

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

MARLON RICARDO REINERT BRODWOLF

ESTUDO DE SELETIVIDADE DAS PROTEÇÕES APLICADOS A UMA  
SUBESTAÇÃO INDUSTRIAL CLASSE 15 KV E POTÊNCIA DE 3 MVA

Joinville

JULHO - 2021

MARLON RICARDO REINERT BRODWOLF

ESTUDO DE SELETIVIDADE DAS PROTEÇÕES APLICADOS A UMA  
SUBESTAÇÃO INDUSTRIAL CLASSE 15 KV E POTÊNCIA DE 3 MVA

Monografia apresentada ao  
Curso de Bacharelado em  
Engenharia Elétrica do  
Campus Joinville do  
Instituto Federal de Santa  
Catarina para a obtenção do  
diploma de Engenheiro  
Eletricista.

Orientador: Carlos Toshiyuki  
Matsumi, Dr. Eng.

Joinville

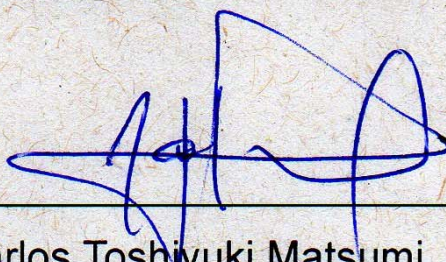
Julho - 2021

## FICHA CATALOGRÁFICA

ESTUDO DE SELETIVIDADE DAS PROTEÇÕES APLICADOS A UMA  
SUBESTAÇÃO INDUSTRIAL CLASSE 15 KV E POTÊNCIA DE 3 MVA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Engenheiro  
Eletricista, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa  
Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora  
abaixo indicada.

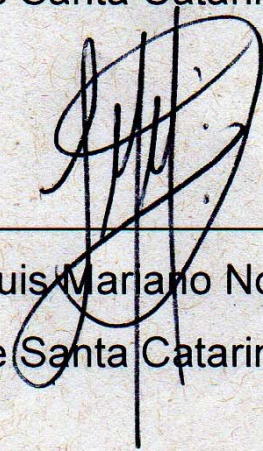
Joinville, 05, agosto de 2021.



Prof. Carlos Toshiyuki Matsumi, Dr.

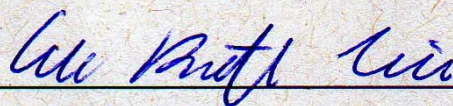
Orientador

Instituto Federal de Santa Catarina – Campus Joinville



Prof. Luis Mariano Nodari, Me.

Instituto Federal de Santa Catarina – Campus Joinville



Prof. Andre Bonetto Trindade, Esp.

Instituto Federal de Santa Catarina – Campus Joinville

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a minha família, que nunca mediu esforços para que eu tivesse uma boa educação e sempre me incentivou nos momentos que precisei.

Em específico minha esposa, Natalia, quem sempre me deu o amparo de um ombro amigo e onde busco forças para seguir adiante.

Ao meu orientador, professor Dr. Carlos Toshiyuki Matsumi, pelo empenho, dedicação, paciência e incentivo durante a elaboração deste trabalho, assim como ao longo de todo o curso.

Ao IFSC, professores e servidores, pelo ambiente acolhedor e educação ímpar que a instituição oferece.

Aos meus pais Klaus e Rose (in memoriam), que sempre proporcionaram bons exemplos de vida e educação, moldando meu caráter e valores que com certeza carregarei para a vida toda.

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação”.

(Simone de Beauvoir)

## RESUMO

O trabalho demonstra um estudo de seletividade de uma planta industrial típica para classe de tensão 15 kV e potência de 3 MVA a partir da literatura atual e suas recomendações quanto aos critérios de parâmetro de projeto para a elaboração dos coordenogramas. A subestação escolhida possui dois transformadores de 1,5 MVA cada, com diferença na impedância dos cabos que os alimentam.

Neste trabalho, foram calculados os valores de curto-circuito baseado nos dados do ponto de entrega de energia pela concessionária e na potência dos transformadores, com estes valores obtidos, foi elaborado o estudo de seletividade analisando os três tipos de curvas da norma IEC: Extremamente Inversa, Muito Inversa e Normal Inversa, em que um dos casos não foi possível garantir a seletividade entre os dispositivos de proteção. Com base nos parâmetros encontrados para configuração das curvas de proteção dos relés dos transformadores e dos disjuntores de baixa tensão, foi possível calcular os ajustes da curva de proteção do relé geral da subestação, servindo de proteção adicional para os transformadores tanto para os casos de sobrecarga, quanto para o de curto-circuito.

Após a análise matemática e desenvolvimento dos cálculos, foi utilizado um *software* específico para simulação das curvas dos dispositivos de proteção e das curvas de danos dos transformadores e cabos, de modo a verificar, além da seletividade entre os dispositivos de proteção, que as curvas encontradas permitem a total utilização da potência disponível dos transformadores. Com as simulações, foi evidenciada também a seletividade entre o relé de entrada da subestação e o religador da concessionária de energia.

**Palavras chave:** Proteção. Estudo de seletividade. Análise de curto-circuito.

## ABSTRACT

This work demonstrate a selectivity study of a typical industrial plant in class 15 kV and 3 MVA potency as of from the current literature and your recommendations for parameter standards for time current curves. The chosen substation includes two transformers of 1,5 MVA of power each, with different impedance on the related feeder cables. Besides the different impedance analysis, different types os curves are adopted to verify the respective applications under the same conditions.

First, the short-circuit values were calculated based on the data of the power delivery point by the utility company and the power of the transformers, with the values obtained, a selectivity study was prepared trying to employ three types of IEC standard: Extremely Inverse, Very Inverse and Normal Inverse, which in one of the cases it was not possible to guarantee selectivity between the protection devices. Based on the parameters found to configure the protection curves of the transformer's relays and the low voltage circuit breakers, it was possible to calculate the settings of the protection curve of the main substation relay, which served as na additional protection for the transformer for overload and short-circuit.

After the mathematical analysis and calculations, a software was used to simulate the curves of the protection devices, the damage curves of the transformers and cables, and was verified that selectivity between the protection devices was reached, enabling the full use of the transformers potency. With the simulations, the selectivity between the substation main relay and the utility recloser was also verified.

**Key words:** Protection. Selectivity study. Coordination. Substation project.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva de proteção disjuntor de 100A relé LSI incorporado .....	24
Figura 2 – Curva característica de fusível.....	25
Figura 3 – Curva IEC normal inversa.....	28
Figura 4 – Curva IEC muito inversa.....	29
Figura 5 – Curva IEC extremamente inversa.....	30
Figura 6 – Relação entre função senoidal e sua equivalente vetorial.....	33
Figura 7 – Triângulo de impedâncias.....	37
Figura 8 – Curva X/R por MVA para transformadores.....	38
Figura 9 – Corrente de Curto-Circuito Simétrica.....	39
Figura 10 – Corrente de Curto-Circuito Parcialmente Assimétrica.....	40
Figura 11 – Corrente de Curto-Circuito Assimétrica e Simétrica.....	40
Figura 12 – Componentes da Corrente de Curto-Circuito.....	41
Figura 13 – Diagrama Unifilar Subestação 1.....	45
Figura 14 – Coordenograma Entre DJ 3, DJ QGBT-1 e TR-A Para Curva EI.....	66
Figura 15 – Coordenograma Entre DJ 2, DJ QGBT-2 e TR-B.....	68
Figura 16 – Coordenograma Entre Todos os Dispositivos do Sistema.....	70
Figura 17 – Coordenograma Entre Relé 1 e Religador da Concessionária.....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores de sobretensão de acordo com o grupo de ligação.....	21
Tabela 2 – Características disjuntor de média tensão Evolis.....	23
Tabela 3 – Ajustes a serem inseridos no Relé 3.....	65
Tabela 4 – Ajustes a serem inseridos no Relé 2.....	67
Tabela 5 – Ajustes a serem inseridos no Relé 1.....	69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MVA - Mega volt-ampere

kV – Kilo volts

kVA - Kilo volt-ampere

TC – Transformador de Corrente

TP – Transformador de Potência

NBR – Norma Brasileira

FT – Fatores Térmicos

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

V<sub>p</sub> – Tensão primária

V<sub>s</sub> – Tensão secundária

RTP – Relação nominal de transformação

VA – Volt-ampere

GL - Grupo de ligação

CC - Curto-circuito

PVO – Disjuntores a pequeno volume de óleo

GVO – Disjuntores a grande volume de óleo

SF<sub>6</sub> – Hexafluoreto de enxofre

TMD – Disparador termo-magnético

LI – Disparador Longo e Instantâneo

LSI – Disparador Longo, Curto e Instantâneo

LSIG - Disparador Longo, Curto, Instantâneo e Falta a Terra

IEEE – *Institute of Electrical and Electronic Engineers*

IEC – *International Electrotechnical Commission*

I<sub>cs</sub> - Corrente de curto-circuito simétrica

I<sub>cim</sub> - Impulso da corrente de curto-circuito em um tempo definido

I<sub>cis</sub> - Impulso da corrente de curto-circuito no momento da falha

I – Corrente elétrica

Ω – Ohm

A – Ampere

R – Resistência ôhmica

X – Reatância

Z – Impedância

V – Tensão elétrica

S – Potência

Pu – valor por unidade

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	15
1.1	Objetivos .....	16
1.1.1	Objetivo geral .....	16
1.1.2	Objetivos específicos .....	16
2	DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO E SELETIVIDADE .....	18
2.1	Dispositivos de Medição .....	18
2.1.1	Definição .....	18
2.1.2	Transformadores de corrente .....	18
2.1.3	Transformadores de Potencial .....	20
2.2	Dispositivos de Proteção .....	22
2.2.1	Disjuntores de média tensão .....	22
2.2.2	Disjuntores de baixa tensão .....	23
2.2.3	Fusíveis .....	25
2.3	Relé de Proteção .....	26
2.3.1	Definição .....	26
2.3.2	Funções de Proteção .....	27
3	METODOLOGIA .....	32
3.1	Grandezas Elétricas Básicas .....	32
3.2	Sistema por Unidade (PU) .....	35
3.2.1	Cálculos por Unidade .....	35
3.3	Corrente de Curto-Circuito .....	38
3.3.1	Corrente Simétrica de Curto-Circuito .....	39
3.3.2	Corrente Assimétrica de Curto-Circuito .....	39
3.3.3	Corrente de Curto-Circuito Longe da Fonte .....	41
3.3.4	Equação matemática da corrente de curto-circuito .....	42
3.3.5	Fator de assimetria .....	43
3.4	Estudo Proposto .....	43
3.4.1	Dimensionamento dos Componentes do Sistema .....	46
3.4.2	Cálculo das Impedâncias .....	46
3.4.3	Corrente de Curto-Circuito Trifásico no Terminal Secundário do Transformador TR-A .....	53
3.4.4	Corrente de Curto-Circuito Fase-Terra no Terminal Secundário do Transformador TR-A .....	53
3.4.5	Ajuste Disjuntor de Baixa Tensão do Transformador TR-A .....	54
3.4.6	Ajuste das Proteções de Média Tensão do Transformador TR-A .....	55
3.4.7	Corrente de Curto-Circuito Trifásico no Terminal Secundário do Transformador TR-B .....	58
3.4.8	Corrente de Curto-Circuito Fase-Terra no Terminal Secundário do Transformador TR-B .....	58
3.4.9	Ajuste Disjuntor de Baixa Tensão do Transformador TR-B .....	59
3.4.10	Ajuste das Proteções de Média Tensão do Transformador TR-B .....	60
3.4.11	Ajuste das Proteções de Média Tensão do Transformador DJ 1 .....	63
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	65
4.1	Parâmetros de Proteção do Transformador TR-A .....	65
4.2	Parâmetros de Proteção do Transformador TR-B .....	67
4.3	Parâmetros de Proteção do Disjuntor Geral de Média Tensão DJ-1 .....	69
5	CONCLUSÃO .....	72
5.1	Trabalhos Futuros .....	73

## 1 INTRODUÇÃO

Qualquer sistema elétrico, independentemente de seu tamanho ou aplicação, está sujeito às perturbações e anomalias. Estas por sua vez, podem ter origens internas ou externas, bem como incidir de forma direta ou indireta sobre os componentes do sistema. Sendo assim, é indispensável que se despenda parte do projeto elétrico avaliando estes riscos buscando mitiga-los.

Segundo Mamede Filho (2017, p. 459) dentro deste contexto, além de assegurar o fornecimento de energia elétrica para o empreendimento, o corpo de engenharia responsável pelo projeto deve garantir que o projeto seja entregue de acordo com as normas vigentes bem como de maneira que o sistema elétrico esteja dimensionado e parametrizado de forma segura, respeitando as características específicas de cada componente, assegurando a continuidade de serviço ao interromper e isolar de forma correta as falhas que possam ocorrer. Portanto, o papel de um estudo de seletividade e coordenação é garantir que a falha no sistema seja isolada e que não ocorram desligamentos impróprios em pontos que não estejam diretamente afetados. Este deve ser elaborado com o estabelecimento de um conceito de proteção, adequando as escolhas dos dispositivos que compõem o sistema de proteção, até a definição dos parâmetros de calibração que os equipamentos estarão submetidos. Neste sentido ainda é importante garantir que sejam atendidos alguns requisitos:

- Seletividade: É a capacidade do sistema de proteção selecionar a parte em que ocorreu a falha e remove-la do circuito, de maneira a não interferir em outros pontos não afetados pela falha detectada.
- Exatidão: É o que garante a segurança do sistema, especial atenção deve ser dada às zonas de saturação dos componentes de medição que fazem a interface entre as medidas elétricas do sistema e os componentes de proteção.
- Sensibilidade: É o intervalo de valores que possibilitam o dispositivo atuar ou não de acordo com sua aplicabilidade. É uma característica tanto dos dispositivos de medição quanto dos relés de proteção.
- Coordenação: Garante que o dispositivo de proteção mais próximo do ponto de falha atue antes dos demais, isolando o ponto de falha e garantindo a continuidade de serviço dos demais pontos da instalação.

- Rapidez: Grandeza fundamental na obtenção de um sistema seguro, de maneira geral um tempo menor de atuação garante mais confiança e segurança para o sistema elétrico e seus equipamentos.
- Robustez: Garantir que o sistema esteja bem dimensionado para suportar as correntes nominais e também as correntes de curto-circuito.

Para garantir que todos estes requisitos sejam alcançados, o estudo de seletividade e coordenação leva em consideração os níveis de curto-circuito, fluxo de potência, energia incidente e correntes de projeto, entre outras grandezas em conjunto com as curvas de tempo x corrente. Isso é feito a partir dos ajustes das curvas de cada tipo de proteção, no qual pode-se variar as curvas de proteção dos dispositivos de maneira que se assegure a coordenação dos dispositivos à montante para a jusante. Além disso devem ser garantidas outras características do sistema, como correntes de *in-rush*, ponto de suportabilidade ao curto-circuito do condutor, entre outras.

Atualmente, existem *softwares* que geram as curvas de tempo e corrente dos dispositivos que integram o sistema, desta maneira, simplificando a validação dos parâmetros e as curvas utilizadas, inclusive avaliar de forma segura os impactos que ampliações e novos dispositivos adicionados ao sistema possam ocorrer.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

Realizar um estudo de seletividade verificando o impacto das variações dos ajustes na coordenação entre os dispositivos de proteção de uma subestação com classe de tensão 15 kV e potência de 3 MVA, a partir do ponto de entrega da concessionária de energia até o disjuntor de baixa tensão do quadro geral de distribuição de uma indústria.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Elaboração de uma planta industrial classe 15 kV e potência de 3 MVA;
- Compreender a aplicação dos dispositivos de proteção e medição utilizados em

subestações;

- Análise teórica das correntes de curto-circuito do sistema;
- Definição dos parâmetros de proteção e critérios de ajustes dos parâmetros recomendados pela literatura;
- Comparar a análise matemática com a simulação através de *software* específico;



## **2 DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO E SELETIVIDADE**

Acerca dos principais componentes de um sistema de proteção elétrico, os mais difundidos são: disjuntores de média tensão e baixa tensão, relés de proteção, fusíveis de média e baixa tensão. Cada um destes com sua curva característica de proteção que deve ser criteriosamente escolhida conforme sua aplicação. Cabe também a utilização de dispositivos auxiliares como transformadores de corrente (TCs) e transformadores de potencial (TPs), que são inseridos ao sistema de maneira a coletar informações de medição de grandezas e realizar a destes dados interface com os relés.

### **2.1 Dispositivos de Medição**

#### **2.1.1 Definição**

São os dispositivos responsáveis por realizar a interface entre a grandeza que se deseja medir e o seu respectivo dispositivo. Para os casos de média e alta tensão, são utilizados também para proteção em conjunto com os relés, de modo que estes sejam um reflexo das grandezas do circuito.

#### **2.1.2 Transformadores de corrente**

Os transformadores de corrente são, segundo Mamede Filho (2017), dispositivos destinados a alimentar cargas de baixa potência, são também responsáveis por fornecer aos medidores e relés de proteção, o valor da corrente instantânea de determinado circuito. Através da conversão eletromagnética, a corrente que circula no circuito primário do TC gera um fluxo magnético alternado, que por sua vez chega ao circuito secundário. A relação entre as espiras do circuito primário, geralmente com poucas voltas, em relação ao secundário faz com que o valor elevado de corrente do circuito primário seja reduzido para valores máximos de 5 A no circuito secundário, sabendo-se a relação de transformação, os equipamentos de medição e proteção ligados ao circuito secundário e devidamente parametrizados tem a informação da corrente instantânea no circuito da carga. Os TCs têm diversos tipos construtivos dependendo da sua aplicação:

- TC tipo janela: este tipo de TC apresenta uma abertura em seu núcleo em que o circuito alimentador atravessa este mesmo núcleo. O papel de circuito primário é feito pelo próprio circuito alimentador, o enrolamento secundário está envolto no núcleo;
- TC tipo barra: neste modelo o enrolamento primário é uma barra fixa que atravessa o núcleo do transformador de corrente, já o enrolamento secundário está envolto no núcleo;
- TC tipo bucha: tem o mesmo modo construtivo do TC de barra, porém é aplicado a bucha dos equipamentos como transformadores;
- TC tipo núcleo partido: tem o tipo construtivo similar ao TC de janela, porém o núcleo pode ser aberto para facilitar a instalação;
- TC tipo enrolado: tem seu enrolamento primário envolto no núcleo do TC, assim como o enrolamento secundário;
- TC de múltiplos enrolamentos secundários: tem os enrolamentos secundários separados entre si, cada um com seu núcleo;

Todas estas formas construtivas podem ser aplicadas tanto para TC de baixa tensão, quanto para os de média tensão. Os transformadores de corrente são geralmente encapsulados em resina epóxi e submetidos a vários processos de polimerização e cura da resina, de modo a garantir uma maior capacidade de sobrecarga térmica, resistência mecânica e rigidez dielétrica, além disso são construídos com núcleo de ferrosilício de grão orientado.

Dessa forma, se nos terminais primários de um TC, cuja relação de transformação nominal é de 20, circula uma corrente de 100 A obtém-se no secundário a corrente de 5 A, ou seja  $100/20 = 5$  A.

#### 2.1.2.1 Fator de Sobrecorrente

É um fator que multiplica a corrente nominal primária do TC, o resultado é a máxima corrente ao qual o circuito primário pode suportar. Por norma (NBR 6856/21) o fator de sobrecorrente para aplicações em sistemas de proteção deve ser de 20 vezes a corrente nominal.

### 2.1.2.2 Fator Térmico Nominal

É o valor que se pode multiplicar a corrente nominal primária do TC para que seja obtido o valor de corrente que o TC pode conduzir de maneira contínua sob as condições especificadas. Por norma os fatores térmicos (FT) nominais são: 1,0/1,2/1,3/1,5/2,0.

### 2.1.2.3 Corrente Térmica Nominal

Refere-se ao valor eficaz da corrente no circuito primário suportável pelo transformador de corrente durante um tempo definido, comumente igual a 1 segundo, quando o enrolamento secundário está em curto-circuito.

## 2.1.3 Transformadores de Potencial

Segundo Mardegan (2012), os transformadores de potencial (TP) para instrumentação são dispositivos monofásicos que detêm dois circuitos magneticamente acoplados, denominados primários e secundário. São utilizados para diminuir o nível de tensão de um circuito, fazendo a interface entre o circuito a ser medido e o dispositivo de medição. Adicionalmente, o transformador isola um circuito do outro, garantindo mais segurança pessoal e para os instrumentos a ele ligados. Os TP de instrumentação são ligados sempre em paralelo ao circuito.

Os principais pontos para a especificação de um transformador de potencial indutivo aplicado em um estudo de seletividade são:

- Tensão nominal primária ( $V_p$ ): Tensão no qual o TP irá operar em seu circuito primário;
- Tensão nominal secundária ( $V_s$ ): Tensão que o circuito secundário do TP opera, normalmente é igual a tensão requerida para energização do relé ou circuito auxiliar;
- Relação nominal de transformação (RTP): É o valor de tensão primária dividido pelo valor da tensão secundária;
- Classe de isolamento: Definido conforme norma NBR 6855/20 de acordo com a classe de tensão do circuito em que o equipamento está conectado;
- Frequência: Frequência da rede;

- Carga nominal: Valor máximo, em volt-ampere (VA) que o circuito secundário irá alimentar, são padronizadas por norma nos valores de 12,5/25/35/75/200 ou 400;
- Classe de exatidão: É um valor percentual que juntamente com uma letra, identifica o valor máximo de variação da leitura e a aplicação respectivamente;
- Grupo de ligação (GL): É definido de acordo com o tipo de ligação entre os potenciais do TP, além disso deve levar em consideração fatores anormais de sobretensão, sendo classificados como:
  - Grupo 1: São projetados para ligações entre fases;
  - Grupo 2: São projetados para ligações entre fase e terra, em sistemas que o aterramento é garantido e eficaz;
  - Grupo 3: São projetados também para ligações entre fase e terra, porém, para sistemas em que não se pode garantir o aterramento. Tem o seu fator de sobretensão maior;

Tabela 1 - Fatores de sobretensão de acordo com o grupo de ligação

Grupo de Ligação	Fator de Sobretensão	
	Contínuo	30 segundos
1	1,15	1,15
2	1,15	1,50
3	1,90	1,90

Fonte - NBR 6855 – Especificação, 2020

Além das especificações, deve-se observar o tipo de ligação que ocorre entre os TP, que varia conforme a tensão nominal primária, a tensão nominal secundária, o grupo de ligação, o tipo de função de proteção que será realizada e também o critério de projeto, as formas mais comuns são:

- Delta – delta;
- Estrela – estrela;
- Estrela – delta aberto;
- Delta aberto – delta aberto;

## 2.2 Dispositivos de Proteção

### 2.2.1 Disjuntores de média tensão

Aplicado aos sistemas de distribuição primário devido a sua capacidade de interromper grandes intensidades de curto-circuito (CC), tem a função de efetuar a manobra e proteção dos circuitos. Como nele não há elementos de proteção (como nos disjuntores de baixa tensão), são sempre comandados por relés de proteção, caso contrário atuam apenas como chaves de manobra mais robustas. Os tipos mais empregados nos sistemas de proteção são:

- Disjuntores a pequeno volume de óleo (PVO);
- Disjuntores a grande volume de óleo (GVO);
- Disjuntores a vácuo;
- Disjuntores a hexafluoreto de enxofre (SF6);

Os disjuntores a óleo foram as primeiras tecnologias desenvolvidas para as aplicações em proteções de sistemas primários, atualmente estão sendo substituídos pelos disjuntores a vácuo ou SF6 em virtude da baixa manutenção que estes apresentam, em conjunto com suas altas capacidades de interrupção de CC.

Dependendo da aplicação, podem ser de execução fixa ou extraível, acionamento local ou remoto, com diferentes classes de tensão e níveis de CC conforme necessidade do projeto. A especificação de um disjuntor de média tensão é definida através de ensaios normativos segundo a NBR IEC 62271-100. Um exemplo das características básicas para especificação de um disjuntor tripolar pode ser verificado na Tabela 2.

Tabela 2 - Características disjuntor de média tensão Evolis

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Corrente nominal	630	A
Tensão nominal	13,8	kV
Frequência	60	Hz
Poder de ruptura	250	MVA
Corrente nominal de curta duração admissível	25	kA
Tempo de operação	<51	ms
Tempo máximo de abertura	66	ms
Tempo de fechamento	71	ms

Fonte - Catálogo disjuntor Evolis do fabricante Schneider Electric

Estes dados são importantes para a elaboração do estudo de seletividade, cálculo de curto-circuito e arco elétrico.

### 2.2.2 Disjuntores de baixa tensão

Aplicado aos sistemas de tensão inferior a 1 kV, tem como finalidade realizar a proteção contra curto-circuito e sobrecargas. Podem ser do tipo caixa aberta para aplicações com correntes de carga maiores ou caixa moldada para casos em que há limitação de espaço e correntes de carga menores. São dotados de uma ampla gama de acessórios, incluindo dispositivos que proporcionam tipos de proteção adicionais como: subtensão, diferencial, residual de corrente, entre outras. Comumente são encontrados com os seguintes tipos de disparador:

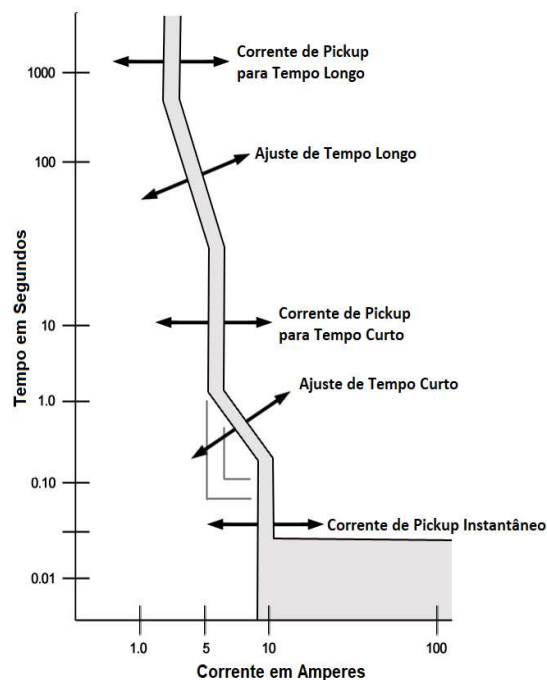
- Termomagnéticos: equipados com disparadores eletromagnéticos de curto-circuito e térmicos de sobrecarga;
- Térmicos: aplicados apenas para proteção contra às sobrecargas;
- Magnéticos: destinados à proteção apenas contra curto-circuito, como por exemplo em aplicações de alimentação de bombas de incêndio;
- Eletrônico: são o tipo mais completo quanto a gama de funções de proteção que podem realizar. Possuem um circuito eletrônico capaz de mensurar as grandezas elétricas e disponibilizá-las para o sistema eletrônico incorporado que monitora as condições e atua na abertura do disjuntor quando o valor de corrente ajustado for ultrapassado.

Adicionalmente, os disjuntores eletrônicos realizam a proteção conforme curvas definidas de tempo e corrente com diferentes faixas de ajuste, de forma a serem compatibilizados ao estudo de seletividade e garantir a continuidade de serviço. Os disjuntores são classificados como:

- TMD: Termomagnético, com ajuste de corrente de sobrecarga (térnico) e disparador magnético fixo ou ajustável;
- LI: Tempo Longo-Instantâneo, permite os ajustes do valor de corrente para correntes de curto-circuito em tempo instantâneo e ajustes de corrente para correntes de sobrecarga em tempo longo;
- LSI: Tempo Longo-Curto-Instantâneo, além dos ajustes LI, permite os ajustes de valor de corrente e tempo situado em um intervalo entre os ajustes de tempo longo e instantâneo;
- LSIG: Tempo Longo-Curto-Instantâneo-Falha a Terra, além das proteções LSI, engloba a proteção contra falha à terra;

Na figura 1, é possível observar uma curva característica de disjuntor de 100 amperes com relé incorporado do tipo LSI em que são evidenciados todos os ajustes da curva de proteção.

Figura 1 - Curva de proteção disjuntor de 100A relé LSI incorporado



Fonte: Adaptado de TestGuy

### 2.2.3 Fusíveis

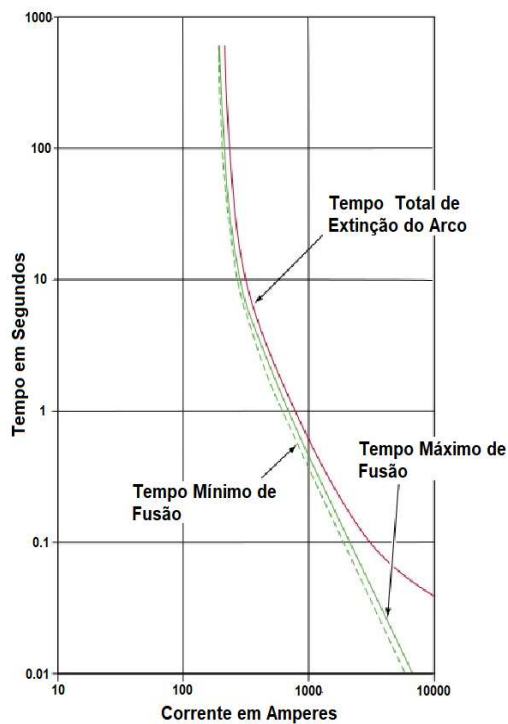
Existem fusíveis para aplicações de baixa tensão e para média tensão, com suas respectivas características e particularidades, porém são utilizados para proteção de sobrecorrente, essencialmente contra CC, e são constituídos por um elemento condutor que se rompe e por consequência causa uma interrupção na passagem de corrente. Os principais tipos aplicados são:

- Ultrarrápido;
- Rápido;
- Retardado;
- Limitador de corrente;

Para a especificação de um fusível, deve-se levar em consideração além das tensões de operação, corrente nominal e corrente de curto-circuito as 3 curvas características de tempo e corrente, representadas abaixo como na Figura 2:

- Tempo máximo de fusão;
- Tempo mínimo de fusão;
- Tempo total para extinção de arco;

Figura 2 - Curva característica de fusível



Fonte: Mardegan (2012, p. 219)



Sobre a aplicação, é importante destacar o desempenho do fusível limitador de corrente, uma vez que seu tempo de atuação muito reduzido, aproximadamente a  $\frac{1}{4}$  do ciclo de onda, impede que a corrente de curto-circuito atinja seu valor de pico máximo.

## 2.3 Relé de Proteção

### 2.3.1 Definição

São os responsáveis pela operação dos dispositivos do sistema quando uma determinada condição das grandezas medidas é alcançada. Relés de proteção detém muitas classificações, sendo as principais:

- Forma construtiva
  - Estáticos;
  - Mecânicos;
  - Eletromecânicos;
  - Digital;
- Função de proteção
  - Sobrecorrente;
  - Sobretensão,
  - Direcional;
  - Diferencial;
- Temporização
  - Instantâneo;
  - Temporizado;
- Tipo de curva de atuação
  - Normal inversa;
  - Muito inversa;
  - Extremamente inversa;
  - Tempo longo inverso;
  - Tempo definido;

Além das características que definem um relé de proteção, são necessários alguns requisitos intrínsecos ao seu tipo de aplicação principalmente:

- Seletividade;
- Sensibilidade;
- Velocidade;
- Baixo consumo;
- Quantidade de entradas e saídas analógicas ou digitais apropriadas à aplicação;

### 2.3.2 Funções de Proteção

As funções de proteção são diversas e classificadas por códigos numéricos da tabela ANSI, padronizados de acordo com o papel que desempenham no sistema em conformidade com a norma IEEE publicação C37.2 de 2008.

#### 2.3.2.1 Relé de Sobrecorrente

Quando um valor de corrente, lido pelos TC, ajustado é atingido, o dispositivo de proteção opera, podendo ser de forma temporizada ou instantânea e independentemente da direção desta corrente. As funções da tabela ANSI relacionadas a proteção são 50, 51, 50N, 51N, 50GS, 51GS, 50V e algumas combinações entre estes, dependendo da aplicação.

Para os relés digitais, amplamente difundidos hoje em dia, estes ajustes são feitos escolhendo os vários tipos de curva “corrente x tempo” de acordo com os parâmetros do relé. Os 3 tipos de curva mais aplicados são os definidos pela IEC como normal inversa, muito inversa e extremamente inversa. Segundo Mardegan (2012) a curva categorizada como normal inversa é rápida para correntes de sobrecarga e lenta para corrente elevadas (sobrecarga e curto-circuito, respectivamente), já a extremamente inversa é rápida para altas correntes, porém lenta em baixas correntes, por fim a curva muito inversa é adequada para ambos os casos, contudo, o critério a ser adotado depende da filosofia de proteção definida pelo projetista. As grandezas relacionadas às equações características de cada curva são apresentadas:

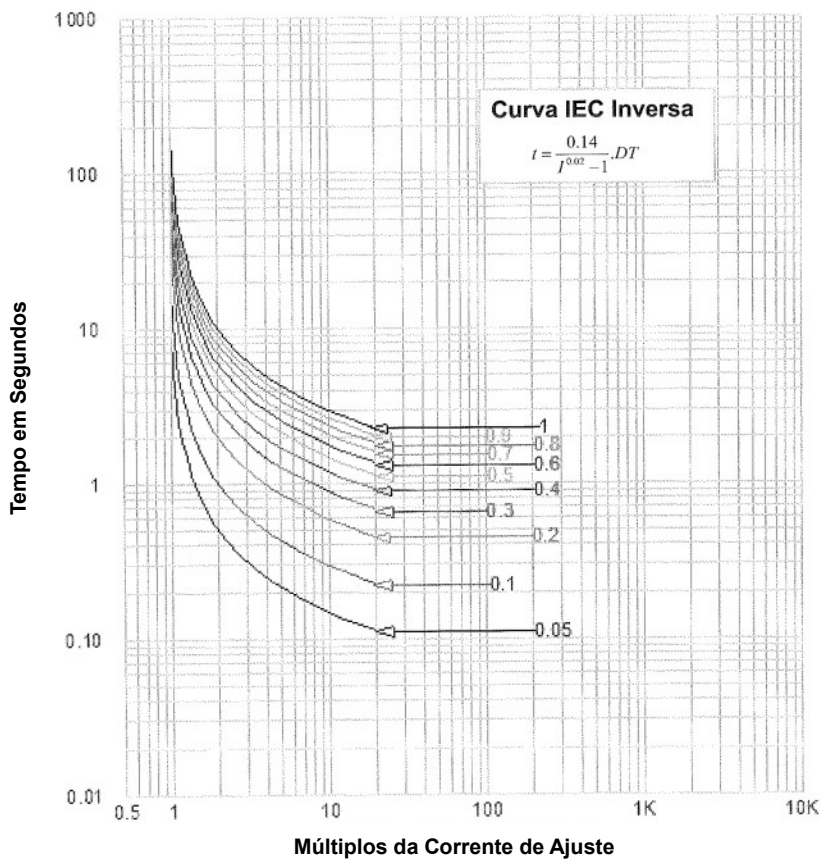
- $t$  = tempo de atuação do relé (segundos)
- $I$  = corrente de *pick-up* ou corrente circulante
- $DT$  = ajuste do multiplicador dos tempos

### 2.3.2.1.1 Normal inversa

Tipo de curva normalmente aplicada aos disjuntores mais próximos à fonte geradora, pois tem ajuste de tempo para o curto-circuito (unidade instantânea) mais lento do que as outras curvas, facilitando sua seletividade com dispositivos abaixo deste. A equação 2.1 é a representa a curva característica normal inversa, ou apenas denominada inversa apresentada na figura 3.

$$t = \frac{0,14}{I^{0,02-1}} \cdot DT \text{ (Equação 2.1)}$$

Figura 3 – Curva IEC normal inversa



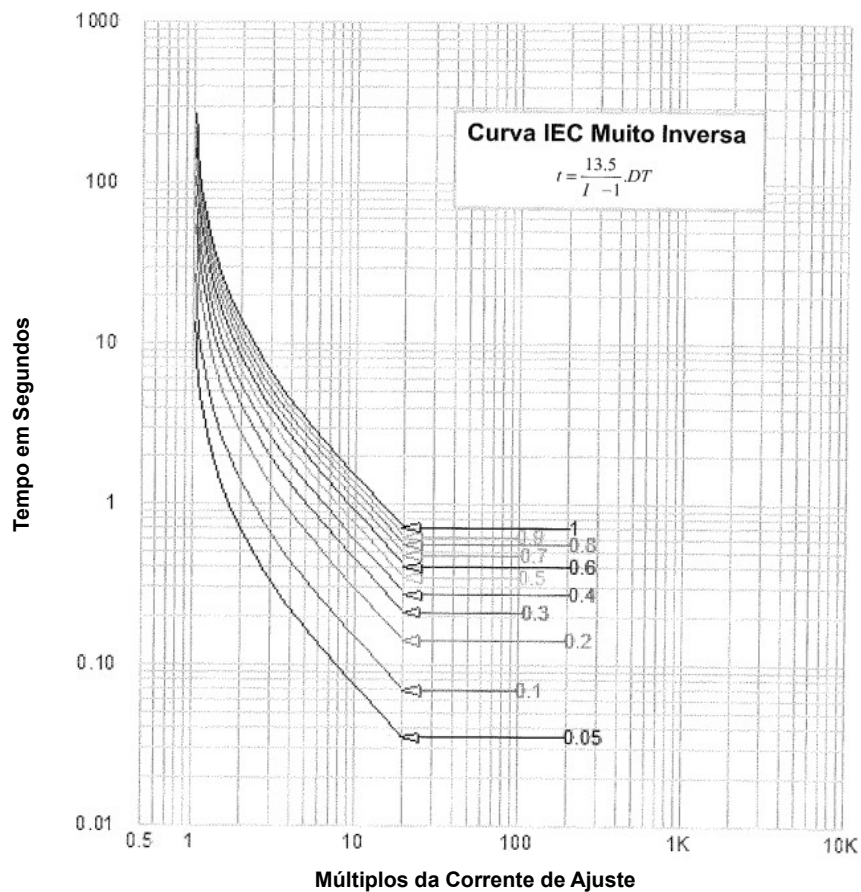
Fonte: Mardegan (2012, p. 194)

### 2.3.2.1.2 Muito inversa

É o modelo de curva mais comum aplicado aos sistemas de proteção, uma vez que seus respectivos tempos de atuação tanto em sobrecarga quanto para o curto-circuito são relativamente rápidos quando comparados aos das outras curvas IEC. É principalmente usada em dispositivos que estão situados simultaneamente à montante e à jusante de outros dispositivos de proteção, bem como em disjuntores próximos à carga. A equação 2.2 representa a curva característica muito inversa apresentada na figura 4.

$$t = \frac{13,5}{I-1} \cdot DT \quad (\text{Equação 2.2})$$

Figura 4 – Curva IEC muito inversa



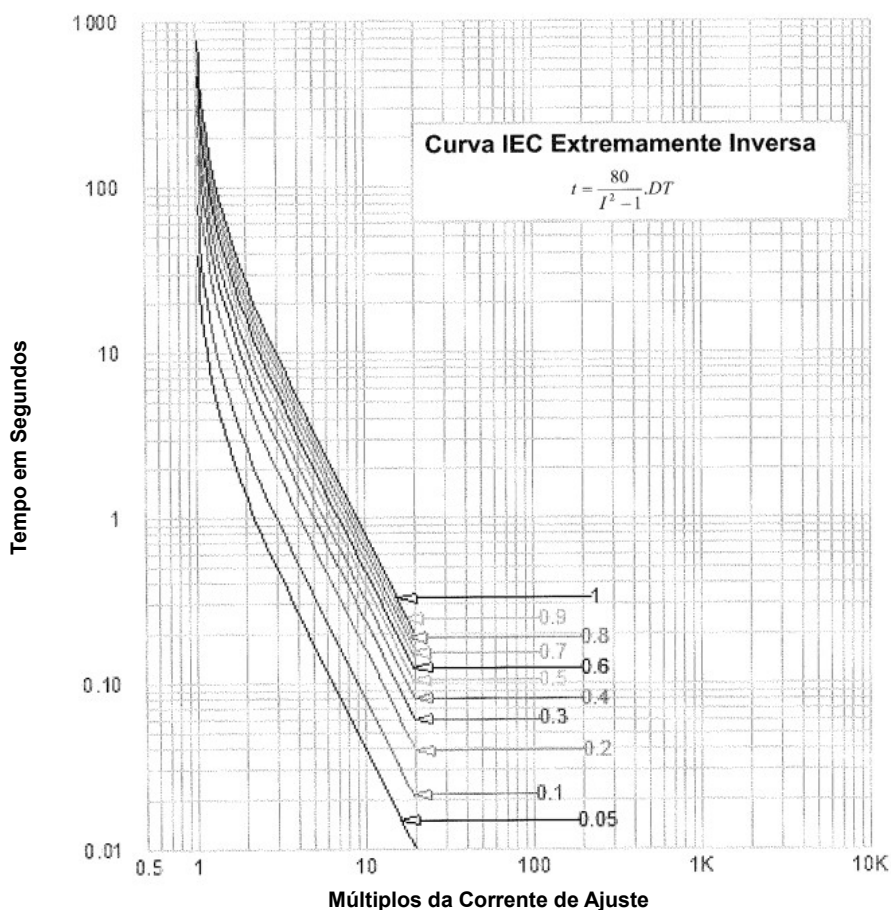
Fonte: Mardegan (2012, p. 195)

### 2.3.2.1.3 Extremamente inversa

Tipo de curva melhor aplicada em dispositivos próximos a carga, ou também combinado com dispositivos simultaneamente à montante e à jusante destes. Este tipo de curva garante o menor tempo de atuação para correntes de curto-circuito para um mesmo múltiplo, em comparação com os outros modelos de curva IEC. A equação 2.3 caracteriza a curva extremamente inversa no gráfico apresentada na figura 5.

$$t = \frac{80}{I^2 - 1} \cdot DT \text{ (Equação 2.3)}$$

Figura 5 – Curva IEC extremamente inversa



Fonte: Mardegan (2012, p. 195)

### 2.3.2.2 Relé de subtensão e sobretensão

Quando a tensão de operação do sistema está inferior ou superior ao valor ajustado, o relé deve operar. As funções da tabela ANSI que se referem às proteções de subtensão e sobretensão são os números 27 e 59 respectivamente. Para os

ajustes típicos de subtensão e sobretensão, o valor de *pick-up* encontra-se em:

- Subtensão: 80% da tensão nominal em um período de 2 segundos.

$$u \leq 0,80 \cdot U_n \rightarrow t_u = 2s$$

- Sobretensão para sistema diretamente aterrado: 110% da tensão nominal em um período de 2s, ou 115% para um pico de tensão.

$$U \geq 1,10 \cdot U_n \rightarrow t_U \geq 2s \quad U \gg 1,15 \cdot U_n \rightarrow t_U \geq 0,0s$$

- Sobretensão para sistema aterrado por impedância: 110% da tensão nominal em um período de 3 segundos, ou 115% da tensão nominal em um período de 2 segundos.

$$U \geq 1,10 \cdot U_n \rightarrow t_U \geq 3s \quad U \gg 1,15 \cdot U_n \rightarrow t_U \geq 2s$$

### 3 METODOLOGIA

Para o estudo de seletividade proposto, será utilizada a metodologia exposta na literatura atual, em conjunto de ferramentas gráficas e planilhas de cálculo. Para auxiliar nas discussões dos resultados, será replicado o diagrama elétrico no software *EasyPower* que é próprio para este tipo de estudo, em sua versão gratuita de teste.

O sistema proposto em 13,8 kV é composto por um disjuntor de entrada interligado a uma barra de distribuição para 2 disjuntores de saída, um deste alimentando um transformador de 1500 kVA (TR-A) distante 15 metros do respectivo disjuntor e outro alimentando um cabo com distância de 150 metros que conecta outro transformador de 1500 kVA (TR-B).

Dos resultados serão avaliadas as técnicas atuais e eventualmente os impactos que variações nas dos parâmetros de ajuste do relé de proteção tem em função da continuidade de serviço e proteção do sistema.

#### 3.1 Grandezas Elétricas Básicas

Segundo Rush (2011), a análise de circuitos é o estudo da resposta de um circuito elétrico dada uma condição específica imposta. As variáveis básicas de qualquer análise de circuitos são: tensão (V), corrente (I) e impedância (Z). Convenciona-se que a corrente elétrica flui a partir da aplicação de uma respectiva tensão sobre uma impedância, contudo, tanto corrente pode ser reflexo da tensão, quanto a tensão ser reflexo da corrente que circula através de uma impedância.

Um circuito elétrico pode também ser classificado quanto as trocas de energia que os elementos presentes desempenham: fontes geradoras (elementos ativos) ou cargas consumidoras de energia (elementos passivos). Contudo, alguns elementos podem desempenhar ambos os papéis, como por exemplo capacitores e indutores, que hora atuam como fontes, hora como consumidores.

Em sistemas de corrente alternada, a corrente e tensão são funções senoidais variantes no tempo com frequência constante. Na análise de circuitos elas são consideradas como vetores girantes, com duas coordenadas: magnitude e ângulo. A equação 3.1 apresentada o valor instantâneo da tensão em função do tempo ( $e_{(t)}$ ):

$$e_{(t)} = E_m \cdot \text{sen}(\omega t + \delta) \text{ (Equação 3.1)}$$

Onde:

$E_m$ : Amplitude máxima da forma de onda;

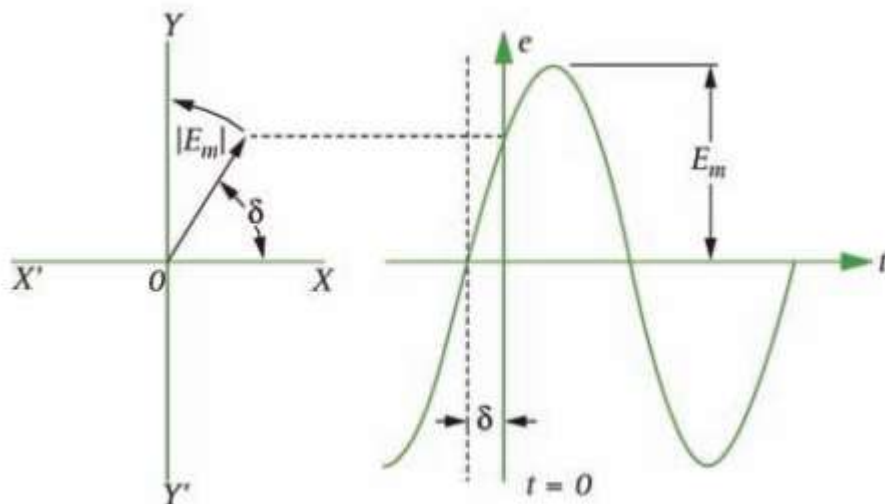
$\omega$ : Frequência angular;

$\delta$ : É o argumento da amplitude de tensão quando tempo igual a 0 s;

$t$ : Tempo

Na forma vetorial, as grandezas relacionadas são expressas para fins de análise com  $|E_m|$  sendo o módulo do vetor, e o argumento  $\delta$  seu respectivo componente imaginário. A notação neste caso é  $|E_m| \angle \delta^\circ$  e a figura 6 representa essa relação:

Figura 6 –Relação entre função senoidal e sua equivalente vetorial



Fonte: Rush (2011, p. 19)

Para a corrente que surge da tensão aplicada sobre a impedância, a função senoidal pode ser relacionada à função da tensão (equação 3.1) bastando-se dividir a amplitude da tensão pelo módulo da impedância e subtraindo o deslocamento angular advindo da relação entre resistência e reatância, a equação 3.2 expressa a função da corrente variando no tempo:

$$i(t) = \frac{E_m}{|Z|} \cdot \text{sen}(\omega t + \delta - \theta) \quad (\text{Equação 3.2})$$

Onde:



$|Z|$ : Módulo da impedância do circuito;

$\theta$ : Ângulo entre reatância e resistência do circuito;

Definindo a fórmula da impedância, tem-se:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \text{ (Equação 3.3)}$$

Onde:

$R$ : Resistência do circuito;

$X$ : Reatância do circuito;

Já a reatância do circuito, é compreendida por:

$$X = \omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \text{ (Equação 3.4)}$$

Onde:

$L$ : Indutância do circuito;

$C$ : Capacitância do circuito;

E para determinar o ângulo entre a reatância e a resistência, tem-se:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{X}{R} \right) \text{ (Equação 3.5)}$$

Por convenção, os valores apresentados nas notações vetoriais, ou complexas, são em valor eficaz, desta forma as análises são sempre em termos de tensão e corrente dos vetores das equações 3.6 e 3.7 respectivamente:

$$|V| = \frac{|E_m|}{\sqrt{2}} \text{ (Equação 3.6)}$$

$$|I| = \frac{|I_m|}{\sqrt{2}} \text{ (Equação 3.7)}$$

### 3.2 Sistema por Unidade (PU)

A utilização de uma grandeza por unidade pode ser entendida como uma relação entre dois números em que um deles se apresenta o valor real e outro sendo a base, onde o resultado desta operação retorna um número sem unidade, ou seja, adimensional.

#### 3.2.1 Cálculos por Unidade

Como do resultado espera-se uma relação, a matemática por detrás do conceito é uma simples divisão, pode-se definir matematicamente então a relação por:

$$VALOR_{PU} = \frac{VALOR_{ATUAL}}{VALOR_{BASE}} \text{ (Equação 3.8)}$$

Utilizar um sistema por unidade é muito benéfico principalmente pois nele é possível avaliar a influência dos vários componentes do circuito dentro do sistema. Segundo Stevenson e Grainger (1994) existem outras vantagens como:

- Os cálculos são feitos de maneira simplificada, uma vez que todos os valores estão na mesma base das grandezas elétricas.
- Os valores dos equipamentos elétricos geralmente são dados em por unidade.
- Para os modelos elétricos em específico, a representação por unidade traz uma modelagem mais simplificada na resolução do sistema.
- Sistemas em que existem transformadores, são expressas tanto a impedância do circuito primário quanto do secundário da mesma maneira, eliminando a necessidade de conversões constantes.

##### 3.2.1.1 Grandezas Elétricas

Nas análises de curto-circuito elétricos, utilizam-se basicamente quatro tipos de grandezas, sendo elas: Corrente, Impedância, Potência aparente e Tensão, definidas como:

$$I_{PU} = \frac{I_{ATUAL}}{I_{BASE}} \text{ (Equação 3.9)}$$

$$Z_{PU} = \frac{Z_{ATUAL}}{Z_{BASE}} \text{ (Equação 3.10)}$$

$$S_{PU} = \frac{S_{ATUAL}}{S_{BASE}} \text{ (Equação 3.11)}$$

$$V_{PU} = \frac{V_{ATUAL}}{V_{BASE}} \text{ (Equação 3.12)}$$

Atenção especial deve ser dada nas informações de catálogo dos equipamentos quando esses são expressos em por unidade, como por exemplo os transformadores. Neste caso, faz-se necessária a conversão do valor que está expresso no catálogo (em uma base diferente), para a base do sistema em estudo.

$$Z_{EQUIP} = Z_{EQUIP(PU)} \cdot \frac{S_{BASE}}{S_{EQUIP}} \cdot \frac{V_{EQUIP}^2}{V_{BASE}^2} \text{ (Equação 3.13)}$$

Já nas análises de curto-circuito, os dados são expressos sempre em função da corrente de base, que pode ser calculada por:

$$I_{BASE} = \frac{S_{BASE}}{\sqrt{3} \cdot V_{BASE}} \text{ (Equação 3.14)}$$

Nos estudos de engenharia, normalmente é convencionado a potência e a tensão do sistema de base, onde as demais grandezas é determinada a partir destas. Na literatura, é utilizada a base de potência no valor de 100MVA e a tensão base com o valor da tensão de entrada do sistema em questão.

### 3.2.1.2 Aplicação em Cabos Elétricos

Para a determinação dos valores em por unidade dos cabos elétricos que compõem o sistema, deve-se recorrer ao catálogo do fabricante de modo que seja possível estabelecer os valores da resistência do cabo ( $R_c$ ) e da reatância do cabo ( $X_c$ ) dados em  $\Omega/\text{km}$ , além de conhecer a distância ( $l$ ) dos cabos alimentadores.

$$R_{PU} = \frac{R_c \cdot l}{Z_{BASE}} \text{ (Equação 3.15)}$$

$$X_{PU} = \frac{X_C \cdot l}{Z_{BASE}} \quad (\text{Equação 3.16})$$

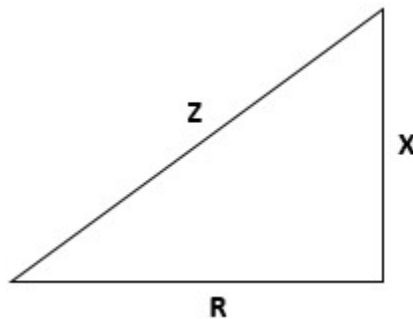
### 3.2.1.3 Aplicação em Transformadores

Nas situações em que existem transformadores presentes no sistema, deve-se mudar a impedância  $Z$  do equipamento para a base do sistema. Sabendo a impedância conforme a placa de dados, a impedância do transformador, expressa em pu, é calculada pela equação 3.17.

$$Z_{TRPU} = \frac{Z\%}{100} \cdot \frac{S_{BASE}}{S_{TR}} \cdot \frac{V_{TR}^2}{V_{BASE}^2} \quad (\text{Equação 3.17})$$

Os valores de resistência ( $R$ ) e reatância ( $X$ ) são obtidos através do triângulo de impedâncias. Quando disponibilizado pelo fabricante os valores de  $X/R$  obtidos no ensaio de curto-circuito, pode-se reduzir a expressão das componentes à esta relação. Na figura 7 está a representação geométrica do triângulo de impedâncias.

Figura 7 - Triângulo de impedâncias



Fonte: O autor

$$Z^2 = R^2 + X^2 \quad (\text{Equação 3.18})$$

$$\frac{X}{R} = a \quad (\text{Equação 3.19})$$

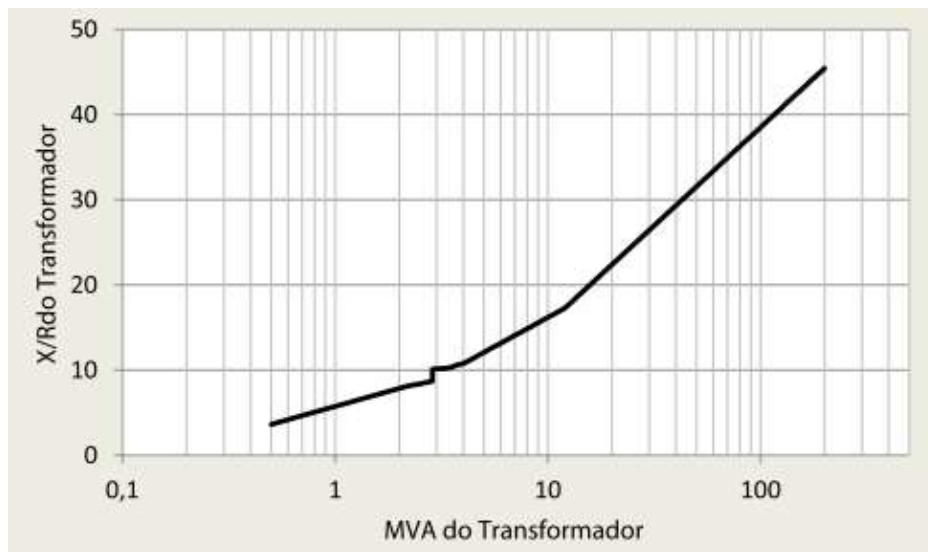
Substituindo 3.18 em 3.19 e desenvolvendo:

$$R = \frac{Z}{\sqrt{1 + \left(\frac{X}{R}\right)^2}}$$

$$X = a \cdot R = \frac{X}{R} \cdot R \text{ (Equação 3.20)}$$

Contudo, nos casos em que este dado não é informado pelo fabricante, pode-se recorrer a relação obtida no Red Book, IEEE Std 141-1999 cuja curva de X/R em relação a potência pode ser observada na figura 8.

Figura 8 - Curva X/R por MVA para transformadores



Fonte: IEEE Std 141-1999

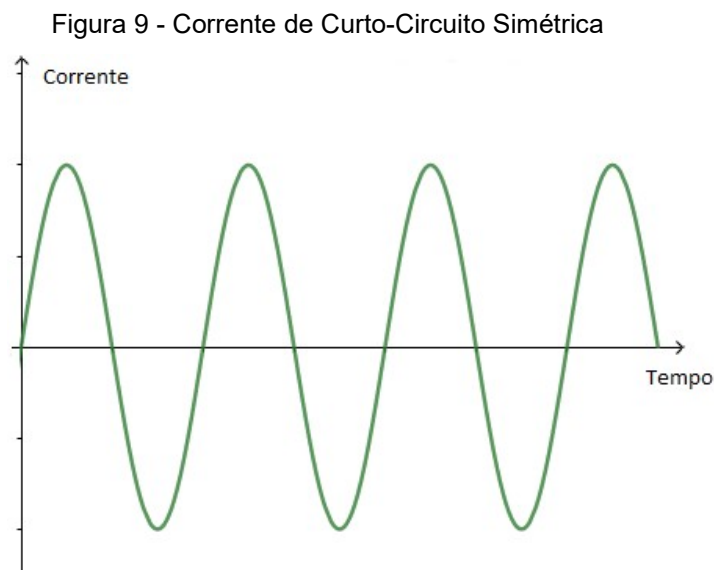
### 3.3 Corrente de Curto-Circuito

Para realização de um correto estudo de proteção e seletividade, é imprescindível que se entenda e dimensione as correntes de curto-circuito, pois as concessionárias de energia elétrica exigem que o sistema de proteção de seus clientes esteja coordenado com seus disjuntores e religadores, sobretudo para instalações com cargas elevadas.

O curto-circuito ocorre quando existem ligações de baixa impedância entre as fases, ou entre fase e terra. Os valores de corrente, nestes casos, adquirem altos valores em um curto espaço de tempo. Tais situações costumam surgir através da perda da isolação dos elementos energizados do circuito. Os valores de pico das correntes de curto circuito podem variar entre 10 a 100 vezes a corrente nominal à que os equipamentos estão projetados para operar.

### 3.3.1 Corrente Simétrica de Curto-Circuito

É a forma de onda que se apresenta simetricamente em relação ao eixo do tempo. Pode ser entendida também com o a corrente de curto-circuito permanente, pois, após fim do período de corrente assimétrico, é a corrente simétrica de curto-circuito que fica estabelecida. Essa componente é de suma importância, pois os equipamentos de proteção são dimensionados a partir desta para suportar os efeitos térmicos da corrente. Na figura 9 é possível perceber a corrente de curto circuito de longo período.

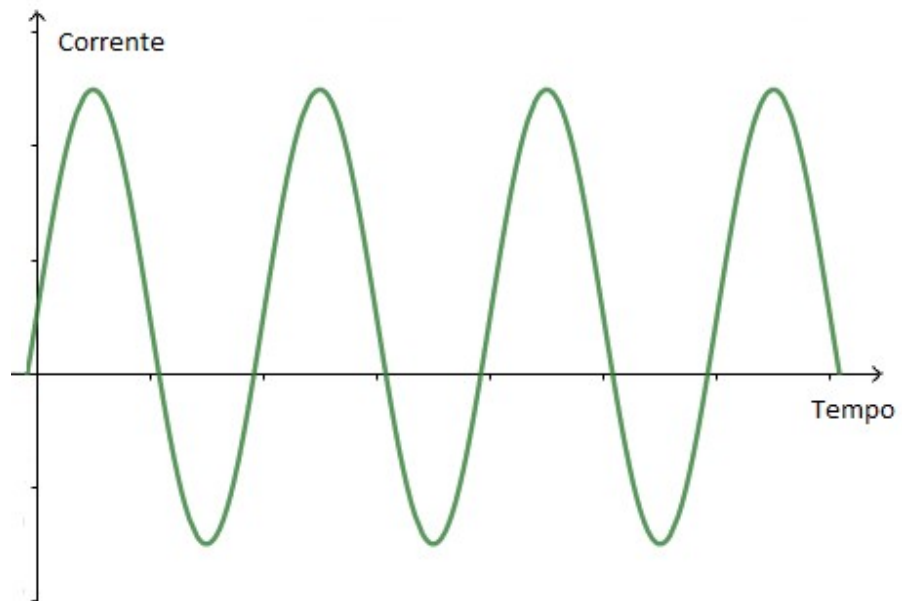


Fonte: O autor

### 3.3.2 Corrente Assimétrica de Curto-Circuito

É a forma de onda que se apresenta de maneira assimétrica em relação ao eixo do tempo e pode ter duas formas: parcialmente assimétrica e a totalmente assimétrica. A corrente de curto-circuito parcialmente assimétrica é pouco deslocada em relação ao eixo do tempo, porém, ainda cruza o eixo como pode ser visto na figura 10.

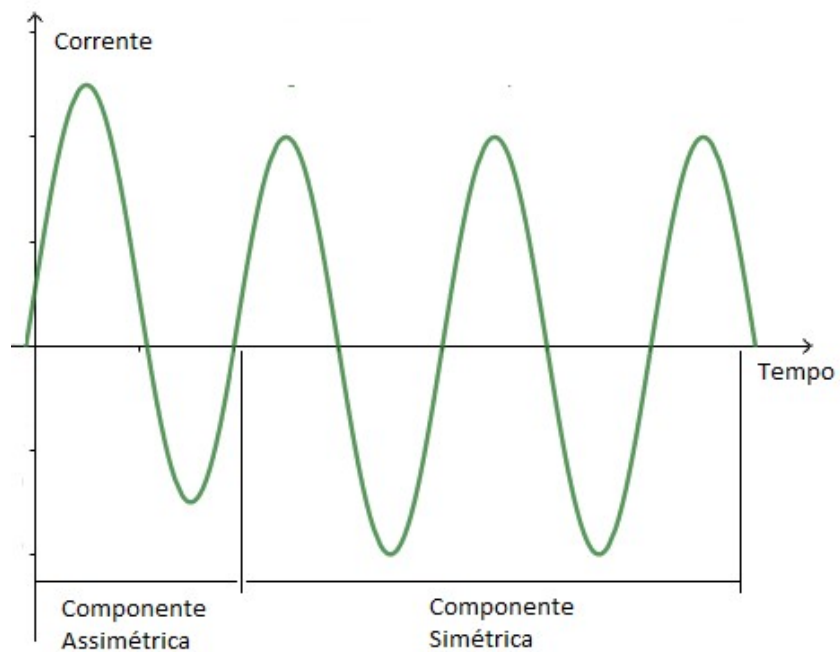
Figura 10 - Corrente de Curto-Circuito Parcialmente Assimétrica



Fonte: O autor

Já a totalmente assimétrica começa com seu primeiro ciclo totalmente deslocado o eixo do tempo sem cruzá-lo, após o tempo transitório assume uma forma de onda simétrica ou parcialmente assimétrica dependendo das características da rede. Na figura 11 apresenta-se a forma assimétrica e simétrica.

Figura 11 - Corrente de Curto-Circuito Assimétrica e Simétrica



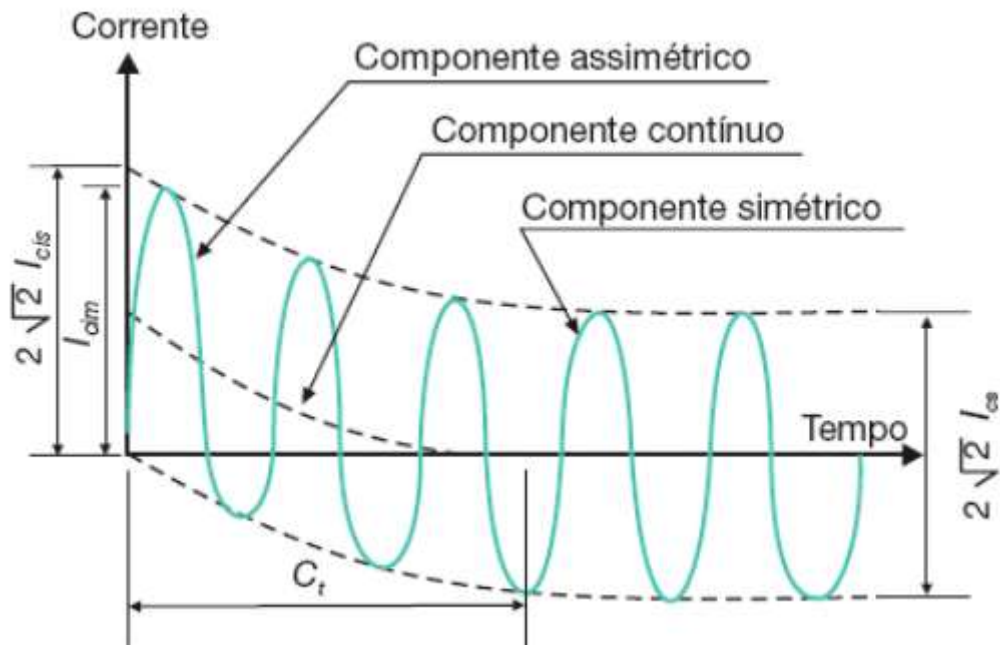
Fonte: O autor

### 3.3.3 Corrente de Curto-Circuito Longe da Fonte

Usualmente os sistemas industriais estão localizados longe da fonte geradora. Isso faz com que a impedância acumulada na rede interfira tanto nos valores das correntes de curto-circuito, quanto nas características da forma de onda. Essa impedância é muito grande em relação a impedância do gerador, fazendo com que a corrente simétrica seja igual a corrente de regime permanente, somente acrescida do seu nível de corrente contínua. A composição da corrente de curto-circuito assimétrica neste ponto apresenta duas componentes, que combinadas resultam no comportamento do curto-circuito que podem ser visualizadas na figura 12 e classificadas como:

- Componente simétrica: comportamento simétrico da corrente de curto-circuito em regime permanente, tem variação previsível;
- Componente contínuo: é a componente de natureza contínua, que decai com o passar do tempo até a estabilização da corrente de curto-circuito. Ele é oriundo da impossibilidade de o fluxo magnético variar bruscamente;

Figura 12 - Componentes da Corrente de Curto-Circuito



Fonte: Mamede Filho (2017, p. 356)



Com base nas características da onda completa que expressa o curto-circuito, pode-se definir algumas grandezas importantes:

- Corrente eficaz de curto circuito-circuito simétrica permanente ( $I_{cs}$ ): é o valor eficaz corrente de curto-circuito simétrica após o período transitório.
- Impulso da corrente de curto-circuito ( $I_{cim}$ ): maior valor da corrente durante um determinado instante de tempo.
- Impulso da corrente de curto-circuito ( $I_{cis}$ ): valor da corrente no exato instante do defeito.

### 3.3.4 Equação matemática da corrente de curto-circuito

O comportamento da corrente de curto-circuito é uma onda senoidal, deste modo uma grande variedade de valores pode ser esperada dependendo do instante de tempo em que o defeito ocorre, a equação 3.21 representa o comportamento da corrente de curto-circuito:

$$I_{cc(t)} = \sqrt{2} \cdot I_{cs} \cdot [\text{sen}(\omega t + \beta - \theta) - e^{-\frac{t}{C_t}} \cdot \text{sen}(\beta - \theta)] \quad (\text{Equação 3.21})$$

Em que:

$I_{cc(t)}$ : Corrente de curto-circuito instantânea em dado instante  $t$ ;

$I_{cs}$ : Valor eficaz da corrente de curto-circuito simétrico;

$t$ : Instante de tempo do defeito;

$\beta$ : Deslocamento angular medido quando o valor de tensão é igual a zero até o instante de tempo de defeito, medido no sentido da variação de tensão pelo tempo.

$C_t$ : Constante de tempo, expressa por:

$$C_t = \frac{X}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R} \quad (\text{Equação 3.22})$$

$R$ : Resistência do circuito, da fonte até o ponto de defeito;

$f$ : Frequência da rede;

$X$ : Reatância do circuito, da fonte até o ponto de defeito;

$\omega$ : Frequência angular;

$\theta$ : Ângulo entre reatância e resistência do circuito, expresso por:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{X}{R} \right) \text{ (Equação 3.23)}$$

A equação da corrente de curto-circuito pode ser dividida em duas partes, sendo a primeira  $\sqrt{2} \cdot I_{cs} \cdot [\text{sen}(\omega t + \beta - \theta)]$  responsável pelo valor simétrico de efeito permanente. Já a segunda parte  $\sqrt{2} \cdot I_{cs} \cdot [-e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \text{sen}(\beta - \theta)]$  é a que acrescenta a componente contínua à forma de onda, responsável pelo comportamento assimétrico inicial.

### 3.3.5 Fator de assimetria

Segundo Mamede Filho (2017), de modo a facilitar o cálculo da corrente de curto circuito assimétrica é possível obter um fator através da relação X/R do sistema até o ponto de defeito, sendo que do produto deste fator pela corrente de curto-circuito simétrica obtém-se o valor de corrente de curto circuito assimétrica. O fator de assimetria (FA) pode ser determinado pela equação abaixo:

$$FA = \sqrt{1 + 2 \cdot e^{-\frac{2\pi R}{X}}} \text{ (Equação 3.24)}$$

*FA*: Fator de Assimetria;

*X*: Reatância do circuito da fonte até o ponto de falha;

*R*: Resistência do circuito da fonte até o ponto de falha;

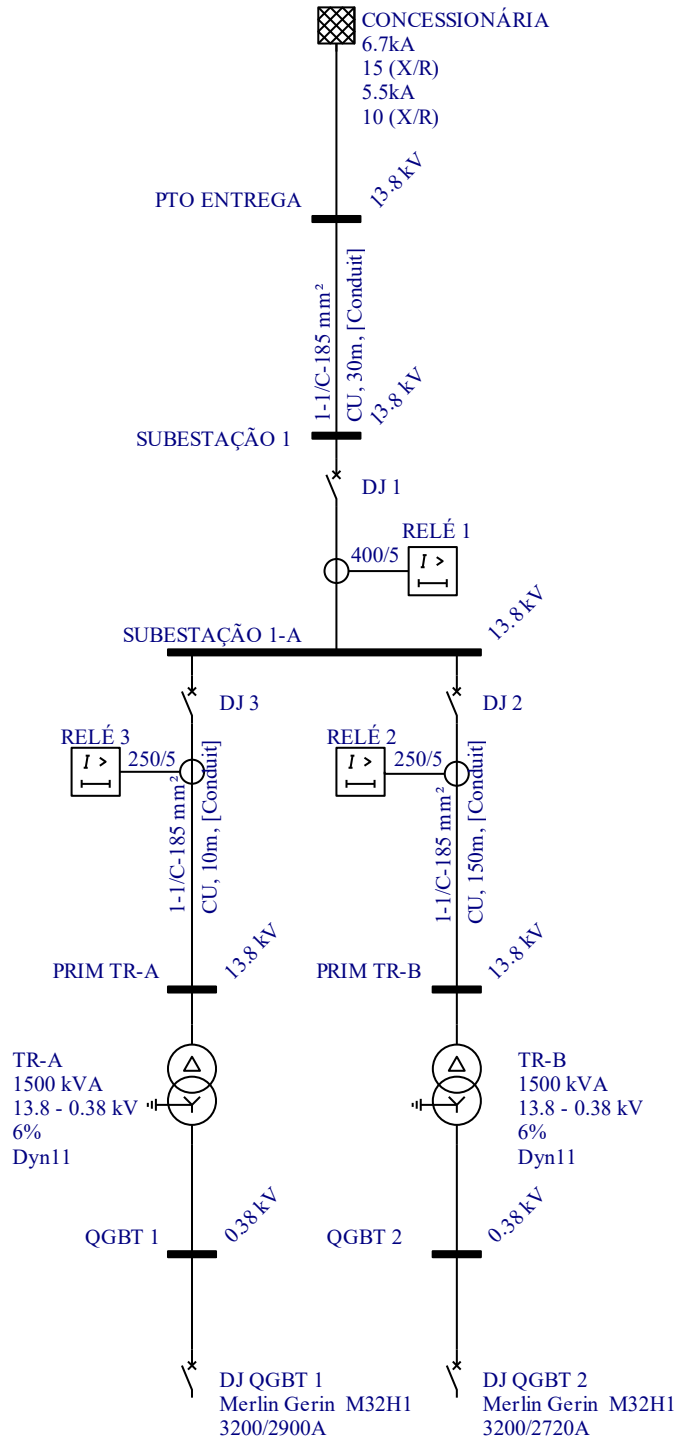
## 3.4 Estudo Proposto

A partir da proposição do circuito da subestação, os critérios adotados foram quanto a proteção dos transformadores (TR-A e TR-B) que se dá através da utilização de disjuntores (DJ 3 e DJ 2) para tal finalidade, além do disjuntor geral. Esse critério foi adotado seguindo a recomendação da NBR IEC 14.039:2005, item 5.3.1.2 que cita a necessidade para a proteção geral da subestação com potência superior a 300 kVA a utilização de disjuntor com funções ANSI 50 e 51. Para a proteção dos transformadores também foi adotado este critério, uma vez que a coordenação com os outros dispositivos de proteção presentes no sistema é necessária.

A hierarquia estabelecida quanto a sequência de atuação das proteções em condições de falha no circuito secundário dos transformadores é de tal maneira que na condição de curto-circuito (ANSI 50) a atuação fica por conta do disjuntor à montante do transformador (disjuntor de média tensão), pois a proteção instantânea o disjuntor geral de baixa tensão está desabilitado de modo a coordenar com maior facilidade com os curtos-circuitos dos futuros alimentados à jusante deste, e no caso de falha do disjuntor à montante do transformador, o disjuntor geral (DJ 1) da subestação está coordenado como *backup* do sistema. Já para a situação de sobrecarga (ANSI 51), o primeiro disjuntor que deverá atuar é o disjuntor de baixa tensão, em caso de falha deste, o disjuntor de média tensão à montante do transformador deverá fazer a proteção do circuito, e ainda em caso de falha deste, o disjuntor geral DJ 1 também está parametrizado para atuar na sobrecarga de um transformador. Como forma de complementação de um estudo real, checkou-se também a coordenação do relé do disjuntor geral da subestação em relação ao religador da concessionária de energia, de modo a garantir que uma falha interna não desligue de forma equivocada a linha de fornecimento.

Na figura 13, está apresentado o diagrama unifilar da subestação com suas características, posteriormente estão apresentadas as sequências de cálculo e as devidas justificativas em conjunto com os coordenogramas elaborados em *software* próprio que permite comprovar o atendimento aos requisitos de proteção, coordenação e seletividade a partir dos cálculos.

Figura 13 – Diagrama Unifilar Subestação 1



Fonte: O autor

### 3.4.1 Dimensionamento dos Componentes do Sistema

O dimensionamento do disjuntor de baixa tensão, deu-se a partir da potência nominal do transformador e sua respectiva tensão secundária, adicionalmente foi levado em consideração a impedância do transformador para conhecimento da corrente de curto-circuito neste mesmo ponto, de maneira que o disjuntor escolhido consiga operar de maneira adequada sob condições de falha. Para os cabos de média tensão, foi aplicado o método da máxima capacidade de condução de corrente considerando a corrente nominal de operação dos equipamentos no ramo em que o valor de corrente é o maior, desta forma a seção encontrada do cabo foi aplicada aos outros ramos da instalação. Os transformadores de corrente foram determinados a partir das correntes nominais dos circuitos à que estão conectados, desta maneira foi escolhido um valor acima do encontrado de maneira que o equipamento não operasse próximo ao seu limite nominal. Os disjuntores de média tensão foram estabelecidos à partir da corrente nominal do ramo que estão conectados e próximos aos valores comercialmente aplicados, uma vez que disjuntores de média tensão tem uma gama muito menor de correntes disponíveis.

### 3.4.2 Cálculo das Impedâncias

Para o cálculo das impedâncias do sistema, foram adotados os seguintes valores:

- Potência base = 100 MVA
- Tensão base = 13,8 kV
- Resistência do cabo de sequência positiva:  $R1 = 0,1380 \Omega/\text{km}$
- Reatância do cabo de sequência positiva:  $X1 = 0,2490 \Omega/\text{km}$
- Resistência do cabo de sequência zero:  $R0 = 0,2194 \Omega/\text{km}$
- Reatância do cabo de sequência positiva:  $X0 = 0,6335 \Omega/\text{km}$
- Impedância do transformador:  $Z = 6 \%$

## 3.4.2.1 Concessionária

- Impedância de sequência positiva ( $Z_{1S}$ )

$$S_{cc3\phi} = \sqrt{3} \cdot kV_n \cdot I_{cc3\phi} \cdot 10^{-3}$$

$$S_{cc3\phi} = \sqrt{3} \cdot 13,8 \cdot 6700 \cdot 10^{-3}$$

$$S_{cc3\phi} = 160,145 [MVA]$$

$$Z_{1S} = \frac{S_{base}}{S_{cc}} = \frac{100}{160,145} = 0,6244 pu$$

$$Z_{LS\phi} = \frac{X}{R} = 15$$

$$\varphi_{cc} = \tan^{-1}(15) = 86,19^\circ$$

$$\boxed{Z_{1S} = 0,6244 \angle 86,19^\circ}$$

$$R_{1S} = Z_{1S} \cdot \cos(\varphi_{cc})$$

$$R_{1S} = 0,6244 \cdot \cos(86,19^\circ)$$

$$\boxed{R_{LS} = 0,041490 pu}$$

$$X_{1S} = Z_{1S} \cdot \sin(\varphi_{cc})$$

$$X_{1S} = 0,6244 \cdot \sin(86,19^\circ)$$

$$\boxed{X_{LS} = 0,623020 pu}$$

$$\boxed{Z_{1S} = 0,0415 + j0,6230}$$

- Impedância de sequência zero ( $Z_{0S}$ )

$$I_{cc1\phi} = \frac{3E}{Z_{0S} + Z_{1S} + Z_{2S} + Z_G}$$

$$Z_G = 0$$

$$Z_{2S} = Z_{1S}$$

$$I_{cc1\phi} = \frac{3E}{Z_{0S} + 2Z_{1S}}$$

$$Z_{0S} = \frac{3E}{I_{cc1\phi}} - 2Z_{1S}$$

$$I_{cc1\phi} = \frac{3E}{Z_{0S} + 2Z_{1S}}$$

$$I_{CC1\phi-PU} = \frac{I_{CC1\phi}}{I_{BASE}} = \frac{I_{CC1\phi}}{\frac{V_{BASE}}{\sqrt{3} \cdot V_{BASE}}}$$

$$I_{CC1\phi-P} \frac{5500}{\frac{100000}{\sqrt{3} \cdot 13,8}} = 1,3146 pu$$

$$\frac{X}{R} = 10$$

$$\varphi_{cc} = \tan^{-1}(10) = 84,29^\circ$$

$$\boxed{I_{CC1\phi-PU} = 1,3146 \angle -84,29^\circ}$$

$$Z_{0S} = \frac{3E}{I_{CC1\phi}} - 2Z_{1S} = \frac{3 \cdot 1 \angle 0^\circ}{1,3146 \angle -84,29^\circ} - 2 \cdot 0,6244 \angle 86,19^\circ$$

$$Z_{0S} = 2,2820 \angle 84,29^\circ - 1,2488 \angle 86,19^\circ$$

$$\boxed{Z_{0S} = 1,0347 \angle 81,99^\circ}$$

$$R_{0S} = 1,0347 \cdot \cos(81,99^\circ)$$

$$\boxed{R_{0S} = 0,144181 pu}$$

$$X_{0S} = 1,0347 \cdot \sin(81,99^\circ)$$

$$\boxed{X_{0S} = 1,024605 pu}$$

$$\boxed{Z_{0S} = 0,1442 + j1,0246}$$

### 3.4.2.2 Cabo A

$$Z_{BASE} = \frac{kV^2}{MVA_{BASE}} = \frac{13,8^2}{100}$$

$$Z_{BASE} = 1,9044 \Omega$$

- Impedância de sequência positiva

$$R_{1A-PU} = \frac{R_{1A} \cdot L}{Z_{BASE}} = \frac{0,1380 \cdot 0,03}{1,9044}$$

$$\boxed{R_{1A-PU} = 0,0021 pu}$$

$$X_{1A-PU} = \frac{X_{1A} \cdot L}{Z_{BASE}} = \frac{0,2490 \cdot 0,03}{1,9044}$$

$$\boxed{X_{1A-PU} = 0,0039 \text{ pu}}$$

$$\boxed{Z_{1A} = 0,0021 + j0,0039 \text{ pu}}$$

- Impedância de sequência zero

$$R_{0A-PU} = \frac{R_{0A} \cdot L}{Z_{BASE}} = \frac{0,2194 \cdot 0,03}{1,9044}$$

$$\boxed{R_{0A-PU} = 0,0034 \text{ pu}}$$

$$X_{0A-PU} = \frac{X_{0A} \cdot L}{Z_{BASE}} = \frac{0,6335 \cdot 0,03}{1,9044}$$

$$\boxed{X_{0A-PU} = 0,0100 \text{ pu}}$$

$$\boxed{Z_{0A} = 0,0034 + j0,0100 \text{ pu}}$$

### 3.4.2.3 Cabo B

- Impedância de sequência positiva

$$R_{1B-PU} = \frac{R_{1B} \cdot L}{Z_{BASE}} = \frac{0,1380 \cdot 0,01}{1,9044}$$

$$\boxed{R_{1B-PU} = 0,0007 \text{ pu}}$$

$$X_{1B-PU} = \frac{X_{1B} \cdot L}{Z_{BASE}} = \frac{0,2490 \cdot 0,01}{1,9044}$$

$$\boxed{X_{1B-PU} = 0,0013 \text{ pu}}$$

$$\boxed{Z_{1B} = 0,0007 + j0,0013 \text{ pu}}$$



- Impedância de sequência zero

$$R_{0B-PU} = \frac{R_{0B} \cdot L}{Z_{BASE}} = \frac{0,2194 \cdot 0,01}{1,9044}$$

$$\boxed{R_{0B-PU} = 0,0011 \text{ pu}}$$

$$X_{0B-PU} = \frac{X_{0B} \cdot L}{Z_{BASE}} = \frac{0,6335 \cdot 0,01}{1,9044}$$

$$\boxed{X_{0B-PU} = 0,0033 \text{ pu}}$$

$$\boxed{Z_{0B} = 0,0011 + j0,0033 \text{ pu}}$$

#### 3.4.2.4 Cabo C

- Impedância de sequência positiva

$$R_{1C-PU} = \frac{R_{1C} \cdot L}{Z_{BASE}} = \frac{0,1380 \cdot 0,15}{1,9044}$$

$$\boxed{R_{1C-PU} = 0,0105 \text{ pu}}$$

$$X_{1C-PU} = \frac{X_{1C} \cdot L}{Z_{BASE}} = \frac{0,2490 \cdot 0,15}{1,9044}$$

$$\boxed{X_{1C-PU} = 0,0195 \text{ pu}}$$

$$\boxed{Z_{1C} = 0,0105 + j0,0195 \text{ pu}}$$

- Impedância de sequência zero

$$R_{0C-PU} = \frac{R_{0C} \cdot L}{Z_{BASE}} = \frac{0,2194 \cdot 0,15}{1,9044}$$

$$\boxed{R_{0C-PU} = 0,0170 \text{ pu}}$$

$$X_{0C-PU} = \frac{X_{0C} \cdot L}{Z_{BASE}} = \frac{0,6335 \cdot 0,15}{1,9044}$$

$$\boxed{X_{0C-pu} = 0,0500 pu}$$

$$\boxed{Z_{0C} = 0,0170 + j0,0500 pu}$$

### 3.4.2.5 Transformador TR-A

- Impedância de sequência positiva

$$Z_{1TR-A} = \frac{Z\%}{S_{TR-A}} = \frac{6\%}{1,5}$$

$$\boxed{Z_{1TR-A} = 4,0000 pu}$$

Da figura 08, tem-se:

$$\frac{X}{R} = 8$$

$$R_{1TR-A} = \frac{Z_{1TR-A}}{\sqrt{1 + \left(\frac{X}{R}\right)^2}} = \frac{4,0000}{\sqrt{1 + (8)^2}} = \frac{4,0000}{8,06}$$

$$\boxed{R_{1TR-A} = 0,4962 pu}$$

$$X_{1TR-A} = R_{1TR-A} \cdot \left(\frac{X}{R}\right) = 0,4962 \cdot 8$$

$$\boxed{X_{1TR-A} = 3,9696 pu}$$

$$\boxed{Z_{1TR-A} = 0,4962 + j3,9696 pu}$$

- Impedância de sequência zero

$$Z_{0TR-A} = 0,85 \cdot Z_{1TR-A} = 0,85 \cdot 0,4962 + j3,9696$$

$$\boxed{Z_{0TR-A} = 0,4217 + j3,3741}$$

## 3.4.2.6 Transformador TR-B

- Impedância de sequência positiva

$$Z_{1TR-B} = \frac{Z\%}{S_{TR-B}} = \frac{6\%}{1,5}$$

$$\boxed{Z_{1TR-B} = 4,0000 \text{ pu}}$$

Da figura 08, tem-se:

$$\frac{X}{R} = 8$$

$$R_{1TR-B} = \frac{Z_{1TR-B}}{\sqrt{1 + \left(\frac{X}{R}\right)^2}} = \frac{4,0000}{\sqrt{1 + (8)^2}} = \frac{4,0000}{8,06}$$

$$\boxed{R_{1TR-B} = 0,4962 \text{ pu}}$$

$$X_{1TR-B} = R_{1TR-B} \cdot \left(\frac{X}{R}\right) = 0,4962 \cdot 8$$

$$\boxed{X_{1TR-B} = 3,9696 \text{ pu}}$$

$$\boxed{Z_{1TR-B} = 0,4962 + j3,9696 \text{ pu}}$$

- Impedância de sequência zero

$$Z_{0TR-B} = 0,85 \cdot Z_{1TR-B} = 0,85 \cdot 0,4962 + j3,9696$$

$$\boxed{Z_{0TR-B} = 0,4217 + j3,3741}$$

### 3.4.3 Corrente de Curto-Circuito Trifásico no Terminal Secundário do Transformador TR-A

$$Z_{SEC-TR-A} = Z_{1S} + Z_{1A} + Z_{1B} + Z_{TR-A}$$

$$Z_{SEC-TR-A} = (0,0415 + j0,6230) + (0,0021 + j0,0039) + (0,0007 + j0,0013) \\ + (0,4962 + j3,9696)$$

$$Z_{SEC-TR-A} = 0,5405 + j4,5978$$

$$Z_{SEC-TR-A} = 4,6295 \angle 83,29^\circ$$

$$I_{CC\ 3\phi\ SIMÉTRICO} = \frac{E}{Z_{SEC-TR-A}} = \frac{1 \angle 0^\circ}{4,6295 \angle 83,29^\circ}$$

$$I_{CC\ 3\phi\ SIMÉTRICO} = 0,2160 \angle -83,29^\circ\ A$$

$$I_{CC\ BASE} = \frac{100000}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 151,93\ kA$$

$$I_{CC\ 3\phi\ SIMÉTRICO} = 151934,3 \cdot 0,2160$$

$$I_{CC\ 3\phi\ SIMÉTRICO} = 32,82\ kA$$

### 3.4.4 Corrente de Curto-Circuito Fase-Terra no Terminal Secundário do Transformador TR-A

$$I_{CC\ 1\phi} = \frac{3E}{Z_{0S} + Z_{1EQ} + Z_{2EQ} + Z_G}$$

$$Z_{2EQ} = Z_{1E}$$

$$Z_G = 0$$

$$Z_{0E} = Z_{0S} + Z_{0A} + Z_{0B} + Z_G + Z_{0TR-A}$$

$$Z_{0E} = 0,4217 + j3,3741$$

Importante observar que em transformadores onde a configuração de ligação do primário é em triângulo e a ligação secundária é em estrela, a incidência de um curto-circuito no secundário não promove a circulação da corrente de sequência zero no primário do transformador.

$$I_{CC1\emptyset} = \frac{3\angle 0^\circ}{0,4217 + j3,3741 + (2 \cdot 4,6295\angle 83,29^\circ)}$$

$$I_{CC1\emptyset} = \frac{3\angle 0^\circ}{0,4217 + j3,3741 + 9,2590\angle 83,29^\circ}$$

$$I_{CC1\emptyset} = \frac{3\angle 0^\circ}{12,6592\angle 83,17^\circ}$$

$$\boxed{I_{CC1\emptyset} = 0,2369\angle -83,17^\circ A}$$

$$\boxed{I_{CCBASE} = \frac{100000}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 151,93 kA}$$

$$I_{CC1\emptyset SIMÉTRICO} = 151934,3 \cdot 0,2369$$

$$\boxed{I_{CC1\emptyset SIMÉTRICO} = 36,00 kA}$$

### 3.4.5 Ajuste Disjuntor de Baixa Tensão do Transformador TR-A

A análise dos parâmetros de ajuste do disjuntor do secundário do transformador dá-se a partir da corrente nominal ( $I_{n_{sec}}$ ):

$$I_{n_{sec}} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V_s} = \frac{1500}{\sqrt{3} \cdot 0,38}$$

$$I_{n_{sec}} = 2,28 kA$$

- Determinação do ajuste de corrente para tempo longo ( $I_{LTD}$ )

$$I_{LTD} = \frac{1,2 \cdot I_{n_{sec}}}{I_{n-disparador}} = \frac{1,2 \cdot 2279,01}{3200} = 0,85 \cdot I_n$$

$$\boxed{I_{LTD} = 0,85}$$

- Determinação do ajuste de tempo para a corrente de tempo longo ( $T_{LTD}$ )

Por tratar-se do primeiro dispositivo imediatamente conectado ao secundário do transformador, será adotado o tempo mínimo de ajuste:  $T_{LTD} = 0,5 s$ . Com esse ajuste é possível a coordenação com os dispositivos à jusante.

- Determinação do ajuste de corrente para tempo curto ( $I_{STD}$ )

O ajuste deste parâmetro será feito abaixo da corrente de curto circuito fase-terra, inicialmente sendo a 38% desta para verificar se o ajuste já é suficiente para garantir seletividade.

$$I_{STD} = 0,85 < (0,38 \cdot I_{CC1\phi SIMÉTRICO})$$

$$I_{STD} = 0,38 \cdot 35993,23$$

$$I_{STD} = 13,68 \text{ kA}$$

Desta forma, para determinar o ajuste:

$$I_{STD} < \frac{13677,43}{(3200 \cdot 0,85)} = 5,01 \cdot I_r$$

$$\boxed{I_{STD} = 4 \cdot I_r}$$

- Determinação do ajuste de tempo para a corrente de tempo curto retardo ( $T_{STD}$ )

Já para o ajuste de tempo, deverá considerar que existem diversos perfis de carga ligados a este barramento. Portanto, o ajuste de tempo de curto retardo será em 0,2 s, coordenando com as proteções à jusante do disjuntor geral.

- Determinação do ajuste instantâneo ( $I_{INS}$ )

Por tratar-se do disjuntor geral, a coordenação deste dispositivo com a grande variedade de disjuntores à jusante torna-se muito difícil, desta forma o ajuste instantâneo deverá ser bloqueado.

#### 3.4.6 Ajuste das Proteções de Média Tensão do Transformador TR-A

Para o relé de proteção do primário do transformador foi utilizado o modelo SEPAM S-42 da fabricante Schneider Electric. Este relé detém as funções de proteção de corrente e tensão, dentre outras várias funções ANSI complementares para um nível maior de proteção.

Para determinação dos ajustes de proteção de média tensão, devem-se levar em consideração a corrente de *in-rush* do transformador, corrente nominal, corrente de curto-circuito trifásica no secundário e corrente de curto-circuito fase-terra do primário. Estes parâmetros serão inseridos no disjuntor imediatamente a montante do transformador TR-A, denominado de DJ 3.

$$I_{n_{prim-TR-A}} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{1500}{\sqrt{3} \cdot 13,8}$$

$$\boxed{I_{n_{prim-TR-A}} = 62,75 \text{ A}}$$

- Determinação da corrente de *pick-up* de fase ( $I_{>}$ )

$$I_{>} = 1,5 \cdot I_{n_{prim-TR-A}} = 1,5 \cdot 62,75$$

$$\boxed{I_{>} = 94 \text{ A}}$$

Para o ajuste no relé de proteção, considerando o transformador de corrente com relação de transformação (RTC) 250-5A:

$$Ajuste_{DJ} = \frac{I_{>}}{RTC} = \frac{94,12}{50} = 1,8824 \text{ A}$$

$$I_{>relé-DJ3} = \frac{Ajuste_{DJ3}}{I_{N-Relé}} = \frac{1,8824}{5} = 0,3764 \cong 0,5$$

$$\boxed{I_{>relé-DJ3} = 0,5 \cdot I_n}$$

O ajuste definido refere-se aos 94 A de corrente de *pick-up*. Para a determinação do tempo de atuação ( $t_{>}$ ) deve-se considerar o tempo de proteção do disjuntor presente no secundário do transformador (0,2 s), acrescido do intervalo de coordenação entre o relé e o disjuntor do secundário (0,25 s).

Considerando a curva muito inversa, deve-se determinar os múltiplos da corrente de ajuste, considerando a corrente de curto-circuito trifásica refletida para o lado primário do transformador. A partir da equação da curva IEC Extremamente Inversa, tem-se:

$$t = \frac{80}{Múltiplos^2 - 1} \cdot DT$$

Determinando os múltiplos,

$$Múltiplos = \frac{I_{cc}}{I_{>}} = \frac{903,67}{94} = 9,61$$

Isolando DT,

$$DT = \frac{t \cdot (Múltiplos^2 - 1)}{80} = \frac{0,45 \cdot (9,61^2 - 1)}{80} = \frac{3,87}{13,5}$$

$$\boxed{DT = 0,51}$$

O ajuste a ser inserido no relé:

$$\frac{t_{>}}{\beta} = DT \Rightarrow t_{>} = 0,51 \cdot 1,5 = 0,77$$

$$\boxed{t_{>} \cong 0,8 \text{ s}}$$

- Determinação do ajuste de corrente instantâneo ( $I_{>>}$ )

O ajuste para disparo da unidade instantânea deve ser inicialmente 10% acima da corrente de curto circuito máximo assimétrico do secundário do transformador, refletido ao primário, de modo que se verifique a seletividade gerada por este ajuste. Para tanto, aplica-se o fator de assimetria à corrente de curto-circuito simétrico para um período de tempo de 0,5 segundos.

$$FA = \sqrt{1 + 2 \cdot e^{-\frac{2\pi \cdot R}{X}}}$$

$$FA = \sqrt{1 + 2 \cdot e^{-\frac{2\pi \cdot 0,5503}{4,6160}}}$$

$$FA = 1,3948$$

A corrente de ajuste a ser considerada é determinada por:

$$I_{>>} = 1,1 \cdot \frac{I_{CC3\phi SIMÉTRICO} \cdot FA}{\frac{V_p}{V_s}} = 1,1 \cdot \frac{32817,80 \cdot 1,3948}{\frac{13800}{380}}$$

$$\boxed{I_{>>} = 1,39 \text{ kA}}$$

O ajuste no relé de dado por:

$$Ajuste = \frac{I_{>>}}{RTC} = \frac{1386,50}{50} \cong 35 \text{ A}$$

$$I_{>>relé-DJ3} = \frac{Ajuste}{I_{N-Relé}} = \frac{35}{5}$$

$$\boxed{I_{>>relé-DJ3} = 7 \cdot I_n}$$

- Determinação da temporização do ajuste de corrente instantâneo ( $t_{>>}$ )

A temporização para a atuação de curto-circuito deve ser a menor possível, usualmente 0,05 segundos, ou se possível no relé de proteção definida como instantânea.



### 3.4.7 Corrente de Curto-Circuito Trifásico no Terminal Secundário do Transformador TR-B

$$Z_{SEC-TR-B} = Z_{1S} + Z_{1A} + Z_{1C} + Z_{TR-}$$

$$Z_{SEC-TR-B} = (0,0415 + j0,6230) + (0,0021 + j0,0039) + (0,0105 + j0,0195) + (0,4962 + j3,9696)$$

$$Z_{SEC-TR-B} = 0,5503 + j4,616$$

$$Z_{SEC-TR-B} = 4,6487 \angle 83,20^\circ$$

$$I_{CC3\phi SIMÉTRICO} = \frac{E}{Z_{SEC-TR-A}} = \frac{1 \angle 0^\circ}{4,6487 \angle 83,20^\circ}$$

$$I_{CC3\phi SIMÉTRICO} = 0,2151 \angle -83,20^\circ$$

$$I_{CCBASE} = \frac{100000}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 151,93 \text{ kA}$$

$$I_{CC3\phi SIMÉTRICO} = 151934,3 \cdot 0,2151$$

$$I_{CC3\phi SIMÉTRICO} = 32,82 \text{ kA}$$

### 3.4.8 Corrente de Curto-Circuito Fase-Terra no Terminal Secundário do Transformador TR-B

$$I_{CC1\phi} = \frac{3E}{Z_{0S} + Z_{1EQ} + Z_{2E} + Z_G}$$

$$Z_{2E} = Z_{1E}$$

$$Z_G = 0$$

$$Z_{0EQ} = Z_{0S} + Z_{0A} + Z_{0C} + Z_G + Z_{0TR-A}$$

$$Z_{0EQ} = 0,4217 + j3,3741$$

$$I_{CC1\phi} = \frac{3 \angle 0^\circ}{0,4217 + j3,3741 + (2 \cdot 4,6487 \angle 83,20^\circ)}$$

$$I_{CC1\phi} = \frac{3 \angle 0^\circ}{0,4217 + j3,3741 + 9,2974 \angle 83,20^\circ}$$

$$I_{CC1\phi} = \frac{3 \angle 0^\circ}{12,6977 \angle 83,11^\circ}$$

$$I_{CC1\phi} = 0,2362 \angle -83,11^\circ$$

$$I_{CC_{BASE}} = \frac{100000}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 151,93 \text{ kA}$$

$$I_{CC_{1\phi SIMÉTRICO}} = 151934,3 \cdot 0,2362$$

$$I_{CC_{1\phi SIMÉTRICO}} = 35,89 \text{ kA}$$

### 3.4.9 Ajuste Disjuntor de Baixa Tensão do Transformador TR-B

A análise dos parâmetros de ajuste do disjuntor do secundário do transformador dá-se a partir da corrente nominal ( $I_{n_{sec}}$ ):

$$I_{n_{sec}} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{1500}{\sqrt{3} \cdot 0,38}$$

$$I_{n_{sec}} = 2,28 \text{ kA}$$

- Determinação do ajuste de corrente para tempo longo ( $I_{LTD}$ )

$$I_{LTD} = \frac{1,2 \cdot I_{n_{sec}}}{I_{n-disparado}} = \frac{1,2 \cdot 2279,01}{3200} = 0,85 \cdot I_n$$

$$I_{LTD} = 0,85$$

- Determinação do ajuste de tempo para a corrente de tempo longo ( $T_{LTD}$ )

Por tratar-se do primeiro dispositivo de proteção de baixa tensão, conectado ao secundário do transformador, será adotado o tempo mínimo de ajuste:  $T_{LTD} = 0,5 \text{ s}$ . Com esse ajuste foi possível a coordenação com os dispositivos à jusante.

- Determinação do ajuste de corrente para tempo curto ( $I_{STD}$ )

O ajuste deste parâmetro será feito inicialmente abaixo da corrente de curto circuito fase-terra, sendo a 38% desta, de modo que seja verificado se o ajuste escolhido é adequado.

$$I_{STD} = 0,85 < (0,38 \cdot I_{CC_{1\phi SIMÉTRICO}})$$

$$I_{STD} = 0,38 \cdot 35886,88$$

$$I_{STD} = 13,64 \text{ kA}$$

Desta forma, para determinar o ajuste:

$$I_{STD} < \frac{13637,01}{(3200 \cdot 0,85)} = 5,01 \cdot I_r$$

$$\boxed{I_{STD} = 4 \cdot I_r}$$

- Determinação do ajuste de tempo para a corrente de tempo curto retardo ( $T_{STD}$ )

Já para o ajuste de tempo, deverá considerar que existem diversos perfis de carga ligados a este barramento. Portanto, o ajuste de tempo de curto retardo será em 0,2 s, coordenando com as proteções à jusante do disjuntor geral.

- Determinação do ajuste instantâneo ( $I_{INS}$ )

O ajuste instantâneo deverá ser bloqueado pelo mesmo critério adotado no transformador TR-A.

#### 3.4.10 Ajuste das Proteções de Média Tensão do Transformador TR-B

O relé de proteção do primário do transformador considerado é o mesmo utilizado para o transformador TR-A

Para determinação dos ajustes de proteção de média tensão, devem-se levar em consideração a corrente de *in-rush* do transformador, corrente nominal, corrente de curto-circuito trifásica no secundário e corrente de curto-circuito fase-terra do primário. Estes parâmetros serão inseridos no disjuntor imediatamente a montante do transformador TR-B, denominado de DJ 2.

$$I_{n_{prim-TR-B}} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{1500}{\sqrt{3} \cdot 13,8}$$

$$\boxed{I_{n_{prim-TR-B}} = 62,75 \text{ A}}$$

- Determinação da corrente de *pick-up* de fase ( $I_{>}$ )

$$I_{>} = 1,5 \cdot I_{n_{prim-TR-B}} = 1,5 \cdot 62,75$$

$$\boxed{I_{>} = 94 \text{ A}}$$

Para o ajuste no relé de proteção, considerando o transformador de corrente com relação de transformação (RTC) 250-5A:

$$Ajuste_{DJ2} = \frac{I_{>}}{RTC} = \frac{94,12}{\frac{250}{5}} = 1,8824 \text{ A}$$

$$I_{>relé-DJ2} = \frac{Ajuste_{DJ}}{I_{N-Relé}} = \frac{1,8824}{5} = 0,3764 \cong 0,5 \text{ (ajuste SEPAM)}$$

$$\boxed{I_{>relé-DJ2} = 0,5 \cdot I_n}$$

O ajuste definido refere-se aos 94 A de corrente de *pick-up*. Para a determinação do tempo de atuação ( $t_{>}$ ) deve-se considerar o tempo de proteção do disjuntor presente no secundário do transformador (0,2 s), acrescido do intervalo de coordenação entre o relé e o disjuntor do secundário (0,25 s).

Considerando a curva muito inversa, deve-se determinar os múltiplos da corrente de ajuste, considerando a corrente de curto-circuito trifásica refletida para o lado primário do transformador. A partir da equação da curva IEC Muito Inversa, tem-se:

$$t = \frac{13,5}{\text{Múltiplos} - 1} \cdot DT$$

Determinando os múltiplos,

$$\text{Múltiplos} = \frac{I_{cc}}{I_{>}} = \frac{903,67}{94} = 9,61$$

Isolando DT,

$$DT = \frac{t \cdot (\text{Múltiplos} - 1)}{13,5} = \frac{0,45 \cdot (9,61 - 1)}{13,5} = \frac{3,87}{13,5}$$

$$\boxed{DT = 0,29}$$

O ajuste a ser inserido no relé:

$$\frac{t_{>}}{\beta} = DT \Rightarrow t_{>} = 0,29 \cdot 1,5 = 0,4305$$

$$\boxed{t_{>} \cong 0,5 \text{ s}}$$

- Determinação do ajuste de corrente instantâneo ( $I_{>>}$ )

O ajuste para disparo da unidade instantânea deve ser inicialmente de 10% acima da corrente de curto circuito máximo assimétrico do secundário do transformador, refletido ao primário, de modo a verificar se o ajuste é adequado. Para tanto, aplica-se o fator de assimetria à corrente de curto-circuito simétrico para um período de tempo de 0,5 segundos.

$$FA = \sqrt{1 + 2 \cdot e^{-\frac{2\pi \cdot R}{X}}}$$

$$FA = \sqrt{1 + 2 \cdot e^{-\frac{2\pi \cdot 0,5503}{4,6160}}}$$

$$FA = 1,3948$$

A corrente de ajuste a ser considerada é determinada por:

$$I_{>>} = 1,1 \cdot \frac{I_{CC3\phi SIMÉTRICO} \cdot FA}{\frac{V_p}{V_s}} = 1,1 \cdot \frac{32817,80 \cdot 1,3948}{\frac{13800}{380}}$$

$$\boxed{I_{>>} = 1,39 \text{ kA}}$$

O ajuste no relé de dado por:

$$Ajuste = \frac{I_{>>}}{RTC} = \frac{1386,50}{\frac{250}{5}} \cong 35 \text{ A}$$

$$I_{>>relé-DJ2} = \frac{Ajuste}{I_{N-Relé}} = \frac{35}{5}$$

$$\boxed{I_{>relé-DJ2} = 7 \cdot I_n}$$

- Determinação da temporização do ajuste de corrente instantâneo ( $t_{>>}$ )

A temporização para a atuação de curto-circuito deve ser a menor possível, usualmente 0,05 segundos, ou se possível no relé de proteção definida como instantânea.

### 3.4.11 Ajuste das Proteções de Média Tensão do Transformador DJ 1

Para determinação dos ajustes de proteção de média tensão do disjuntor 1 (DJ 1), devem-se levar em consideração as correntes de *in-rush* dos transformadores, corrente nominal, corrente de curto-circuito trifásica no secundário e corrente de curto-circuito fase-terra do primário.

$$In_{DJ1} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{3000}{\sqrt{3} \cdot 13,8}$$

$$\boxed{In_{prim-TR-A} = 125,50 A}$$

- Determinação da corrente de *pick-up* de fase ( $I_{>}$ )

$$I_{>} = 1,5 \cdot In_{DJ1} = 1,5 \cdot 125,50 = 188,25$$

$$\boxed{I_{>} = 190 A}$$

Para o ajuste no relé de proteção, considerando o transformador de corrente com relação de transformação (RTC) 400-5A:

$$Ajuste_{DJ} = \frac{I_{>}}{RTC} = \frac{190}{400} = 2,3750 A$$

$$I_{>relé-DJ1} = \frac{Ajuste_{DJ1}}{I_{N-Relé}} = \frac{2,3750}{5} = 0,4750 \cong 0,5$$

$$\boxed{I_{>relé-DJ1} = 0,5 \cdot In}$$

O ajuste definido refere-se aos 190 A de corrente de *pick-up*. Para a determinação do tempo de atuação ( $t_{>}$ ) deve-se considerar o tempo de proteção de 1 segundo, de modo que as proteções a jusante não sejam sobrepostas com facilidade.

Considerando a curva normal inversa, deve-se determinar os múltiplos da corrente de ajuste, considerando a corrente de curto-circuito trifásica refletida para o lado primário do transformador. A partir da equação IEC Normal Inversa, tem-se:

$$t = \frac{0,14}{Múltiplos^{0,02} - 1} \cdot DT$$

Determinando o ajuste dos múltiplos no relé à partir da  $I_{cc}$  de um dos transformadores de modo a posicionar a curva de atuação da proteção de maneira fique abaixo da curva de danos do transformador.

$$Mútiplos = \frac{I_{cc}}{I_{>}} = \frac{6661}{190} = 35,05$$

Isolando DT,

$$DT = \frac{t \cdot (Mútiplos^{0,02} - 1)}{0,14} = \frac{1 \cdot (35,05^{0,02} - 1)}{0,14} = 0,5266$$

$$\boxed{DT = 0,53}$$

O ajuste a ser inserido no relé:

$$\frac{t_{>}}{\beta} = DT \Rightarrow t_{>} = 0,53 \cdot 1,5 = 0,795$$

$$\boxed{t_{>} \cong 0,8 \text{ s}}$$

- Determinação do ajuste de corrente instantâneo ( $I_{>>}$ )

O ajuste para disparo da unidade instantânea deve inicialmente ser 10% acima da corrente de curto circuito máximo assimétrico do secundário do transformador, refletido ao primário, assim como no critério adotado para o transformador TR-A. Para tanto, aplica-se o fator de assimetria à corrente de curto-circuito simétrico para um período de tempo de 10 segundos, de modo a coordenar com os dispositivos à jusante e não causar problemas de seletividade. Portanto, os mesmos ajustes de corrente dos disjuntores 2 e 3 são aplicados aqui, porém apenas o tempo é alterado.

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 Parâmetros de Proteção do Transformador TR-A

Nos estudos preliminares para as proteções do transformador TR-A, foram obtidos inicialmente os parâmetros dispostos na Tabela 3:

Tabela 3 – Ajustes a serem inseridos no Relé 3

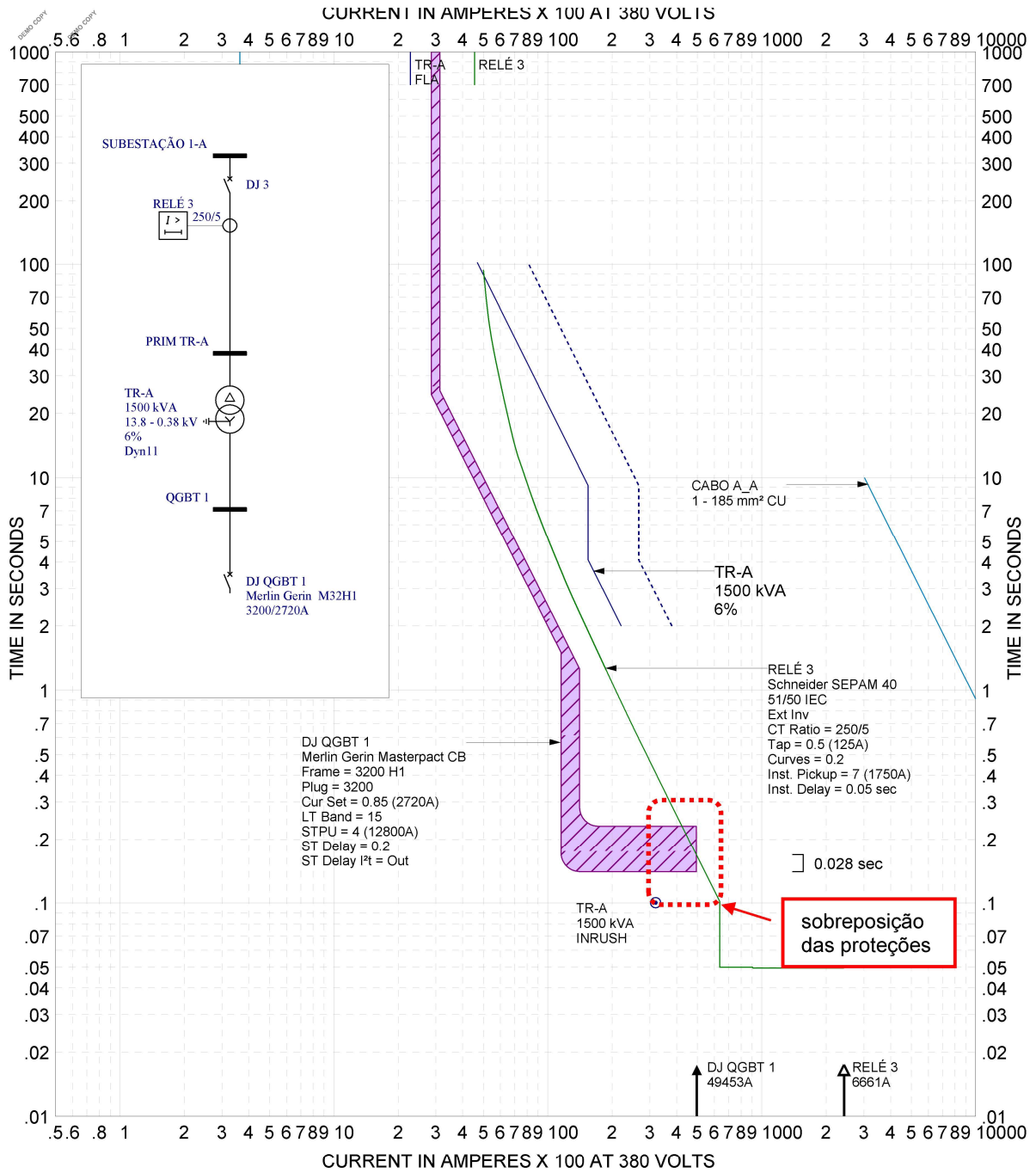
<b>Ajuste</b>	<b>Baixa Tensão</b>	<b>Média Tensão</b>
Pickup Instantâneo (A)	Desl.	$7 \cdot I_n$
Atraso Instantâneo (s)	Desl.	0,05
Pickup Curto (A)	$4 \cdot I_r$	-
Tempo Curto (s)	0,20	-
Pickup Longo (A)	$0,85 \cdot I_n$	$0,50 \cdot I_n$
Tempo Longo (s)	0,50	0,80

Fonte – O autor

Com a parametrização, obteve-se uma sobreposição entre as curvas de proteção do disjuntor de baixa tensão e da curva do relé de proteção primário, desse modo, não é possível garantir a seletividade entre os dispositivos, conforme pode ser verificado na figura 14. Desta forma, evidencia-se também que, segundo Mardegan (2010), a característica extremamente inversa tem uma baixa velocidade de atuação para baixas correntes e rápida atuação para altas correntes, portanto, mesmo que alterados os parâmetros de TAP da curva, tempo de atuação e alteração na relação de transformação, não foi possível obter seletividade entre os dispositivos. Para que pudesse haver seletividade entre as proteções, foram então admitidos os parâmetros calculados para o relé de média tensão do transformador B (TR-B).



Figura 14 - Coordenograma Entre DJ 3, DJ QGBT-1 e TR-A Para Curva EI



Fonte: O autor

## 4.2 Parâmetros de Proteção do Transformador TR-B

Para as proteções do transformador TR-B, foram obtidos inicialmente os parâmetros dispostos na Tabela 4:

Tabela 4 – Ajustes a serem inseridos no Relé 2

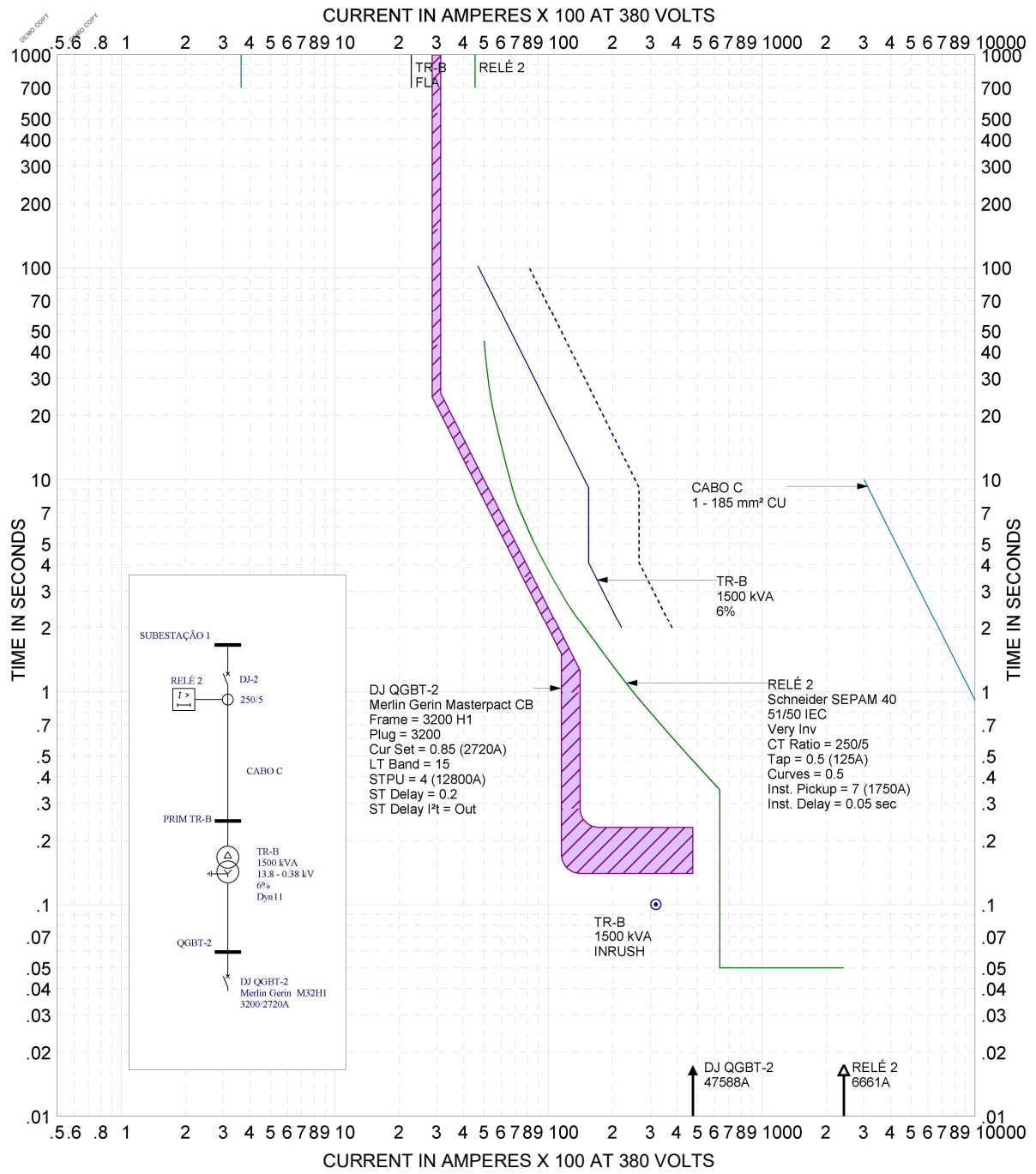
<b>Ajuste</b>	<b>Baixa Tensão</b>	<b>Média Tensão</b>
<i>Pickup</i> Instantâneo (A)	Desl.	$7 \cdot I_n$
Atraso Instantâneo (s)	Desl.	0,05
<i>Pickup</i> Curto (A)	$4 \cdot I_r$	-
Tempo Curto (s)	0,20	-
<i>Pickup</i> Longo (A)	$0,85 \cdot I_n$	$0,50 \cdot I_n$
Tempo Longo (s)	0,50	0,50

Fonte – O autor

Para o transformador TR-B, foi considerado na proteção de média tensão a curva muito inversa. A parametrização obtida apresentou um perfeito ajuste sob o ponto de vista da coordenação e seletividade da proteção junto ao disjuntor de baixa tensão. Na figura 15 pode-se observar que não há sobreposição de curvas de proteção e os intervalos de tempo são respeitados. Sob o ponto de vista de um curto-circuito, apenas o sistema de proteção em média tensão atua, já em um sobrecarga, garante-se que o disjuntor de baixa tensão irá operar primeiro, sendo que a proteção em média tensão serve como uma proteção de *backup* em caso de falha da primeira.

Mesmo que os valores obtidos através da sequência de passos sugerida pela literatura tenham gerado um coordenograma seletivo, percebe-se que não existe muita margem para alterações nos parâmetros obtidos sob o ponto de vista do relé de média tensão. Para que se pudesse ter uma ampla variedade de possibilidades de curvas, com diversos ajustes, seria necessário alterar também os parâmetros de proteção do disjuntor de baixa tensão, de modo a deixar a atuação da proteção mais lenta, o que poderia colocar em risco a integridade dos componentes do circuito, sobretudo o transformador.

Figura 15 - Coordenograma Entre DJ 2, DJ QGBT-2 e TR-B



Fonte: O Autor

### 4.3 Parâmetros de Proteção do Disjuntor Geral de Média Tensão DJ-1

Os parâmetros de proteção do disjuntor geral da subestação estão dispostos na tabela 5:

Tabela 5 – Ajustes a serem inseridos no Relé 1

<b>Ajuste</b>	<b>Média Tensão</b>
Pickup Instantâneo (A)	$7 \cdot I_n$
Atraso Instantâneo (s)	0,05
Pickup Curto (A)	-
Tempo Curto (s)	-
Pickup Longo (A)	$0,50 \cdot I_n$
Tempo Longo (s)	0,50

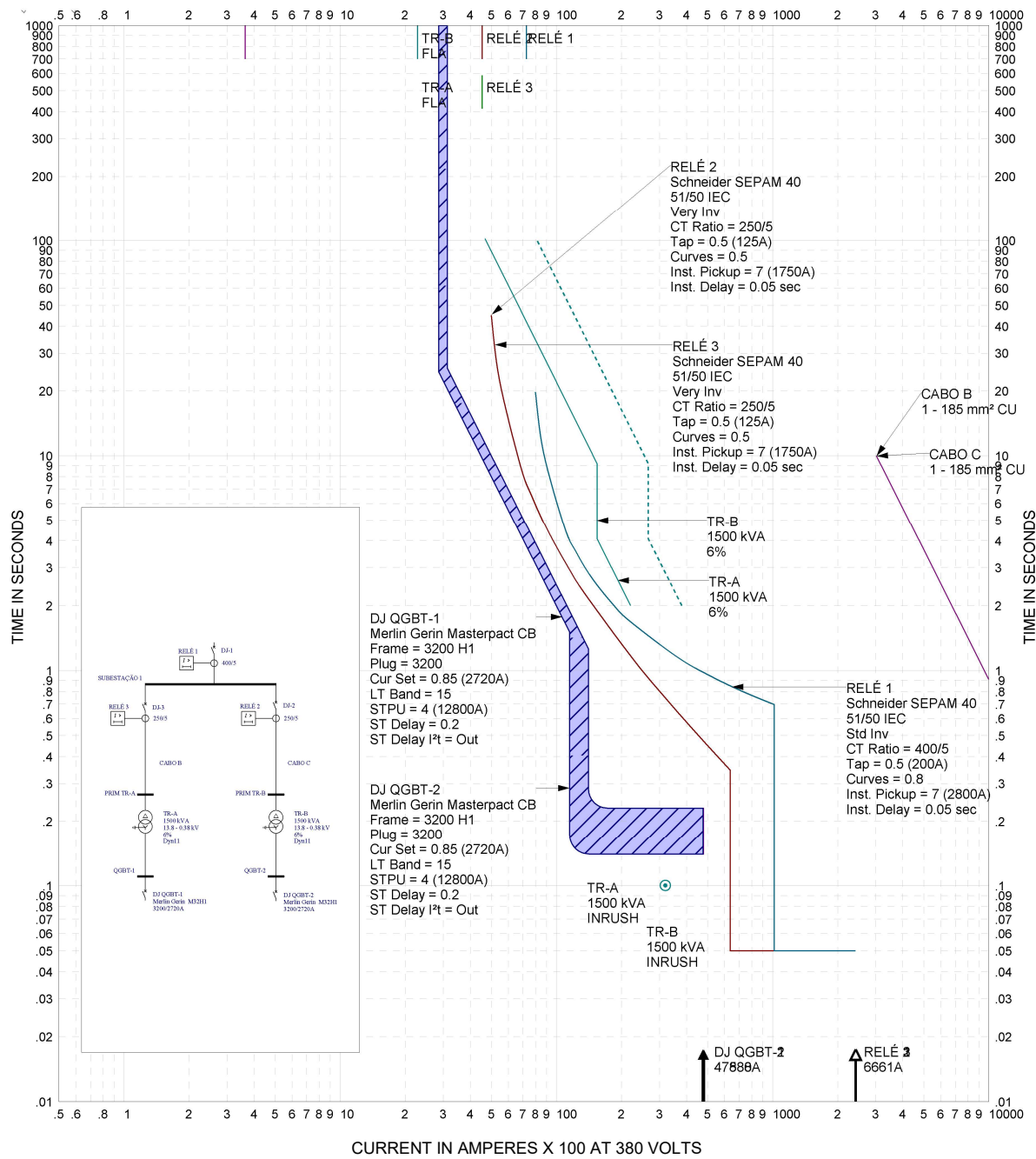
Fonte – O autor

Apesar dos valores de ajustes serem os mesmos para os outros dois relés que estão à jusante do disjuntor geral, trata-se de uma coincidência tendo em vista que o valor maior da relação de transformação do transformador de corrente para o disjuntor DJ-1 e a equação característica da curva normal inversa serem diferentes, mas chegam aos mesmos valores ajuste.

Na figura 16 é possível perceber todos os dispositivos presentes no sistema, notadamente o disjuntor geral não pode ter parâmetro algum variado caso queira-se garantir além da seletividade entre os disjuntores DJ-2 e DJ-3 o fato de que ele permaneça servindo de proteção de *backup* para ambos os disjuntores, tanto para a função de proteção de curto-circuito quanto para sobrecarga. No coordenograma fica evidente que as curvas de proteção evitam o ponto de *in-rush* dos transformadores e garantem a proteção muito próxima a curva de dano dos transformadores, de modo que seja possível utilizar a potência máxima dos transformadores em questão, já que o critério estabelecido foi o da potência instalada, caso fosse baseado na demanda, o estudo deveria ser readequado.

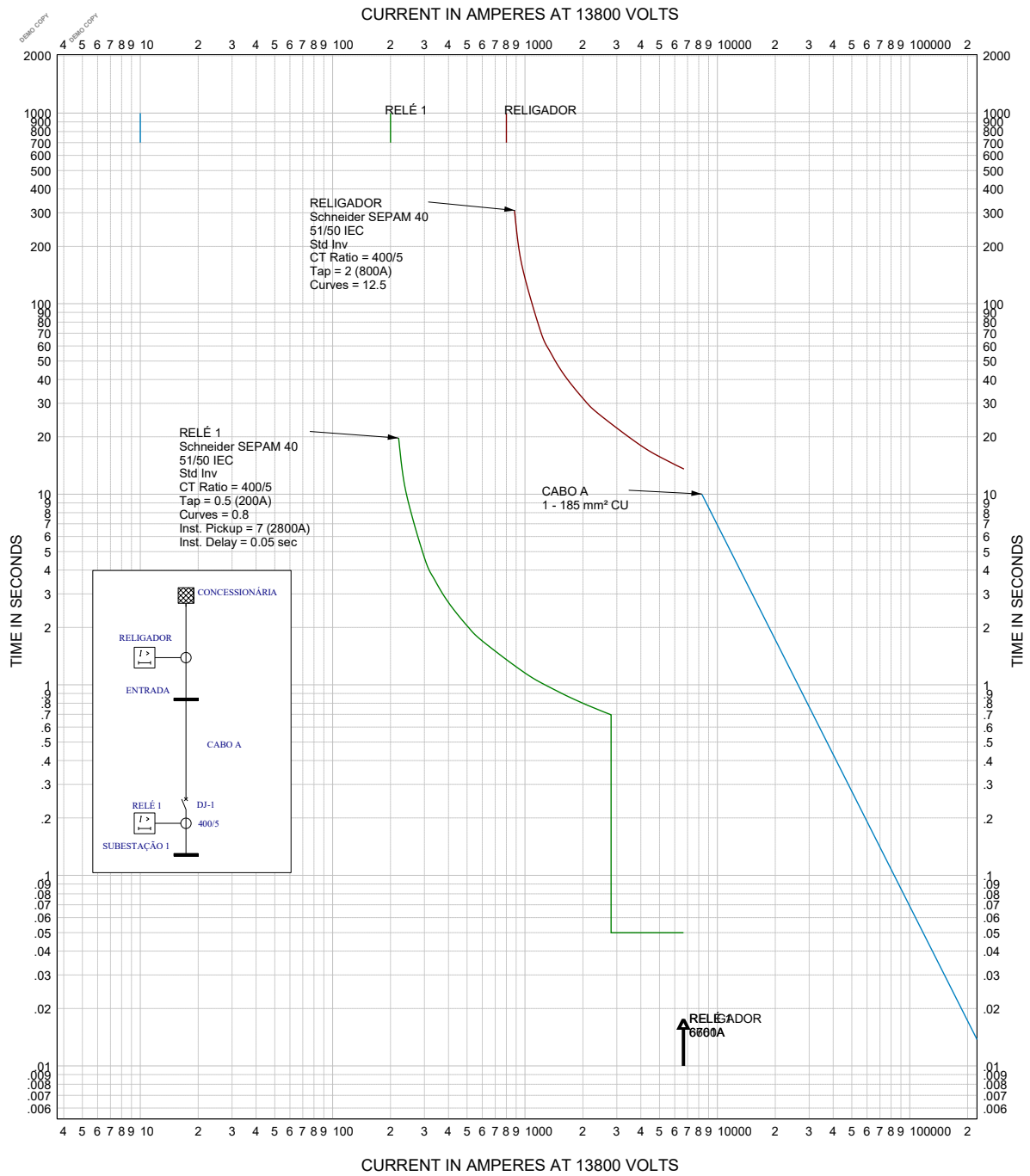
Para fins de complementação do estudo, é importante garantir que os parâmetros definidos nos dispositivos de proteção estejam coordenados com o dispositivo religador da concessionária à montante do ponto de fornecimento, na figura 17 está simulada tal situação.

Figura 16 - Coordenograma Entre Todos os Dispositivos do Sistema



Fonte: O Autor

Figura 17 - Coordenograma Entre Relé 1 e Religador da Concessionária



Fonte: O Autor

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho objetivou a revisão da literatura acerca das proteções em sistemas industriais de média tensão a partir de uma planta industrial típica de classe de tensão 15 kV e potência de 3 MVA.

Após analisar os níveis de curto-circuito nos diferentes pontos do sistema interno e no ponto de conexão com a concessionária, foi possível definir os critérios de projeto para o sistema de proteção em conjunto com os ajustes dos relés, onde foram confrontadas alternativas relativas aos tipos de curvas possíveis de serem empregadas sob circunstâncias similares. Ficou claro que nem todo tipo de curva possui ajuste perfeito quanto a coordenação entre dispositivos, uma vez que no primeiro momento a sobreposição entre as curvas obtidas não garantiu a seletividade.

Elaborar o estudo de proteção e seletividade vai muito além dos critérios de projeto e parâmetros estabelecidos pela literatura, é fundamental uma análise aprofundada de cada caso. Neste aspecto a vivência do engenheiro em sistemas de proteção amplia sua visão quanto às possíveis soluções e artifícios a serem empregados, já que cada estudo de seletividade é único.

A partir da análise das correntes de curto-circuito calculadas e parâmetros de proteção encontrados, foi possível traçar os gráficos de tempo e corrente dos dispositivos de proteção. A tentativa de utilizar a curva IEC extremamente inversa para a proteção do transformador TR-A mostrou que nem todo tipo de curva é adequado quando existem mais de um dispositivo responsável pela proteção do equipamento. Na proteção do transformador TR-B, a curva IEC muito inversa apresentou um ajuste muito preciso, envolvendo toda a curva de dano do transformador, evitando o ponto de *in-rush* e garantindo que o transformador possa ser utilizado em sua potência máxima, uma vez que o ajuste de proteção foi baseado no critério da potência nominal do equipamento e não em sua demanda de utilização. Posteriormente para atingir o objetivo de coordenação entre os dispositivos de proteção, foram utilizados os mesmos parâmetros de proteção do transformador TR-B para o transformador TR-A. Já para o relé do disjuntor geral, pode-se perceber que a curva IEC normal inversa proporciona um ajuste mais adequado, uma vez que é um tipo de curva mais lenta para as correntes de curto-circuito gerando uma melhor coordenação com os demais dispositivos de proteção do sistema.

Ficou corroborado que o estudo realizado está adequado com relação a

proteção dos dispositivos do sistema elétrico, além de atuar de maneira coordenada e seletiva. Assim, o resultado do estudo de seletividade e coordenação foi alcançado.

## **5.1 Trabalhos Futuros**

Para direcionar os trabalhos que busquem ampliar o estudo proposto, recomenda-se:

- A aplicação de fusíveis no circuito de média tensão para a proteção dos transformadores, buscando analisar seu impacto quanto à coordenação e seletividade do circuito.
- Utilização das definições de curva da norma ANSI C37.112, de modo a comparar as curvas normal inversa, muito inversa e extremamente inversa sob as mesmas condições em que foram aplicadas as curvas IEC.
- Definir proteções para circuitos alimentadores em baixa tensão à jusante do disjuntor geral, de maneira que possam ser avaliados os impactos na seletividade com o disjuntor geral para pequenas e grandes cargas, buscando a possibilidade de habilitação da proteção de curto-circuito do disjuntor geral do quadro de baixa tensão.



## REFERÊNCIAS

- G. KINDERMANN. **Curto-Circuito**, Edição do Autor, 4ª Edição, 2005
- STEVENSON, W.; GRAINGER, J. **Power System Analysis**. McGraw Hill Inc, 1994
- G. KINDERMANN. **Proteções de Sistemas Elétricos de Potência**, Edição do Autor, 3ª Edição, 2008.
- MARDEGAN, Cláudio. Dispositivos de proteção – Parte 1. **O Setor Elétrico**, São Paulo, p. 33-34, mar. 2010.
- MAMEDE FILHO, João. **Instalações Elétricas Industriais**. 9. ed. [S.L]: Ltc, 2017.
- MARDEGAN, Cláudio Sérgio. **Proteção e Seletividade em Sistemas Elétricos Industriais**. São Paulo: Atitude Editorial, 2012.
- RUSH, Peter. **Proteção e automação de redes: conceito e aplicação**. São Paulo: Editora Blucher: Schneider, 2011.
- MARDEGAN, Cláudio. Conceitos básicos – Números complexos. **O Setor Elétrico**, São Paulo, p. 38-44, jan. 2016.
- MARDEGAN, Cláudio. Dispositivos de proteção – Parte III. **O Setor Elétrico**, São Paulo, p. 26-36, maio 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 6856**: Transformador de corrente com isolamento sólida para tensão máxima igual ou inferior a 52 kV - Especificação e ensaios. Rio de Janeiro, 2021. 80 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 6855**: Transformador de potencial indutivo - Requisitos e ensaios. Rio de Janeiro, 2020. 82p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 5356-11**: Transformadores de potência. Rio de Janeiro, 2016. 47 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 14039**: Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV. Rio de Janeiro, 2005. 87p.
- ESON, Hans-Erik O.; LEJDEBY, Sven-Anders. Evolução das Subestações. **O Setor Elétrico**, São Paulo, abril 2009.
- MAMEDE FILHO, João. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 3. ed. [S.L]: Ltc, 2005.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **C37.2**: IEEE Standard Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations. Nova Iorque, 2008. 48 p.

PRYSMIAN. **Média Tensão:** uso geral. Uso Geral. Disponível em: [https://br.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/Guia\\_Dimensionamento\\_Media\\_Tensao.pdf](https://br.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/Guia_Dimensionamento_Media_Tensao.pdf). Acesso em: 22 mar. 2021.

CHARACTERISTICS of Circuit Breaker Trip Curves and Coordination. 2015. Disponível em: <https://testguy.net/content/197-Characteristics-of-Circuit-Breaker-Trip-Curves-and-Coordination>. Acesso em: 21 jan. 2021.

SCHNEIDER ELECTRIC INDUSTRIES SAS (França). Evolis circuit breakers 17.5 kV: vacuum breaking fixed and withdrawable versions. vacuum breaking fixed and withdrawable versions. 2014. Catalogue. Disponível em: [https://download.schneider-electric.com/files?p\\_enDocType=Catalog&p\\_File\\_Name=AMTED307010EN\\_web.pdf&p\\_Doc\\_Ref=AMTED307010EN](https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Catalog&p_File_Name=AMTED307010EN_web.pdf&p_Doc_Ref=AMTED307010EN). Acesso em: 19 jan. 2021.



## TERMO DE ACEITE PARA DIVULGAÇÃO

Eu, Marlon Ricardo Reinert Brodwolf, aluno(a) do curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do IFSC, Câmpus Joinville, aceito e autorizo a divulgação e/ou publicação do meu TCC – Trabalho de Conclusão de Curso, que contém os seguintes dados:

**Título:** Estudo de Seletividade das Proteções Aplicados a Uma Subestação Industrial Classe 15 kV e Potência de 3 MVA

Professor Orientador: Carlos Toshiyuki Matsumi

Data: 13 / 08 / 2021.

Assinatura do(a) Aluno(a)