

PAULO HENRIQUE CORTEZ

Estudos sobre coordenação e seletividade elétrica em um ambiente industrial

Guaratinguetá - SP

2017

Paulo Henrique Cortez

Estudos sobre coordenação e seletividade elétrica em um ambiente industrial

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador (a): Prof. Dr. Rubens Alves Dias

Guaratinguetá - SP

2017

C828e	Cortez, Paulo Henrique Estudos sobre coordenação e seletividade elétrica em um ambiente industrial / Paulo Henrique Cortez– Guaratinguetá, 2017. 122 f : il. Bibliografia: f. 119-122 Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017. Orientador: Prof. Dr. Rubens Alves Dias 1. Sistemas de energia elétrica - Proteção. 2. Instalações elétricas. 3. Reles de proteção. I.Título CDU 621.316.17
-------	--

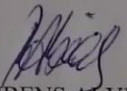
PAULO HENRIQUE CORTEZ

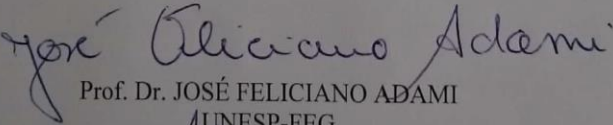
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA"

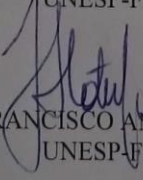
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. RUBENS ALVES DIAS
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. JOSÉ FELICIANO ADAMI
UNESP-FEG


Prof. Dr. FRANCISCO ANTONIO LOTUFO
UNESP-FEG

Dezembro de 2017

DADOS CURRICULARES

PAULO HENRIQUE CORTEZ

NASCIMENTO	10.01.1994 – Guaratinguetá / SP
FILIAÇÃO	Paulo Geraldo Cortez Izabel Cristina Pereira da Rocha
2012/2017	Graduação em Engenharia Elétrica UNESP - FEG
2008/2010	Técnico em Eletroeletrônica CTIG - UNESP

Dedico este trabalho para minha família
pela educação e por todo incentivo.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer e dedicar este trabalho para todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento desta obra. Em destaque agradeço a minha mãe, meu irmão e minha namorada, e toda minha família que, com muito carinho e apoio não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Rubens Alves Dias, que sempre me direcionou e auxiliou na realização deste trabalho. Sua orientação foi de extrema importância para o resultado positivo alcançado com este.

Agradeço a banca avaliadora, Prof. Dr. José Feliciano Adami e Prof. Dr. Francisco Antonio Lotufo por se disponibilizarem a avaliar esta obra, que representa minha graduação como engenheiro eletricista.

Agradeço ao meu primo, engenheiro eletricista Gilberto Sales, por todo suporte técnico e dicas oferecidas para a realização deste, fazendo com que fosse possível agregar muito mais valor à obra.

Agradeço aos meus colegas da empresa Eaton Hydraulics, que me ajudaram e motivaram para a realização deste trabalho, trazendo para o projeto um case real de uma empresa modelo em componentes hidráulicos.

Agradeço de maneira geral, a todos os docentes que fizeram parte de minha graduação, que compartilharam seus conhecimentos comigo ao longo dessa trajetória no ensino superior. Agradeço também aos meus amigos de classe, que sempre incentivaram os meus estudos e vivenciaram muitos momentos de estudo como um time.

“O segredo de qualquer conquista é a coisa mais simples do mundo: saber o que fazer com ela”.

André Malreux

RESUMO

Em um ambiente industrial a necessidade de proteção se faz presente devido aos elevados valores de tensão e corrente presentes, visto que sua presença previne a possibilidade de um acidente mais grave. Este trabalho representa um estudo de coordenação e seletividade visando a proteção contra sobrecorrente em um sistema elétrico industrial, tomando como base um estudo de caso de uma indústria hidráulica de pequeno porte. Foi realizada a definição e os ajustes dos dispositivos de proteção contra sobrecorrente a partir dos dados nominais dos equipamentos protegidos, assim como a criação de um roteiro de implementação do estudo de caso em uma instalação industrial. Também foi proposta com este uma análise dos gráficos de tempo *versus* corrente através do software Eaton CurveSelect V1.24, uma ferramenta que facilita a identificação da coordenação e seletividade presentes no sistema. Os dispositivos de proteção são elementos indispensáveis para qualquer instalação elétrica e torna-se cada vez mais importante o engenheiro possuir conhecimento neste tema, visto que o projeto de tais sistemas se torna cada vez mais complexo, em função da tecnologia que está se desenvolvendo.

PALAVRAS-CHAVE: Coordenação elétrica. Seletividade elétrica. Proteção de sistemas elétricos. Relé de proteção.

ABSTRACT

In an industrial environment, the need for protection is present because the highest values of voltage and current, the presence of protection systems prevents a possibility of more serious accident. This work represents a study of coordination and selectivity for protection against overcurrent in an isolated electrical system, based on a practical case of a small hydraulic industry. The definition and adjustments of the overcurrent protection devices were made from nominal data of the protected equipment, as well as a creation of an implementation roadmap of the case study in an industrial installation. It was also proposed an analysis of time versus current graphs through Eaton CurveSelect software V1.24, a tool that facilitates an identification of the coordination and selectivity presents in the system. The protection devices are indispensable elements for any electrical installation and have become increasingly important the engineer have knowledge on the subject, since the design of such systems becomes increasingly complex, depending on the technology that is developing.

KEYWORDS: Electric coordination. Electric selectivity. Electric systems protection. Protection relay.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipos de Fusíveis	31
Figura 2 – Sistema Seletivo	32
Figura 3 – Seletividade de Fusíveis Limitadores de Corrente	33
Figura 4 – Curva TCC de um fusível	34
Figura 5 – Exemplo de seletividade entre fusíveis	35
Figura 6 – Disjuntores	36
Figura 7 – Forma de onda da limitação de corrente	38
Figura 8 – Ajuste instantâneo ou disparo magnético	39
Figura 9 – Ajuste eletrônico de disparo	40
Figura 10 – Curva TCC típica de um disjuntor tripolar de 600 A	42
Figura 11 – Curva TCC com as funções ajustáveis identificadas	43
Figura 12 – Relés de proteção	44
Figura 13 – Relés tipo Êmbolo	46
Figura 14 – Funcionamento de relés tipo Êmbolo	46
Figura 15 – Relés tipo Indução Eletromagnética	47
Figura 16 – Relé Eletrônico	47
Figura 17 – Arquitetura do Relé Digital	48
Figura 18 – Representação de relés temporizados	49
Figura 19 – Representação de relés instantâneos	50
Figura 20 – Representação de relés com função 51	52
Figura 21 – Curva de tempo definido	52
Figura 22 – Curva de tempo inverso	53
Figura 23 – Princípio de funcionamento de um relé diferencial	54
Figura 24 – Comparação fasorial de um relé direcional	55
Figura 25 – Representação da corrente de curto-circuito simétrica	56
Figura 26 – Representação da corrente de curto-circuito assimétrica	57
Figura 27 – Representação de sistemas simétricos	58
Figura 28 – Diagrama de faltas monofásicas	60
Figura 29 – Diagrama de sequência para faltas fase-terra	62
Figura 30 – Diagrama de faltas bifásicas	63
Figura 31 – Diagrama de sequência para faltas fase-fase	64

Figura 32 – Diagrama de faltas fase-fase à terra	64
Figura 33 – Diagrama de sequência para faltas fase-fase à terra	66
Figura 34 – Diagrama de sequência para faltas trifásicas	67
Figura 35 – Diagrama de sequência para faltas fase-fase à terra	68
Figura 36 – Diagrama Unifilar do Posto Primário	71
Figura 37 – Diagrama Unifilar do Posto Secundário	72
Figura 38 – Planta da instalação industrial	73
Figura 39 – Relé digital URPE 7104	74
Figura 40 – Curva de fase do relé de proteção	81
Figura 41 – Curva de neutro do relé de proteção	82
Figura 42 – Curva do relé de proteção	83
Figura 43 – Características da Proteção	84
Figura 44 – Interface do software CurveSelect	85
Figura 45 – Entrada de dados do software CurveSelect	87
Figura 46 – Diagrama unifilar do sistema elétrico	89
Figura 47 – Posto Primário Convencional	90
Figura 48 – Diagrama unifilar do QGBT de 440 V	92
Figura 49 – Curvas características QGBT 440V	93
Figura 50 – Curva de Corrente de Cut Off 3NA3132	95
Figura 51 – Curva de Energia Passante 3NA3132	96
Figura 52 – Curva de Corrente de Cut Off 3NA3136	97
Figura 53 – Curva de Energia Passante 3NA3136	98
Figura 54 – Curva de Corrente de Cut Off 3NA3140	99
Figura 55 – Curva de Energia Passante 3NA3140	100
Figura 56 – Curva de Corrente de Cut Off 3NA3152	101
Figura 57 – Curva de Energia Passante 3NA3152	102
Figura 58 – Diagrama unifilar QGBT 220 V	103
Figura 59 – Curvas características QGBT 220V	104
Figura 60 – Corrente de Cut Off 3NA3124	107
Figura 61 – Curva de Energia Passante 3NA3124	108
Figura 62 – Curva de Corrente de Cut Off 3NA3132	109
Figura 63 – Curva de Energia Passante 3NA3132	110
Figura 64 – Curva de Corrente de Cut Off 3NA3136	111

Figura 65 – Curva de Energia Passante 3NA3136	112
Figura 66 – Curva de Corrente de Cut Off 3NA3140	113
Figura 67 – Curva de Energia Passante 3NA3140	114
Figura 68 – Curva de Corrente de Cut Off 3NA3142	115
Figura 69 – Curva de Energia Passante 3NA3142	116

LISTA DE TABELAS

	51
Tabela 1 – Principais funções de Proteção	
Tabela 2 – Lista de Material do Posto Primário	71
Tabela 3 – Lista de Material do Posto Secundário	72
Tabela 4 – Dados de Fornecimento	75
Tabela 5 – Características dos Transformadores	76
Tabela 6 – Determinação do Ponto ANSI	76
Tabela 7 – Dados do transformador	77
Tabela 8 – Dados de parametrização do relé URPE 7140	78
Tabela 9 – Curvas padronizadas	78
Tabela 10 – Curvas padronizadas	79
Tabela 11 – Tempos de disparo	80
Tabela 12 – Dados de seletividade QGBT 440 V	94
Tabela 13 – Dados de seletividade QGBT 220 V	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AUW	<i>Air Under Water</i>
AT	Alta tensão
BT	Baixa tensão
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CC	Curto-circuito
CMC	Conjunto de Manobra e Controle
IDMT	Tempo mínimo inverso definido
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IED	Dispositivo Eletrônico Inteligente
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IMA	Máxima sobrecorrente definida
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
GOOSE	Eventos genéricos da subestação orientados a objeto
LAN	<i>Local Area Network</i>
NBR	Norma Brasileira
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
MAC	<i>Media Access Control</i>
MT	Média tensão
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RTDS	<i>Real Time Data Services</i>
STD	<i>Standard</i>
TC	Transformador de Corrente
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TP	Transformador de Potencial
TCC	Time Current Curve
WAN	<i>Wide Area Network</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	FALHAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA: ANÁLISE GERAL	18
2.1	QUESITOS DE SEGURANÇA	18
2.2	CONSIDERAÇÕES DE CONFIABILIDADE E QUESTÕES ECONÔMICAS	19
2.3	COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE DA PROTEÇÃO	20
2.3.1	Seletividade	21
2.4	TENDÊNCIAS E RUMOS DO AMBIENTE DE PROTEÇÃO INDUSTRIAL	22
2.5	AVANÇOS NOS RECURSOS DOS RELÉS DE PROTEÇÃO	22
2.6	UTILIZAÇÃO DE ALGORITMOS PARA RELÉS DE COORDENAÇÃO DE SOBRECORRENTE EM SISTEMAS INDUSTRIAIS	23
2.7	SISTEMAS DE CONFIGURAÇÃO EXPERT DE RELÉS DE PROTEÇÃO PARA EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS	24
2.8	ARCOS VOLTAICOS E INFLUÊNCIA NA COORDENAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS	24
2.9	RELÉS DE PROTEÇÃO E OS BENEFÍCIOS DA IEC 61850	25
3	DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO	28
3.1	FUSÍVEIS	28
3.1.1	Fusíveis em aplicações de seletividade	30
3.2	DISJUNTORES	33
3.2.1	Limitação de corrente	35
3.2.2	Unidade de disparo ou trip	36
3.2.3	Características tempo versus corrente (tcc)	39
3.3	RELÉS DE PROTEÇÃO	41
3.3.1	Classificação dos relés de proteção	43
3.3.2	Classificação das funções de relés de proteção	49
3.3.2.1	Relés de sobrecorrente (50 e 51)	49
3.3.2.2	Relé de proteção diferencial (87)	51
3.3.2.3	Relé de sobretensão (59) e relé de subtensão (27)	52
3.3.2.4	Relé de sobrecorrente direcional (67)	52
3.3.2.5	Relé de distância (21)	53
4	ANÁLISE DE FALHAS	54
4.1	COMPONENTES SIMÉTRICAS	55
4.2	COMPONENTES ASSIMÉTRICAS	57
4.3	CURTO MONOFÁSICO À TERRA	58

4.4	CURTO BIFÁSICO.....	60
4.5	CURTO TRIFÁSICO	65
5	Estudo de Caso	68
5.1	PARAMETRIZAÇÃO DO RELÉ DE PROTEÇÃO	72
5.2	SOFTWARE CURVESELECT.....	83
5.3	ESTUDO DE SELETIVIDADE E COORDENAÇÃO	86
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	115
	REFERÊNCIAS	117

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país que possui um sistema elétrico extremamente amplo e complexo devido seu território extenso e suas características históricas de utilização de eletricidade como principal insumo energético. Não há nenhuma dúvida que o país se tornará uma potência mundial nos próximos anos mesmo perante uma retração econômica presente nos dias atuais, e para isso é necessário um planejamento energético adequado. Necessariamente um investimento em novas obras de geração e distribuição de energia elétrica se faz presente quando o tema é expansão, e no âmbito do sistema elétrico brasileiro, este é altamente integrado e possui diversos padrões de distribuição e geração doravante a grande gama de empresas de distribuição, geração e transmissão presentes no mercado nacional. Sendo assim são necessárias diversas regulações para o alcance de uma energia elétrica com qualidade.

Os sistemas elétricos industriais possuem vários pontos que requerem uma atenção especial devido aos potenciais humanos e ativos envolvidos na operação, dentre estes estão os transformadores, motores e subestações. Para a proteção destes é necessário um sistema bem dimensionado em termos de proteção elétrica, com um sistema possuindo elementos como relés, disjuntores, fusíveis, religadores, chaves seccionadores e transformadores de potencial e corrente. Tais elementos devem ser muito bem dimensionados para que quando alguma falha ocorrer no sistema, sejam possíveis a detecção e a proteção do sistema elétrico perante sobrecorrente ou sobrecarga.

Para que não haja risco pertinente a vida humana e nem interrupção da distribuição é imprescindível uma proteção bem dimensionada e parametrizada. Caso alguma falha se faça, a coordenação e a seletividade pregam que o sistema deve ser isolado no ponto mais próximo a falha, mantendo continuidade do fornecimento no restante da rede. A coordenação e a seletividade promovem uma robustez no sistema, de modo que as proteções devam suportar os níveis de curto-circuito (CC) para que os dispositivos não se danifiquem e não causem uma explosão ou acidente mais grave como um incêndio.

A rapidez é outro pré-requisito para um sistema ser seletivo e coordenado, pois as proteções sempre devem atuar no menor tempo possível perante a percepção da falha no sistema. Porém além de ser um sistema robusto e rápido, o sistema de proteção coordenado e seletivo também deve ser confiável, de modo que os dispositivos operem da maneira mais correta possível, garantindo a isolação da falha

Neste trabalho foi utilizada uma metodologia de elaboração de um estudo de seletividade e coordenação em sistemas elétricos industriais, entendendo as tendências nos cenários mundial e nacional das técnicas e boas práticas aplicadas, assim como elementos e conceitos inovadores deste tema.

A proposta deste vai além de somente compreender as técnicas de coordenação e seletividade, mas entender o funcionamento dos dispositivos de proteção de maneira prática. O trabalho é dividido em 6 capítulos.

O capítulo 1 traz as justificativas e uma breve introdução deste. O capítulo 2 representa um resumo do cenário mundial e nacional no tema de proteção, trazendo vários artigos e conteúdo de qualidade proveniente de autores consagrados no tema. No capítulo 3 foi realizado um estudo teórico sobre proteção, representado pelas referências bibliográficas, contendo uma explanação sobre cálculos de corrente simétricas e de curto circuito, bem como a concepção técnica dos dispositivos de proteção. No capítulo 4 foi-se estudado mais a fundo os cálculos para determinação das correntes de curto circuito, assim como a determinação de correntes simétricas e assimétricas. No capítulo 5 foi realizado um estudo de caso em uma indústria hidráulica de pequeno porte, no qual foi realizada toda a parametrização do relé conforme as normas e realizado um estudo de coordenação e seletividade dos 3 quadros gerais de baixa tensão (QGBT), assim como da parte de alta tensão (AT). Por fim o capítulo 6 traz a conclusão do trabalho, a reflexão dos resultados encontrados e da metodologia aplicada para o desenvolvimento deste.

2 FALHAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA: ANÁLISE GERAL

Conforme Araújo (2005), os sistemas de proteção podem ser definidos como o conjunto de dispositivos necessários para detectar, localizar e eliminar um curto-circuito ou uma condição anormal de operação de um sistema elétrico, no menor tempo possível, diminuindo os danos causados aos equipamentos defeituosos e ao restante do circuito.

Os objetivos da proteção e coordenação do sistema elétrico são:

- Limitar a extensão e a duração da interrupção do serviço sempre que ocorrer falha do equipamento, erro humano ou eventos naturais adversos em qualquer parte do sistema.
- Minimizar danos aos componentes do sistema envolvidos na falha.

As circunstâncias que causam mau funcionamento do sistema são geralmente imprevisíveis; no entanto, os circuitos de proteção e a manutenção preventiva podem reduzir a probabilidade de problemas no sistema. O sistema elétrico, portanto, deve ser projetado e mantido para se proteger automaticamente.

Em mais de 70% dos curtos-circuitos, a falta ocorre de uma fase para a terra, mas podem ocorrer faltas bifásicas, bifásicas à terra ou até mesmo trifásicas (ANDERSON, 1995). A má operação de um equipamento, dispositivo ou qualquer deficiência no sistema elétrico pode provocar danos, que vão desde um acidente de rotina, prejuízo na produção, danificação da instalação elétrica ou mesmo a perda de vidas humanas. Por este motivo, existe a necessidade de se projetar um sistema capaz de proteger e prever possíveis irregularidades nas instalações elétricas.

2.1 QUESITOS DE SEGURANÇA

Prevenção de lesões humanas é o objetivo mais importante na concepção de proteção de sistemas elétricos.

Os dispositivos de interrupção devem ter capacidade de interrupção adequada. As peças energizadas devem ser suficientemente fechadas ou isoladas para evitar exposição das pessoas a explosão, incêndio, arco ou choque. A segurança deve sempre ter prioridade sobre a continuidade do serviço, danos ao equipamento ou economia (IEEE, 2001).

Se minimizar o risco de danos ao equipamento ou preservar a continuidade do serviço é o objetivo mais importante, depende da filosofia de funcionamento de uma determinada organização industrial ou comercial. Algumas operações podem permitir interrupções de

serviço limitadas para minimizar a possibilidade de reparo de equipamentos ou custos de substituição, enquanto outros considerariam essa despesa como pequena em comparação com uma breve interrupção de serviço.

Na maioria dos casos, a proteção elétrica deve ser projetada para o melhor compromisso entre danos ao equipamento e continuidade do serviço. Um dos principais objetivos da proteção do sistema é obter seletividade para minimizar a extensão do desligamento do equipamento em caso de falha. Portanto, muitos engenheiros de proteção preferem que o equipamento com falha seja desenergizado assim que a falha seja detectada.

2.2 CONSIDERAÇÕES DE CONFIABILIDADE E QUESTÕES ECONÔMICAS

O custo da proteção do sistema determina o grau de proteção que pode ser projetado de forma viável. Muitas características que melhoram o desempenho do sistema, a confiabilidade e a flexibilidade podem ser adicionadas, mas resultam em um custo inicial aumentado. No entanto, a falha em projetar um sistema pelo menos nos requisitos mínimos de segurança e confiabilidade inevitavelmente resulta em desempenho insatisfatório, com uma maior probabilidade de tempo de inatividade. A modificação de um sistema que se mostra inadequado é mais cara e, na maioria dos casos, menos satisfatória do que inicialmente projetar esses recursos em um sistema.

O sistema de proteção deve sempre ser projetado para isolar falhas com um mínimo de perturbação para o ambiente e deve ter características para dar a máxima confiabilidade consistente com os requisitos da planta e custos justificáveis. As avaliações dos custos também devem incluir requisitos de manutenção do equipamento. Em muitos casos, os requisitos da planta tornam difíceis de programar as interrupções planejadas do sistema para manutenção de rotina. Tais fatores devem pesar no processo de decisão econômica versus confiabilidade. Quando os custos de inatividade e manutenção do equipamento são considerados na avaliação de custos do sistema de proteção, as decisões podem ser baseadas no custo total ao longo da vida útil do equipamento, em vez de simplesmente o primeiro custo do sistema (IEEE, 2001).

É muito difícil colocar uma quantia exata de capital no impacto de perdas de energia inesperadas. A maioria das organizações são extremamente relutantes em compartilhar quaisquer informações quanto a essas falhas. Nos últimos anos, as falhas de energia dos datacenters derrubaram temporariamente uma série de negócios bem conhecidos na Internet, desativando operações e travando transações comerciais, os principais sites que caíram incluem Amazon, Craigslist, Technorati e Intuit. Um estudo de 2011 pelo Ponemon Institute, uma

organização de pesquisa independente, concluiu que o tempo de inatividade de um centro de dados custa mais de U\$500.000,00 por incidente em média, ou U\$ 5.600 por minuto (ABB, 2012).

2.3 COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE DA PROTEÇÃO

Segundo Creder (2005), os dispositivos de proteção são especificados pelos fabricantes com determinada capacidade de ruptura, de acordo com a tensão de serviço. Essas capacidades de ruptura são ditadas pelas correntes de curto-circuito presumíveis, capazes de suportar sem sofrer avarias.

Coordenação seletiva é um sistema elétrico desenvolvido que melhora a confiabilidade. O método limita as falhas de energia ao ramo de um sistema elétrico no qual ocorre um problema, sem a necessidade de eliminar outras áreas do sistema. Quando uma falha ocorre, o dispositivo de proteção de sobrecorrente mais próximo é aberto, seja um disjuntor ou um fusível, garantindo que as falhas não se encaixem em cascata.

A coordenação de disjuntores refere-se ao uso de disjuntores especificamente para isolar problemas elétricos, interromper o disparo desagradável e evitar apagões no sistema. Além de limitar uma interrupção ao circuito de derivação, a coordenação do disjuntor torna mais fácil para os engenheiros eletricitas investigar as causas de falhas, identificar equipamentos subestimados ou sobrecarregados e fazer as correções (ABB, 2012).

No âmbito industrial, um projeto elétrico envolve várias etapas que vão desde o estabelecimento de uma estratégia de proteção, selecionando os respectivos dispositivos que irão atuar na presença de falhas, até a determinação de suas condições de funcionamento, o qual se enquadra a calibração dos dispositivos para atuação no tempo exato. Um projeto de proteção deve possuir boa seletividade entre as proteções, equipamentos devem possuir exatidão e segurança, além de serem sensíveis o suficiente para atuar o mais rapidamente possível.

Segundo Creder (2005), dois dispositivos de proteção, em série, estão coordenados quando seus ajustes são tais que o segundo dispositivo, mais próximo da fonte, é capaz de eliminar a falta, caso o primeiro, mais próximo ao defeito, venha a falhar na atuação. Denomina-se tempo ou degrau de coordenação o período que separa as duas hipóteses anteriores, devendo também cobrir o tempo próprio de atuação do disjuntor, mais o tempo de atuação do relé e uma certa margem de segurança.

2.3.1 Seletividade

O objetivo maior de um estudo de seletividade é determinar os ajustes gerais dos dispositivos de proteção, de forma que, como já mencionado neste, na ocorrência de um curto-circuito, opere apenas o dispositivo mais próximo da falta, isolando a menor porção do sistema elétrico. Historicamente a seletividade apareceu no começo da década de 1950.

Segundo Creder (2005), a seletividade entre dispositivos de proteção contra sobrecorrentes está presente quando dois ou mais dispositivos de proteção forem colocados em série e quando a segurança ou as necessidades de utilização o justifiquem, suas características de funcionamento devem ser escolhidas de forma a somente seccionar parte da instalação onde ocorreu a falta. A seletividade entre dispositivos deve ser obtida comparando-se suas características de funcionamento e verificando-se que, para qualquer corrente de falta, o tempo de atuação do dispositivo mais próximo da fonte seja superior ao do mais distante.

De acordo com Mamede (2011) há três procedimentos utilizados para realizar a correta seletividade em um sistema elétrico industrial. O primeiro procedimento é a seletividade amperimétrica, que tem como base o princípio de que quanto mais próximo da geração ocorrer uma falta, sua corrente de curto-circuito apresentará valores mais elevados, sistema que é empregado atualmente mais particularmente em sistemas de baixa tensão, pois as impedâncias dos condutores são significantes.

O segundo método se baseia no princípio da seletividade cronológica, na qual o dispositivo de proteção mais próximo à falta possua temporização inferior ao dispositivo a montante. Como regra de aplicação, o tempo de disparo utilizado das proteções de forma consecutiva tem que ser igual ao tempo de abertura do disjuntor somando um intervalo de coordenação que corresponde à atuação das proteções. Este tipo de seletividade pode ser aplicado através das combinações dos seguintes equipamentos de proteção:

- Fusível em série com fusível.
- Fusível em série com disjuntor de ação termomagnética.
- Disjuntor em série entre si.

O terceiro modo de seletividade é a lógica. Utilizando este tipo de seletividade diminui-se o tempo de coordenação entre as proteções, e conseqüentemente o tempo de eliminação da falta, utilizam-se relés para este tipo de seletividade. Na prática, há um envio de sinal discreto do relé sensibilizado por uma corrente de falta para o relé a montante. Portanto o relé a montante ao perceber através de sua entrada lógica que o relé a jusante está sensibilizado para atuação, retardará em um tempo suficiente o disparo. Caso ocorra falha na proteção a jusante, o

equipamento de proteção a montante conseguirá extinguir a falta em um menor tempo quando comparado com os outros tipos de seletividade apresentados.

2.4 TENDÊNCIAS E RUMOS DO AMBIENTE DE PROTEÇÃO INDUSTRIAL

A evolução dos sistemas de proteção industrial se deu de fato a partir da década de 1960, com a introdução da tecnologia digital para proteção de sistemas elétricos de potência. O desenvolvimento de algoritmos aplicados na proteção de sistemas elétricos, desde a geração até a distribuição foi um grande marco, porém, este período teve uma estagnação devido a limitação dos microprocessadores. A partir da década de 1990, os microprocessadores atingiram um nível decisivo para o desenvolvimento de relés digitais.

De forma geral, os sistemas de proteção têm registrado grandes avanços, não somente nos dispositivos, mas também nas diferentes metodologias que são abordadas, fazendo-se necessário que a maneira de execução dos projetos seja repensada. Em 1880, os meios de proteção eram os fusíveis; em 1920 o relé de sobrecorrente diferencial foi aplicado. Em 1930 já se tinha relés de impedância de alta velocidade, esquematizado com 3 zonas. Em 1933 havia relé de reatância e mho, também esquematizado com 3 zonas. Em 1944 um grande marco foi a introdução do “esquema carrier”. Com a eletrônica de potência se desenvolvendo, em 1956 tinha-se a introdução dos comparadores de fase com a utilização de transistores. Em 1965, os sistemas já eram constituídos de um comparador de fase para característica quadrilateral, e, em 1966, um relé de distância quadrilateral com 3 zonas. Em 1969 houve a primeira proposta de utilização de computadores para proteção da linha e em 1979 já se tinha o uso de relés polifásicos utilizando circuitos lógicos. Em 1990 os relés digitais numéricos foram difundidos e em 2000 os relés microprocessados já foram popularizados, caracterizando uma redução nas tecnologias eletromecânicas.

2.5 AVANÇOS NOS RECURSOS DOS RELÉS DE PROTEÇÃO

Embora os sistemas digitais de proteção sejam amplamente utilizados nos sistemas de potência industriais, muitas práticas de proteção ainda são as mesmas empregadas para os relés eletromecânicos. Consequentemente, as potencialidades e os benefícios dos relés digitais não são totalmente explorados.

As vantagens da proteção digital para coordenação de relés de sobrecorrente estão presentes na utilização das funcionalidades de comunicação, de lógica e controle de relés

microprocessados. Segundo Vieira e Soares (2008), as práticas convencionais não resultam em uma solução eficiente e um esquema de proteção adaptativa garante uma coordenação de sobrecorrente para todos os cenários operacionais. Para explorar totalmente as funcionalidades dos relés microprocessados e alcançar a máxima eficiência, é desejado que os engenheiros tenham através do conhecimento, com alguma noção prévia em sistemas de potência, habilidades em programação e operação de softwares de sistemas digitais eletrônicos.

Segundo Abboud; Lima e Needs (2016) os algoritmos usados pelos relés numéricos na proteção térmica de motor simulam com precisão as características do motor. Estes algoritmos usam a velocidade do motor para calcular o aquecimento do rotor. Isso resulta na partida adequada para cargas de alta inércia conectadas aos motores e minimiza o tempo de resfriamento, proporcionando re-partidas mais rápidas. Estes algoritmos são executados em um relé numérico que também efetua o registro e a plotagem das características de partida. Dessa forma, pode-se obter um registro preciso do desempenho do motor, fornecendo uma indicação de possível falha do motor. Barras rompidas do rotor causam a redução do torque de aceleração, aumento do aquecimento do motor e aumento das vibrações, podendo causar danos graves ao motor. Os modernos relés numéricos de motor monitoram o espectro da corrente do estator para componentes de frequência associados a este fenômeno e usam a análise da assinatura da corrente do motor para detectar barras rompidas no rotor. Para aumentar a segurança, estes dispositivos também podem incluir a proteção de arco voltaico, permitindo que faltas no conjunto de manobra (cubículo) possam ser rapidamente detectadas e eliminadas.

2.6 UTILIZAÇÃO DE ALGORITMOS PARA RELÉS DE COORDENAÇÃO DE SOBRECORRENTE EM SISTEMAS INDUSTRIAIS

O mínimo tempo inverso definido (IDMT) da coordenação do relé de sobrecorrente precisa ser operado por engenheiros qualificados e demanda muito tempo, custos e os resultados podem não ser facilmente validados. Os relés de sobrecorrente, incluindo os relés de proteção ANSI (51, 67, 51N/G/V, 67N/G) são vastamente aplicados em sistemas elétricos industriais como dispositivos principais na proteção, pelo fato de serem confiáveis, rentáveis e seletivos.

Uma boa coordenação do relé de sobrecorrente é muito importante para plantas industriais. O algoritmo genético (GA) ou otimização do enxame de partículas (PSO) é uma metodologia que tem sido aplicada na determinação do tempo inverso definido na coordenação de relés de sobrecorrente. O método demonstra que é possível utilizar GA para implementar coordenação de relés de sobrecorrente considerando não apenas os diferentes tipos de curvas

de relés, mas também outros componentes como curvas de transformadores e limitação do sistema de curto-circuito.

Segundo Kim e Park (2015), é muito importante certificar-se de que o sistema de coordenação e proteção está em rede de utilidade real. Um algoritmo de coordenação de proteção em tempo real para o cabo de alimentação usando método de coordenadas simétricas e análise de vetores sob condição de falha de utilidade é atualmente avaliado utilizando um sistema de aquisição de dados em tempo real com simulador digital também em tempo real (RTDS). Para os autores as condições de falhas assimétricas são altamente perigosas devido o valor de corrente de falha de pico ser muito maior que a falha simétrica.

2.7 SISTEMAS DE CONFIGURAÇÃO *EXPERT* DE RELÉS DE PROTEÇÃO PARA EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS

Os sistemas *experts* são programas que simulam o raciocínio de um profissional que domina determinada área de forma a apresentar a melhor solução técnica possível. Tal técnica é uma tendência no desenvolvimento de sistemas de proteção de plantas industriais.

Segundo Shan, Zhao E Zhang (2009), o cálculo da configuração de proteção e gerenciamento de dados para os principais equipamentos em uma planta industrial é uma importante base técnica para o trabalho de seletividade. Os relés de proteção de equipamentos principais não têm critério uniforme e o estilo de cada fornecedor é diferente, fazendo com que a configuração seja demorada e trabalhosa.

A representação hierárquica multinível pode garantir a configuração de proteção e as regras de configuração são exibidas claramente para os usuários. É utilizado um método de inferência mista, de alta precisão e um curto tempo de cálculo de definição (JIANG, 2012).

Os usuários podem usar o sistema *expert* para realizar várias funções, tais como modelagem de conexão principal, gerenciamento de equipamentos, configuração de relé, análise de falhas e configuração de gerenciamento de valor e assim por diante. Consequentemente pode a carga de trabalho de funcionários da equipe, além de melhorar a eficiência e a qualidade de trabalho (WU; ZHAO; ZHANG, 2009).

2.8 ARCOS VOLTAICOS E INFLUÊNCIA NA COORDENAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

O desafio do engenheiro de proteção é equilibrar a proteção e a confiabilidade do sistema. Os engenheiros podem influenciar a proteção ao custo da confiabilidade do sistema ou à

seletividade desejada, ao custo de proteção. A necessidade de compromisso é muitas vezes aceita como uma realidade inalterável. Para Valdes (2014), a indústria forneceu dispositivos, técnicas e esquemas para minimizar, e até mesmo eliminar, este compromisso. As ferramentas incluem algoritmos de detecção instantâneos mais inteligentes, proteção diferencial, intertravamento de zona seletiva e relés de flash de arco.

Intertravamento por zona seletiva é uma solução rentável para aplicações de baixa tensão (BT) e média tensão (MT). Hoje, o intertravamento seletivo de zonas abrange diferentes tensões, entre características de proteção inversa, tais como curvas de curta duração e rápida proteção instantânea, tanto em sistemas BT e MT. No entanto, os esquemas tradicionais devem ainda aninhar os limiares de corrente de captação para acomodar as tolerâncias de detecção. Relés de arco voltagem emergiram como protetores de espaço excelente, mas apresentam preocupações em aplicações BT (VALDES, 2014).

Para Sutherland (2009), uma vez que a análise de perigo por arco voltaico se tornou um requisito para muitos estudos do sistema de potência industrial, a redução de riscos de arco voltaico tornou-se uma preocupação importante. Inevitavelmente, os fatores que conduzem as reduções nos riscos de arco não conduzem sempre a uma melhoria em outras áreas, isto é, em particular, a coordenação do dispositivo de proteção.

Em uma planta industrial antiga, a resolução de problemas combinados de arcos voltaicos e coordenação requer a avaliação de várias opções. A solução de um problema pode causar outro problema e assim a falha inicial pode reaparecer em outro local. A presença de equipamentos antigos com características não confiáveis complica a avaliação. As curvas tempo-corrente e os tempos de abertura do disjuntor não devem ser sempre confiados. Soluções propostas nem sempre podem ser implementadas e o engenheiro deve estar preparado para um processo demorado antes que todos os problemas sejam resolvidos. As soluções propostas que reduzem os riscos de arco elétrico podem criar outros problemas de proteção que tornam a solução inutilizável (SUTHERLAND, 2009).

2.9 RELÉS DE PROTEÇÃO E OS BENEFÍCIOS DA IEC 61850

A construção de subestações é uma atividade que vem se desenvolvendo desde o final do século XIX, ou seja, há mais de 100 anos. E a automação de uma subestação de energia elétrica significa, de uma forma geral, monitorar e controlar as grandezas elétricas envolvidas no processo de transmissão e distribuição de energia. Várias gerações de tecnologias convivem hoje em dia dentro das subestações. Estas vêm sendo ampliadas à medida que a demanda cresce.

Cada geração de tecnologia resolve uma determinada necessidade e foram agregadas às instalações, criando o que se convencionou como ilha de dados. É neste cenário que se encaixa a norma IEC 61850. Ela propõe uma arquitetura de comunicação única entre todos os dispositivos, independente da função que este exerce na subestação ou de seu fabricante.

Com os avanços da eletrônica e das redes de computadores, verificou-se que haveria um grande ganho na automação de subestações se estas tecnologias fossem a ela incorporadas. Já foi adotada a tecnologia TCP/IP. Portanto, todos os conceitos oriundos das redes de computadores comerciais, como endereços IP, endereços MAC, LAN, WAN, roteamento, frames, datagramas, etc. vêm para o mundo da automação e proteção de subestações, de forma total e completa. O transporte das informações entre dois dispositivos é encapsulado em TCP/IP, padrão da internet mundial, confiável e já testado em todo mundo há mais de 20 anos. Não seria necessário reinventar nada. A norma IEC 61850 (IEC, 2015) focou na modelagem dos dispositivos de automação da subestação. Esta tarefa foi executada com a tecnologia de orientação a objetos da engenharia de software e se desenvolve na camada de aplicação do modelo OSI. Ela é muito mais que um protocolo de comunicações, é uma arquitetura de automação de subestações. Esta modelagem pode ser resumida em dispositivo lógico/nó lógico/objeto de dados.

Para Mazur, Kreite e Rouker (2013), o conjunto de protocolos IEC 61850 fornece um método conveniente para integrar os dispositivos eletrônicos inteligentes (IED) do sistema de alimentação em redes de sistemas de controle, a fim de proporcionar maior visibilidade do sistema elétrico para os operadores da planta. Os autores ilustram como os nomes de TAGS na IEC 61850, componentes estruturados e mantidos no software do controlador de automação, o que fornece maior transparência para os dados, comissionamento mais rápido de um sistema e um sistema de multi-fornecedores, que é verdadeiramente uma das vantagens da abordagem orientada a objetos promovida com os nós lógicos que podem ser definidos na IEC 61850. Os protocolos permitem a interconexão de todos os IEDs e sistemas de controle no nível industrial, incluindo mineração, metais, celulose e papel, semicondutores, petróleo e gás. Ao incorporar uma solução que funciona com uma infinidade de fornecedores, os proprietários de processos agora podem gerenciar facilmente seus sistemas elétricos com uma infra-estrutura de rede simples e padrão.

A proteção oportuna do barramento é extremamente crítica devido à instabilidade generalizada do sistema de energia que pode ocorrer devido a uma falha em tal. Além das formas convencionais existentes de proteção do barramento de média tensão, há uma nova possibilidade de proteção de arco voltaico usando a IEC 61850 e eventos genéricos da

subestação orientados a objeto (GOOSE) de mensagens. A proteção de arco voltaico tem alta seletividade e segurança e relativamente custa menos que outros esquemas comparáveis (CABRERA; CHIU; KUMAR, 2012).

3 DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

Um sistema elétrico por melhor projetado e dimensionado que seja, está sujeito a falhas. Em um sistema elétrico de potência são utilizados os mais diversos tipos de componentes, como motores, geradores, transformadores, fornos elétricos, banco de capacitores, entre vários outros que podem acarretar alguma avaria e apresentar algum tipo de problema para o sistema. Há também problemas de fornecimento e qualidade de energia, que causam uma instabilidade no sistema, assim como falha humana, como por exemplo erro de ligação de equipamentos. Além desses pontos, o sistema também está propício a problemas de origem ambiental, como por exemplo descargas atmosféricas.

Visando garantir a integridade dos equipamentos que compõem uma planta industrial, vários dispositivos de proteção são utilizados para resguardar que problemas como sobrecorrentes, sobretensões e perturbações em geral possam causar danos ao sistema e a seus operadores. Nesse contexto, será dado um enfoque aos dispositivos de proteção que são comumente utilizados em sistemas elétricos industriais, tais como fusíveis, disjuntores, transformadores de instrumentos e relés.

Cada um destes dispositivos apresenta características, tanto construtivas como operativas, diferentes. É importante observar que dispositivos como fusíveis e disjuntores são conectados diretamente à rede que está sendo protegida, ao contrário dos relés digitais e os dispositivos eletrônicos integrados (IEDs), que necessitam de transformadores de tensão e corrente para possibilitar a leitura de tais grandezas com a melhor precisão possível.

3.1 FUSÍVEIS

Um fusível de baixa tensão é um dispositivo que protege um circuito, abrindo seu elemento sensível à corrente quando uma sobrecorrente passa por ele. Os fusíveis são dispositivos destinados à proteção dos circuitos elétricos e que se fundem quando são percorridos por uma corrente de valor superior àquele para o qual foram projetados (MAMEDE FILHO, 2002).

Figura 1 – Tipos de Fusíveis



Fonte: Portal do eletricitista (2017)

Dentre as características funcionais de um fusível, nota-se que tal componente combina os elementos de detecção e de interrupção em um dispositivo autônomo, atuando diretamente na medida em que responde a uma combinação de amplitude e duração da corrente do circuito que flui através dele, não inclui nenhuma provisão para abertura de um circuito energizado manualmente e requer dispositivos separados para executar essa função, trata-se de um dispositivo monofásico e depois de ter interrompido uma sobrecorrente o sistema só é religado pela substituição de tal (IEEE, 2001).

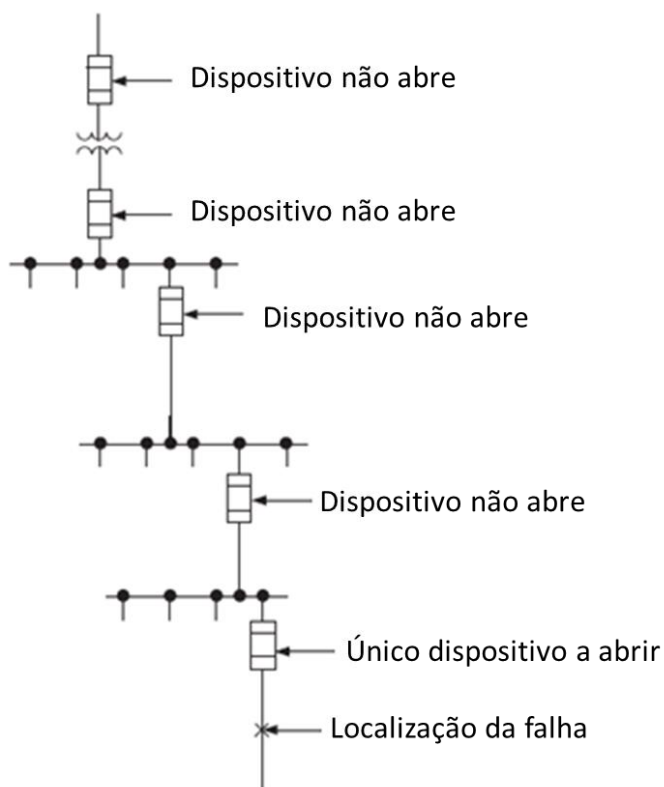
A primeira função dos fusíveis é proteger os cabos e condutores das correntes de sobrecarga e curto-circuito, mas também são apropriados para a proteção de equipamentos elétricos. Entre as múltiplas funções e variadas condições de serviço, cabe mencionar uma elevada seletividade em redes radiais para evitar interrupções desnecessárias do serviço; uma proteção de segurança reserva de disjuntores termomagnéticos; proteção de circuitos de motores nos quais, por meio do serviço, podem produzir sobrecargas breves e curtos-circuitos; proteção contra curtos-circuitos de equipamentos como contadores e disjuntores; em redes TN e TT, os fusíveis evitam que diante de faltas sejam mantidas as tensões de contato limite nas estruturas metálicas. O campo de aplicação dos fusíveis é muito amplo e abrange desde as instalações elétricas em residências, comércios e fábricas industriais até, inclusive, em instalações de empresas geradoras ou distribuidoras de energia elétrica.

Outro fator relevante dos fusíveis é referente à característica de atuação dos mesmos, estes podem ser classificados como: rápidos ou retardados. Os fusíveis de atuação rápida são geralmente empregados em circuitos que operam com corrente abaixo da nominal do fusível, como cargas resistivas. Já os de atuação retardada são empregados em circuitos onde há sobrecargas temporárias, como em motores e capacitores (MAMEDE FILHO, 2011).

3.1.1 Fusíveis em aplicações de seletividade

A seletividade é obtida quando a mínima quantia de equipamentos é retirada de serviço pela ocorrência de uma condição de sobrecorrente. A Figura 2 ilustra um aspecto geral de um sistema seletivo, no qual o único elemento de proteção que deve abrir é o mais próximo a falha.

Figura 2 – Sistema Seletivo

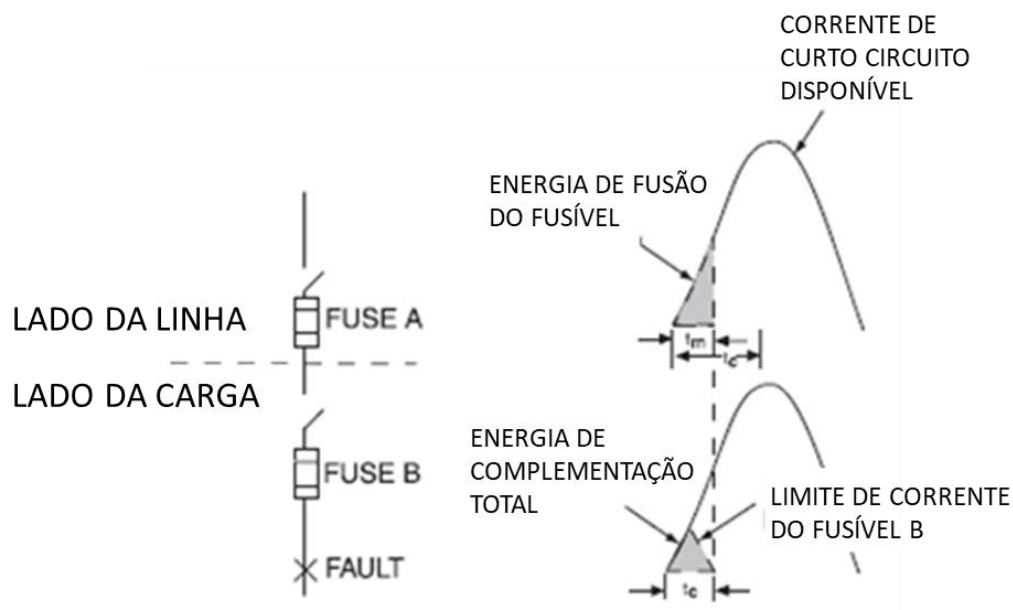


Fonte: IEEE (2001)

A Figura 3 ilustra o princípio geral pelo qual fusíveis limitadores de corrente são coordenados para qualquer valor de corrente de curto circuito suficiente para eles operarem no modo de limitação de corrente. Para seletividade, a corrente total de compensação I^2t do fusível

B deveria ser menor que o mínimo dissipado I^2t do fusível A. Em aplicações de baixa tensão para fusíveis, a coordenação pode algumas vezes ser determinada através das tabelas de seletividade. (IEEE, 2011)

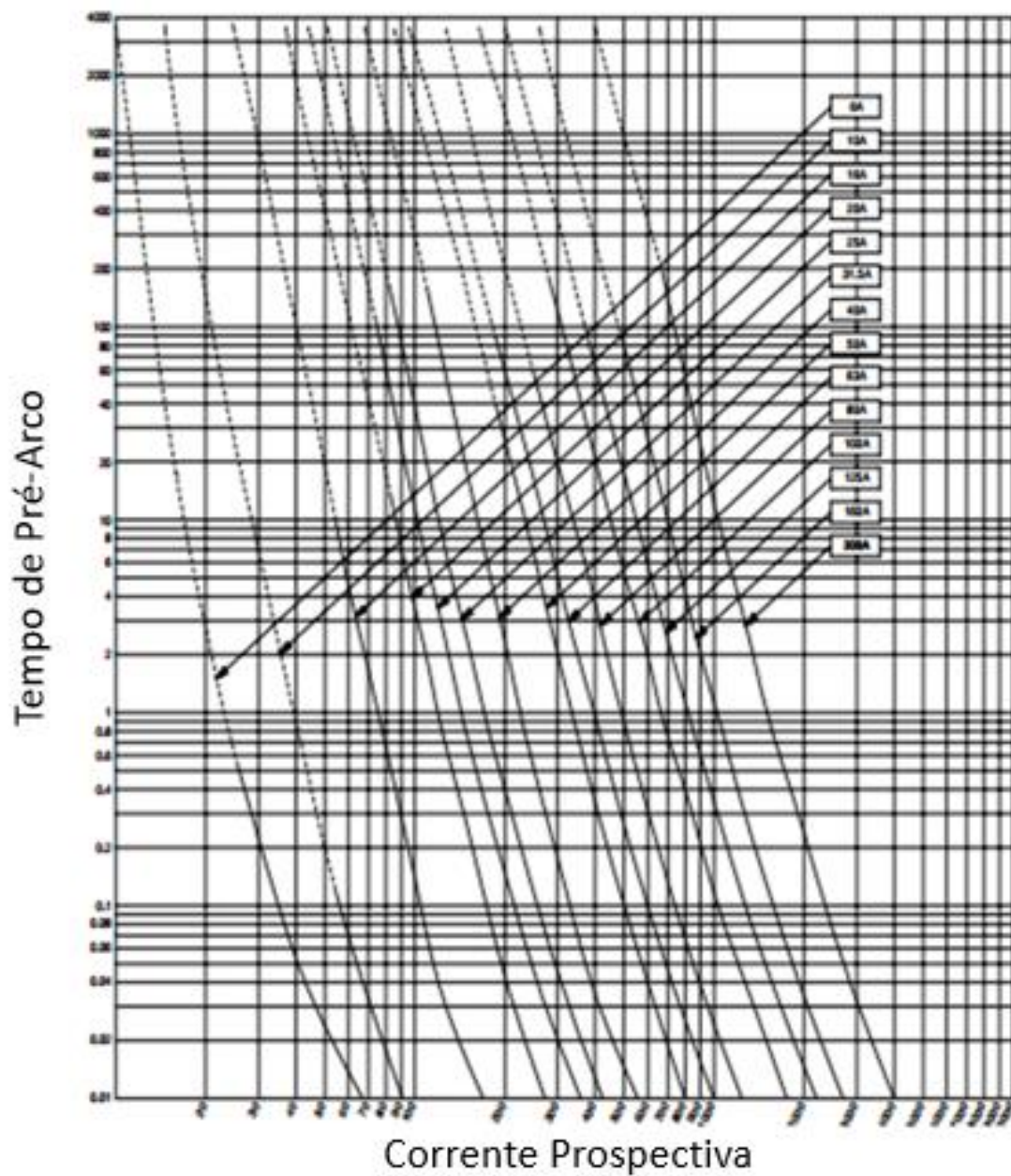
Figura 3 – Seletividade de Fusíveis Limitadores de Corrente



Fonte: IEEE (2001)

As curvas de tempo de fusão versus corrente (TCC) dos fusíveis mostram o relacionamento entre os vários valores de sobrecorrente e seus respectivos tempos de rompimento. São plotados em papel log-log para possibilidade de serem mais facilmente traçados. A Figura 4 representa a curva TCC de um fusível. Os valores de corrente são normalmente representados na abcissa e o valor de tempo na ordenada, devendo representar o mínimo tempo de fusão, o tempo de fusão médio e o tempo total de compensação, como especificado na curva. O tempo de fusão médio representa a característica de abertura tendo uma tolerância máxima de $\pm 15\%$ na corrente em qualquer ponto de tempo. Para tempos superiores a 0,1 s, o tempo máximo de fusão é essencialmente o mesmo que o tempo total de compensação.

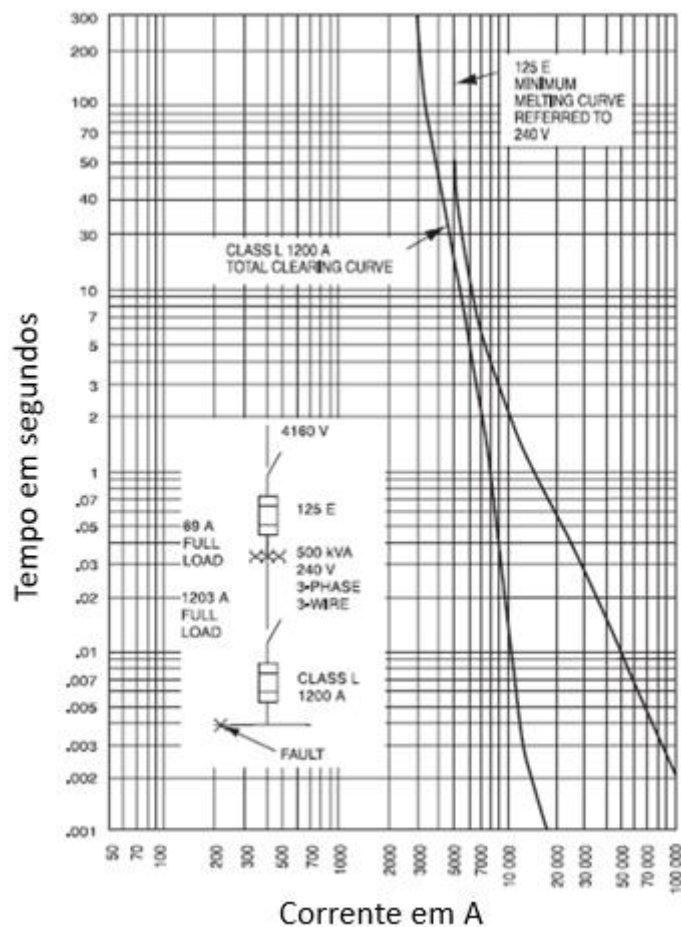
Figura 4 – Curva TCC de um fusível



Fonte: ABB (2016)

Um exemplo crasso de seletividade pode ser observado na Figura 5. No qual nota-se a seletividade entre um fusível de alta tensão e um de baixa tensão. Observando a Figura 5, a curva de desobstrução total do fusível de baixa tensão de 1200 A e a curva de fusão mínima do fusível de 5kV com classificação 125E são separadas por um espaço livre, portanto, são ditas seletivas.

Figura 5 – Exemplo de seletividade entre fusíveis



Fonte: IEEE (2001)

Um valor referência é o termo I^2t , que é uma medida da energia que um fusível deixa passar enquanto limpa uma falha. Cada peça de equipamento elétrico é limitada em sua capacidade de suportar energia. O equipamento suporta uma taxa I^2t que pode ser comparada com os valores máximos de compensação para fusíveis.

3.2 DISJUNTORES

Disjuntores são dispositivos que interrompem a passagem de corrente elétrica em um circuito, podendo abrir e fechar por métodos não automáticos e, devendo abrir circuitos automaticamente em uma situação de sobrecorrente pré-determinada, sem danificar si próprio.

Disjuntores são projetados a fim de interromper rápida e sucessivamente a corrente na ocorrência de um curto-circuito (I_{cc}), limitando, desta forma, os danos causados aos

equipamentos que compõem o sistema elétrico. Este componente deve ser capaz de estabelecer e conduzir por longos espaços de tempo não somente as correntes nominais das cargas do circuito, mas também as correntes de magnetização de transformadores, reatores e correntes capacitivas de bancos de capacitores. A Figura 6 representa disjuntores tripolares, bipolares e monopolares.

Figura 6 – Disjuntores



Fonte: Eaton (2017)

A classificação de tempo de curto-circuito, as vezes referida como classificação de suporte, especifica a capacidade máxima de um disjuntor para suportar os efeitos do fluxo de corrente de curto por um período determinado, tipicamente 0,5 s, ou menos, sem abertura. Esta capacidade fornece tempo para dispositivos de proteção do lado da carga, mais pertos da falha, operarem e isolarem o circuito.

O disjuntor deve suportar a tensão do circuito em que está instalado com os contatos abertos, assim como deve realizar o movimento de abertura em um intervalo tão curto quanto 2 ciclos ainda que tenha permanecido por um período de vários meses na posição fechado. Um requisito para os disjuntores é resistir tanto aos efeitos do arco elétrico quanto os efeitos eletromagnéticos e mecânicos devido ao primeiro ciclo da corrente de curto, além dos efeitos térmicos presentes no fluxo de corrente nominal de curta duração. O disjuntor aberto, deve apresentar impedância infinita para ser capaz de fechar em qualquer instante sem causar dano aos contatos, inclusive sob curto-circuito; já na posição fechada deve possuir impedância nula, para ser capaz de interromper a corrente especificada em qualquer instante.

O disjuntor possui algumas características que devem sempre ser analisadas, são elas o controle de fechamento (*closing*), o controle de abertura (*tripping*), o sistema de abertura livre (*trip free*), o antibombeamento (*anti pumping*) e o quesito de confiabilidade (LAWSON, 2012).

3.2.1 Limitação de Corrente

A limitação de corrente usando disjuntores pode ser fornecida por dois tipos de disjuntores: limitante de corrente e de fusíveis integrados.

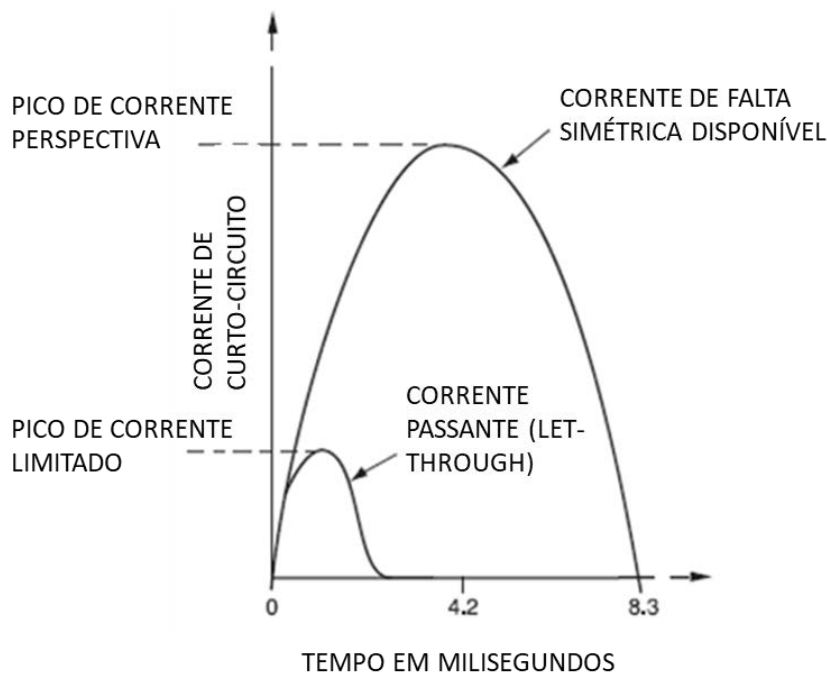
Os disjuntores de limitação de corrente são geralmente de caixa moldada especiais que não só fornecem capacidade de altas interrupções, como também limitam a corrente passante e a energia para os dispositivos de carga. Segundo a norma UL (1996), esta define um disjuntor de limitação de corrente como um disjuntor que não emprega um elemento fusível e que, ao operar dentro de seu intervalo de limitação de corrente, limita a corrente I^2t de passagem para um valor inferior ao I^2t da meia onda de corrente elétrica prospectiva. I^2t , como usado na definição, está na equação (1) relacionado a energia resultante do fluxo de corrente.

$$I^2t = \int i^2(t)dt \quad (1)$$

A integral está sob o período de consideração, que engloba geralmente desde o início de um curto-circuito até a limpeza. Os catálogos de fabricantes específicos devem sempre ser consultados para informação das características sobre limitação de corrente. Os disjuntores limitadores de corrente fornecem ao projetista do sistema um meio de reduzir os níveis de energia de falha para os componentes do sistema do lado da carga, mantendo as vantagens da construção do disjuntor, como a abertura comum (*trip*) e a reutilização. Esses disjuntores podem ser redefinidos e o serviço restaurado da mesma maneira que os disjuntores térmicos-magnéticos convencionais. Nada precisa ser substituído, mesmo depois de limpar as correntes de falha nominal máxima.

Após a interrupção em altos níveis de falha, é necessário que o equipamento com falha, incluindo o disjuntor, seja verificado e substituído, se necessário, antes de ser colocado de volta no serviço. A Figura 7 ilustra a forma de onda da corrente resultante da operação de limitação de corrente.

Figura 7 – Forma de onda da limitação de corrente



Fonte: IEEE (2001)

Disjuntores com fusíveis integrados provêm uma alta capacidade de interrupção através do uso de fusíveis limitadores de corrente, que são montados na caixa do disjuntor. Os fusíveis nestes dispositivos são desenvolvidos para operar e requerem substituição somente após uma falha de alto nível (IEEE, 2011).

3.2.2 Unidade de disparo ou *Trip*

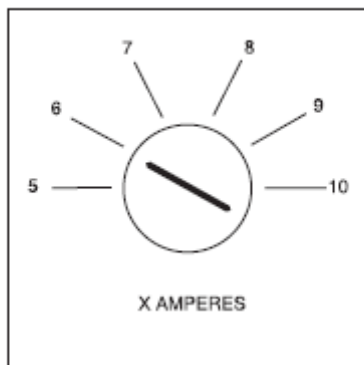
Segundo Lawson (2012), a unidade de disparo detecta continuamente a corrente e inicia o disparo de acordo com sua curva de retorno de tempo-corrente para fornecer a função de proteção de sobrecorrente automática do disjuntor. Dependendo da magnitude da corrente, a unidade de *trip* inicia uma resposta de tempo inverso ou uma resposta instantânea. Quando o disparo é iniciado, um mecanismo de ação direta dentro do disjuntor abre os principais contatos e interrompe o fluxo de corrente. Pode ser eletromecânico, térmico-magnético ou *dashpot* mecânico, ou eletrônico.

Unidades de disparo podem ser consideradas em cinco configurações básicas:

- **Não-ajustáveis:** são as mais comuns disponíveis em pequenos disjuntores de caixas moldadas. Todas suas características são fixas.

- **Ajustáveis instantaneamente:** muitos disjuntores termomagnéticos são desenvolvidos com um ajuste instantâneo (ou disparo magnético), como mostrado na Figura 8. Todas as outras características são fixas, o ajuste pode ser um único ajuste para todos os polos ou um ajuste individual para cada polo do disjuntor.

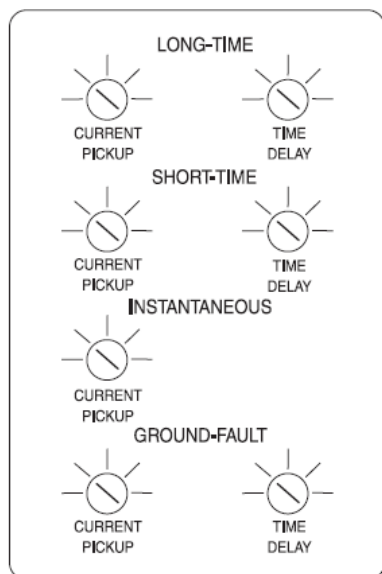
Figura 8 – Ajuste instantâneo ou disparo magnético



Fonte: Kingsley (2017)

- **Atuador Mecânico:** uma unidade de disparo por atuador mecânico é encontrada em muitos disjuntores de baixa tensão antigos que ainda estão em serviço. Este tipo de unidade de disparo é raramente encontrado em equipamentos novos com o advento de disparos eletrônicos.
- **Eletrônico:** unidades de disparo eletrônicas são encontradas como padrão na maioria dos disjuntores de baixa e como opção nos disjuntores de caixa moldada. Eles são equipados com ajustes para algumas ou todas características do dispositivo. Alguns ajustes são feitos por passos simples de programação ou mesmo pelo ajuste de mostradores, conforme indica a Figura 9. Funções adicionais, tais como proteção contra falhas à terra, ou combinações de funções que influenciam ainda mais a resposta tempo-corrente do disjuntor estão disponíveis em fabricantes específicos. Amperímetros e outros monitores visuais estão disponíveis opcionalmente para monitorar a condição do circuito e disjuntor.

Figura 9 – Ajuste eletrônico de disparo



Fonte: Kingsley (2017)

Em adição ao ajuste das características de disparo, algumas unidades de disparo provêm comunicação com outros dispositivos, com um sistema de interface eletrônica e um sistema operacional. Os recursos podem incluir bloqueio seletivo para desligamento rápido, mas ordenado; proteção de equilíbrio de fase, monitoramento de energia, monitoramento de formato de ondas e monitoramento e controle remoto. Esses recursos variam de acordo com o produto e o fabricante. As funções básicas da unidade de disparo são as mesmas que na unidade de disparo eletrônica (KINGSLEY, 2017).

O bloqueio seletivo de zona (ZSI) é definido como uma função fornecida para limpeza rápida, mantendo a coordenação. A função é uma interligação de comunicação entre as unidades de disparo eletrônicas de dois ou mais disjuntores conectados em série e em múltiplos níveis. Por meio da intercomunicação entre os elementos de atraso curto e/ou de falta de terra, o disjuntor mais próximo da falha dispara com um atraso de tempo mínimo enquanto sinaliza que os disjuntores do lado da fonte demorem por um período predeterminado. Sinônimos são bloqueio de zona e bloqueio seletivo.

Contrastando com sistemas tradicionais em que o atraso de curto prazo é definido para a coordenação seletiva e o tempo limite antes do disparo ocorre, o sistema seletivamente interligado reduz substancialmente a energia potencialmente prejudicial entregue a uma falha porque o atraso no disparo não é introduzido além de qualquer configuração presente no disjuntor mais próximo da falha.

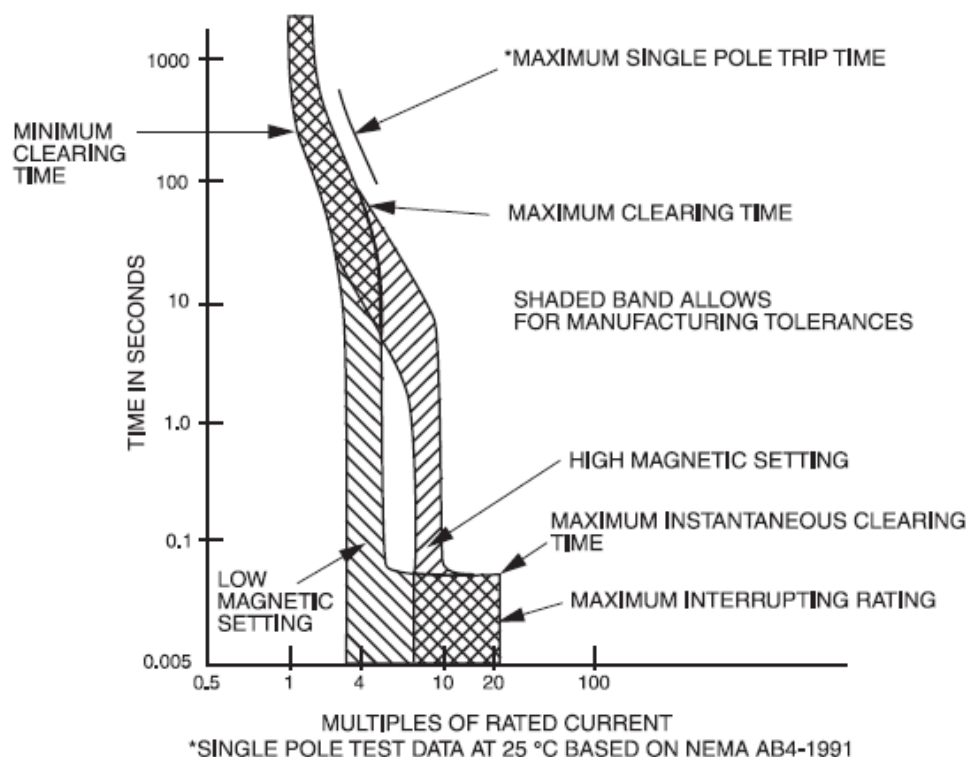
Quando harmônicos ou outras condições não-lineares estão potencialmente presentes, os sistemas de detecção nos vários tipos de unidades de disparo reagem de diferentes maneiras. Bimetais e elementos térmicos similares em unidades de trip termomagnético reagem diretamente ao aquecimento i^2r e fornecem uma verdadeira detecção de corrente eficaz. Algumas unidades de disparo eletrônicas fornecem alta precisão na detecção de corrente real eficaz combinando amostragem de corrente de alta frequência com um software interno que calcula valores RMS, tais dispositivos podem ser preferidos onde a proteção contra sobrecarga é uma preocupação. As unidades de disparo eletrônicas digitais de detecção de pico e mesmo as analógicas podem não fornecer uma medida RMS precisa, no qual um conteúdo de alta potência de harmônicos ou outros distúrbios estejam presentes, mas pode ser bastante adequado quando a proteção de falhas elevada é motivo de preocupação. As especificações dos fabricantes podem ajudar a identificar a capacidade de uma unidade de disparo específica. As unidades de disparo que são menos precisas na detecção de RMS são susceptíveis a disparar em valores de corrente fundamental mais baixos do que o esperado de 60 Hz devido a condições não senoidais (IEEE, 2011).

3.2.3 Características Tempo versus Corrente (TCC)

A curva característica de tempo versus corrente (TCC) descreve o tempo necessário para que um disjuntor se abra automaticamente em relação à corrente que flui através dele. A curva é principalmente uma função do tipo de unidade de disparo e suas configurações. A característica de tempo inverso destina-se a proteger os condutores e deriva seu nome da proporcionalidade inversa do tempo para operar versus a magnitude da corrente que flui através do disjuntor. Em outras palavras, a abertura é mais rápida quando a condição de sobrecorrente é a maior.

As curvas de tempo versus corrente são excelentes ferramentas de engenharia quando o tempo e a corrente são os principais fatores. Na região de curto-circuito, outros fatores (por exemplo, fator de potência, instância de inicialização de falha, número de polos ou fases na falha, comportamento de outros equipamentos no circuito) também podem afetar o tempo de reação e desobstrução. As curvas geralmente disponíveis desenhadas de acordo com a NEMA AB 1-1991 mostram uma ampla faixa de tempo de limpeza para interrupção de múltiplos polos que inclui o efeito desses fatores (IEEE, 2001). A Figura 10 representa a curva típica de um disjuntor tripolar de 600 A.

Figura 10 – Curva TCC típica de um disjuntor tripolar de 600 A



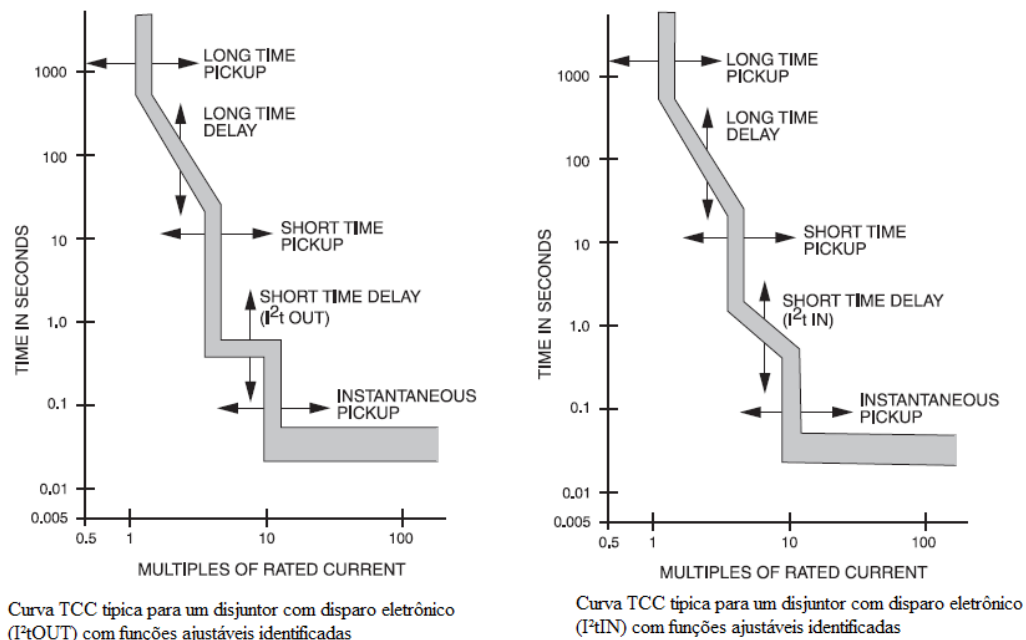
Fonte: IEEE (2001)

A classificação de corrente contínua pode ser fixa ou ajustável. Alguns projetos podem exigir a substituição de toda ou parte da unidade de disparo para alterar a classificação contínua. As características de disparo de sobrecorrente são uma função, múltipla ou porcentagem da classificação de corrente contínua.

A Figura 11 representa as curvas de TCC típicas para unidades de disparo eletrônicas com os cinco ajustes mais comuns: captação de corrente de longa duração, atraso de longa duração, captação de curto prazo, atraso de curto prazo e captação instantânea. Para uma classificação de quadro determinada, o captador de corrente de longa duração (às vezes chamado de configuração atual), além da ficha de seleção selecionada, determina a classificação atual do disjuntor. Esta função determina a corrente na qual a função de disparo começa. Os meios de ajuste da configuração do coletor devem estar localizados atrás de uma tampa selada ou de outra forma restrita ao pessoal qualificado. O atraso de longa duração pode ser ajustado para permitir que o sistema resista a sobrecargas temporárias antes de falhar. Esta configuração varia o tempo que o disjuntor carrega uma dada sobrecarga. A configuração de atraso de curto prazo determina o atraso de tempo para qualquer nível atual acima do captador antes de falhar. A característica de curto prazo é fornecida principalmente para a coordenação seletiva com disjuntores ou

fusíveis do lado da carga. A classificação de curto prazo (ou de resistência) estabelece a capacidade do disjuntor para suportar forças e calor associado ao tempo de atraso com correntes acima do nível de corrente de captação de curto prazo. O captador instantâneo define o nível atual no qual a unidade de disparo inicia um disparo instantâneo. A característica instantânea pode não ser fornecida ou pode ser desligada em alguns disjuntores para aproveitar ao máximo o recurso de curto prazo para a coordenação seletiva. Embora o disparo instantâneo não tenha atraso intencional, o tempo de captação é tipicamente 0,033 s dentro da faixa instantânea e 0,011 s para correntes de curto-circuito mais altas. O tempo de compensação é adicional ao tempo de retirada (NEGRÃO, 2012).

Figura 11 – Curva TCC com as funções ajustáveis identificadas



Fonte: IEEE (2001)

3.3 RELÉS DE PROTEÇÃO

Os relés de proteção devem ter como principal função diagnosticar corretamente problemas, buscando sempre uma resposta rápida que cause o menor distúrbio possível no sistema elétrico. Os relés são dispositivos que detectam condições anormais de operação do sistema elétrico e que desencadeiam ações, no menor tempo possível, com objetivo de normalizar o sistema ou retirar de operação parte do circuito que apresente condições anormais de operação.

Atualmente é possível encontrar relés aplicados em diferentes setores da indústria, transporte e comércio, porém neste trabalho o relé será abordado como um dispositivo de proteção de sistemas elétricos de potência. O IEEE define um relé de proteção como um relé cuja função é detectar linhas ou equipamentos defeituosos ou outras condições anormais em sistemas de potência, de natureza perigosa e que seja capaz de iniciar uma ação de controle apropriada. A Figura 12 representa relés digitais da marca ABB.

Figura 12 – Relés de proteção



Fonte: ABB (2017)

Levando em consideração que relés protegem o sistema contra falhas, estes podem ser divididos em dois grupos, um grupo de relés primários ou principais, e um grupo chamado de retaguarda. Os relés primários agem prioritariamente, buscando a eliminação da falha, já os relés de retaguarda somente entram em ação caso os primários falhem. Os relés acionam disjuntores, e estão localizados na conexão de qualquer dispositivo de potência.

Em geral, quando as faltas ocorrem, correntes de grande magnitude aparecem e os valores de tensão decaem. Entretanto, não são somente estas grandezas que sofrem variações, mas também a frequência do sistema, a potência ativa e reativa, os ângulos dos fasores de tensão e corrente, componentes harmônicas, etc. A função do relé é detectar as mudanças nestas grandezas e reconhecer quais estão dentro de sua zona de proteção. O mais simples dos princípios de operação de um relé é o nível de detecção. Para todos os valores superiores a este nível, no caso de corrente, o relé irá atuar. Esta atuação, normalmente, é um comando sobre um disjuntor ou um alarme sonoro para que um operador possa intervir e tomar alguma decisão. Para saber qual o nível de detecção a ser utilizado em um relé, deve-se conhecer a corrente máxima de operação sob aquele dispositivo. Considerando uma margem de segurança, qualquer corrente acima desta margem, deve ser analisada como uma falta ou uma condição anormal.

Este nível de detecção é conhecido como ajuste de pick-up do relé. Ainda no caso de relés de corrente, atingido este valor de pick-up o relé irá atuar, entretanto, para valores menores, o relé não terá atuação nenhuma. No caso de relés de subtensão, o relé somente irá atuar para valores menores que o valor de pick-up.

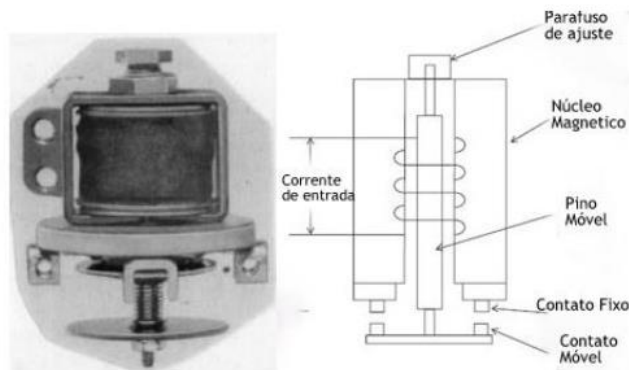
3.3.1 Classificação dos Relés de Proteção

Os relés podem ser classificados de 4 maneiras, uma em relação ao modo de aplicação, outra em relação as suas características construtivas, também são classificados em relação ao seu modo de acionamento juntamente com suas grandezas analisadas, e por fim quanto a sua temporização.

Em relação ao aspecto construtivo, os relés podem ser eletromecânicos, eletrônicos (estáticos) ou digitais. Os relés eletromecânicos são ainda sim, divididos em dois subgrupos, atração eletromagnética ou indução eletromagnética.

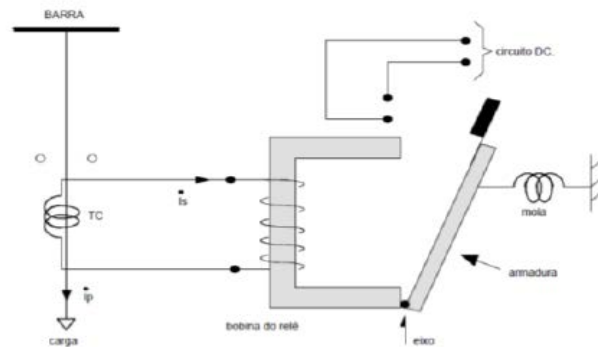
- **Relé de Atração Eletromagnética:** estes podem operar em virtude de um êmbolo sendo arrastado por um solenoide, ou através de uma armadura sendo atraída pelos polos de um eletroímã. Os relés de atração eletromagnética podem ser do tipo DC ou AC. Os relés de atração eletromagnética podem ser do tipo êmbolo ou do tipo alavanca. No tipo êmbolo uma corrente elétrica percorre uma bobina de magnetização que produz um campo magnético e quando a corrente na bobina atinge o valor de ajuste do relé, o campo magnético desloca um êmbolo que irá operar um conjunto de contatos do relé. No tipo alavanca, uma alavanca articulada é atraída quando uma corrente elétrica percorre um eletroímã. Este relé possui maior sensibilidade do que o tipo êmbolo (HEWITSON; BROWN; BALAKRISHNAN, 2004). As Figuras 13 e 14 ilustram um relé tipo êmbolo, sendo possível observar suas características construtivas e seu esquemático de funcionamento.

Figura 13 – Relés tipo Êmbolo



Fonte: Hewitson; Brown; Balakrishnan (2004)

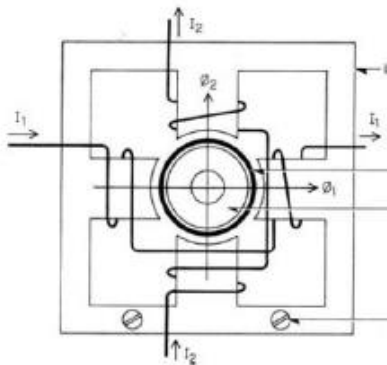
Figura 14 – Funcionamento de relés tipo Êmbolo



Fonte: Hewitson; Brown; Balakrishnan (2004)

- Relé de Indução Eletromagnética:** mais comumente conhecidos como relés secundários, são usualmente empregados em subestações industriais de potência, na proteção de equipamento de alto valor monetário. Funciona baseado em magnetos, um superior e outro inferior, entre os quais está fixado, em torno de seu eixo, um disco de indução, estes se comportam como um núcleo magnético que possibilita a formação de quatro entreferros, conforme indicado na Figura 15. O disco superior é dotado de dois enrolamentos, sendo o primeiro ligado diretamente ao circuito de alimentação, no caso de um transformador de corrente, enquanto o outro é responsável pela alimentação do núcleo inferior. O disco possui um contato móvel, que atua sobre um contato fixo, fechando o circuito de controle, possuindo também uma mola de restrição que implica em um retorno forçado do disco de indução à sua posição original, realizando uma frenagem eletromagnética. Seu ajuste é feito por meio de parafusos durante sua instalação.

Figura 15 – Relés tipo Indução Eletromagnética



Fonte: Hewitson; Brown; Balakrishnan (2004)

- **Relé Estáticos ou Eletrônicos:** são fabricados para atender todas as necessidades de proteção dos sistemas elétricos, competindo em preço e desempenho com os relés eletromecânicos. A grande vantagem está na evidente melhoria da sensibilidade, confiabilidade e velocidade dos sistemas de proteção removendo partes móveis sensíveis ao desgaste, corrosão e vibração. De maneira geral, através do uso de algoritmos, é possível atribuir praticamente qualquer característica de forma econômica aos relés digitais, que também tem permitido o desenvolvimento de esquemas de proteção mais complexos (HEWITSON; BROWN e BALAKRISHNAN, 2004). A Figura 16 representa um relé estático.

Figura 16 – Relé Eletrônico

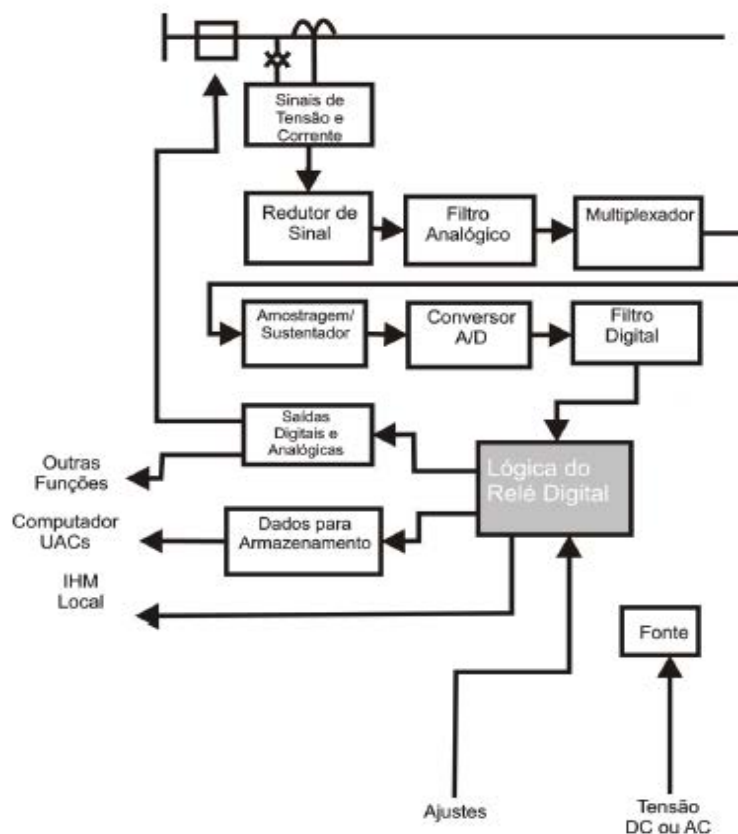


Fonte: Elo solutions (2017)

- **Relé Digitais:** dispositivos que são baseados em técnicas de microprocessadores que trabalham sob o mesmo princípio dos relés eletromecânicos e digitais. Estes relés ganham em velocidade e interfaceamento amigável, com funções de acesso remoto e um armazenamento maior de informações. Os relés digitais operam segundo uma programação

inteligente, com total capacidade de realizar operações lógicas e aritméticas. A Figura 17 demonstra a arquitetura de um relé digital em formato de diagrama de blocos, sendo que os algoritmos utilizados nestes relés, também podem exercer funções de medição e controle, fazendo que seja possível, por exemplo, verificação de valores eficazes e envio de comandos de aberto e fechamento para chaves seccionadoras. Algumas vantagens que são notórias são as funções de ajustes diferenciados para defeitos trifásico, bifásicos e monofásicos; recebimento de sinais provenientes de outros relés; possibilidade de compactação de espaço nos painéis; possibilidade de utilizar mais de uma função de proteção em um único dispositivo (KINDERMANN, 2005).

Figura 17 – Arquitetura do Relé Digital



Fonte: Kindermann (2005)

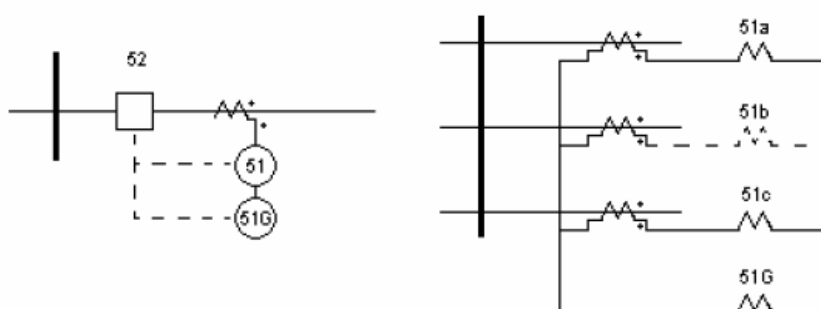
Explanando de forma breve sobre o diagrama de blocos, a entrada analógica é por onde os sinais de corrente e tensão via TC e TP entram. O redutor de sinal realiza a adequação e adaptação dos sinais ao circuito do relé digital. O filtro analógico age de acordo com a necessidade da função requerida, realizando uma filtragem dos sinais indesejados. A parte de amostragem e sustentação realiza a preparação dos sinais analógicos em sinais de amostragem por ciclo para a conversão em sinais digitais. Há uma conversão A/D, passando

por um filtro digital, afim de estabilizar os sinais digitais. O bloco da lógica do relé representa o algoritmo aplicado, juntamente com a função de proteção desejada, podendo conter entradas digitais capazes de alterar a lógica de proteção do relé. As saídas são destinadas a cumprir as funções do relé, podendo principalmente representar um comando para outros relés e comando para abertura de disjuntores. Por fim tem-se o bloco de registro de eventos e a IHM (Interface Homem-Máquina), o primeiro armazena os dados para realizar a análise do desempenho da atuação da proteção, e a IHM pode ser realizada diretamente no display do aparelho ou através de um computador local, e até mesmo de modo remoto.

Outra forma de classificação dos relés é pela variação das grandezas físicas, geralmente respondem a variações de frequência, de tensão e de corrente aos quais o sistema está submetido, porém tomando-se como referência esses valores básicos, é possível construir relés que respondem à parâmetros como potência e impedância.

Por fim a última forma de classificação dos relés é quanto ao tipo de temporização, estes podem ser temporizados ou instantâneos. Para Blackburn e Domin (2014), as principais aplicações dos relés temporizados são em sistemas radiais, no qual é necessário tanto uma proteção para as fases quanto para a terra. A Figura 18 representa o esquemático de relés temporizados com o disparo instantâneo, representado pela função 51.

Figura 18 – Representação de relés temporizados



Fonte: Anderson (1995)

A ANSI (American National Standart Institute) utiliza a numeração 51 para relés de sobrecorrente temporizados e 52 para um disjuntor de corrente alternada, sendo a letra G adicionada para proteção de terra. Geralmente dois ajustes são realizados em relés temporizados, o valor de pick-up e o tempo de atraso.

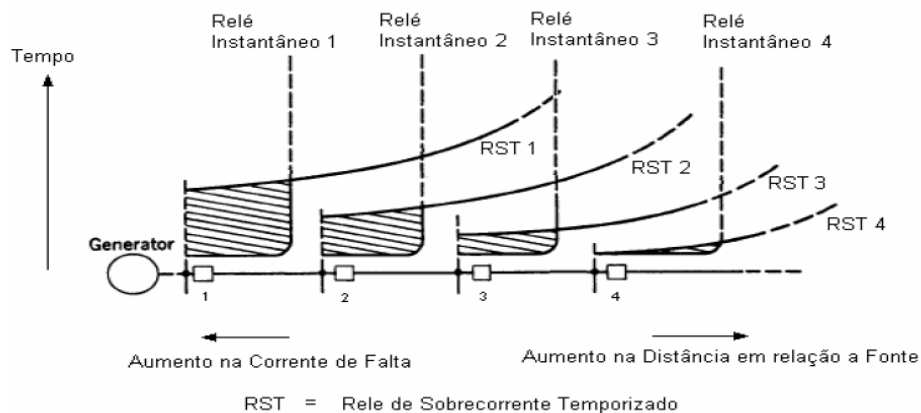
Conforme Blackburn e Domin (2014) o ajuste de corrente de pick-up (I_D) deve seguir a equação (2):

$$2 I_{MÁX} \leq I_D \leq \frac{1}{3} I_{CCMÍN} \quad (2)$$

Sendo $I_{MÁX}$ a corrente máxima de operação e $I_{CCMÍN}$ a mínima corrente de curto-circuito. O ajuste de pick-up é o primeiro ajuste que se realiza considerando a corrente máxima de operação e a mínima de curto-circuito no primário do TC. A característica de tempo de atraso do relé é um parâmetro independente que pode ser obtido através de várias formas, dependendo do modelo do relé, em relés digitais o tempo de atraso é estabelecido através do uso de algoritmos com clocks internos. O tempo de atraso é ajustado afim de prover uma possível coordenação entre mais de um relé, sendo possível simular uma família de curvas, com a mesma falta detectada, porém com tempos de operação diferentes (BLACKBURN e DOMAIN, 2014).

Os relés instantâneos atuam de modo rápido, não possuindo nenhum retardamento intencional no tempo de atuação. O único retardo existente é função de suas características construtivas. Frequentemente um relé de sobrecorrente instantâneo e um temporizado são fornecidos em conjunto, devido suas funções serem requeridas em conjunto. Essas funções são ajustadas independentemente, mas atuadas pela mesma variável. A Figura 19 representa um sistema com 4 relés instantâneos operando de maneiras diferente em função do aumento da corrente de falta, mantendo o mesmo padrão gráfico, porém com valores de tempo e corrente modificados.

Figura 19 – Representação de relés instantâneos



Fonte: Blackburn; Domain, 2014)

3.3.2 Classificação das funções de relés de proteção

Os relés possuem algumas funções representadas por códigos numéricos afim de normatizar sua aplicação. Perante um projeto de sistema de proteção é possível utilizar mais de uma função simultaneamente, a Tabela 1.

Tabela 1 – Principais funções de Proteção

Principais Funções de Proteção - Descrição	
Relé de Distância	21
Relé de Subtensão	27
Relé de Sobrecorrente Instantâneo	50
Relé de Sobrecorrente Temporizado	51
Relé de Sobretensão	59
Relé Direcional de Sobrecorrente	67
Relé de Proteção Diferencial	87

Fonte: Autor (2017)

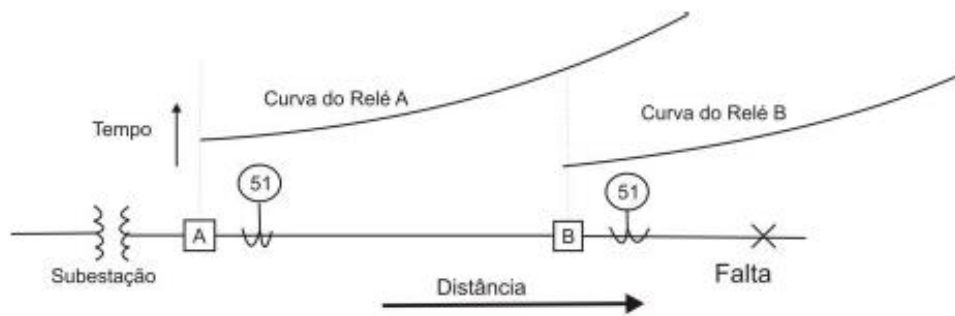
3.3.2.1 Relés de Sobrecorrente (50 e 51)

O relé de sobrecorrente deve atuar sempre que a corrente do equipamento protegido ultrapassar um valor ajustado. Como geralmente as correntes da falha são mais elevadas que a corrente de carga em operação, o relé é capaz de detectar a maioria dos problemas. O relé de sobrecorrente instantâneo (50) deve sempre atuar, sem qualquer acréscimo intencional de tempo, para qualquer valor de corrente que seja superior ao seu ajuste. A equação (3) representa o comportamento de relé de sobrecorrente instantâneo.

$$I_{nominal} \leq I_{ajuste\ do\ relé} \leq ICC_{MÍN} \quad (3)$$

O relé de sobrecorrente temporizado é utilizado para limpar uma falta na linha após um tempo pré-determinado, com a utilização das unidades instantâneas essa tarefa é um tanto quanto complicada. A Figura 20 exemplifica uma aplicação deste tipo de relé. Com a unidade instantânea torna-se complicado perceber o ponto de falta e assim realizar a coordenação da proteção de forma a abrir somente o dispositivo mais próximo da falha. O atraso imposto ao disjuntor A faz com que seja possível uma coordenação entre os dois dispositivos (BLACKBURN; DOMAIN, 2014).

Figura 20 – Representação de relés com função 51



Fonte: Blackburn; Domain (2014)

Os relés de sobrecorrente temporizados ainda podem ser de tempo definidos ou de tempo inverso. No relé de tempo de tempo definido, o seu acionamento ocorre somente depois de um tempo pré-determinado ajustado pelo usuário. Na Figura 21 é possível observar a curva de tempo definido. O relé mais distante do barramento deve sempre ter o menor tempo de ajuste possível e os relés a montante, mais próximos do barramento, devem possuir um ajuste cuja diferença de tempo seja a menor possível, sempre mantendo o limite como o tempo de coordenação. O tempo de coordenação é definido como a mínima diferença de tempo que dois relés devem ter para respeitar a coordenação, respeitando a inequação (4).

$$t_{rel\acute{e}_{montante}} \geq t_{rel\acute{e}_{jusante}} + t_{coordenação} \quad (4)$$

Figura 21 – Curva de tempo definido



Fonte: Anderson (1995)

Os relés de sobrecorrente de tempo inverso têm seus ajustes realizados pela escolha direta da curva de tempo de atuação. A coordenação é um pouco mais complexa, mas permite uma

operação mais eficaz para falhas mais severas. O ajuste da curva inversa pode ser feito pela equação (5). A Figura 22 representa a curva de tempo inverso do relé.

$$T = \frac{13,5}{\frac{I_{MA}}{I_S} - 1} \times T_{MS} \quad (5)$$

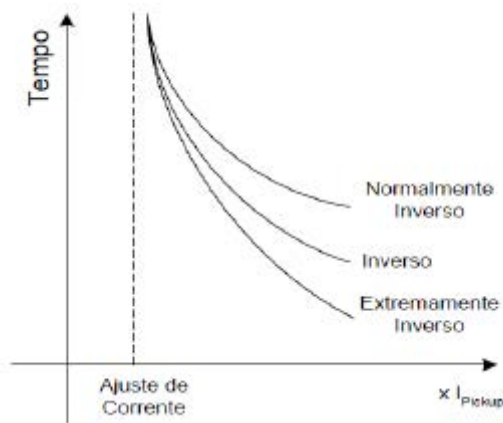
Sendo:

I_{MA} – sobrecorrente máxima definida;

I_S – corrente do ajuste do relé;

T_{MS} – multiplicador de tempo ou índice de tempo;

Figura 22 – Curva de tempo inverso



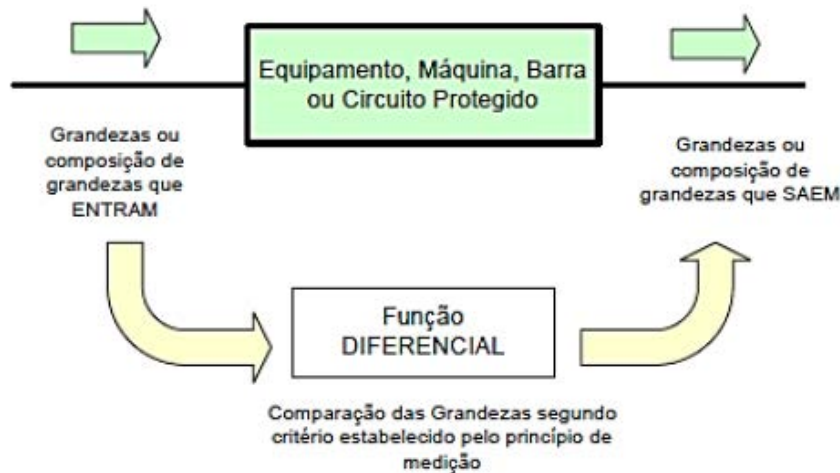
Fonte: Anderson (1995)

3.3.2.2 Relé de Proteção Diferencial (87)

A proteção diferencial pode ser aplicada em situações nas quais deseja-se proteger um barramento, gerador ou transformador contra uma falha de curto-circuito entre as espiras ou defeito entre a parte ativa e terra. Os relés diferenciais são amplamente utilizados em sistemas de proteção destinados a transformadores, e podem estar sujeitos a diversos fatores que possibilitam um acionamento indesejado do disjuntor, tais como correntes de magnetização transitória, defasagens angulares e diferenças de correntes no circuito de conexão do relé em função dos taps dos transformadores de potência. A Figura 23 representa o princípio de funcionamento de um relé diferencial, no qual ele realiza a comparação das grandezas segundo um critério estabelecido pelo princípio de medição, comparando as correntes que entram e saem

da área delimitada pela proteção e opera quando a diferença entre essas duas correntes excede um valor pré-determinado.

Figura 23 – Princípio de funcionamento de um relé diferencial



Fonte: Blackburn; Domain (2014)

3.3.2.3 Relé de Sobretensão (59) e Relé de Subtensão (27)

Os relés de tensão são aplicados em instalações industriais e sistemas de potência em geral, podendo ter tecnologia eletromecânica, eletrônica ou digital, existindo relés para operar na subtensão ou sobretensão.

Na subtensão, o relé funciona de modo que quando o sistema atinja uma tensão menor que um valor de limite inferior aceitável, o equipamento abre e para a operação do sistema. Na proteção de sobretensão, após o relé detectar condições de tensão superiores a um valor aceitável, a operação do sistema é parada, geralmente enviando sinais de alarme ou comandos para abertura de disjuntores.

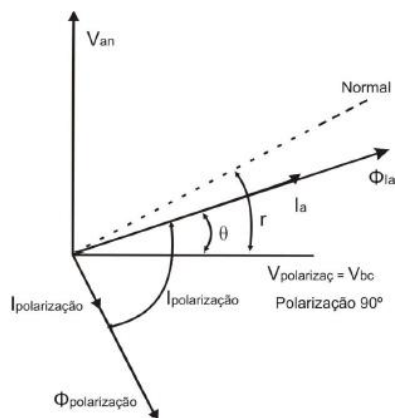
3.3.2.4 Relé de Sobrecorrente Direcional (67)

A função direcional surge para solucionar um problema em sistema com arranjo típico em anel ou em que há aplicação de fontes de tensão em ambas extremidades da linha. Este apresenta sensibilidade para operar apenas em relação a um único sentido conforme o fluxo que trafega no sistema. Sendo assim, este tipo de dispositivo de proteção possui uma característica radial ao sistema em anel. Para o uso deste relé são necessárias duas grandezas: uma de

polarização, que serve como um fasor de referência para o relé, e outra de atuação, que é medida em relação à referência. Para que a função direcional atue, é necessário que a grandeza de operação esteja em uma região específica em relação à grandeza de polarização (BLACKBURN e DOMAIN, 2014).

O relé direcional deve atuar somente quando a corrente no circuito estiver fluindo em um sentido determinado e sua intensidade for superior ao valor de ajuste. A direcionalidade é dada pela comparação fasorial entre a grandeza de polarização com a de operação, por isso a grandeza de polarização deve fornecer uma referência firme de direção de corrente. A Figura 24 representa a comparação fasorial de um relé direcional.

Figura 24 – Comparação fasorial de um relé direcional



Fonte: Autor (2017)

3.3.2.5 Relé de Distância (21)

Tratando-se de linhas longas, o sistema de proteção de sobrecorrente pode ser um complexo de se aplicar, tendo em vista que o valor da corrente de curto-circuito varia de acordo com a impedância medida desde a fonte até o ponto de defeito. Nestas situações deve-se utilizar o relé de distância, cujo tempo de atuação é proporcional a distância entre o ponto de instalação do relé e o ponto de defeito.

4 Análise de Falhas

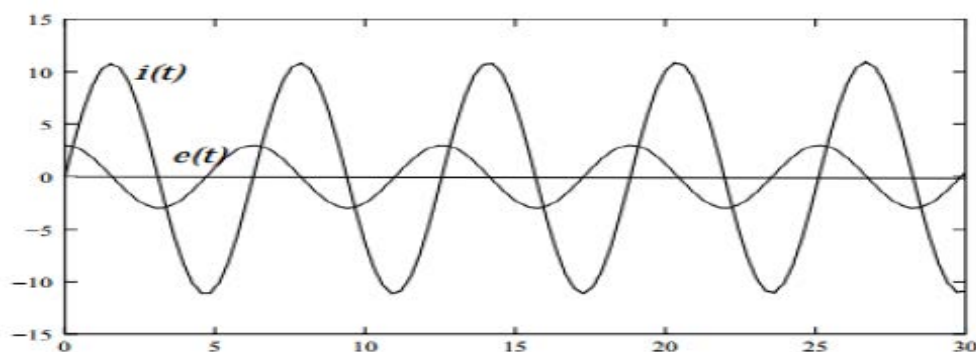
Para realizar a análise de faltas em um sistema elétrico é fundamental conhecer os possíveis modos de falha e conhecer o método de cálculo da corrente de curto-circuito, para assim especificar de maneira adequada o sistema de proteção. Quando um sistema passa por uma falha, altas correntes são geradas, e por efeito joule a temperatura se eleva muito, além de diversos esforços mecânicos provenientes do curto-circuito no sistema de potência.

O curto-circuito é o fenômeno que ocorre quando dois ou mais pontos estão sob diferença de potencial em um circuito elétrico e são ligados entre si, através de uma impedância que pode ou não ser desprezível. Essa ligação pode ser metálica, no caso de curtos-circuitos francos, por um arco elétrico, ou ainda através de um objeto como um galho de árvore. Os dispositivos de proteção devem ser especificados para os níveis de corrente de falta e duração correspondentes (ANDERSON, 1995).

Apenas o curto trifásico se comporta como uma sobrecarga na rede, sendo os condutores das três fases igualmente solicitados, com as correntes de falta de mesmo valor, mas defasados 120° . Para as outras possíveis faltas, comportamentos assimétricos surgem no sistema elétrico e com isso é fundamental compreender muito bem a representação de sistemas desequilibrados.

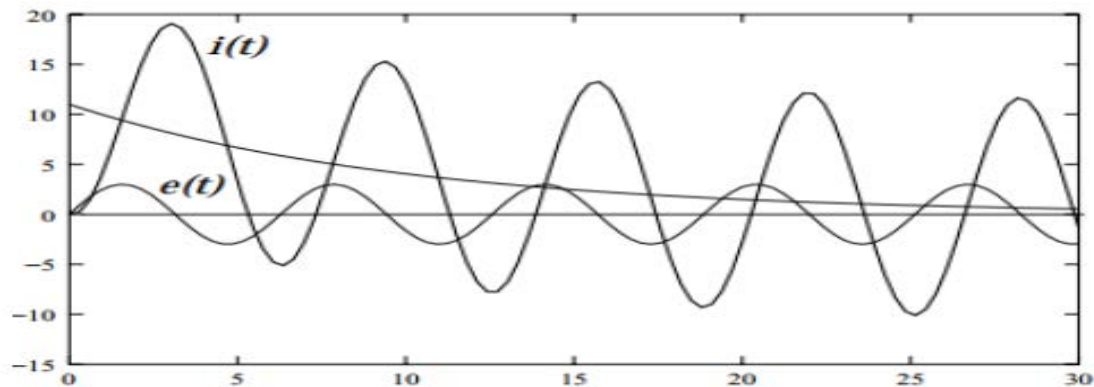
A corrente simétrica de curto-circuito é utilizada para determinar a capacidade dos equipamentos em suportar os efeitos térmicos e sua forma de onda é vista na Figura 25. Por outro lado, a corrente assimétrica de curto-circuito, representada pela Figura 26, possui duas componentes em sua formação, a componente simétrica e a componente contínua, essa componente contínua possui valor decrescente que representa o fluxo magnético e sua propriedade de não variar bruscamente (MAMEDE FILHO, 2011).

Figura 25 – Representação da corrente de curto-circuito simétrica.



Fonte: Sato (2015)

Figura 26 – Representação da corrente de curto-circuito assimétrica.



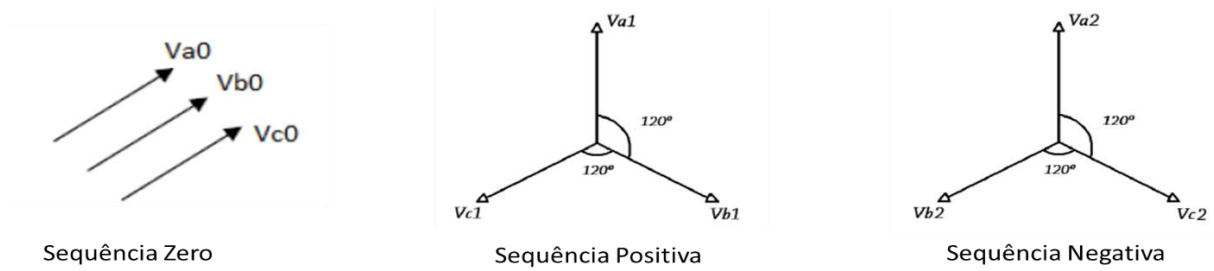
Fonte: Sato (2015)

4.1 COMPONENTES SIMÉTRICAS

O estudo de componentes simétricas foi iniciado em 1918 pelo Dr. Charles L. Fortescue, sendo apresentado como uma ferramenta de análise de decomposição de um sistema de “n” fases desequilibradas em componentes simétricas equilibradas. Segundo Fischer (2002), o Teorema de “Métodos de Componentes Simétricos Aplicado a Soluções de Sistemas Polifásicos” desenvolvido por Fortescue pode ser anunciado da seguinte forma para um sistema elétrico trifásico, que cada um dos três fasores de um sistema trifásico desequilibrado, pode ser decomposto da soma vetorial de outros três vetores pertencentes a três sistemas equilibrados trifásicos e os três sistemas equilibrados são denominados de sequência zero, sequência positiva e sequência negativa.

A sequência zero trata-se de três fasores com amplitudes e fase iguais, conforme a equação (6). As componentes de sequência positiva são três fasores de magnitude igual e defasados de 120° e na mesma sequência de fasores do sistema original, conforme equação (7). Por fim, as componentes de sequência negativa consistem em fasores de módulos iguais, também defasados 120° , porém apresentam sequência oposta aos fasores originais, representado pela equação (8). A Figura 27 exemplifica os três tipos de sistema.

Figura 27 – Representação de sistemas simétricos



Fonte: Autor (2017)

$$\dot{V}_{AO} = \dot{V}_{BO} = \dot{V}_{CO} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_{A1} &= \dot{V}_{A1} \\ \dot{V}_{B1} &= \dot{V}_{A1} \cdot 1 \angle -120^\circ \\ \dot{V}_{C1} &= \dot{V}_{A1} \cdot 1 \angle 120^\circ \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_{A2} &= \dot{V}_{A2} \\ \dot{V}_{B2} &= \dot{V}_{A2} \cdot 1 \angle 120^\circ \\ \dot{V}_{C2} &= \dot{V}_{A2} \cdot 1 \angle -120^\circ \end{aligned} \quad (8)$$

As equações podem ser simplificadas adotando um operador “a”, cujo valor é $1 \angle 120^\circ$ ou $e^{j\frac{2\pi}{3}}$, seguindo com essa simplificação, através da superposição dos sistemas trifásicos equilibrados, os vetores V_A , V_B e V_C em função de V_{A1} , V_{B1} e V_{C1} valem:

$$\begin{cases} V_A = V_{A0} + V_{A1} + V_{A2} \\ V_B = V_{A0} + a^2 \cdot V_{A1} + a \cdot V_{A2} \\ V_C = V_{A0} + a \cdot V_{A1} + a^2 \cdot V_{A2} \end{cases} \quad (9)$$

Rearranjando o sistema de equações (9) em um sistema matricial obtém-se a equação (10):

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} V_{A0} \\ V_{A1} \\ V_{A2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Pode-se definir a A como sendo o seguinte elemento:

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Portanto:

$$[V_{ABC}] = [A] \cdot [V_{012}] \quad (12)$$

V_{ABC} são os vetores das três fases, A, B e C, e V_{012} são os vetores de tensão de sequência zero, sequência positiva e negativa.

A representação por componentes simétricas se aplica também a vetores de corrente, assim a corrente que circula pelas três fases pode ser definida pela equação (13).

$$[I_{ABC}] = [A] \cdot [I_{012}] \quad (13)$$

4.2 COMPONENTES ASSIMÉTRICAS

Uma vez que as quedas de tensão são causadas por apenas correntes de mesma sequência, em um circuito balanceado, as correntes de qualquer sequência podem ser tratadas como parte de circuitos independentes, compostas por componentes daquela sequência. A análise de uma falta assimétrica consiste em determinar as componentes simétricas das correntes desequilibradas que estão circulando pelo circuito.

A determinação das impedâncias de sequência de um sistema de potência visa permitir a montagem dos circuitos de sequência, sendo o termo circuito de sequência o equivalente monofásico composto pelas impedâncias desta mesma sequência. O circuito equivalente demonstra todos os caminhos possíveis para a circulação das componentes de corrente naquela sequência de fase. A impedância de sequência positiva trata-se da impedância dos componentes do sistema, no caso de carga simétrica, por exemplo, para geradores, é a impedância efetiva no instante da falta, variando desde seu valor mínimo no instante inicial, até seu valor máximo que seria seu regime permanente. Para transformadores, é a impedância obtida nos ensaios de curto-circuito. A impedância de sequência negativa é igual à impedância de sequência positiva para os transformadores e condutores, pois, sendo estes componentes passivos, a oposição que apresenta a passagem de corrente elétrica não é influenciada pelo sentido de sequência das fases. Já para geradores e motores, a impedância negativa é aquela que a máquina apresenta

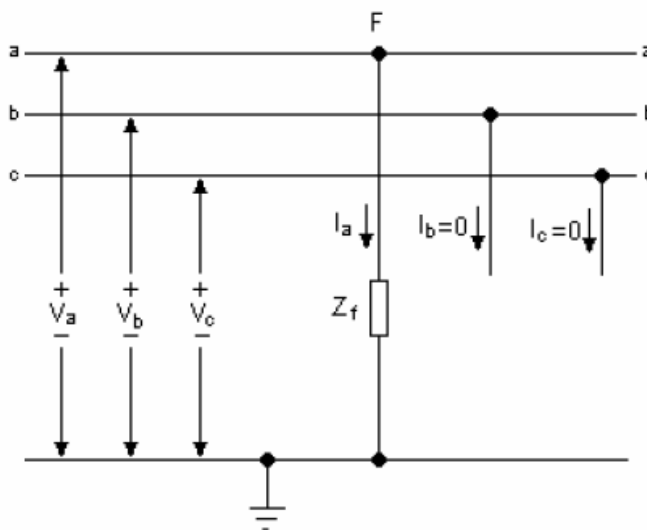
quando está girando à velocidade síncrona e no sentido de sequência positiva, e lhe é submetida uma tensão de sequência oposta (FISCHER, 2002).

Para impedâncias de sequência zero, os valores de impedância podem variar bastante em relação aos valores de sequência positiva e negativa, seja por causa da forma construtiva e dos tipos de conexões, ou devido aos dados geométricos das linhas e da classe de isolamento.

4.3 CURTO MONOFÁSICO À TERRA

Este tipo de curto circuito é o mais frequente dentre os demais tipos de faltas e estas correntes devem ser levadas em consideração para a determinação das tensões de contato, bem como quando a análise dos efeitos e do dimensionamento de sistemas de aterramento. O diagrama referente a este tipo de falta pode ser observado na Figura 28.

Figura 28 – Diagrama de faltas monofásicas



Fonte: Anderson (1995)

Na situação enunciada pela Figura 26, as correntes de fases no momento do curto-circuito, são zero, sendo assim, na análise as correntes de carga são ignoradas. As correntes nomeadas de I_A , I_B e I_C , são as correntes de falta que circulam pelas respectivas fases. A tensão de falta é chamada de V_F , e trata-se da tensão de curto no ponto de falta momentos antes da ocorrência da falha. Como a falta é monofásica, só se tem um valor para I_A podendo-se escrever conforme a equação (14).

$$\begin{bmatrix} I_{A0} \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Logo, a equação (15):

$$\begin{bmatrix} I_{A0} \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot I_A \times \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Nota-se que as três componentes possuem valores iguais. Portanto a tensão da fase 'a', logo após a falta será igual à equação (16):

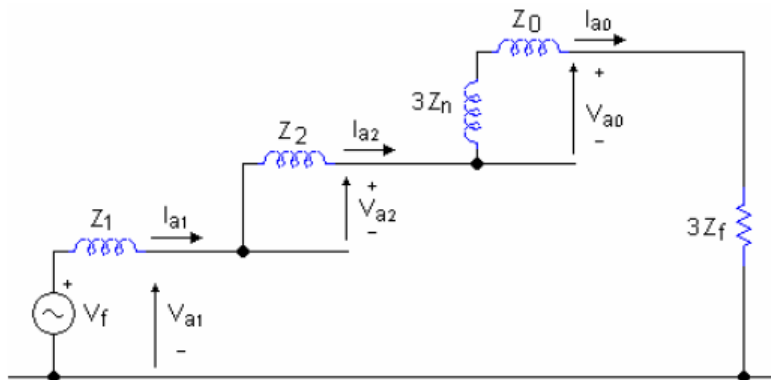
$$V_A = I_A \times Z_F \quad (16)$$

Tendo que Z_F é a impedância de falta, e V_A é igual a soma das tensões de sequência positiva, negativa e zero, tem-se da equação (17):

$$V_{A0} + V_{A1} + V_{A2} = 3 \times I_{A1} \times Z_F \quad (17)$$

Segundo o Anderson (1995), o diagrama que demonstra uma falta monofásica, pode ser representado pelo diagrama da Figura 29, explanando as componentes de sequência de tensão em série.

Figura 29 – Diagrama de sequência para faltas fase-terra



Fonte: Anderson (1995)

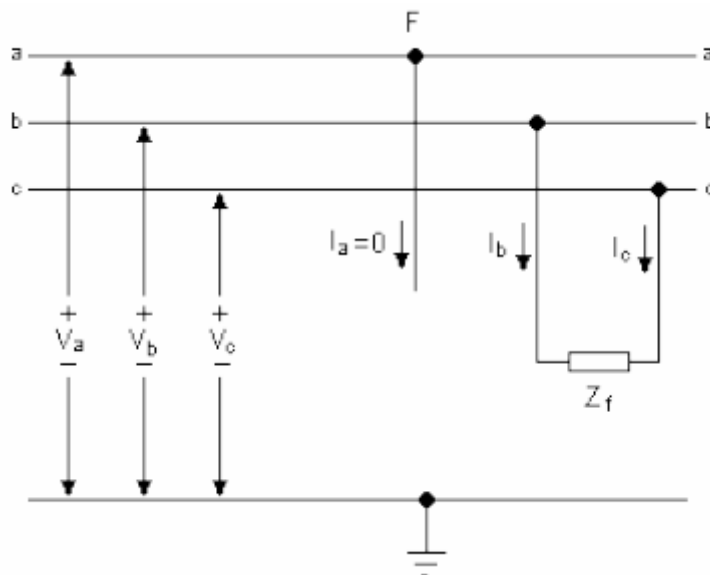
As impedâncias equivalentes de sequência são obtidas através do uso do teorema de Thévenin referidos ao ponto de falta e leva em conta todas as impedâncias dos condutores e do gerador. No qual Z_0 , Z_1 e Z_2 são impedâncias equivalentes do circuito de sequência zero, positiva e negativa, Z_N é a impedância de aterramento dos geradores e Z_F é a impedância de falta. A equação (18) representa a corrente de falta do sistema.

$$I_A = \frac{3V_F}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_F + 3Z_N} \quad (18)$$

4.4 CURTO BIFÁSICO

Existem dois tipos de faltas bifásicas, uma é o curto-circuito bifásico e o outro é o curto-circuito bifásico-terra, e ambas condições são assimétricas. As correntes de curto bifásico são geralmente menores que as grandezas do curto trifásico, porém se a falta ocorrer próximo a máquinas síncronas, então os valores podem ser maiores que os de um curto-circuito trifásico. A Figura 30 representa um diagrama de faltas-bifásicas.

Figura 30 – Diagrama de faltas bifásicas



Fonte: Anderson (1995)

É importante definir que neste tipo de falta as correntes I_B e I_C somadas devem ser nulas, assim como a corrente na carga não deve ser considerada, desse modo I_A é nulo. A equação (19) representa a diferença de tensão entre as fases com falta, 'B' e 'C'.

$$V_B - V_C = I_B \cdot Z_F \quad (19)$$

Fazendo-se uso da equação (15) e adaptando os valores para a situação atual, sabendo que a somatória de I_B e I_C é igual a 0, tem-se a equação (20):

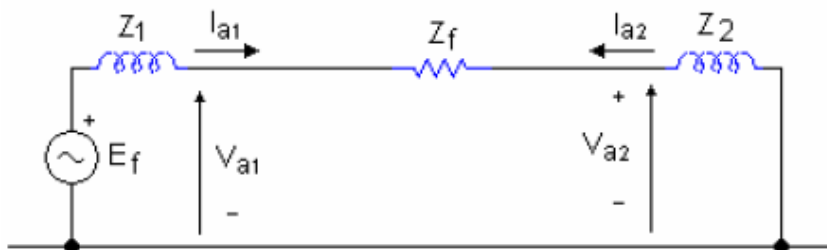
$$\begin{bmatrix} I_{A0} \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ I_B \\ -I_B \end{bmatrix} \quad (20)$$

Observa-se que a corrente de sequência zero é nula pelo fato de não haver circulação de corrente pelo terra. Desse modo, tem-se a equação (21):

$$\begin{aligned} I_A &= I_{A0} + I_{A1} + I_{A2} \\ 0 &= 0 + I_{A1} + I_{A2} \\ I_{A1} &= -I_{A2} \end{aligned} \quad (21)$$

Conclui-se que a corrente de sequência positiva é igual em módulo e defasada de 180° da corrente de sequência negativa. A Figura 31 representa as componentes de sequência de tensão e corrente de uma falta bifásica fase-fase.

Figura 31 – Diagrama de sequência para faltas fase-fase



Fonte: Anderson (1995)

Com base no circuito da Figura 29 é possível determinar a corrente de sequência positiva pela equação (22) e as correntes de curto-circuito da fase B e C, pelas equações (23) e (24) respectivamente.

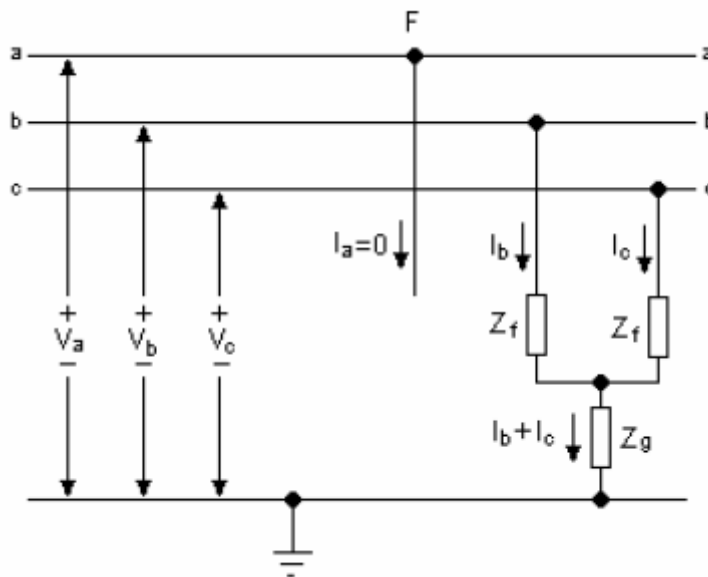
$$I_{A1} = \frac{V_F}{Z_1 + Z_2 + Z_F} \quad (22)$$

$$I_B = \frac{V_F(a^2 - a)}{Z_1 + Z_2 + Z_F} \quad (23)$$

$$I_C = \frac{V_F(a - a^2)}{Z_1 + Z_2 + Z_F} \quad (24)$$

O outro tipo de falta bifásica, é a falta fase-fase à terra, que pode ser representada pelo circuito da Figura 32, no tem-se duas impedâncias Z_F curto-circuitadas entre as linhas e uma impedância Z_G para a terra.

Figura 32 – Diagrama de faltas fase-fase à terra



Fonte: Anderson (1995)

Considerando que a fase A não é curto-circuitada e possui corrente nula, tem-se então, a seguinte definição para as tensões das fases B e C no momento logo após a falta, conforme as equações (25) e (26):

$$V_B = Z_F \cdot I_B + Z_G(I_B + I_C) \quad (25)$$

$$V_C = Z_F \cdot I_C + Z_G(I_B + I_C) \quad (26)$$

Como a corrente I_A é nula, pode ser representada pela equação (27).

$$I_{A0} + I_{A1} + I_{A3} = 0 \quad (27)$$

Fazendo-se uso da equação (9) para definir V_B e V_C , e assim subtraindo de uma de outra para obter a diferença de tensão entre as fases, tem-se a equação (28):

$$\begin{aligned} V_B - V_C &= V_{A1} \cdot (a^2 - a) + V_{A2}(a - a^2) \\ V_B - V_C &= (V_{A1} - V_{A2})(a^2 - a) \end{aligned} \quad (28)$$

Sabe-se que $a^2 - a = -j\sqrt{3}$, portanto tem-se a equação (29).

$$V_B - V_C = (V_{A1} - V_{A2}) \cdot (-j\sqrt{3}) \quad (29)$$

Logo substituindo a equação (29) na diferença das equações (25) e (26) é possível obter a equação (30):

$$\begin{aligned} (V_{A1} - V_{A2}) \cdot (-j\sqrt{3}) &= Z_F[(I_{A0} + a^2 I_{A1} + a I_{A2}) - (I_{A0} + a I_{A1} + a^2 I_{A2})] \\ (V_{A1} - V_{A2}) \cdot (-j\sqrt{3}) &= Z_F[I_{A1}(a^2 - a) - I_{A2}(a^2 - a)] \\ (V_{A1} - V_{A2}) \cdot (-j\sqrt{3}) &= (-j\sqrt{3})Z_F(I_{A1} - I_{A2}) \\ (V_{A1} - Z_F I_{A1}) &= (V_{A2} - Z_F I_{A2}) \end{aligned} \quad (30)$$

Somando agora os termos V_C e V_B da equação (9) e sabendo-se que $1 + a + a^2 = 0$, tem-se que equação (31):

$$V_B + V_C = 2V_{A0} - (V_{A1} + V_{A2}) \quad (31)$$

Agora trabalhando com as equações (25) e (26), somando também os termos V_C e V_B , tem-se que equação (32):

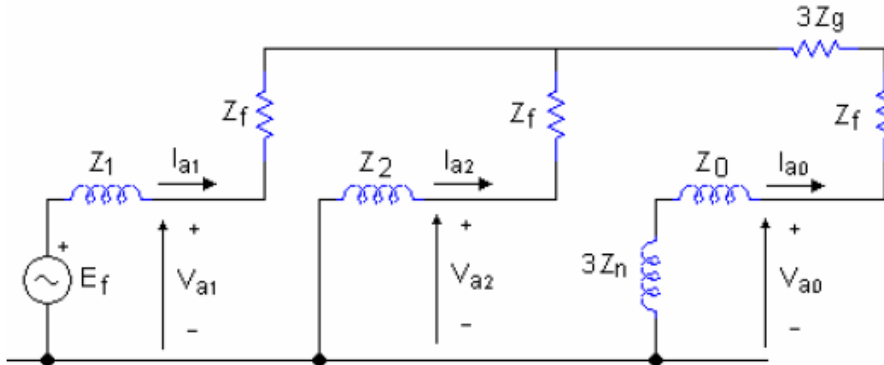
$$\begin{aligned} V_B + V_C &= (Z_F + 2Z_G)I_B + (Z_F + 2Z_G)I_C \\ V_B + V_C &= (Z_F + 2Z_G)[(I_{A0} + a^2I_{A1} + aI_{A2}) + (I_{A0} + aI_{A1} + a^2I_{A2})] \\ V_B + V_C &= Z_F[2I_{A0} - (I_{A1} + I_{A2})] + Z_G[4I_{A0} - 2(I_{A1} + I_{A2})] \end{aligned} \quad (32)$$

Igualando as equações (31) e (32):

$$V_{A0} - Z_F I_{A0} - 3Z_G I_{A0} = V_{A1} - Z_F I_{A2} \quad (33)$$

Seguindo a equação (33) é possível esboçar a representação da rede de sequência, representada pela Figura 33:

Figura 33 – Diagrama de sequência para faltas fase-fase à terra



Fonte: Anderson (1995)

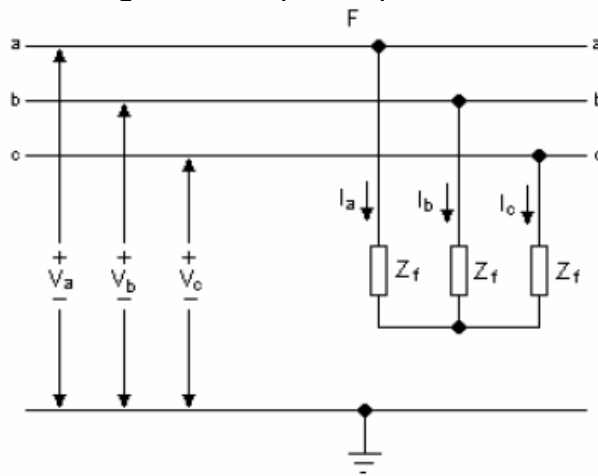
Analisando o diagrama, fica claro que as seqüências zero, positiva e negativa estão todas em paralelo, concluindo-se que a corrente de falta é dada pela equação (34):

$$I_c = \frac{V_F}{Z_1 + Z_F + \frac{(Z_2 + Z_F)(Z_0 + 3Z_N + Z_F + 3Z_G)}{Z_0 + Z_2 + 3Z_N + 3Z_G + 2Z_F}} \quad (34)$$

4.5 CURTO TRIFÁSICO

Neste tipo de falta as três tensões possuem valores zero no ponto de curto e os três condutores apresentam correntes bem elevadas alternadas e simétricas, defasadas de 120 graus. Este é o tipo de falta que geralmente atinge maior valor em um sistema elétrico industrial, sendo a impedância de falta idêntica para as três fases. A Figura 34 representa um diagrama de falta trifásica.

Figura 34 – Diagrama de sequência para faltas trifásicas



Fonte: Anderson (1995)

Analisando o sistema acima, no qual V_A , V_B e V_C representam as tensões nas respectivas fases no ponto de falta logo após a falha e as correntes I_A , I_B e I_C são as correntes de curto-circuito, denotando-se na forma de matriz, tem-se a equação (35):

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_F & 0 & 0 \\ 0 & Z_F & 0 \\ 0 & 0 & Z_F \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (35)$$

Trabalhando o sistema e multiplicando-se ambos os lados pelo termo $[A]$ da equação (11), tem-se a equação (36):

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{A0} \\ V_{A1} \\ V_{A2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_F & 0 & 0 \\ 0 & Z_F & 0 \\ 0 & 0 & Z_F \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{A0} \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{bmatrix} \quad (36)$$

Isolando-se as tensões de simétricas, obtém-se a equação (37):

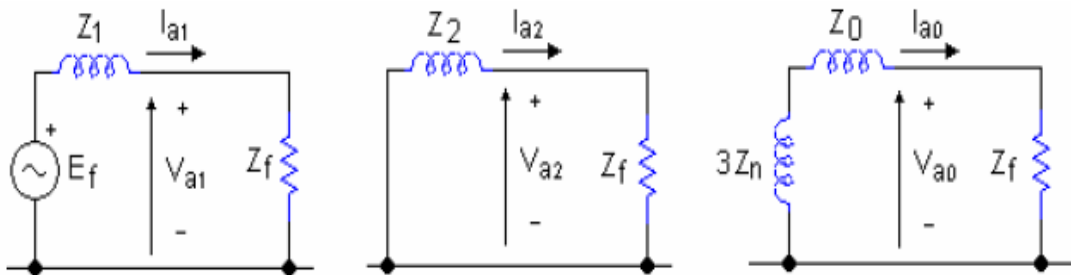
$$\begin{bmatrix} V_{A0} \\ V_{A1} \\ V_{A2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 3Z_F & (1 + a^2 + a)Z_F & (1 + a^2 + a)Z_F \\ (1 + a^2 + a)Z_F & 1 + 2a^3Z_F & (1 + a^2 + a^4)Z_F \\ (1 + a^2 + a)Z_F & (1 + a^2 + a^4)Z_F & 1 + 2a^3Z_F \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{A0} \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{bmatrix} \quad (37)$$

Sabendo que $(1 + a + a^2 = 0)$ e $(a^3 = 1)$, tem-se que:

$$\begin{bmatrix} V_{A0} \\ V_{A1} \\ V_{A2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_F & 0 & 0 \\ 0 & Z_F & 0 \\ 0 & 0 & Z_F \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{A0} \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{bmatrix} \quad (38)$$

Conforme a equação (38) é possível determinar o circuito de sequência para as faltas trifásicas, conforme Figura 35:

Figura 35 – Diagrama de sequência para faltas fase-fase à terra



Fonte: Anderson (1995)

Segundo a análise dos circuitos, em uma falta trifásica equilibrada, não há nenhum componente de sequência negativa ou zero, e pode-se afirmar que a corrente de curto é igual a equação (39):

$$I_{A1} = \frac{V_F}{Z_1 + Z_F} \quad (39)$$

Portanto as correntes de curto-circuito para as três fases são dadas pelas equações (40) a (41):

$$I_A = \frac{V_F}{Z_1 + Z_F} \quad (40)$$

$$I_B = \frac{a^2 V_F}{Z_1 + Z_F} \quad (41)$$

$$I_C = \frac{a V_F}{Z_1 + Z_F} \quad (42)$$

5 ESTUDO DE CASO

Neste trabalho é realizado um estudo de caso referente ao sistema elétrico industrial típico de uma indústria do setor hidráulico de pequeno porte, com foco em produção de mangueiras hidráulicas e conjuntos montados. O sistema é constituído por 1 subestação, sendo que o sistema recebe alimentação da concessionária em 13.800 V, possuindo um sistema de alimentação axial, que contém 2 transformadores e um cubículo reserva para futura ampliação da planta.

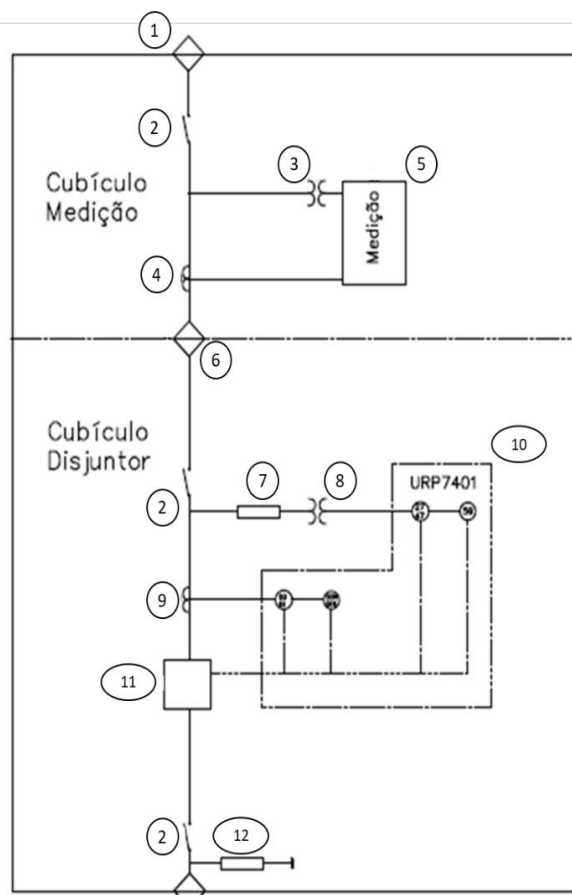
O sistema elétrico é dividido em posto primário e posto secundário, sendo que a cabine primária contém os elementos de medição e de proteção de média tensão. A cabine secundária possui os transformadores que abaixam a tensão em 440 V e 220 V, assim como os respectivos conjuntos de manobra e controle.

O posto primário possui um cubículo de medição e um cubículo disjuntor. No cubículo de medição encontram-se três buchas de passagem, uma chave seccionadora tripolar, um transformador de corrente e um transformador de potencial para medição das grandezas elétricas do sistema. No cubículo disjuntor tem-se também uma chave seccionadora tripolar, um fusível, um transformador de potencial, um transformador de corrente e um disjuntor geral de média tensão, assim como 3 para-raios poliméricos. A Figura 36 ilustra o diagrama unifilar da cabine primária do sistema elétrico, assim como os componentes indicados pela Tabela 2.

O posto secundário é composto por um conjunto de manobra e controle (CMC) de média tensão que tem como função garantir a operação do sistema em segurança, assim como garantir a abertura e fechamento do sistema elétrico perante alguma falha ou procedimento padrão. O modelo do CMC é o Power Xpert UX da Eaton Electronics, que opera com controle de 17,5 kV e 1250 A, sendo que há também um carregador de bateria para a operação do sistema em caso de falha.

O sistema elétrico da planta é dividido em duas partes, seguindo a disposição física da fábrica. Há uma linha de fabricação de mangueiras hidráulicas em um galpão e uma linha de montagem industrial responsável pela fabricação de conjuntos montados ao lado de uma linha de produção de mangueiras para óleo e gás, assim como bundles e blocos manifolds, denominada Synflex. Existem dois transformadores a seco, todos ligados em delta-Y, sendo um deles de 13,8 kV para 440 V, e um de 13,8 kV para 220 V. No posto secundário, já em baixa tensão há 3 painéis disjuntores, sendo um deles em 440/254 V e outros dois em 220/127 V. O diagrama unifilar pode ser observado pela Figura 37 e a lista de materiais pela Tabela 3.

Figura 36 – Diagrama Unifilar do Posto Primário



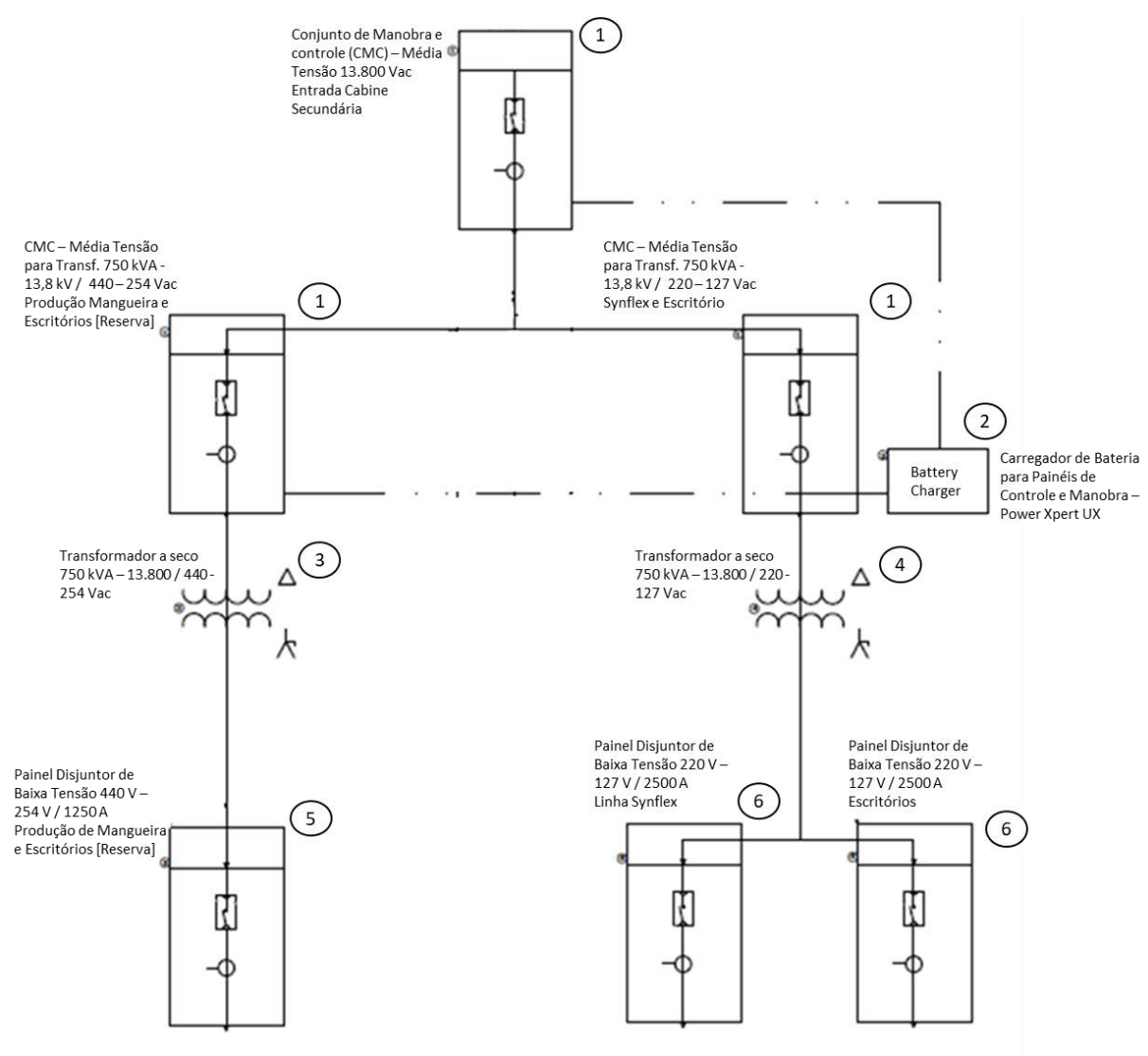
Fonte: Autor (2017)

Tabela 2 – Lista de Material do Posto Primário

Lista de Material - Posto Primário			
Identificação	Quantidade	Unidade	Descrição
1	3	PÇ	Bucha de passagem 15 kV / 400 A
2	1	PÇ	Chave seccionadora tripolar com comando simultâneo 15 kV / 400 A
3	1	PÇ	Transformador de potencial da medição
4	1	PÇ	Transformador de corrente da medição
5	1	PÇ	Caixa de medidores Tipo A1
6	9	PÇ	Isolador pedestal de porcelana 15 kV com prensa fio
7	3	PÇ	Fusível 0,5A / 15 kV para transformador de potencial - proteção
8	2	PÇ	Transformador de potencial proteção 500 VA / 13,8 kV / 220-127 Vac
9	3	PÇ	Transformador de corrente de proteção 200 A/ 5 A
10	1	PÇ	Painel de proteção com relé de proteção secundário URP7401
11	1	PÇ	Disjuntor Geral de média tensão W-VACI Eaton 17 kV / 630A
12	3	PÇ	Para-raio polimérico 15kV / 10kA

Fonte: Autor (2017)

Figura 37 – Diagrama Unifilar do Posto Secundário



Fonte: Autor (2017)

Tabela 3 – Lista de Material do Posto Secundário

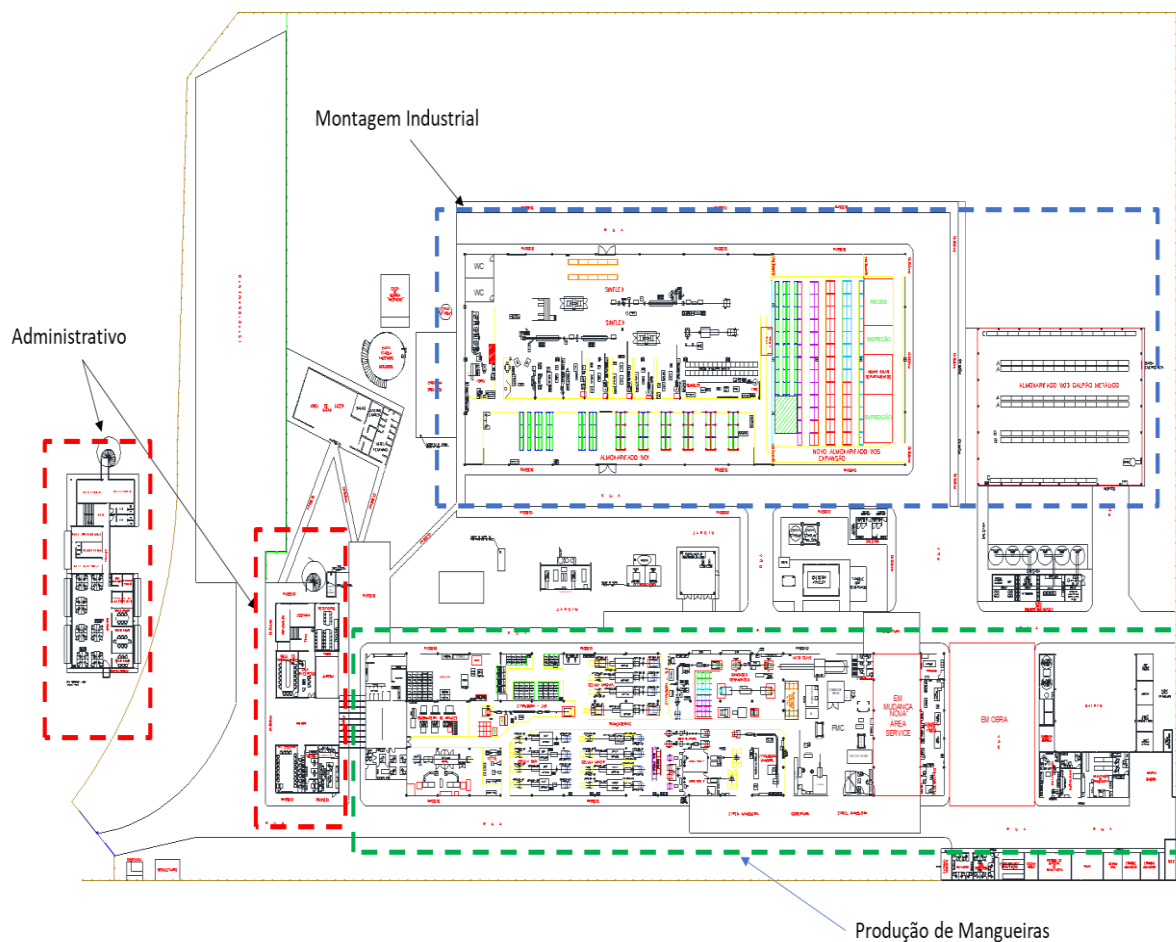
Lista de Material - Posto Secundário			
Identificação	Quantidade	Unidade	Descrição
1	3	PÇ	Conjunto de Manobra e controlé de média tensão Power Xpert UX 17,5 kV 1250 A
2	1	PÇ	Carregador de Bateria Power Xpert UX
3	1	PÇ	Transformador a seco IP00 750 kVA 13800/440-254 Vac
4	1	PÇ	Transformador a seco IP00 750 kVA 13800/220-127 Vac
5	1	PÇ	Painel de Disjuntor de baixa tensão 1250 A
6	2	PÇ	Painel de Disjuntor de baixa tensão 2500 A

Fonte: Autor (2017)

A planta da indústria exemplo é dividida em três áreas, sendo dentre estas, uma área administrativa e duas áreas industriais. A área administrativa contém elementos típico de área comercial como ar condicionados, computadores e carga de iluminação, representada por dois andares, juntamente com as cargas do restaurante.

A área industrial é dividida em duas partes, uma parte responde pela produção de mangueiras, possuindo máquinas típicas como extrusoras de mandril e extrusoras de borracha, trançadeiras de 1 e 2 decks, trançadeiras têxteis e uma trançadeira espiral, possui também máquinas bobinadeiras e uma cabine de teste, que é responsável pelo teste hidrostático e pelo teste AUW (air under water). A outra área industrial é responsável pela montagem de conjuntos e produção de mangueiras de óleo e gás, denominadas Synflex, possuindo dessa maneira máquinas de corte, cabines de teste de pressão e uma extrusora para a produção da mangueira termoplástica. A Figura 38 representa a planta da fábrica exemplo.

Figura 38 – Planta da instalação industrial



Fonte: Autor (2017)

5.1 PARAMETRIZAÇÃO DO RELÉ DE PROTEÇÃO

O primeiro passo para o dimensionamento do sistema de proteção a fim da realização do estudo de coordenação e seletividade é a parametrização do relé de proteção do sistema. Como já mencionado neste, o relé de proteção do sistema é o URPE 7104 da marca Pextron. Pode-se observar o modelo pela Figura 39.

Figura 39 – Relé digital URPE 7104



Fonte: Pextron, 2017

Este relé de proteção de sobrecorrente contempla as funções ANSI 50/51 tanto de fase, quanto de neutro, possui painel frontal com o sinótico das curvas de proteção, 4 displays LED, 23 LEDs de sinalização e 5 teclas de programação. O modelo de relé URPE 7104 também é extraível a quente, curto-circuitando os TCs. Possui porta serial traseira com protocolos de comunicação MODBUS RTU e DNP3 L2.

A parametrização deve ser realizada primeiramente conhecendo os dados de fornecimento, que envolvem demanda contratada, fator de potência da instalação, tensão de entrada e corrente nominal, conforme pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados de Fornecimento

Dados do Fornecimento			
Dados	Abreviação	Valores	Unidade
Demanda contratada	D	1150	kW
T.C	T.C	40	-
Fator de Potência	Fp	0,92	-
Tensão de alimentação	Vn	13,2	kV
Corrente Nominal	In	55	A

Fonte: Autor (2017)

A corrente nominal (I_N) é calculada a partir da demanda máxima, que é igual a demanda contratada, juntamente com o fator de potência de referência de 0,92. Utiliza-se a equação (42).

$$I_N = \frac{D}{1,73 \cdot V_N \cdot F_P} \quad (42)$$

Aplicando a equação 42, tem-se que a corrente nominal é 55 A, conforme a Tabela 4. A corrente de partida do relé (I_P) será “k” vezes maior que a corrente nominal (I_N), considerando que pode haver ultrapassagem de 10% da demanda contratada, de modo que “fq” representa o fator de sobrecarga, variando de 1,3 a 1,5, sendo determinado para o projeto 1,3.

$$I_P = fq \cdot I_N \quad (43)$$

Após determinar a corrente nominal de entrada, é necessário calcular a corrente de magnetização dos transformadores. A corrente de magnetização (I_{RUSH}) para transformadores de até 2000 kVA pode ser considerada igual a 8 vezes a corrente nominal com duração da ordem de 0,1s e para transformadores de potência superiores a 2000 kVA o valor da corrente de magnetização e o tempo de duração devem ser informados pelo fabricante do transformador. A determinação deste valor de forma correta é imprescindível pois a proteção não deve atuar na energização do posto. Em casos de sistemas com mais de um transformador, deve-se considerar a corrente de magnetização do maior transformador somada as correntes nominais dos demais. É possível observar as características dos transformadores na Tabela 5, contendo os valores dos 2 trafos, lembrando que o Trafo T₃ não está sendo utilizado no sistema, sendo um cubículo reserva para transformador.

Tabela 5 – Características dos Transformadores

Características dos Transformadores								
Trafo	Potência	Unidade	In	Unidade	Irush	Unidade	Z%	ANSI
T1	750 kVA		31,88 A		255,02 A		5,07	637,54
T2	500 kVA		12,51 A		100,09 A		4,45	312,79
T3	0 kVA		0 A		0 A		0	0
Total	1250 kVA		44,39 A		267,53 A		-	637,54

Fonte: Autor (2017)

Nota-se acima as potências dos transformadores que são abaixo de 2000 kVA, desse modo deve calcular I_{RUSH} como 8 vezes a corrente nominal, sendo que a corrente de magnetização total do sistema é a corrente de magnetização do maior transformador somado a corrente nominal dos outros transformadores. Também se nota os valores dos pontos ANSI dos transformadores, assim como a impedância percentual de cada.

O ponto ANSI trata-se do máximo valor de corrente que um transformador pode aguentar sem se danificar por um período definido de tempo. Para falhas fase-terra em transformadores triângulo-estrela com neutro aterrado, deve-se considerar 0,58 vezes o ponto ANSI. Mais especificamente e falando em termos práticos, a curva de relé deve ficar abaixo do ponto ANSI do transformador de menor potência, observa-se na Tabela 6 a metodologia adotada para determinar o Ponto ANSI, afim de adotá-lo no diagrama de coordenação e seletividade.

Tabela 6 – Determinação do Ponto ANSI

Z% [Ohms]	Ponto ANSI [A]	Tempo Máx. de Duração [s]
4	25 x In	2
5	20 x In	3
6	16,6 x In	4
7	14,7 x In	5

Fonte: Autor (2017)

No ponto de derivação do ramal de ligação deve-se atentar para as correntes de curto-circuito, no qual a fornecedora de energia deve informar os dados de curto-circuito ao engenheiro para que os transformadores de corrente e potencial possam ser dimensionados, de forma geral recomenda-se que os TC tenham uma corrente primária tal que o maior valor de corrente de curto-circuito não exceda em 50 vezes e que o TP seja protegido por fusível. A Tabela 7 traz resumidamente os dados do transformador, incluindo valores de potência, corrente

de magnetização de fase e de neutro, o ponto ANSI de fase e de neutro definido e a corrente nominal dos transformadores.

Tabela 7 – Dados do transformador

Dados do transformador		
Dados	Valores	Unidades
Potência	1250	kVA
Im	267	A
Im-neutro	89	A
Ponto Ansi Fase	637	A
Ponto Ansi Neutro	212	A
In-trafos	54	A

Fonte: Autor (2017)

Após o cálculo das informações do sistema é necessário de fato parametrizar o relé microprocessado. Como já mencionado neste, os relés disponíveis no mercado possuem várias funções incorporadas, para o desenvolvimento deste projeto são consideradas somente duas funções, que por sua vez são funções mandatórias exigidas pela concessionária.

- Função 50: proteção de sobrecorrente instantânea.
- Função 51: proteção de sobrecorrente temporizada.

Ambas as funções estão disponíveis para fase e neutro (terra), portanto neste projeto o relé é configurado com as funções 50/51 e 50N/51N. O ajuste da função temporizada 51 se deve quanto ao tipo de curva, neste é escolhida a curva muito inversa (MI). O ajuste quanto a partida (pick-up) é definido conforme I_p , definido pela equação 43, o que significa que o relé começará a se sensibilizar para valores de correntes superiores a I_p , caso o valor de corrente seja acima de I_p , o relé irá iniciar a contagem de tempo de acordo com sua curva característica e atuará se o tempo for superior ao desta curva no ponto de operação.

O ajuste da função instantânea 50 deve ser realizado com o intuito de escolher o menor valor possível que não fará com que o relé atue de forma indevida na energização dos transformadores, portanto o valor para ajuste deve ser maior que I_m . Em termos de seletividade deve-se verificar que o ajuste não seja superior ao menor valor de curto-circuito e ao ponto ANSI do menor transformador. Os dados da parametrização do relé podem ser observados na Tabela 8.

Tabela 8 – Dados de parametrização do relé URPE 7140

Corrente de partida de fase (Ip)	
Ip	71 A
Imag	432 A
Corrente de partida de Neutro (Ipn)	
Ipn	23 A
Imag na partida	144 A
Parâmetros do Relé	
Função 50-Sobrec. Inst. Fase	373 A
Função 51-Sobrec. Temp. Fase	71 A
Função 50N-Sobrec. Inst. Neutro	123 A
Função 51N-Sobrec. Temp. Neutro	23 A

Fonte: Autor (2017)

Na Tabela 8 observa-se alguns valores já determinados previamente, como corrente de partida de fase (Ip) e corrente de partida de neutro (Ipn), mas que são necessários para definir os parâmetros do relé. Os dados de parametrização foram obtidos através da Tabela 11, que é a tabela de parametrização do relé, sendo o fator “fq” igual a 1,3 na equação (43). O tempo de disparo do relé é obtido através da equação (44).

$$t_{(s)} = \frac{k \cdot dT}{M^{\alpha} - 1} \quad (44)$$

Os valores de k e α são provenientes da norma IEC, que divide as curvas padronizadas em três tipos, normalmente inversa (NI), muito inversa (MI) e extremamente inversa (EI). A Tabela 9 apresenta os valores das variáveis K e Alfa da equação 44. A variável M representa a relação de corrente de partida e seus múltiplos.

Tabela 9 – Curvas padronizadas

Curvas Padronizadas	k	alfa	Número
Normalmente Inversa (NI)	0,14	0,02	1
Muito Inversa (MI)	13,5	1	2
Extremamente Inversa (EI)	80	2	3
Curva a ser utilizada			2

Fonte: Autor (2017)

Para este projeto foi-se utilizada a curva muito inversa (MI) devido aos testes realizados e a observação da curva se encontrar dentre os limites máximo e mínimo indicados pelo fabricante.

Para a determinação do tempo de disparo só é necessária a determinação do dial de tempo (dT), o relé utilizado possui duas formas de inserção dos parâmetros das curvas, a primeira é denominada $10 \cdot I_s$ e a segunda é a TMS, o que faz com que o relé se torne totalmente adaptável. A equação 45 demonstra que o valor de T está sendo dividido por um coeficiente, o resultado dessa operação é o “dial de tempo”. A equação 45 é equivalente a equação 44.

$$t_{(s)} = \frac{k}{\left(\frac{I}{I_p}\right)^\alpha - 1} \times \frac{T}{\beta} \quad (45)$$

A Tabela 10 apresenta os valores de dial de tempo utilizados na parametrização. O relé possui uma ampla faixa de ajuste de dial de tempo possibilitando um melhor ajuste da proteção, deixando o sistema de proteção mais eficiente.

Tabela 10 – Curvas padronizadas

Dial de tempo		Valores Teste		
Fase	0,3	0,273	0,327	0,279
Neutro	0,1	0,091	0,109	0,103

Fonte: Autor (2017)

A Tabela 11 contém os valores de corrente múltiplos de I_p de fase e de neutro, e para cada valor foi realizado a medição dos tempos de disparo de fase e de neutro, tais tempos medidos foram comparados com os valores calculados através da equação 44 e comparados com os valores máximos e mínimos fornecidos pelo fabricante, que atua conforme as normas IEC.

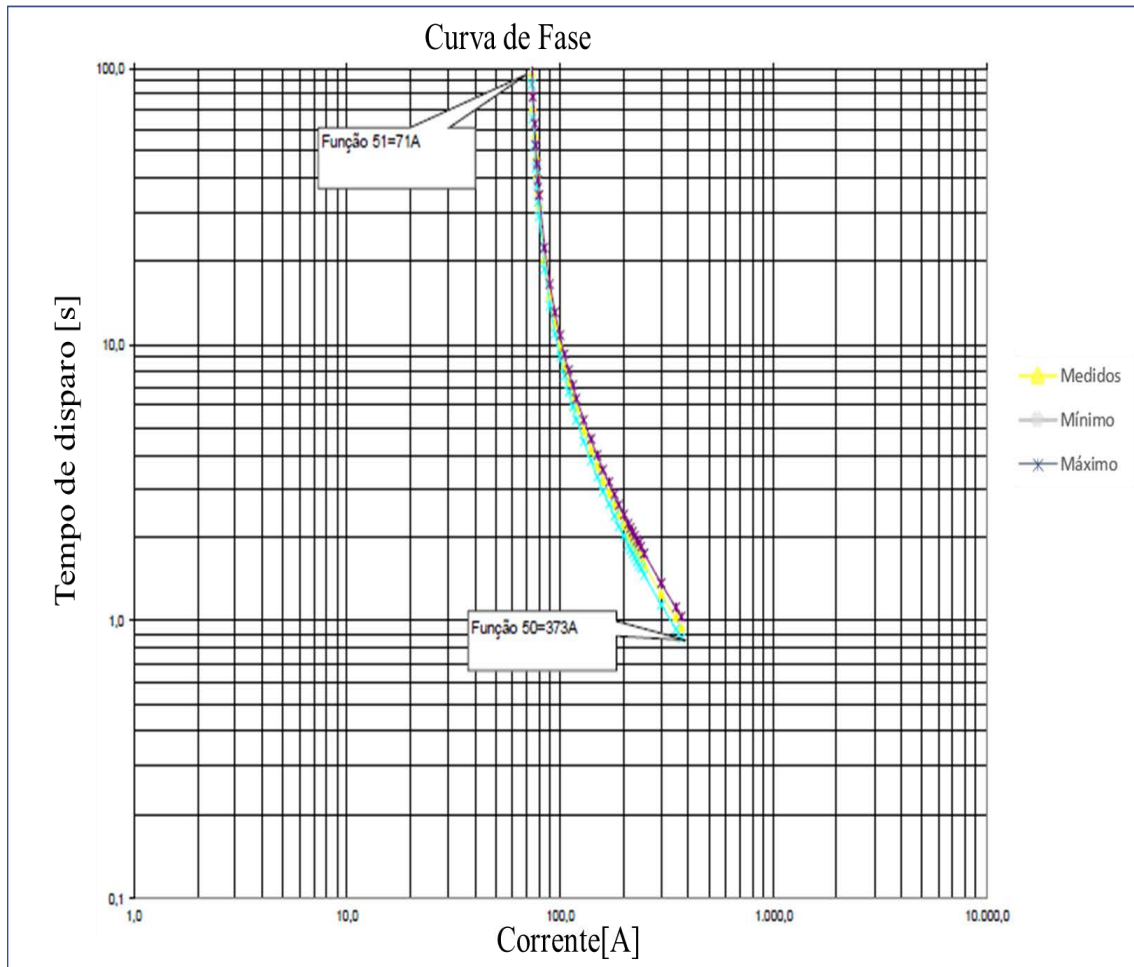
Tabela 11 – Tempos de disparo

Resultados Testes				Tempos de disparo [s]							
				Medidos		Calculados		Mínimo		Máximo	
Fase	Un	Neutro	Un	Fase	Neutro	Fase	Neutro	Fase	Neutro	Fase	Neutro
72 A		24 A		267,420	31,980	287,550	31,050	261,670	28,260	313,430	33,840
73 A		25 A		143,780	15,990	143,780	15,530	130,840	14,130	156,710	16,920
74 A		26 A		95,850	10,660	95,850	10,350	87,220	9,420	104,480	11,280
75 A		27 A		71,890	8,000	71,890	7,760	65,420	7,060	78,360	8,460
76 A		28 A		57,510	6,400	57,510	6,210	52,330	5,650	62,690	6,770
77 A		29 A		47,920	5,330	47,920	5,180	43,610	4,710	52,240	5,640
78 A		30 A		41,080	4,570	41,080	4,440	37,380	4,040	44,780	4,830
79 A		31 A		35,940	4,000	35,940	3,880	32,710	3,530	39,180	4,230
80 A		32 A		31,950	3,550	31,950	3,450	29,070	3,140	34,830	3,760
85 A		33 A		20,540	3,200	20,540	3,110	18,690	2,830	22,390	3,380
90 A		34 A		15,130	2,910	15,130	2,820	13,770	2,570	16,500	3,080
95 A		35 A		11,980	2,670	11,980	2,590	10,900	2,350	13,060	2,820
100 A		36 A		9,920	2,460	9,920	2,390	9,020	2,170	10,810	2,600
105 A		37 A		8,460	2,280	8,460	2,220	7,700	2,020	9,220	2,420
110 A		38 A		7,370	2,130	7,370	2,070	6,710	1,880	8,040	2,260
115 A		39 A		6,540	2,000	6,540	1,940	5,950	1,770	7,120	2,120
120 A		40 A		5,870	1,880	5,870	1,830	5,340	1,660	6,400	1,990
130 A		41 A		4,870	1,780	4,870	1,730	4,440	1,570	5,310	1,880
140 A		42 A		4,170	1,680	4,170	1,630	3,790	1,490	4,540	1,780
150 A		43 A		3,640	1,600	3,640	1,550	3,310	1,410	3,970	1,690
160 A		44 A		3,230	1,520	3,230	1,480	2,940	1,350	3,520	1,610
170 A		45 A		2,900	1,450	2,900	1,410	2,640	1,280	3,170	1,540
180 A		46 A		2,640	1,390	2,640	1,350	2,400	1,230	2,880	1,470
190 A		47 A		2,420	1,330	2,420	1,290	2,200	1,180	2,630	1,410
200 A		48 A		2,230	1,280	2,230	1,240	2,030	1,130	2,430	1,350
210 A		50 A		2,070	1,180	2,070	1,150	1,880	1,050	2,250	1,250
215 A		55 A		2,000	1,000	2,000	0,970	1,820	0,880	2,180	1,060
220 A		60 A		1,930	0,860	1,930	0,840	1,760	0,760	2,100	0,910
225 A		65 A		1,870	0,760	1,870	0,740	1,700	0,670	2,040	0,810
230 A		70 A		1,810	0,680	1,810	0,660	1,650	0,600	1,970	0,720
235 A		75 A		1,750	0,620	1,750	0,600	1,600	0,540	1,910	0,650
240 A		80 A		1,700	0,560	1,700	0,540	1,550	0,500	1,850	0,590
250 A		85 A		1,610	0,520	1,610	0,500	1,460	0,460	1,750	0,550
300 A		90 A		1,260	0,480	1,260	0,460	1,140	0,420	1,370	0,510
350 A		100 A		1,030	0,420	1,030	0,400	0,940	0,370	1,120	0,440
373 A		123 A		0,950	0,320	0,950	0,310	0,870	0,280	1,040	0,340

Fonte: Autor (2017)

A partir dos dados da Tabela 11 é possível plotar as curvas de fase e de neutro do relé e observar os valores de corrente referentes as funções 51 e 50.

Figura 40 – Curva de fase do relé de proteção

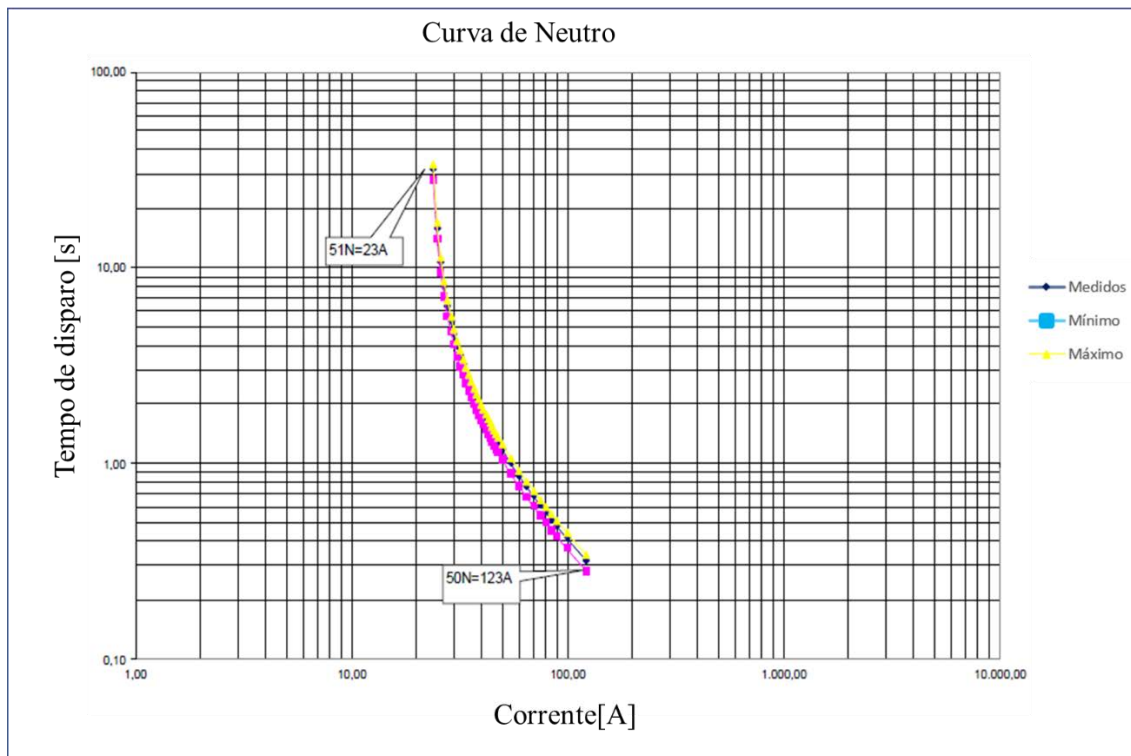


Fonte: Autor (2017)

No gráfico representado pela Figura 40 é possível observar o ponto de disparo do relé temporizado, relativo a função 51, de fase. Que representa 71 A, após esse valor de corrente ele irá limpar a falta em um tempo pré-definido, de 0,5080s. A função 50 é definida com o 373 A de fase, sendo que a partir desse valor de corrente o sistema deve abrir instantaneamente.

É possível observar que todos os valores medidos ficaram próximos do calculado e respeitando os limites superiores e inferiores, referentes aos valores máximos e mínimos de tempo de disparo.

Figura 41 – Curva de neutro do relé de proteção



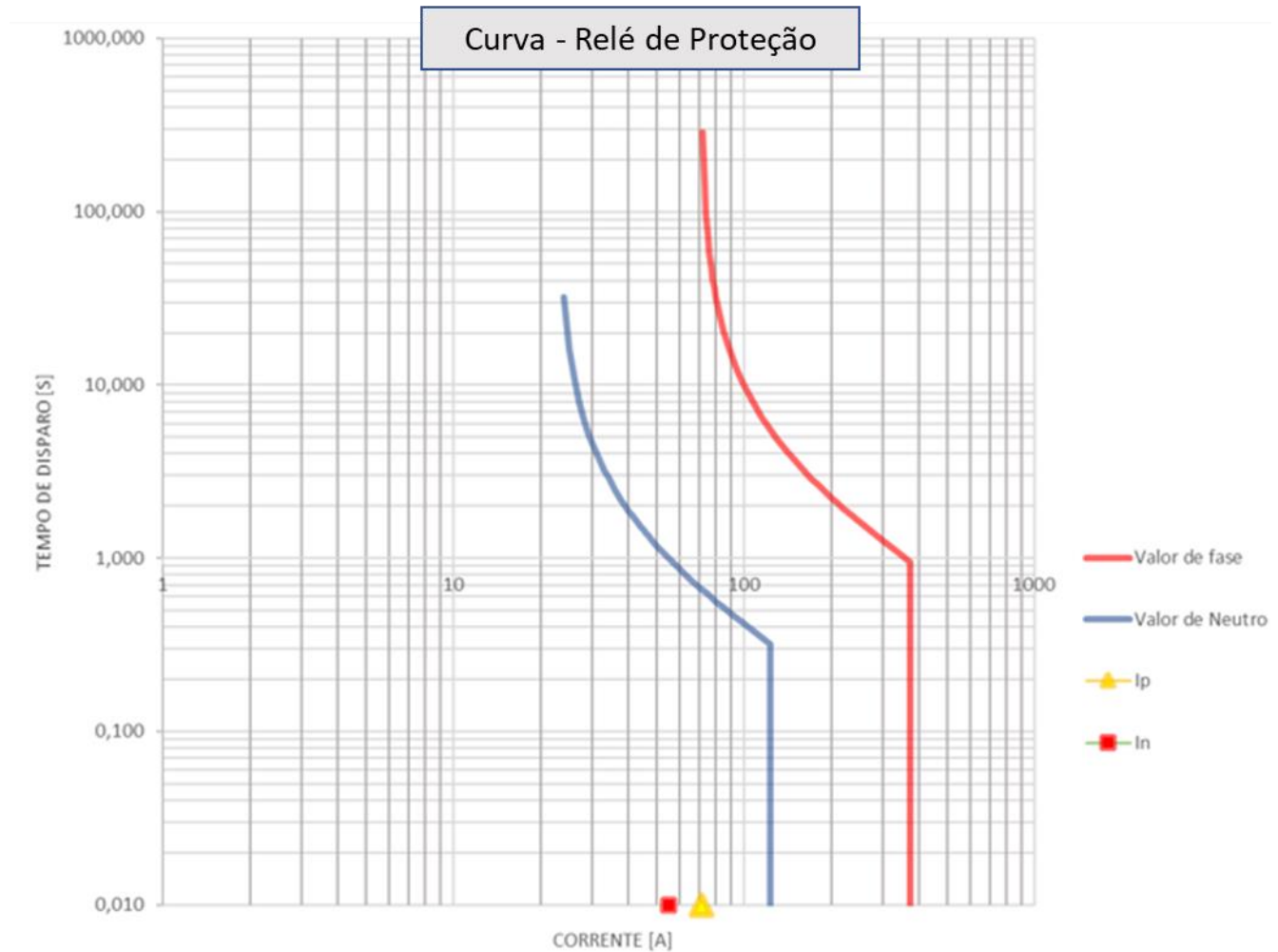
Fonte: Autor (2017)

Semelhante ao gráfico da Figura 40, a Figura 41 representa os valores da curva da corrente de neutro, que se analisados correspondem a terça parte dos valores de fase, sendo a função temporizada 51N, disparando a partir de 23 A e a função instantânea 50N disparando a partir de 123A.

Assim como na curva de fase, os valores medidos ficaram próximos do calculado e respeitando os limites superiores e inferiores, referentes aos valores máximos e mínimos de tempo de disparo.

Na Figura 42 é possível observar as duas curvas do relé de proteção plotadas, bem como os valores de corrente de partida e corrente nominal do sistema, sendo de fácil visualização e compreensão que após os valores de sobrecorrente instantânea o relé dispara.

Figura 42 – Curva do relé de proteção



Fonte: Autor (2017)

Também é necessário a instalação de uma fonte de alimentação auxiliar para alimentação do relé, pois após a ocorrência de um curto-circuito, o nível de tensão tende a zero, portanto deve existir um sistema que alimentado a partir do transformador de potência ou a partir do TP irá fazer com que a alimentação no relé seja mantida até o tempo de abertura do disjuntor.

De forma resumida tem-se a ficha representada pela Figura 43.

Figura 43 – Características da Proteção

CARACTERÍSTICAS DA PROTEÇÃO								
Relé microprocessado digital, com as funções 50/50N e 51/51N, com fonte capacitiva incorporada, e corrente nominal de 5A, tipo URP 7104T, marca Pextron								
DIMENSIONAMENTO DOS TRANSFORMADORES								
Demanda prevista de:		1150 kW						
Conforme Tabela 04 NT 01 resulta em TC's com: 40				Fator térmico: 1,2				
Os transformadores de corrente deverão ainda ser capazes de suportar uma corrente de 4kA								
	Dt Fase adotado:		0,3 s					
	Dt Neutro adotado:		0,1 s					
CÁLCULO DAS CORRENTES DE AJUSTE DO RELÉ								
Tensão Primária:		13,2 kV						
Demanda:		1150 kW						
Fator de Potência:		0,92 %						
Corrente Nominal:		55 A						
CÁLCULO DAS CORRENTES DE PROTEÇÃO TEMPORIZADA								
Corrente de Partida:		71 A		Ajuste da função ANSI 51				
Corrente de Neutro:		23 A		Ajuste da função ANSI 51N				
CÁLCULO DA SOBRECORRENTE INSTANTÂNEA								
Dados:								
Trafos	Pot	Unidade	Im	Unidade	Im	Unidade	Z%	ANSI
T1	750	kVA	31,88	A	255,02	A	5,07	637,54
T2	500	kVA	12,51	A	100,09	A	4,45	312,79
Im fase:				267 A				
Im neutro:				89 A				
ANSI fase:				637 A				
ANSI neutro:				212 A				
In proteção Instantânea fase:				373 A		Ajuste da função ANSI 50		
In proteção Instantânea neutro:				123 A		Ajuste da função ANSI 50N		
O cálculo da curva no ponto ANSI do menor transformador deverá resultar de um tempo de abertura:								
Para o ajuste resulta em:								
K =	13,5							
Alfa =	1							
t =	0,50804 s		FASE					
t =	0,16429 s		NEUTRO					

Fonte: Autor (2017)

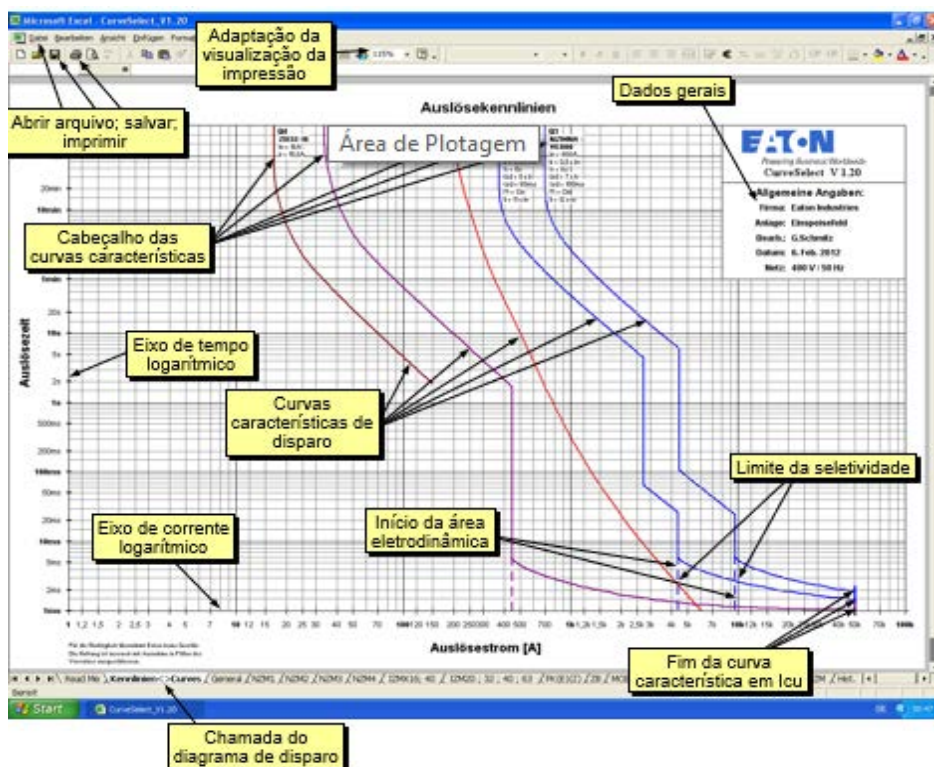
5.2 SOFTWARE CURVESELECT

O software CurveSelect foi desenvolvido pela empresa Eaton Ltda baseado no aplicativo Excel da Microsoft, com o intuito de fornecer a representação gráfica completamente escalonada das curvas de disparo dos disjuntores de caixa moldada (NZM), caixa aberta (IZM), dos disjuntores de proteção para motor (PKZ) e dos relés térmicos (ZB), bem como dos fusíveis de baixa tensão em valores absolutos.

A ferramenta tem como objetivo representar graficamente as curvas de disparo conforme os ajustes pré-selecionados dentro das múltiplas possibilidades de ajuste de um disjuntor selecionado, a fim de possibilitar da maneira mais fácil o controle visual para a seletividade na sobrecarga e na faixa de sobrecorrente com retardo de curta duração, em particular de fusíveis, bem como para documentar o controle de forma simples.

A Figura 44 representa a interface que o programa possui de forma autoexplicativa, possuindo o cabeçalho das curvas características, os eixos logarítmicos de tempo e de corrente, as curvas plotadas, indicação do início da área eletrodinâmica, limite de seletividade, entre outros dados relevantes para o projeto.

Figura 44 – Interface do software CurveSelect



Fonte: Autor (2017)

A representação gráfica pode ser acessada a qualquer momento pela guia “Kennlinien<>Curves” na aba das janelas de trabalho. São exibidas todas as curvas de disparo ativadas, cuja entrada se processou sem mensagem de erro. É exibido o valor médio da curva característica de disparo parametrizada e não são representadas as tolerâncias do valor de resposta e dos tempos de disparo.

Na área do disparador de sobrecorrente sem retardo é indicado o tempo mínimo de comando, isto é, o tempo do fluxo de corrente em que o disparo se torna irreversível, o que corresponde ao tempo de fusão dos fusíveis.

O software não considera o tempo total de desligamento dependente da corrente, tensão e posição da fase, compreendendo o retardo na resposta, na comutação e tempo de extinção de arco, visto que não é considerado na curva representada devido ao fato das propriedades de limitação da corrente dos disjuntores não poderem ser consideradas nessa forma de representação pelos efeitos eletrodinâmicos sobre o dispositivo de contato e extinção na faixa de correntes de forte intensidade. A faixa desse limite eletrodinâmico é representada no diagrama pelo valor de resposta do disparador de sobrecarga sem retardo, usando uma linha vertical tracejada.

Para a visualização da curva característica de disparo, após a entrada dos dados gerais, são necessárias a seleção e a parametrização do disjuntor. A seleção do tipo do dispositivo é feita através da seleção na guia do tipo do dispositivo em questão, nas abas de trabalho. Assim que a aba é selecionada, aparece uma interface de entrada para o respectivo tipo de disjuntor ou fusível, a interface de entrada também possibilita a entrada de dois ou três dispositivos desse tipo.

A Figura 45 representa a interface de entrada de parâmetros dos dispositivos, sendo que a entrada é feita de cima para baixo conforme a designação do dispositivo na instalação. A parametrização é constituída de uma possibilidade de entrada de caracteres alfanuméricos indicadas pelo software e somente com a entrada da parametrização é ativada a curva característica.

Figura 45 – Entrada de dados do software CurveSelect

The screenshot shows the 'CurveSelect' software interface with three input fields for circuit breakers. The interface is titled 'Eingabefelder NZM3'. Each field has a 'Wert' (Value) field, a 'Einheit' (Unit) field, and a 'Einzelwert' (Individual Value) field. Below these are sections for 'Eingabefelder' (Input Fields), 'Auswahl' (Selection), 'Faktor' (Factor), and 'Warnung' (Warning). The 'Warnung' section contains a 'Chamada das máscaras de entrada' (Input mask call) and a 'História das versões' (Version history) button. The 'Warnung' section also contains a 'Fehler' (Error) field.

Fonte: Autor (2017)

Após a designação do dispositivo, é efetuada a seleção do modelo do dispositivo básico, do tipo do disparador, bem como a corrente nominal. As respectivas opções para a seleção são exibidas à direita do campo de entrada correspondente. Após a seleção do tipo do dispositivo é efetuada a parametrização final através da entrada dos desejados valores de ajuste nos campos de entrada correspondentes, sendo que os possíveis valores de parâmetros são exibidos novamente a direita do respectivo campo de entrada. Sob os campos de entrada encontra-se um campo para a sinalização de dados com falhas, de modo que aparece uma indicação a respeito de entradas que ainda faltam ou que são incorretas. Somente quando nesse campo não aparece mais uma sinalização de falha é exibida a curva característica do disjuncto em questão no diagrama das curvas características.

A última ressalva é em relação a observação da seletividade no programa. Assim que a guia “Kennlinien<>Curves” for selecionada na pasta de trabalho das folhas, aparecerá o diagrama de disparo com as curvas características de todos os disjuntores e fusíveis ativados e descritos sem falhas. Após as curvas serem plotadas, a verificação da seletividade dos disjuntores e fusíveis entre si pode ser efetuada com a ajuda das curvas características de disparo. A seletividade entre dois dispositivos de manobra/fusíveis é então assegurada, desde que as curvas características não se cortem ou se toquem. O limite de seletividade entre esses dispositivos de manobra é atingido num ponto de intersecção ou de contato. De maneira geral, o limite de seletividade é atingido com o contato da curva do disparador de um interruptor/fusível subordinado a essa linha, contudo, um limite de seletividade mais elevado é possível através das propriedades parcialmente limitadores de correntes dos disjuntores, mas que, como já mencionado, não podem ser consideradas nessa forma de representação.

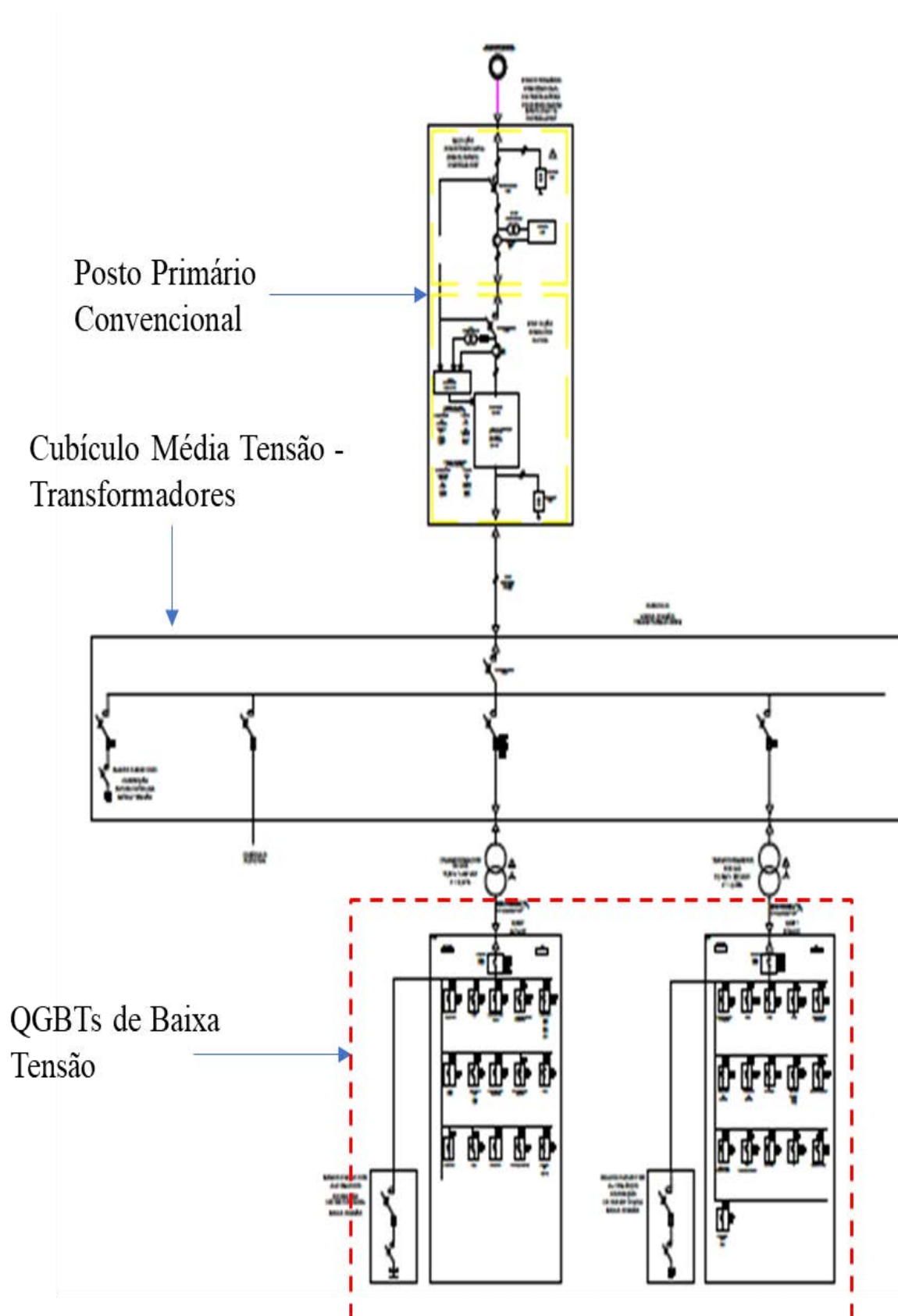
5.3 ESTUDO DE SELETIVIDADE E COORDENAÇÃO

Foi realizado o estudo de seletividade e coordenação de baixa tensão dos dois QGBTs presentes na indústria, sendo um QGBT de 220 V e outro de 440 V. O QGBT de 440 V compreende o galpão de produção de mangueiras e o QGBT de 220 V corresponde aos escritórios e ao galpão de montagem industrial.

A Figura 46 representa o diagrama unifilar do sistema elétrico com os disjuntores e as chaves fusíveis de baixa tensão. Nela é possível observar de forma macro o posto primário convencional, o cubículo de média tensão, os transformadores e os quadros de baixa tensão.

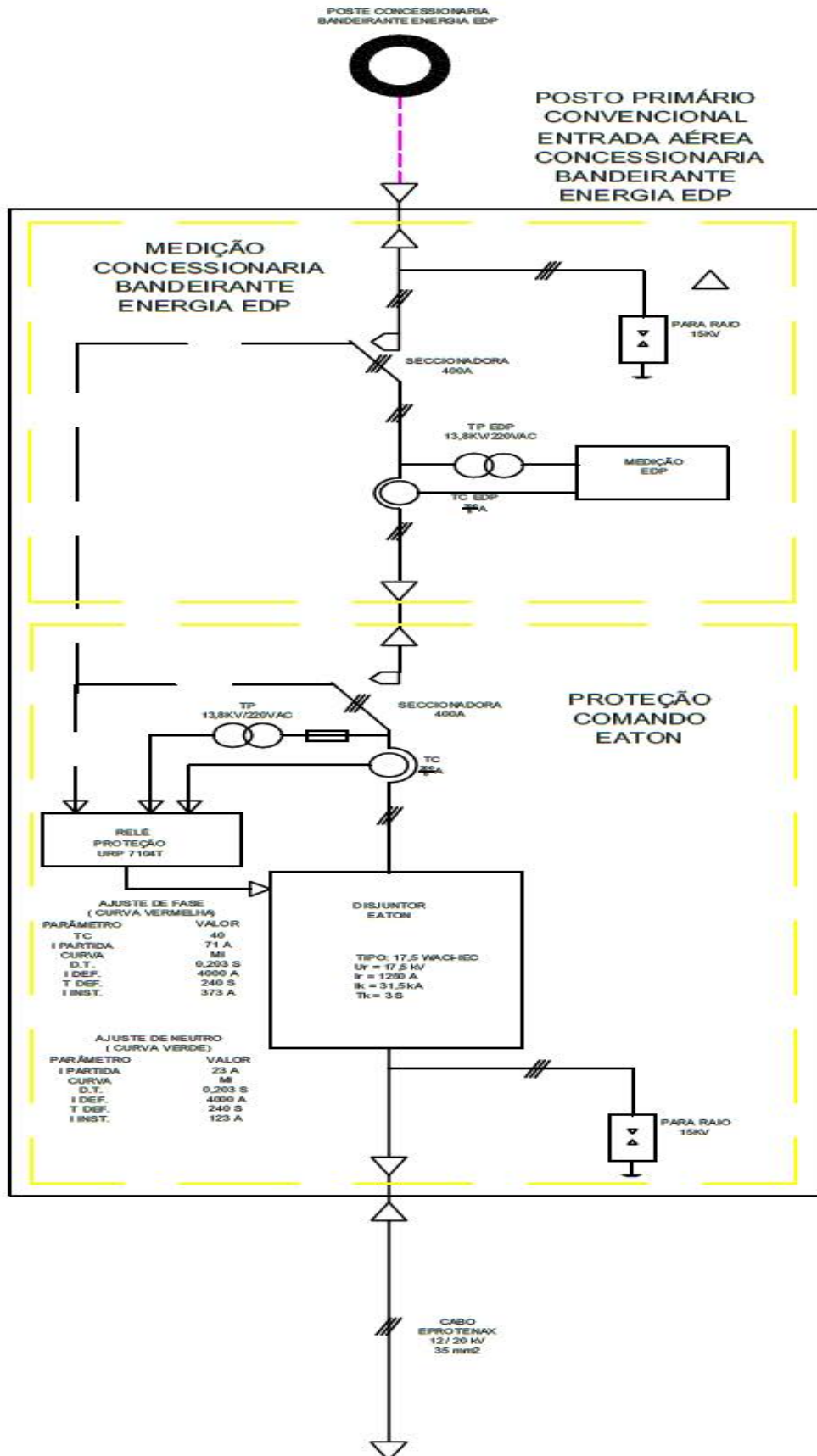
A Figura 47 mostra especificamente o posto primário convencional, com a área de medição da concessionária, a qual é por via aérea, para proteção da linha há uma seccionadora de 400 A e para descargas atmosféricas há um para-raio de 15 kV. A medição da EDP é por meio de TCs e TPs, sendo a relação de transformação do TC 40 (200/5). Há também na Figura 47 a área destinada proteção e comando envolvendo o relé de proteção e o disjuntor de média tensão.

Figura 46 – Diagrama unifilar do sistema elétrico



Fonte: Autor (2017)

Figura 47 – Posto Primário Convencional



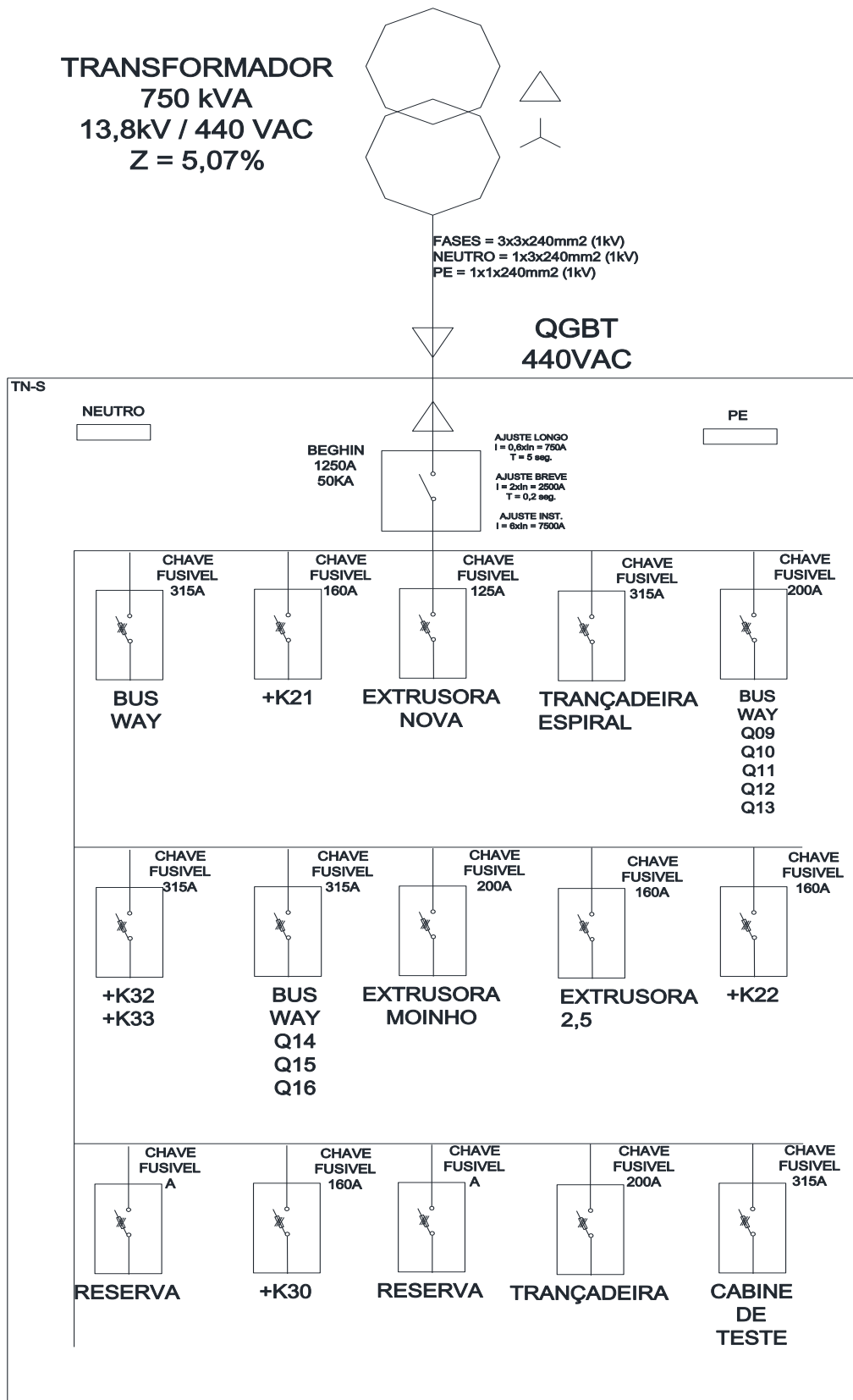
Fonte: Autor (2017)

Na Figura 48 é representado o QGBT de 440 V, este é destinado para a linha de produção de mangueiras, bem como alimentação dos circuitos destinados a escritório. Neste há um disjuntor geral da Siemens, da família 3WT, com código 3WT81217AA000AA2, que possui corrente nominal de 1250 A e corrente máxima de interrupção de 55 kA. Há também 4 tipos de chave fusível, da família 3NA, nos modelos 3132, 3136, 3140 e 3252, todas da marca Siemens, sendo ao todo 15 chaves fusíveis.

A chave fusível referente a proteção do Bus, possui tensão de 500 V, tamanho 2 e categoria gG, possuindo corrente nominal 315A e corrente simétrica de curto de 7kA. A chave fusível referente ao circuito +K21 possui tensão 500 V, tamanho 1 e também categoria gG, com corrente nominal 160 A e corrente simétrica de curto de 3kA. A chave fusível referente a extrusora de mandril é de tamanho 1 e categoria gG, com corrente nominal de 125 A e corrente simétrica de curto de 2,37 kA. A chave fusível da trançadeira espiral possui tamanho 2 e categoria gG, com corrente nominal 315 A e corrente simétrica de curto 7 kA. O bus way de do quadro 09 ao quadro 13 possui uma chave fusível com tensão de 500 V, tamanho 2 e categoria gG, com corrente nominal de 200 A e corrente simétrica de curto de 3,8 kA. A chave fusível referente ao +K32 e +K33 possui tamanho 2 e categoria gG, com corrente nominal de 315 A e corrente simétrica de curto é 7kA. A chave fusível referente ao bus way Q14, Q15 e Q16 possui as mesmas características da chave fusível mencionada anteriormente, designada aos +K32 e +K33. A extrusora moinho tem uma chave fusível de tamanho 2 e categoria gG, com corrente nominal de 200 A e corrente de curto simétrica de 3,8 kA. A chave fusível que representa a extrusora 2,5 possui tamanho 1 com categoria gG, corrente nominal de 160 A e corrente de curto circuito simétrico de 3 kA. A chave fusível que representa o +K22 tem tamanho 1 e categoria gG, possuindo corrente nominal de 160 A e corrente de curto circuito de 3 kA. A chave fusível que representa +K30 é também do tamanho 1, categoria gG e corrente nominal de 160 A, e corrente de curto circuito simétrico de 3kA. Para as trançadeiras da planta há uma chave fusível de tamanho 2, categoria gG, corrente nominal 200 A e corrente simétrica de curto de 12 kA. Por fim, a última chave fusível do quadro geral de distribuição de 440 V possui tamanho 2, categoria gG, corrente nominal de 315 A e corrente simétrica de curto de 7 kA, representando a cabine de teste.

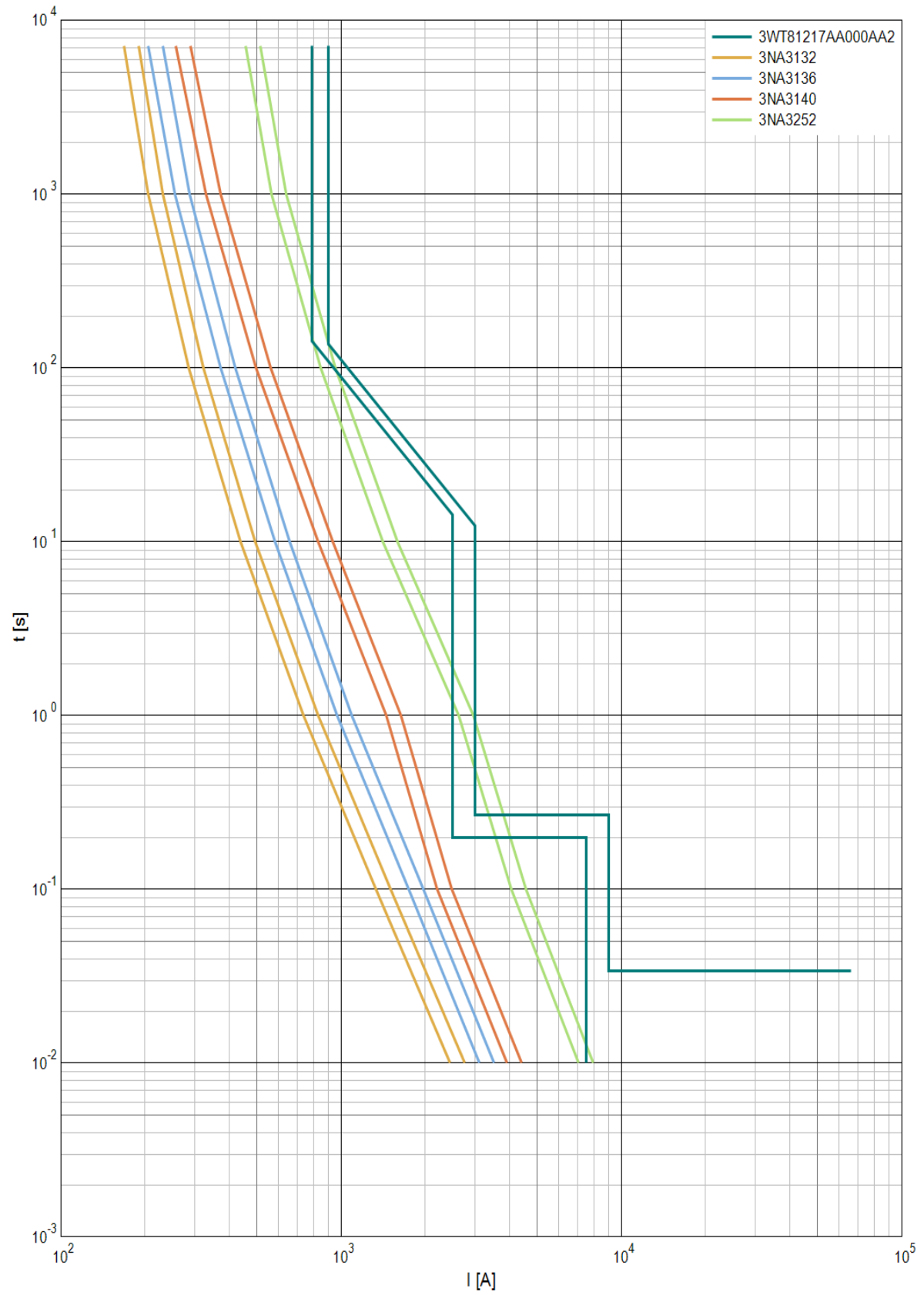
A Figura 49 representa o estudo de seletividade entre os elementos.

Figura 48 – Diagrama unifilar do QGBT de 440 V



Fonte: Autor (2017)

Figura 49 – Curvas características QGBT 440V



Fonte: Autor (2017)

Nota-se que o sistema está coordenado e seletivo, no qual, qualquer falha presente em uma chave fusível irá desenergizar somente o ramo no qual a falha está presente, de modo que o disjuntor não irá desarmar. A Tabela 12 demonstra os valores de corrente representados pela Figura 48.

Analisando a Tabela 12 têm-se os valores de corrente I_n , I_r , I_{sd} e I_i . A corrente I_r , representa o ajuste longo, que trata-se da corrente ajustável de disparo por sobrecarga, que é definida pela equação (45), também representado pela letra L. A corrente I_{sd} trata-se da corrente de ajuste breve, definida pela equação (46), representa o valor de ajuste da temporização do disparador de curto-circuito, representado pela letra S. Por fim, a corrente I_i , definida como ajuste instantâneo, representa o valor de ajuste do disparador instantâneo de curto-circuito, definido pela letra I e representado pela equação (47).

Tabela 12 – Dados de seletividade QGBT 440 V

Baixa Tensão - QGBT 440V									
Designação	L			S				I	
	I_n [A]	I_r [A]	t_r [s]	I_{sd} [A]	t_{sd} [s]	Char.	Ligado	I_i [A]	Ligado
3WT81217AA000AA2	1250	750	5,5	2500	0,2	Std	sim	7500	Sim
3NA3132	125	-	-	-	-	-	-	-	-
3NA3136	160	-	-	-	-	-	-	-	-
3NA3140	200	-	-	-	-	-	-	-	-
3NA3152	315	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autor (2017)

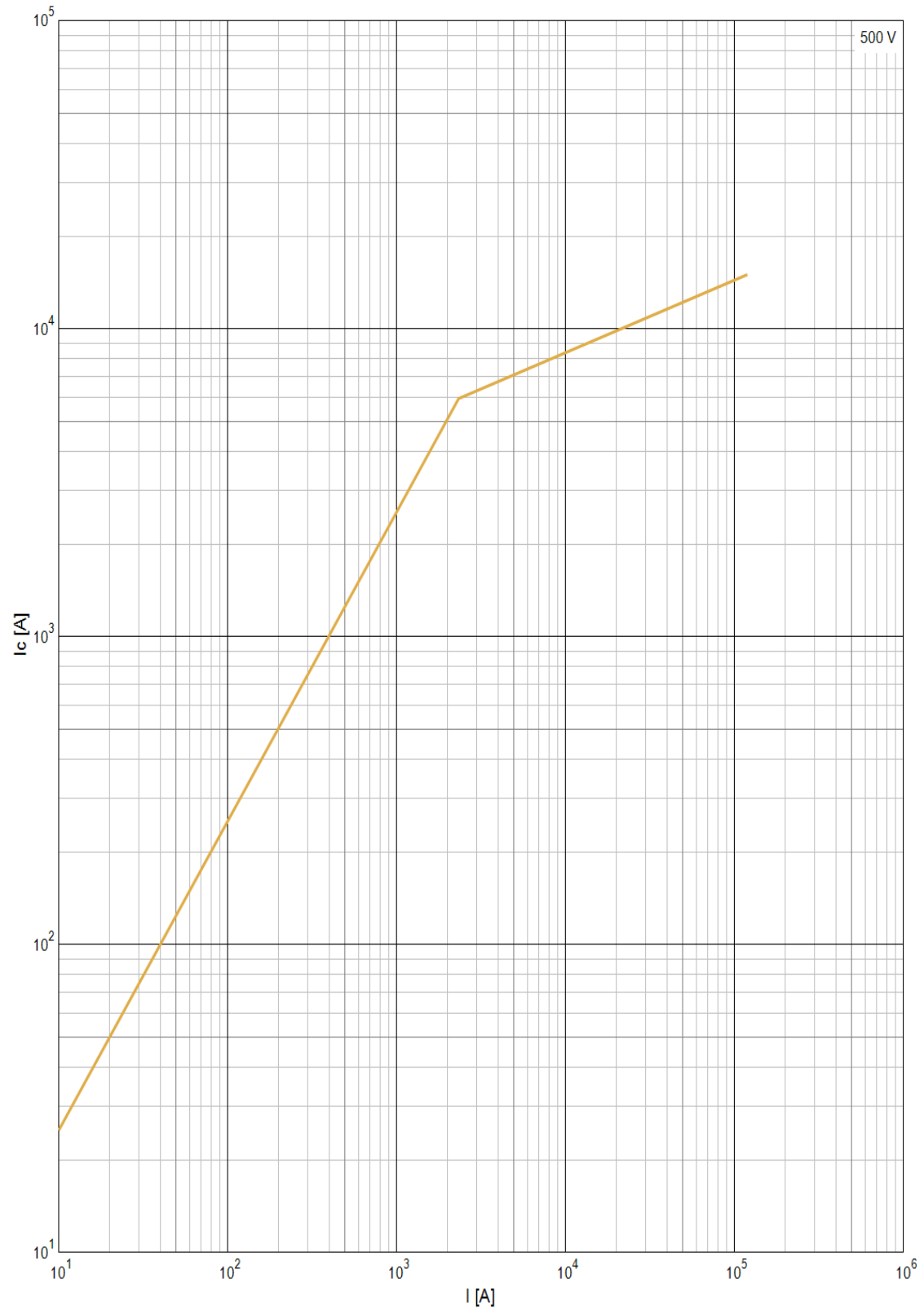
$$I_R = 0,6. I_N \quad (45)$$

$$I_{sd} = 2. I_N \quad (46)$$

$$I_I = 6. I_N \quad (47)$$

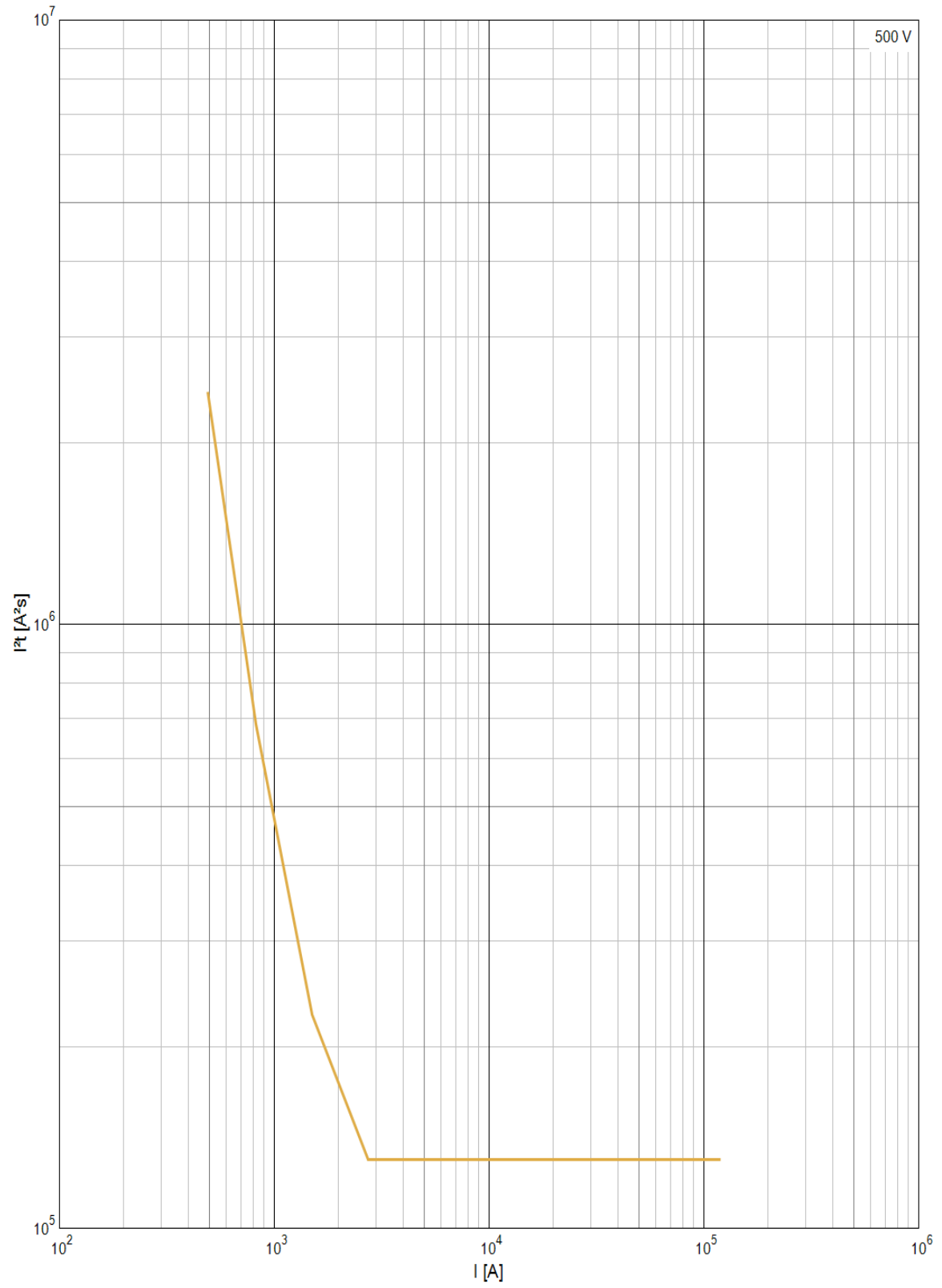
As chaves fusíveis foram dimensionadas conforme a carga de seus respectivos circuitos, no QGBT de 440 V há chaves de 125 A, 160 A, 200 A e 315 A. As Figuras 50 a 57 representam as curvas de corrente de cut off e curva de energia passante dos fusíveis presentes neste quadro geral de baixa tensão.

Figura 50 – Curva de Corrente de Cut Off 3NA3132



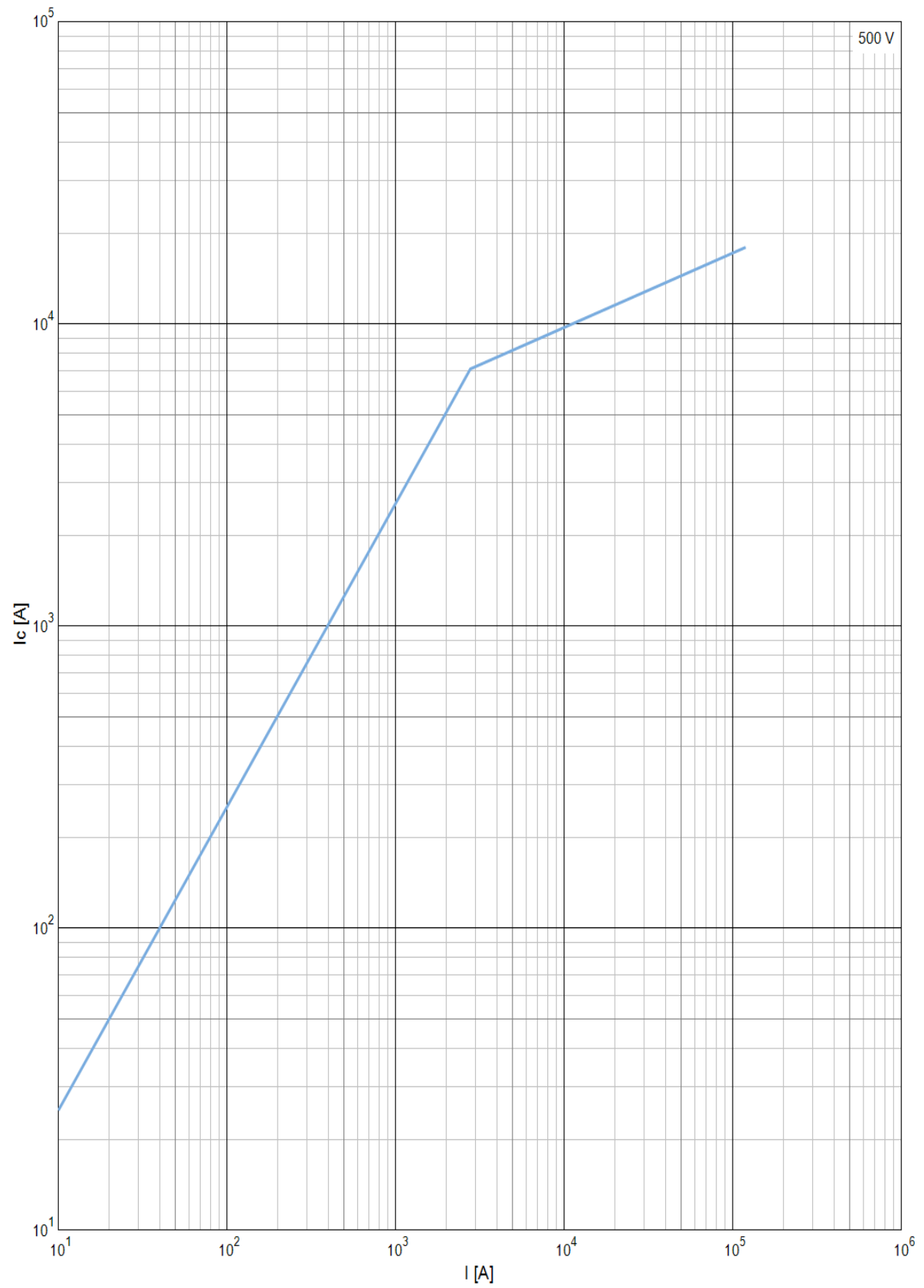
Fonte: Autor (2017)

Figura 51 – Curva de Energia Passante 3NA3132



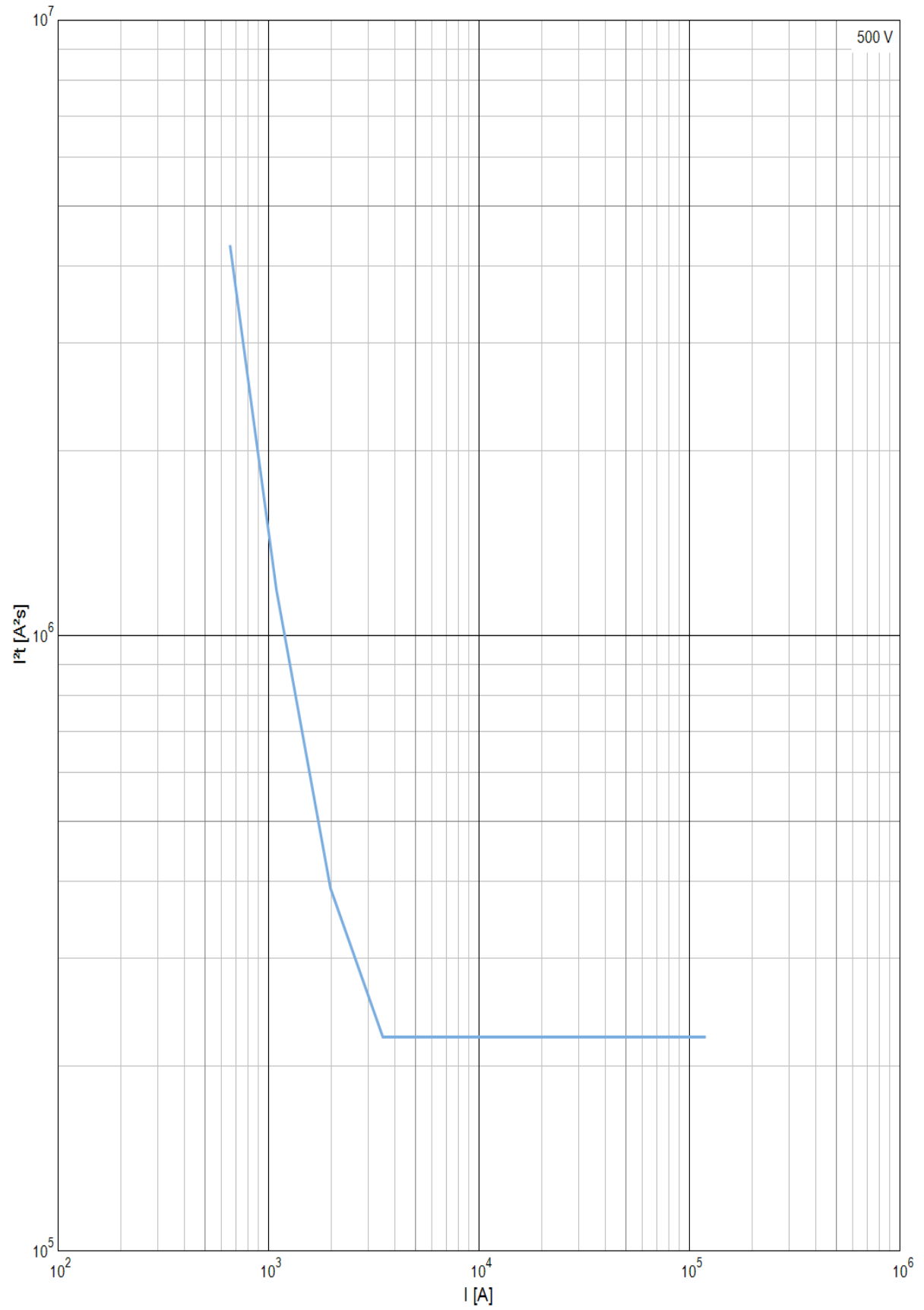
Fonte: Autor (2017)

Figura 52 – Curva de Corrente de Cut Off 3NA3136



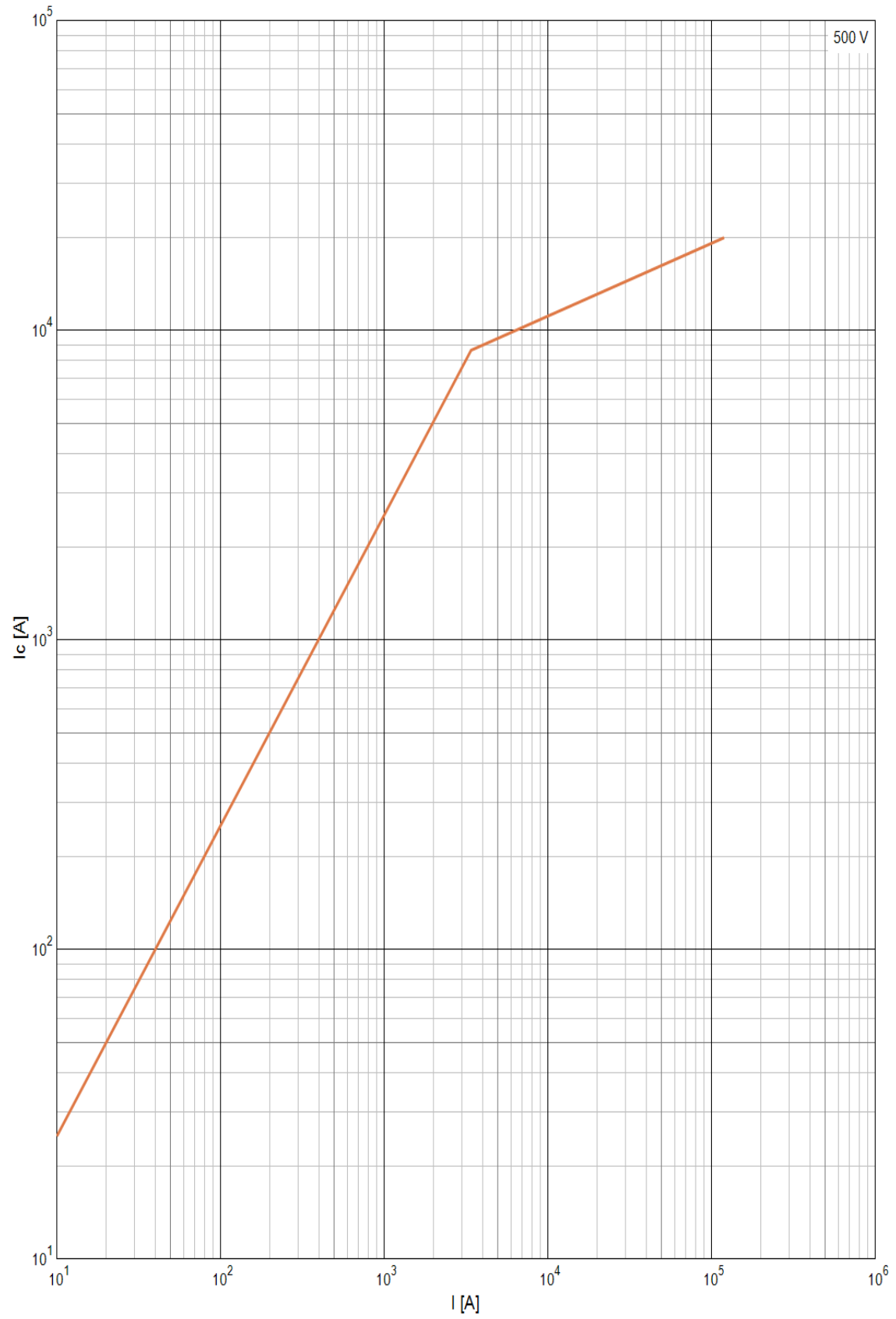
Fonte: Autor (2017)

Figura 53 – Curva de Energia Passante 3NA3136



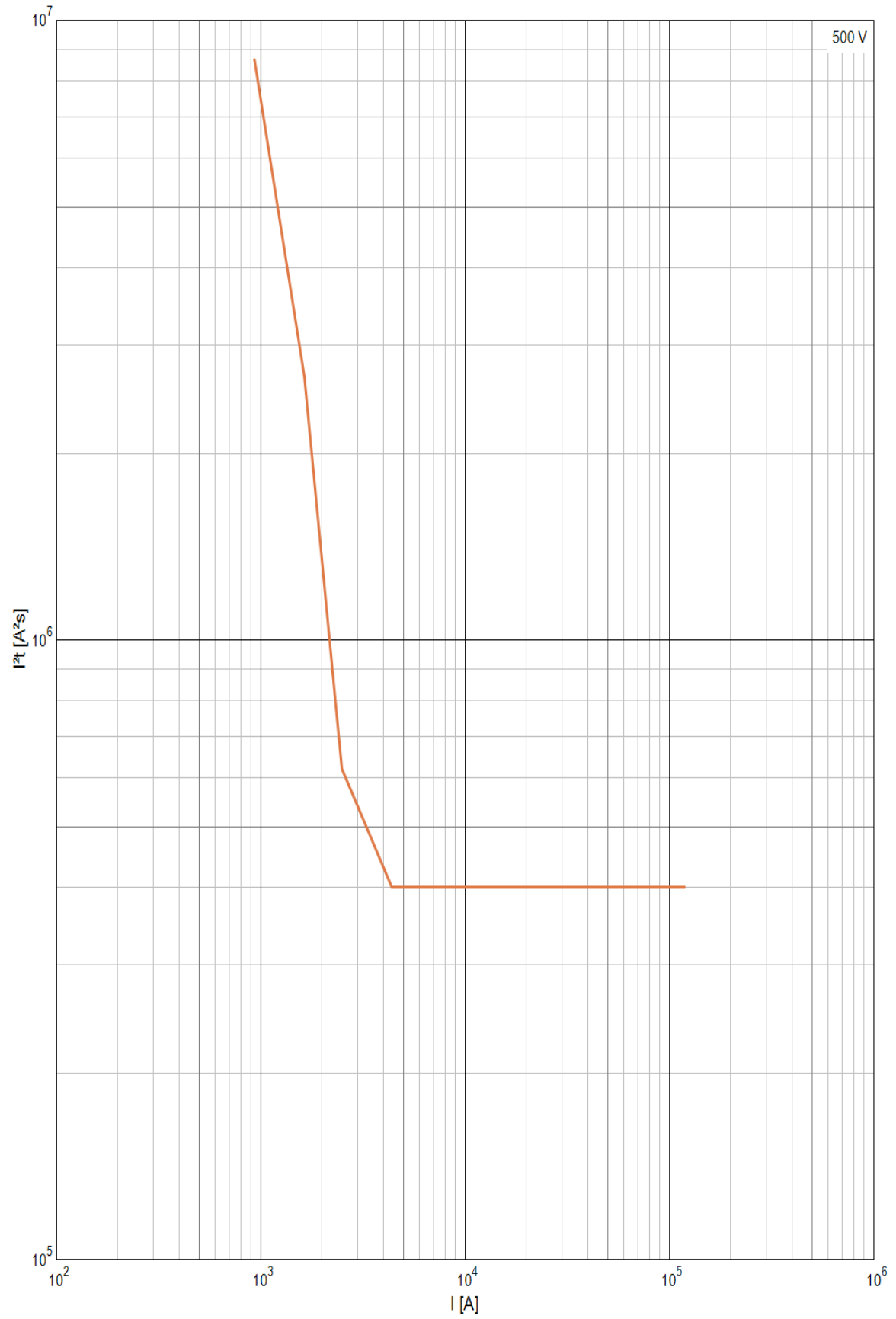
Fonte: Autor (2017)

Figura 54 – Curva de Corrente de Cut Off 3NA3140



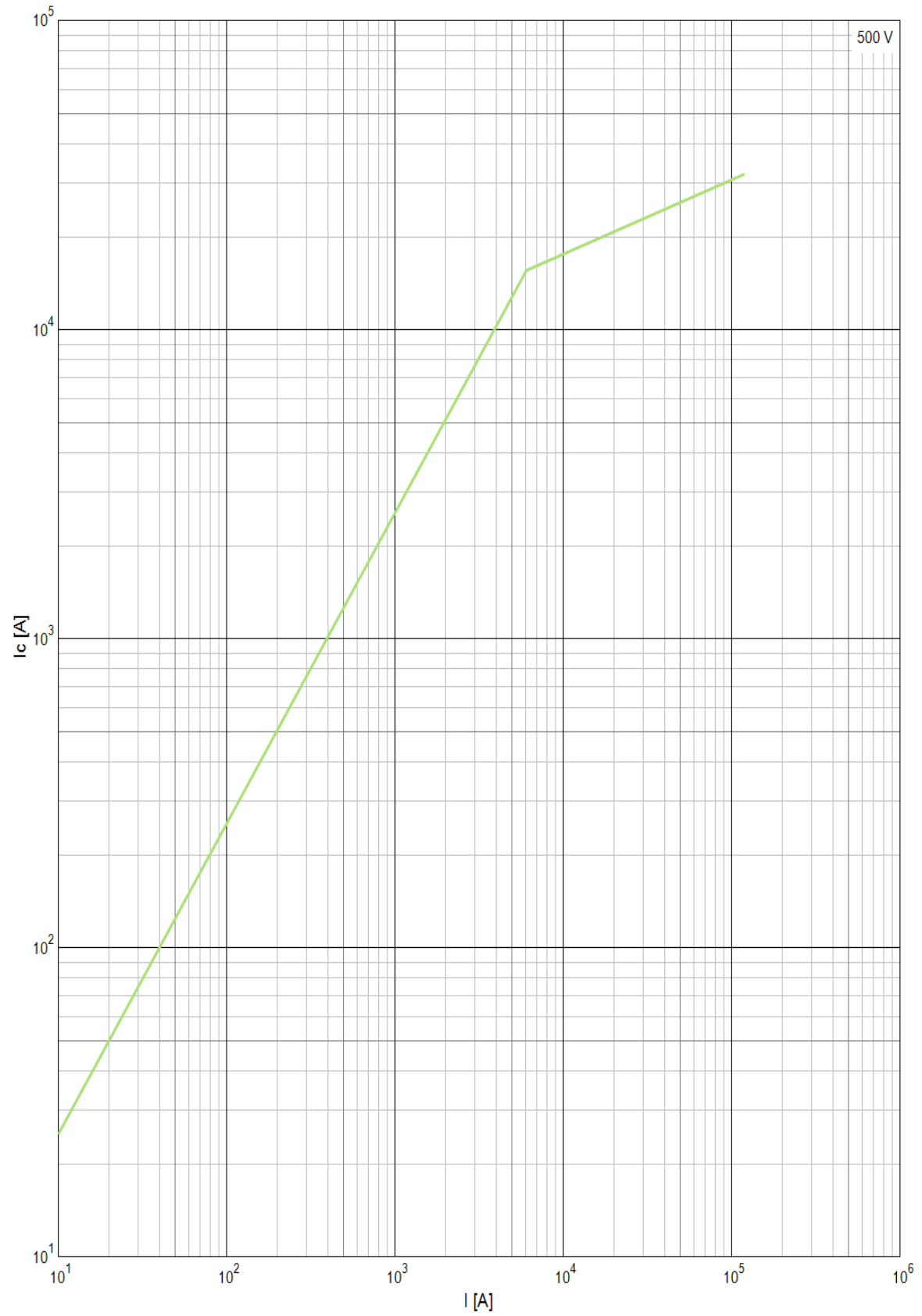
Fonte: Autor (2017)

Figura 55 – Curva de Energia Passante 3NA3140



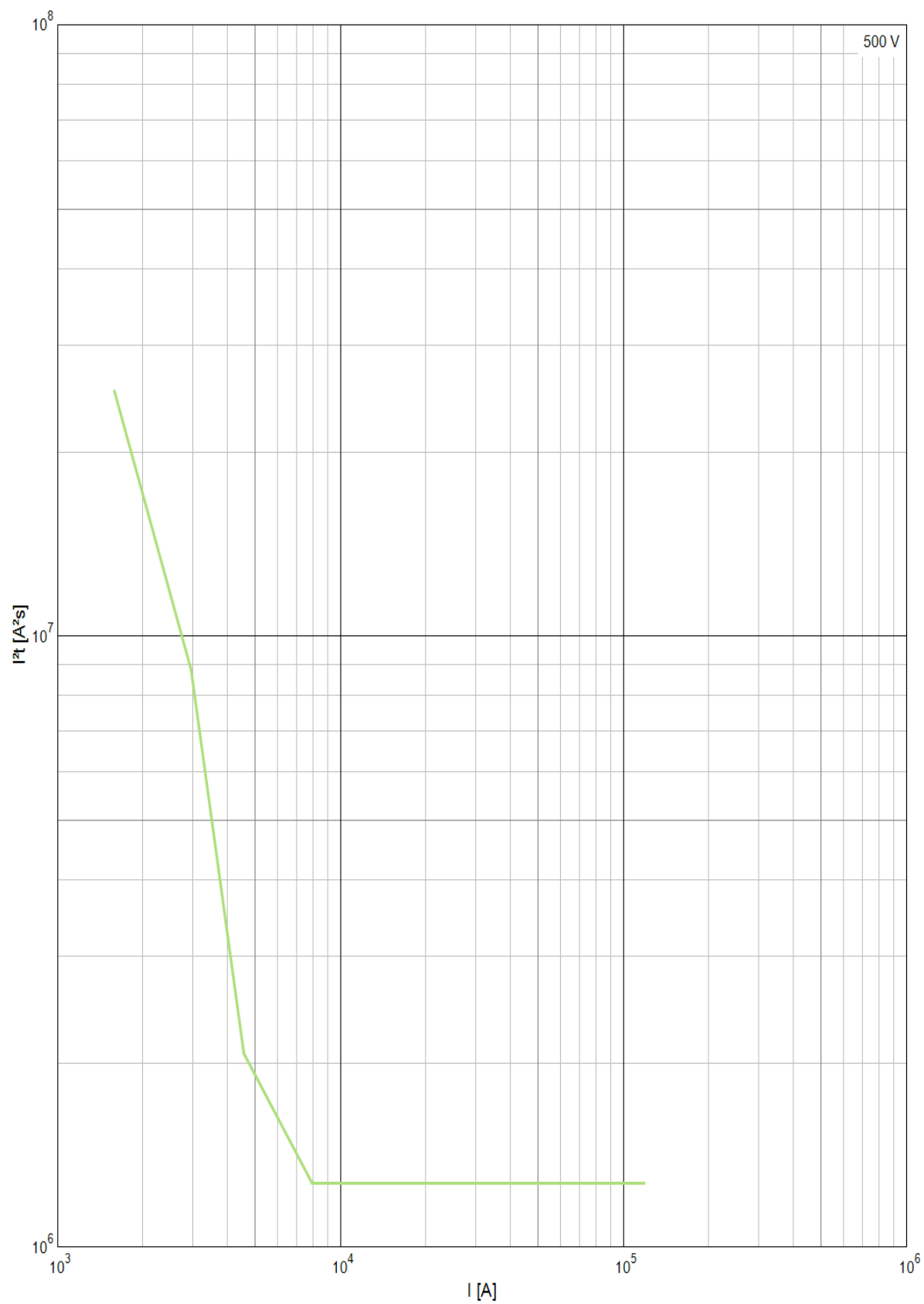
Fonte: Autor (2017)

Figura 56 – Curva de Corrente de Cut Off 3NA3152



Fonte: Autor (2017)

Figura 57 – Curva de Energia Passante 3NA3152



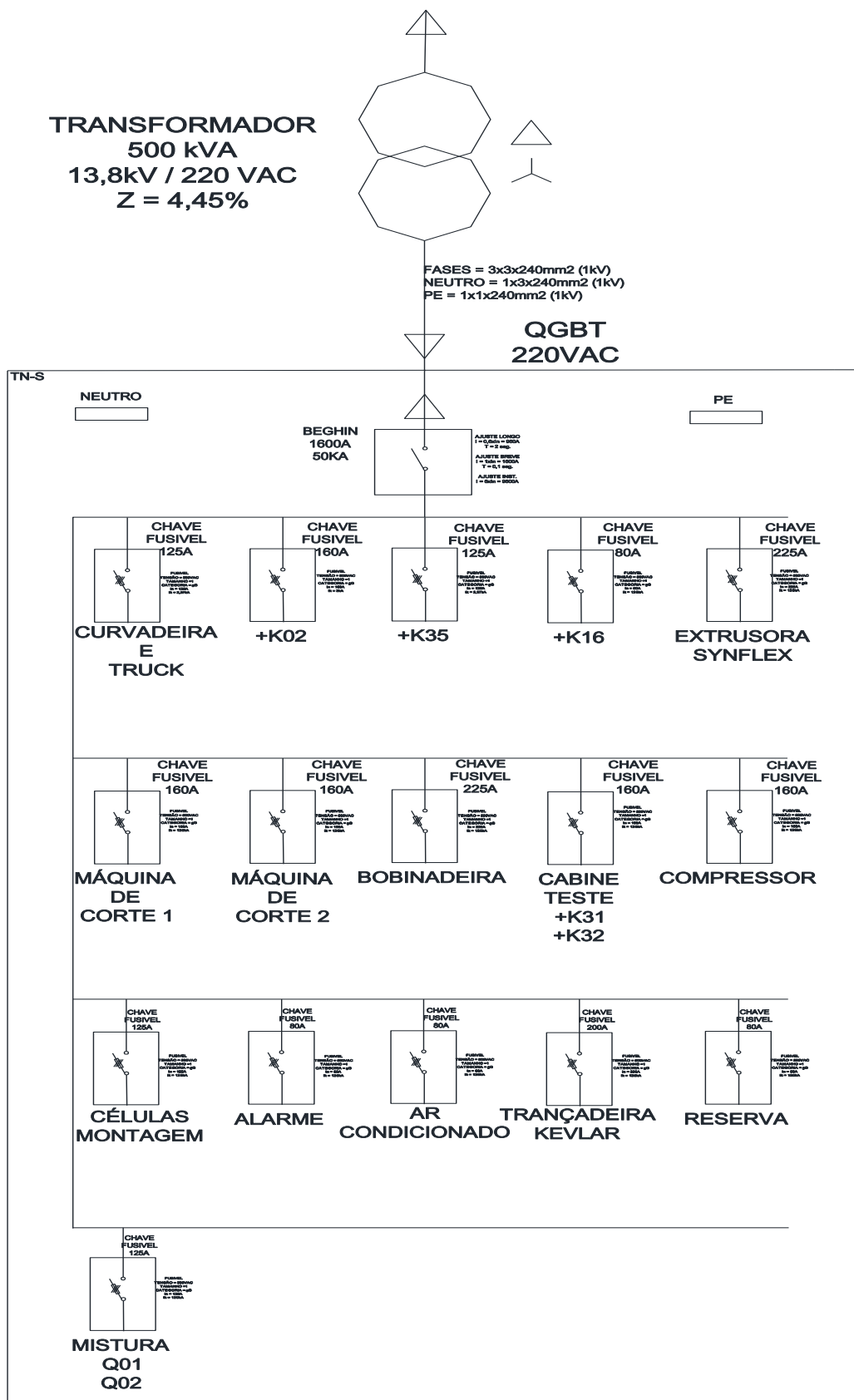
Fonte: Autor (2017)

Na Figura 58 é representado o QGBT de 220 V, este é destinado para a linha de montagem industrial, linha synflex e alimentação dos circuitos destinados a escritório. Neste há um disjuntor geral da Siemens, da família 3WT, com código 3WT81617AA000AA2, que possui corrente nominal de 1600 A e corrente máxima de interrupção de 55 kA. Há também 5 tipos de chave fusível, da família 3NA, nos modelos 3124, 3132, 3136, 3140 e 3142, todas da marca Siemens, sendo ao todo 16 chaves fusíveis.

A chave fusível referente a área da máquina curvadeira e da célula truck possui tamanho 1, categoria gG, com corrente nominal de 125 A e corrente simétrica de curto de 2,37 kA. A chave fusível que representa o circuito +K02 possui tamanho 1 e categoria gG, com corrente nominal de 160 A e corrente de simétrica de curto de 3 kA. A chave fusível que representa o circuito +K36 possui tamanho 1, categoria gG com corrente nominal de 125 A e corrente simétrica de curto de 2,37 kA. A chave fusível que representa o circuito +K16 possui tamanho 1, categoria gG com corrente nominal de 80 A e corrente simétrica de curto de 2 kA. As chaves fusíveis do alarme e do ar condicionado possuem as mesmas características da chave +K16, sendo assim da categoria gG com corrente nominal de 80 A. As chaves fusíveis das máquinas de corte, da cabine de teste e do compressor possuem mesmas características, sendo de 160 A de corrente nominal, categoria gG, tamanho 1 e corrente simétrica de curto de 3 kA. As chaves fusíveis das células da montagem e da mistura também possuem características similares, sendo ambas de 125 A com corrente de curto de 2,37 kA. A chave fusível da trançadeira de kevlar possui corrente nominal de 200 A, com tamanho 1 e categoria gG, além de uma corrente de curto circuito de 3,8 kA. Por fim, a chave fusível que representa a extrusoras synflex possui características de corrente nominal de 225 A, categoria gG e corrente de curto circuito simétrica de 4 kA.

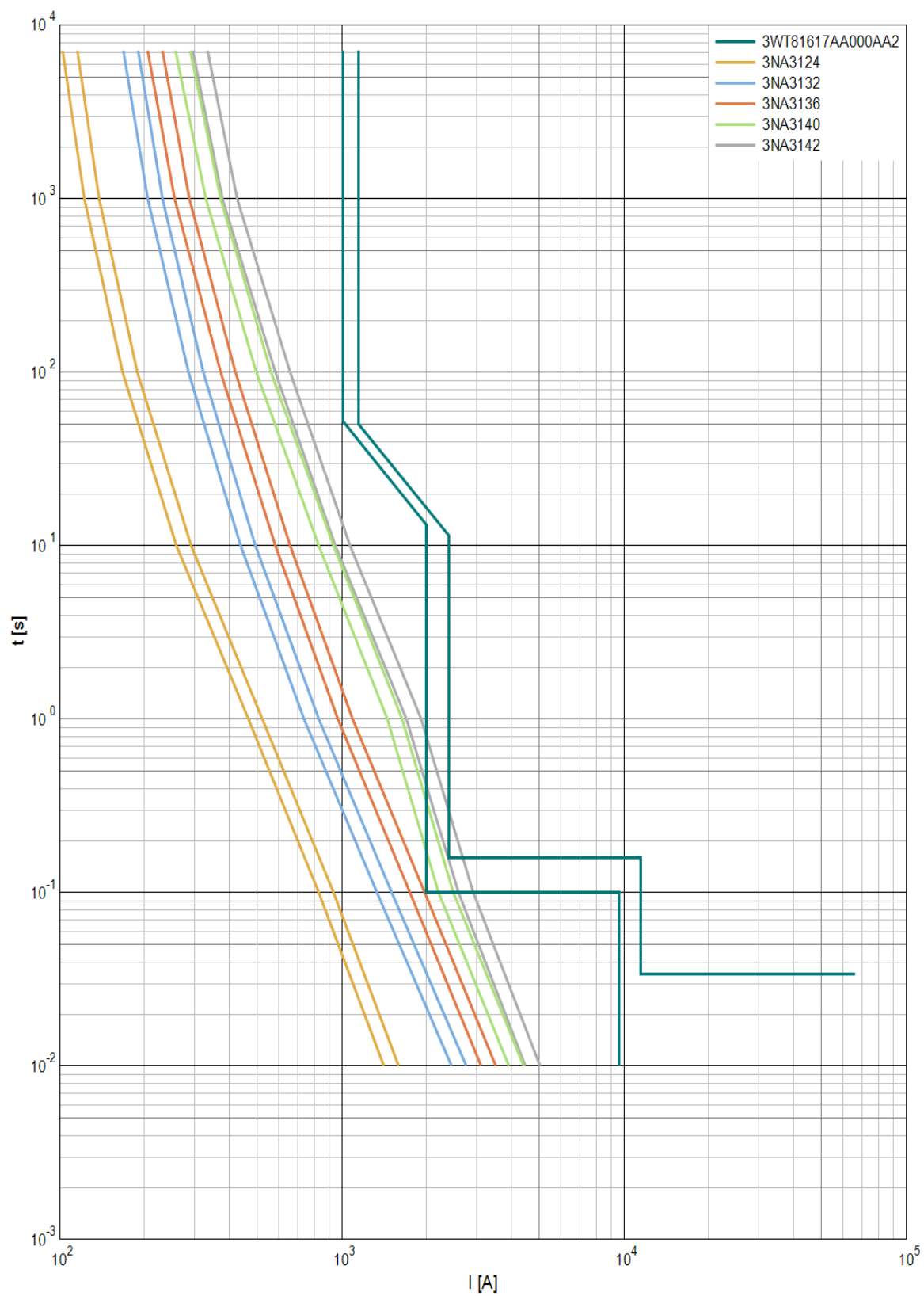
Na Figura 59 observa-se as curvas características do QGBT de 220 V.

Figura 58 – Diagrama unifilar QGBT 220 V



Fonte: Autor (2017)

Figura 59 – Curvas características QGBT 220V



Fonte: Autor (2017)

Nota-se que o sistema está coordenado e seletivo, no qual, qualquer falha presente em uma chave fusível irá desenergizar somente o ramo no qual a falha está presente, de modo que o disjuntor não irá desarmar. A Tabela 13 demonstra os valores de corrente representados pela Figura 59.

Tabela 13 – Dados de seletividade QGBT 220 V

Baixa Tensão - QGBT 220V									
Designação	L			S				I	
	In[A]	Ir[A]	tr[s]	Isd [A]	tsd [s]	Char.	Ligado	Ii[A]	Ligado
3WT81617AA000AA2	1600	960	2	2000	0,1	Std	sim	9600	Sim
3NA3124	80	-	-	-	-	-	-	-	-
3NA3132	125	-	-	-	-	-	-	-	-
3NA3136	160	-	-	-	-	-	-	-	-
3NA3140	200	-	-	-	-	-	-	-	-
3NA3142	224	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autor (2017)

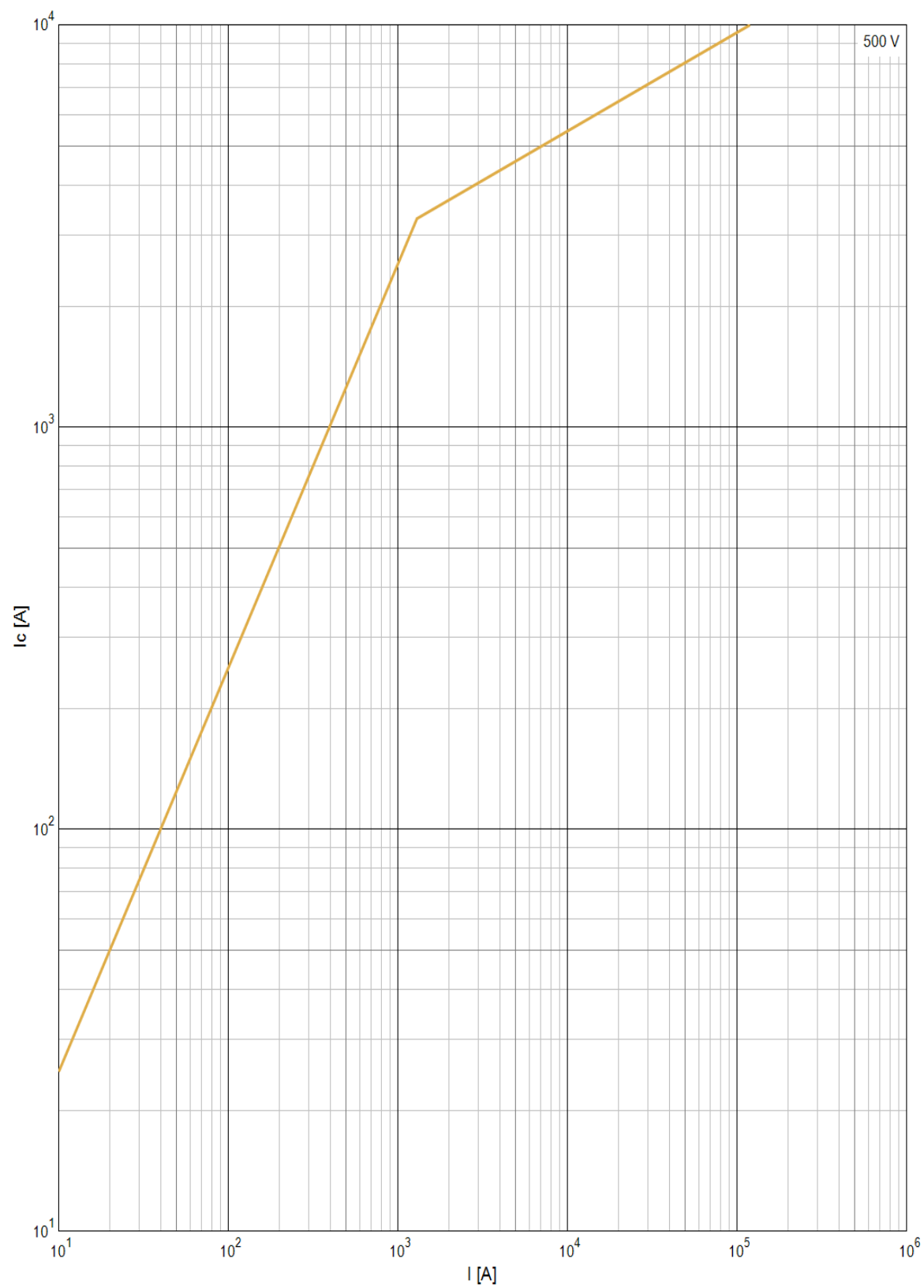
Observando a Tabela 13, o disjuntor 3WT81617AA000AA2 utilizado possui corrente nominal de 1600 A, temporizado para disparar com sobrecarga no tempo de 2 segundos com corrente de 960 A, e com presença de curto circuito ele dispara em 0,1 segundo com uma corrente de 2000 A.

Os valores de corrente de disparo por sobrecarga, corrente de ajuste da temporização do disparador de curto-circuito e corrente de ajuste do disparador instantâneo foram definidos pelas equações 45, 46 e 47.

A seletividade entre dois ou mais dispositivos é assegurada visto que as curvas características não se cortam ou se toquem, o limite de seletividade entre esses dispositivos de manobra é atingido num ponto de interseção ou de contato. De forma mais simples, o limite de seletividade sempre é atingido com o contato da curva característica do disparador de um interruptor subordinado a essa linha.

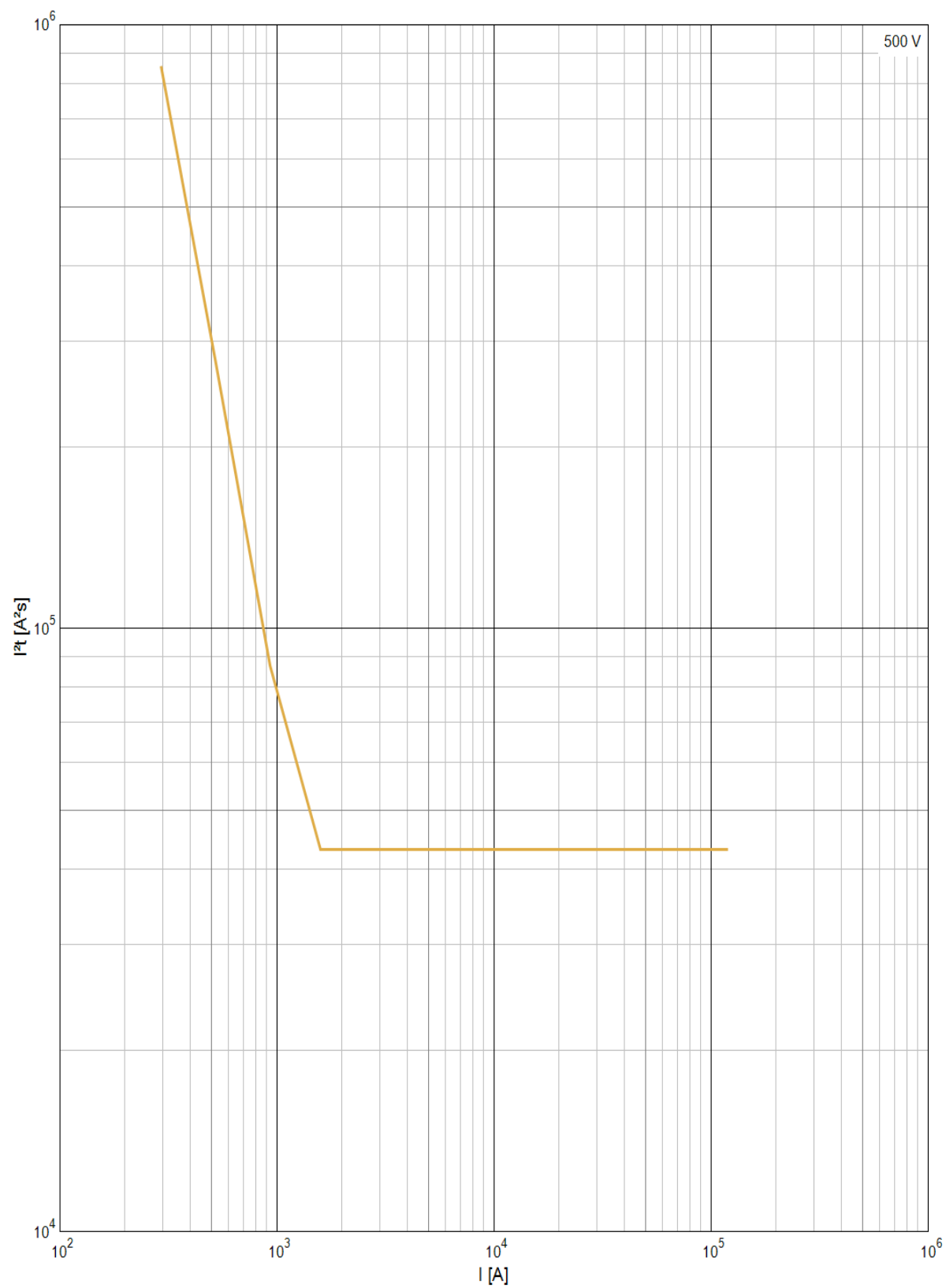
Nas Figuras 60 a 79 é possível observar as curvas de corrente de cut off e energia passante das chaves fusíveis presentes no sistema elétrico do QGBT de 220 V. São os modelos 3NA3124, 3NA3132, 3NA3136, 3NA3140 e 3NA3142.

Figura 60 – Corrente de Cut Off 3NA3124



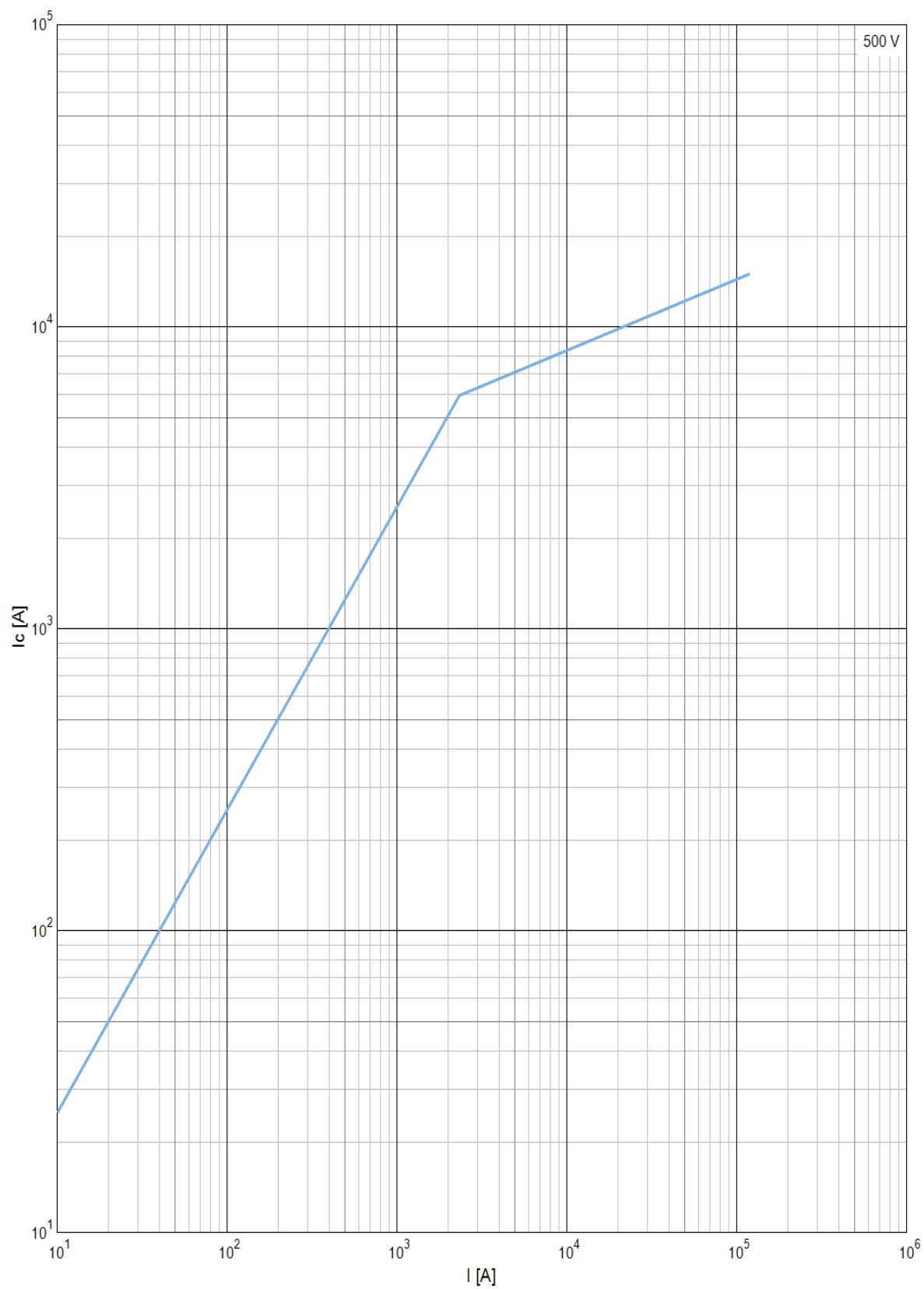
Fonte: Autor (2017)

Figura 61 – Curva de Energia Passante 3NA3124



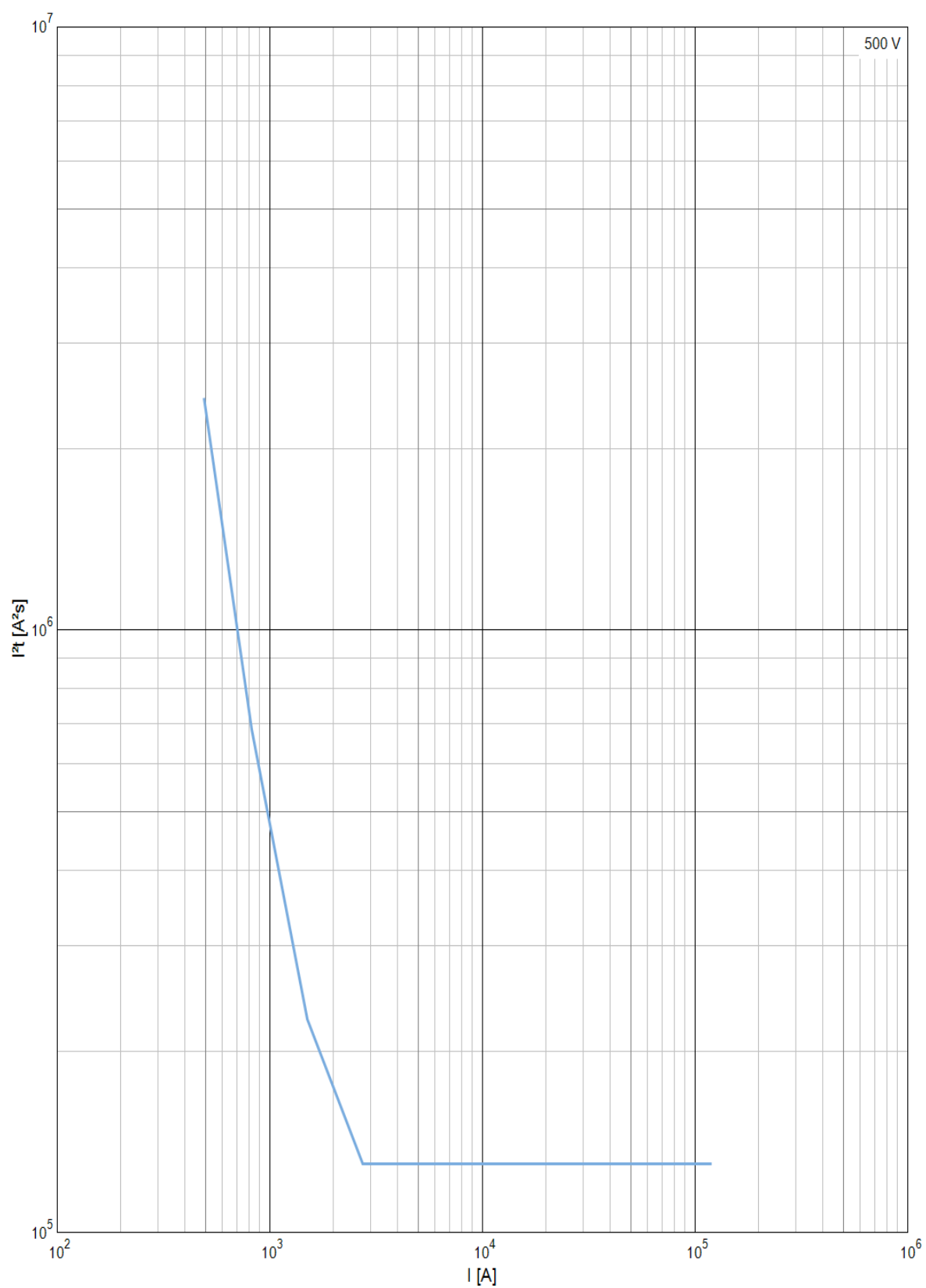
Fonte: Autor (2017)

Figura 62 – Curva de Corrente de Cut Off 3NA3132



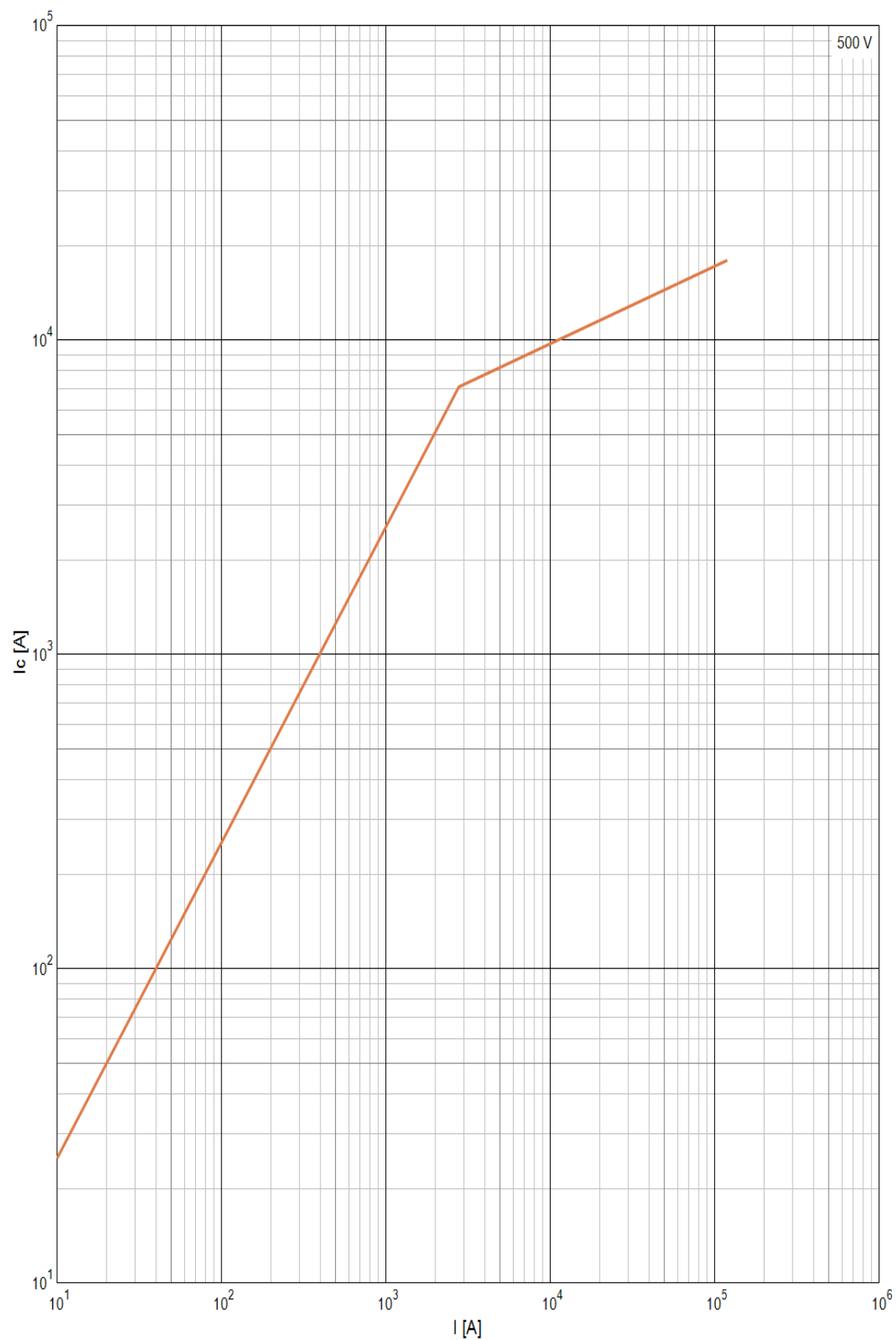
Fonte: Autor (2017)

Figura 63 – Curva de Energia Passante 3NA3132



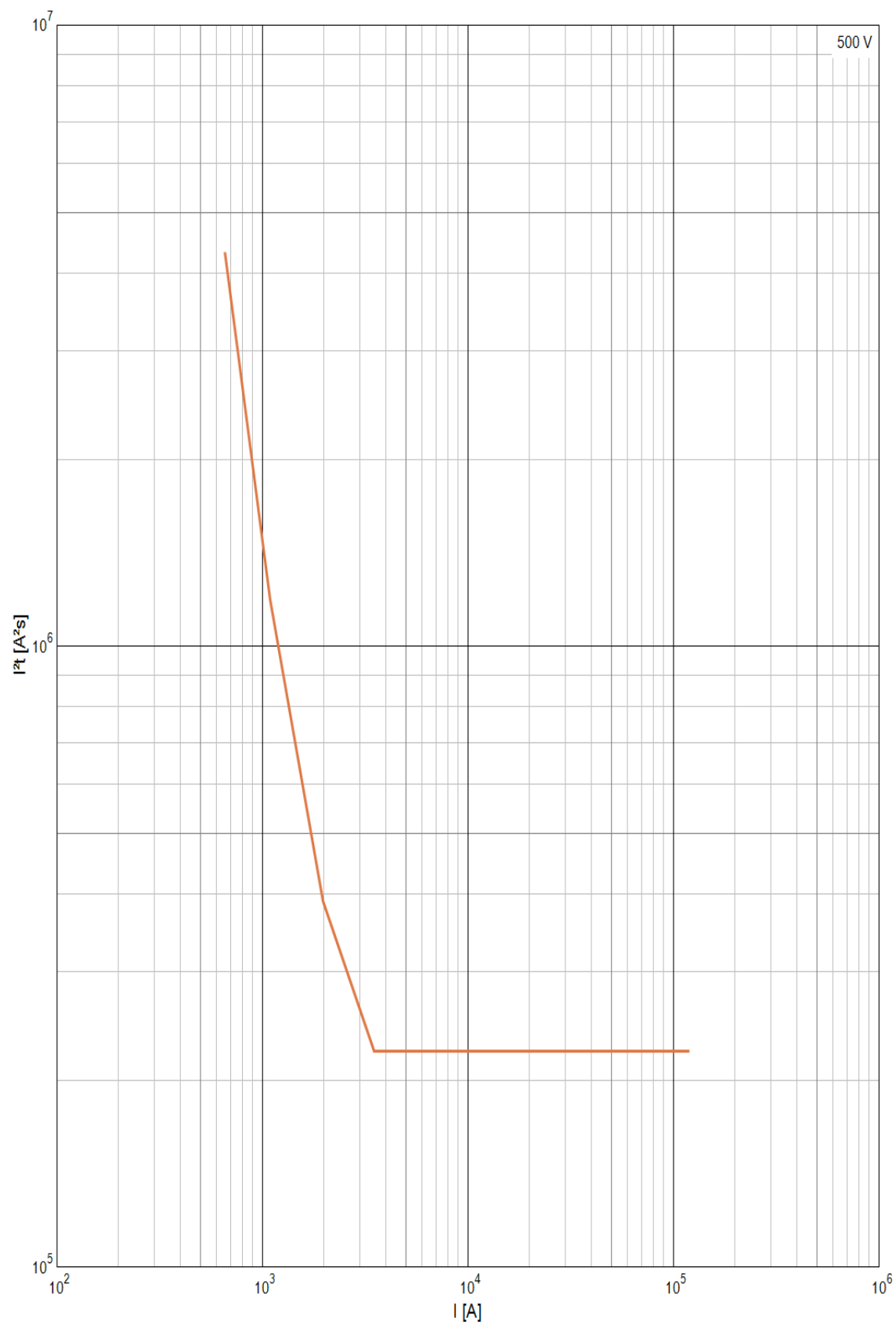
Fonte: Autor (2017)

Figura 64 – Curva de Corrente de Cut Off 3NA3136



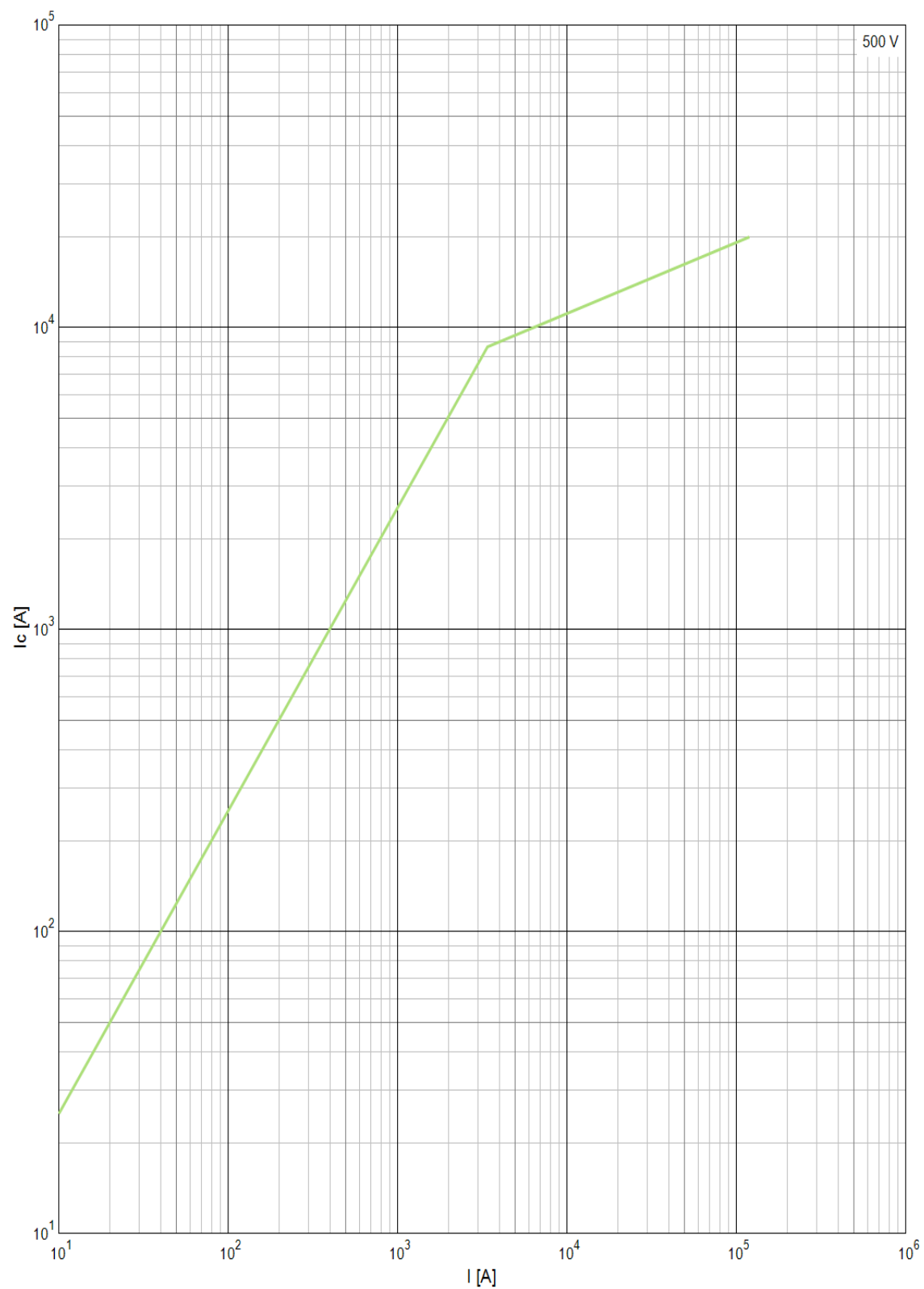
Fonte: Autor (2017)

Figura 65 – Curva de Energia Passante 3NA3136



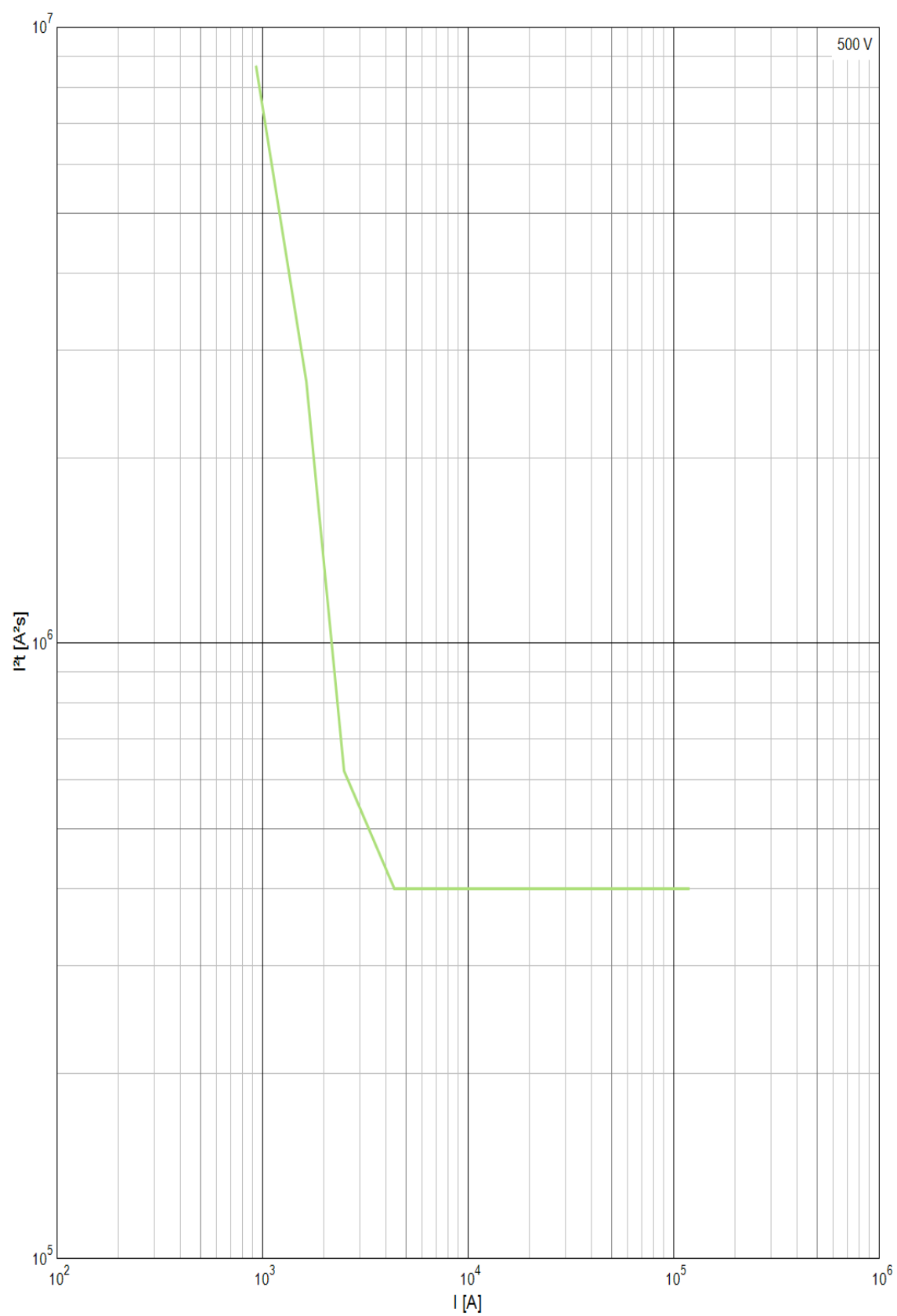
Fonte: Autor (2017)

Figura 66 – Curva de Corrente de Cut Off 3NA3140



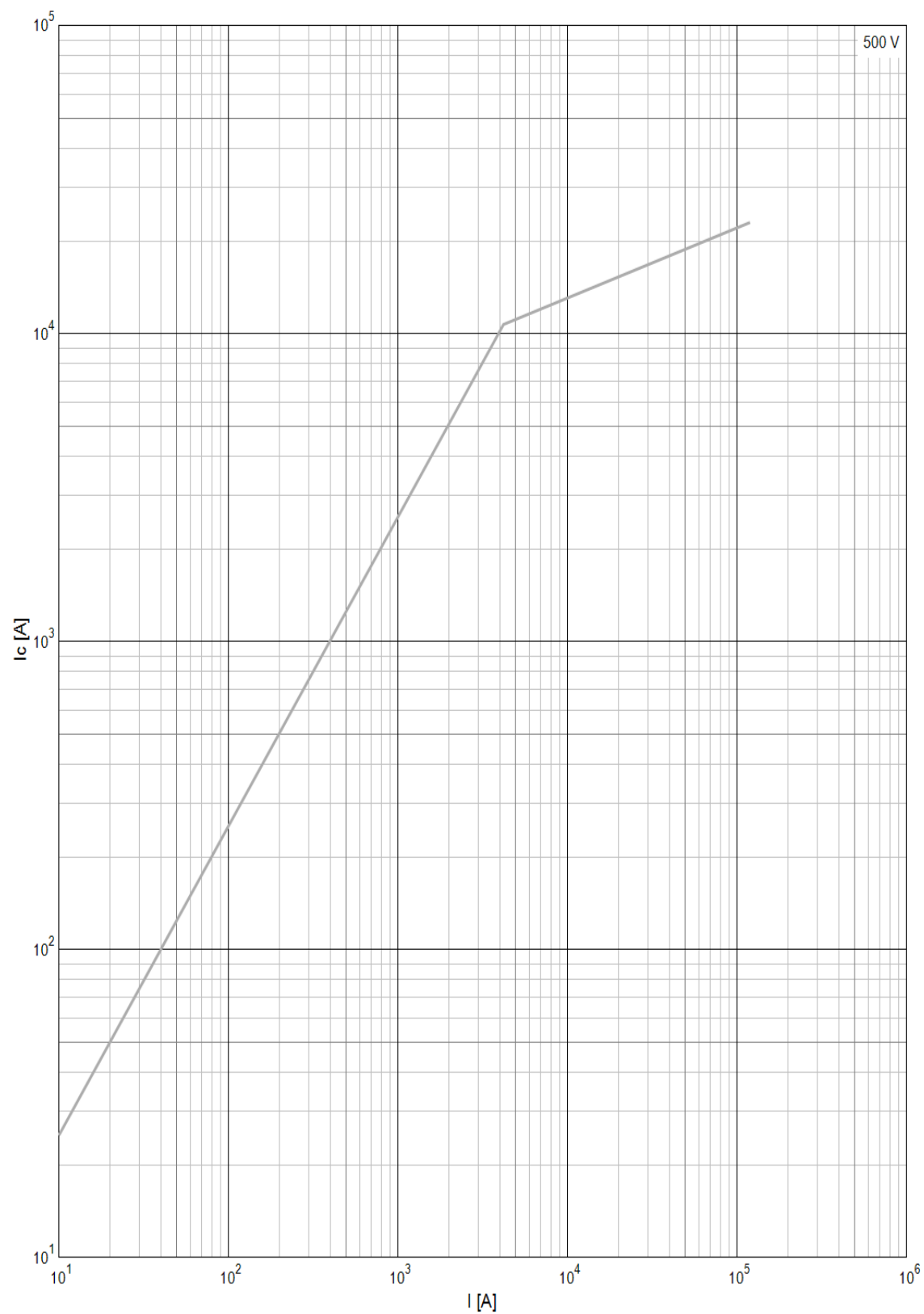
Fonte: Autor (2017)

Figura 67 – Curva de Energia Passante 3NA3140



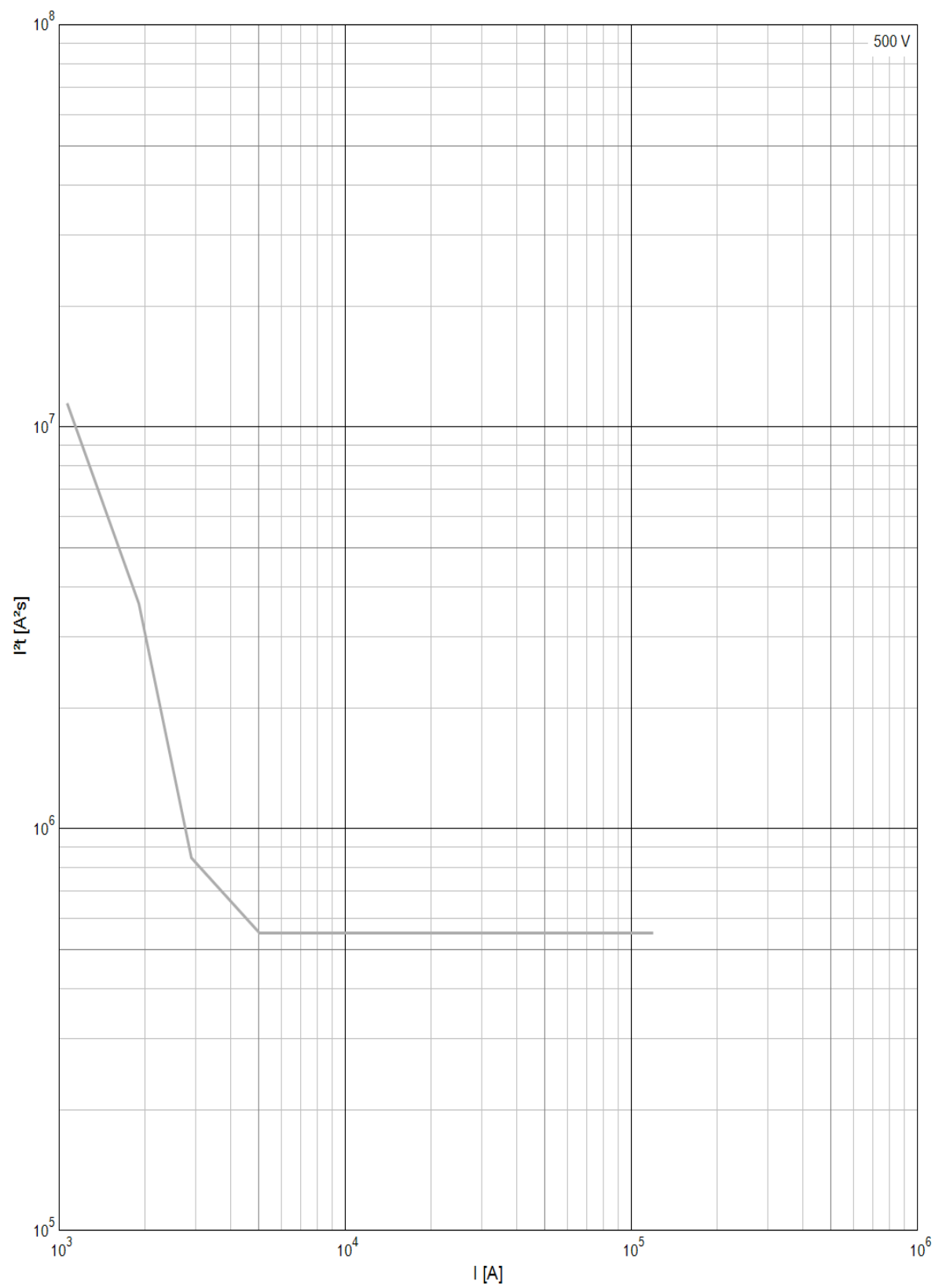
Fonte: Autor (2017)

Figura 68 – Curva de Corrente de Cut Off 3NA3142



Fonte: Autor (2017)

Figura 69 – Curva de Energia Passante 3NA3142



Fonte: Autor (2017)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proteção do sistema elétrico industrial é um dos principais temas atualmente no âmbito de engenharia elétrica, visto que este tem como objetivo manter a operação de forma contínua desligando somente a parcela do sistema elétrico de potência que se encontra defeituoso. Os sistemas devem atuar rapidamente para minimizar riscos à vida humana e danos aos equipamentos que compõem o sistema elétrico de potência.

Um estudo de coordenação e seletividade visa otimizar o sistema elétrico, fazendo com que somente o dispositivo mais próximo da falta atue, de modo que o sistema continue operando mitigando somente o ramo possuidor da falha, reduzindo assim o prejuízo, tanto material como humano. Para que os índices de desempenho do sistema possam ser mantidos é imprescindível uma estrutura que permita o funcionamento do sistema elétrico, para detectar e corrigir no menor tempo todas as falhas que ocorrem, garantindo o funcionamento durante as operações diárias de manutenção ou manobra.

Visto a importância do tema, o mercado vive um cenário de grande demanda de projetos contrastando com a falta de mão de obra qualificada para desenvolvimento de um estudo de seletividade e coordenação. Hoje o profissional que possui conhecimento neste tema está muito bem posicionado no mercado.

A metodologia apresentada diz respeito a um projeto de coordenação e seletividade visando a proteção contra sobrecorrente em um sistema elétrico isolado, analisando os gráficos de tempo versus corrente através do software Eaton CurveSelect V1.24, definindo os ajustes dos dispositivos de proteção contra sobrecorrente a partir dos dados nominais dos equipamentos protegidos e criando um roteiro bem explicativo de implementação do estudo de caso numa instalação industrial exemplificando uma planta de produção de mangueiras hidráulicas.

A parametrização do relé de proteção foi o primeiro passo para o alcance de uma proteção bem efetiva, e a seletividade foi induzida, visto que no estudo de caso já se considerava que os equipamentos estavam instalados. O relé digital foi parametrizado baseado nos transformadores e cargas já instaladas e a seletividade de baixa tensão foi alcançada a partir da análise das curvas dos dispositivos, no qual as curvas não devem se cruzar, fazendo que de modo coordenado o sistema selecione a falta.

Toda parte de cálculo presente neste foi executada de acordo com as normas vigentes em relação a este assunto e baseados na teoria presente na literatura de autores referência no tema, somados à expertise de profissionais do ramo e trabalhos similares para melhor desenvolvimento do projeto. O trabalho de campo demandou bastante tempo, devido a

dificuldade de encontrar informações precisas das instalações e mesmo o diagrama unifilar correto, visto que a empresa não possui um departamento de engenharia elétrica na planta, terceirizando todo o tipo de serviço elétrico. O processo de coordenação e seletividade deve ser sempre atualizado, no caso da indústria modelo, prevê-se a ampliação de tal, com a inserção de mais um galpão industrial para produção de novos produtos, com isso a empresa deve modificar o estudo de seletividade elétrica afim de sanar qualquer possibilidade de interrupções de energia desnecessárias, assim evitando gastos elevados.

Visto a importância deste estudo, uma proposta de continuidade deste trabalho é a modernização do sistema de proteção da planta hidráulica, realizando a troca de chave fusíveis por disjuntores. Outro cenário possível é uma provável ampliação dessa planta, com a instalação de mais uma linha de produção ou aumento no portfólio de produtos, sendo assim necessário a instalação de novas máquinas, com isso é necessário a instalação de mais um transformador. Com um sistema elétrico mais complexo, é necessária uma nova parametrização do relé digital, assim como um novo estudo de coordenação e seletividade.

REFERÊNCIAS

- ABB. **ABB expands its Relion® ANSI portfolio to include single-function protection relays.** Disponível em:
<http://www.abb.com/cawp/seitp202/2a3831d1cadada9485257dfc007baf9d.aspx>. Acesso em: 18 ago. 2017.
- ABB. **Breaker coordination.** São Paulo, 2012.
- ABBOUD, R.; LIMA, P.; NEEDS, J. **Avanços nos recursos dos relés de proteção de motores.** Berlim: Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Dibyendu Bhattacharya BP Exploration Operating Co., Ltd., 2016.
- ANDERSON, P. **Analysis of faulted power systems.** New York: IEEE Press Power Systems Engineering Series, 1995. 540 p.
- ARAÚJO, C. et al. **Proteção de sistemas elétricos.** 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2005. 266 p.
- BLACKBURN, J. L.; DOMIN, T. J. **Protective relaying: principles and applications.** 3. ed. California: Taylor & Francis Group, 2014.
- CABRERA, C.; CHIU, S.; KUMAR, N. **Implementation of Arc-Flash protection using IEC 61850 Goose Messaging.** Auckland: IEEE, 2013.
- CREDER, H. **Instalações elétricas.** 15. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005. 476 p.
- ELO SOLUTIONS. **Atuadores e relés estáticos.** Disponível em:
<http://www.elosolutions.com.br/index.php/produtos/gefran/atuadores-e-reles-estaticos-reles-de-estado-solido/>. Acesso em: 23 ago. 2017.
- FISCHER, P. A. **Tratado teórico e prático sobre curto-circuitos.** Porto Alegre: São Cristovão, 2002.
- HEWITSON, L.G.; BROWN, M.; BALAKRISHNAN, R. **Practical Power System Protection.** Amsterdam: Elsevier, 2004.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 242: recommended practice for protection and coordination of industrial and commercial power systems,** New York, 2001.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Arc flash and coordination study conflict in an older industrial plant.** New York: IEEE Press Power Systems Engineering Series, 2007.
- JIANG, J. **Design of relay protection setting calculation module of oilfield power plant based on expert system.** Daqing: IEEE, 2012.
- KIM, J.; PARK, M.; YU, I. **Development of real time protective coordination algorithm for HTS power cable.** Beijing: IEEE, 2015.

KINDERMANN, G. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 2005. v. 1.

KINGSLEY, J. **Setting of overload, short circuit and ground fault protection of MCCB**. Doha: IEEE, 2017.

LAWSON, A. **Consolidação de material didático para a disciplina de equipamentos elétricos**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

LEE, C. H.; CHEN, C. **Using genetic algorithm for overcurrent relay coordination in industrial power system member**. Taipei: IEEE National Taipei University of Technology, Taiwan ROC, 2008.

MAMEDE FILHO, J. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 788 p.

MAZUR, D. et al **Protective relay faceplate development utilizing the benefits of IEC 61850**. Florida: IEEE, 2013.

NEGRAO, D. L. A. **Metodologia automática para a realização da coordenação e seletividade da proteção de sobrecorrente em sistemas elétricos industriais**. 2012. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

PEXTRON. **Proteção e controle para a maior vida útil do ativo**. Disponível em: <https://www.pextron.com/index.php/pt-br/solucoes-01/coluna-01/trafos-a-oleo-01> . Acesso em: 22 out. 2017.

PORTAL DO ELETRICISTA. **Tipos de fusíveis**. Disponível em: <http://www.portaleletricista.com.br/tipos-de-fusiveis/> . Acesso em: 25 set. 2017.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Transformadores de baixa tensão**. Disponível em: http://www.schneider-electric.com.br/brasil/pt/produtos-servicos/distribuicao-electrica/distribuicao-electrica-intermediario.page?f=F13%3ADistribui%C3%A7%C3%A3o%20El%C3%A9trica~!NNM1:Transformadores+e+Autotransformadores+de+Baixa+Tens%C3%A3o&p_function_id=61124. Acesso em: 15 jul. 2017

STEVENSON JUNIOR, W. D. **Elementos de análise de sistemas de potência**. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

SUTHERLAND, P. **Arc Flash and coordination study conflict in an older industrial plant**. Chicago: IEEE, 2015.

VALDES, M. **Advances in protective device interlocking for improved protection and selectivity**. Plainville: IEEE, 2014.

VIEIRA, J. C.; SOARES, A. H. **Case Study: adaptative overcurrent protection scheme applied to an industrial plant with cogeneration units**. Chicago: IEEE, 2008.

ZHAO, D.; SHAN, B.; ZHANG X. **Research on relay protection setting expert system for main equipment in power plant.** Beijing: IEEE, 2009.

WU, J.; ZHAO, D.; ZHANG, X. **Design and development of relay protection setting calculation expert system in power plant.** Beijing: IEEE, 2009.