a corrente de *inrush* está dentro da margem de atuação da unidade temporizada de tempo definido, sendo assim, a corrente de *inrush*, que acontece por 0,1 segundo, tem uma margem de 0,3 segundos antes que o relé atue.

É possível perceber que o relé atuará em, no máximo, 1 segundo para qualquer valor de curto-circuito envolvendo a terra, já que o menor curto circuito da unidade de neutro é o fase-terra mínimo de 98,92 A na barra 7, e para esse valor o tempo de atuação está em 1 segundo.

O relé também atuará em, no máximo, 0,3 segundo para qualquer valor de curto-circuito envolvendo apenas as fases. Como as unidades de fase fazem a proteção de todos os curto circuitos envolvendo as fases, também protegem contra os curtos-circuitos bifásicos, que equivalem a 86,6% do valor do curto trifásico. Dessa forma, o menor curto-circuito trifásico é na barra 7 e equivale a 430,89 A. Sendo assim, o curto bifásico equivale a 373,15 A e, mesmo para esse valor, se tem uma atuação do relé em 0,3 segundo.

O transformador de corrente escolhido, de acordo com os cálculos do capítulo três, foi o TC com relação 600/5, com uma tensão máxima no secundário de 3,4 V e uma potência máxima no secundário de 8,8 VA.

## 4 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como principal objetivo analisar um estudo de caso sobre a parametrização de um relé digital de sobrecorrente, descrevendo detalhadamente todas as etapas do processo. A parametrização considerou as correntes de *inrush*, os pontos ANSI dos transformadores, as correntes de curto-circuito, as curvas da concessionária e o dimensionamento do transformador de corrente.

Para isso, cada passo dos cálculos foi descrito de maneira detalhada, possibilitando o entendimento por completo da parametrização. Os cálculos são complexos e extensos, por isso é justificável a necessidade do uso de softwares específicos para a parametrização dos relés. Qualquer erro, mesmo que mínimo pode ser perigoso, pois se trata de uma proteção, razão pela qual deve ser feita de maneira irrepreensível.

O uso do relé de proteção se faz necessário devido à sua complexidade. Em uma indústria de bebidas, ou indústrias em geral, a falta de energia representa uma grande perda financeira, já que os produtos deixam de ser produzidos nessa situação. Desse modo, é importante destacar que o relé de proteção é seletivo e atua apenas quando se faz necessário. Para correntes menores, o relé tem uma contagem de tempo um pouco mais alta, como foi visto no estudo. Desse modo, ele só atua quando realmente é necessário, evitando atuações desnecessárias em situações de pequenas oscilações que não representam risco real à instalação. Por conta disso, o relé contribui com a redução de prejuízos, ao evitar desligamentos desnecessários e garante o funcionamento das fábricas e indústrias.

Por outro lado, o relé é muito rápido, ou mesmo instantâneo, para correntes que apresentam um risco real a instalação, protegendo de maneira segura e dando boas condições de operação. Afinal, para correntes de valores muito elevados o relé atua sem contagem de tempo.

Ainda é válido comentar sobre a evolução do relé de proteção, que atualmente, com o relé digital de sobrecorrente, apresenta valores de ajuste muito mais precisos que seus antecessores, assim como maior velocidade de operação e confiabilidade. Além das funções de proteção, ele pode ser usado para monitoramento, sendo usado em conjunto com alguns softwares, pode produzir gráficos que analisam o fornecimento de energia durante um determinado período de tempo.

Os relés ainda podem ser usados em conjunto, apresentando uma dupla proteção, pois, quando um relé a jusante vier a falhar, o outro relé a montante funciona. No caso do estudo, os

relés da concessionária viriam a atuar algum tempo depois, caso houvesse alguma falha no relé de estudo. Os relés a jusante, 2,3 e 4, também teriam o relé do estudo como uma segunda proteção nos curtos nas barras de baixa tensão.

Como trabalhos futuros, poderia se ter o estudo da parametrização dos relés a jusante, os relés 2, 3 e 4, mostrando como eles são configurados para que atuem em um tempo inferior ao relé 1 e como os valores da corrente de partida e instantânea são menores, por se tratarem de valores inferiores de potência instalada. Além disso, poderia ser feita a parametrização de um relé de proteção de uma outra instalação com transformadores acima de 2000kVA, que exige funções além das funções de sobrecorrente.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6856:2015. **Transformador de corrente, Ensaio de exatidão**. Rio de Janeiro, 2015.
- CELESC DISTRIBUIÇÃO S.A. **Comunicado nº 43 – Alteração do limite de sobrecorrente temporizada de neutro no ajuste de proteção secundária em média tensão**. Florianópolis, 2024.
- CELESC DISTRIBUIÇÃO S.A. **Fornecimento de energia elétrica em tensão primária de distribuição até 25 kV**. Norma Técnica N-321.0002. Florianópolis, 2016.
- DUARTE, Antônio Carlos da Rocha. **Introdução à Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**, São Paulo: Artliber, 2018.
- FONTANA, Diego; FURLANETTO, Cesar; BENEDET, Edmilson. **SUPERCOORD V2**. Criciúma: Supercoord, 2020. Disponível em: <http://www.supercoord.com.br>. Acesso em: 30 mar. 2025.
- IEEE. **IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants** (IEEE Std 141-1993). New York: IEEE, 1994.
- Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA). **Matriz Energética Limpa e Inclusiva**. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/nossos-objetivos/energia-eletrica>. Acesso em: 8 mar. 2025.
- KINDERMANN, G. **Curto-Circuito**. 2ª Edição. Florianópolis: Geraldo Kindermann, 1997.
- KINDERMANN, G. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, Volume 1**. 2ª Edição. Florianópolis: Geraldo Kindermann, 2005.
- KINDERMANN, G. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, Volume 2**. 2ª Edição. Florianópolis: Geraldo Kindermann, 2014.
- MAMEDE FILHO, João. **Instalações Elétricas Industriais**. 7ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2007
- MAMEDE FILHO, João; MAMEDE, Daniel Ribeiro. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Rio de Janeiro: Grupo Editorial Nacional, 2013.
- MARDEGAN, Cláudio. **Proteção e Seletividade Em sistemas Elétricos Industriais**. 2ª Edição. São Paulo: Atitude Editorial, 2020.
- MEDEIROS, Carlos, **Curto-Circuitos Trifásicos no Sistema Elétrico**. Goiás: Carlos Medeiros, 2017.
- PEXTRON. Manual técnico – **Relé digital de proteção**. São Paulo: Pextron, 2020.

SALGADO, R. S. **Introdução a Sistemas de Energia Elétrica**. Florianópolis: Roberto de Souza Salgado, 2022.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Relés de proteção Vamp 11F**. Disponível em: <https://www.se.com/br/pt/product-range/63300-rel%C3%A9s-de-prote%C3%A7%C3%A3o-vamp-11f/#overview>. Acesso em: 9 mai. 2025.

RIES, Walter. **Transformadores, Fundamentos para o Projeto e Cálculo**: Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

KOTHARI, D. P, NAGRATH I. J. **Modern Power System Analysis**. 4th ed. New Delhi: Tata McGraw-Hill; 2011.