



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

MATHEUS VINÍCIUS FERRO DE OLIVEIRA

**UM ESTUDO DE CASO PARA AJUSTES DA PROTEÇÃO COM ANÁLISE DE
CURTO-CIRCUITO ATRAVÉS DO ANAFAS**

Recife

2019

MATHEUS VINÍCIUS FERRO DE OLIVEIRA

**UM ESTUDO DE CASO PARA AJUSTES DA PROTEÇÃO COM ANÁLISE DE
CURTO-CIRCUITO ATRAVÉS DO ANAFAS**

Trabalho de Conclusão do Curso de
Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Pernambuco,
como requisito parcial para obtenção do
grau em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Augusto César Cavalcanti de Oliveira.

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

- O48u Oliveira, Matheus Vinícius Ferro de.
Um estudo de caso para ajustes da proteção com análise de curto-circuito através do anafas / Matheus Vinícius Ferro de Oliveira – Recife, 2019.
127 f., figs., tabs., abrev. e siglas.
- Orientador: Prof. Dr. Augusto César Cavalcanti de Oliveira.
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco.
CTG. Departamento de Engenharia Elétrica, 2019.
Inclui referências e apêndice.
1. Engenharia Elétrica. 2. Relé de sobrecorrente. 3. Relé direcional. 4. Relé de distância. 5. Relé diferencial. 6. ANAFAS.
I. Oliveira, Augusto César Cavalcanti de. (Orientador). II. Título.

UFPE

621.3 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-328

MATHEUS VINÍCIUS FERRO DE OLIVEIRA

**UM ESTUDO DE CASO PARA AJUSTES DA PROTEÇÃO COM ANÁLISE DE
CURTO-CIRCUITO ATRAVÉS DO ANAFAS**

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso
de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito da
disciplina de Trabalho de Conclusão de
Curso (EL403)

.

Aprovado em: 02 / 07 / 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Augusto César Cavalcanti de Oliveira (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Zanon Dueire Lins (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. José Maurício de Barros Bezerra (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar força e coragem de transformar meus objetivos em realizações. Sem ele, eu não seria nada.

Aos meus pais, Eliane Ferro e José Edimilson, por me mostrarem todos os dias exemplos de honestidade, força, humildade e perseverança. Por tornarem os meus sonhos em sonhos deles e por não medirem esforços para que se transformem em realidade. Aos meus irmãos, Gabriela e Tales Ferro, por todo companheirismo e apoio durante todos esses anos morando juntos longe dos nossos pais.

Ao restante da família, que independente da distância sempre encontrou uma forma de me incentivar. Em especial, agradeço a minha Vó, Maria Lucinda, que mesmo sem ensino fundamental completo, sempre exaltou a importância da educação na minha formação como homem.

A minha namorada, Joyce Nunes, por todo o seu incentivo, cuidado, paciência e compreensão. Por me mostrar que sempre existe uma saída, por mais difícil que a situação pareça.

Aos amigos que fiz na universidade e que levarei comigo para o resto da vida. A jornada foi longa, mas com certeza eles a tornaram mais fácil. Aos demais amigos, em especial Danilo e Moisés, por sempre me ouvirem e me incentivarem a conseguir o melhor.

Ao professor Augusto César Cavalcanti de Oliveira por todo o seu auxílio e paciência durante a realização deste trabalho. Ao Departamento de Engenharia Elétrica da UFPE por todo o conhecimento que me foi passado e pelas diversas experiências enriquecedoras dentro e fora da sala de aula.

RESUMO

Os sistemas de proteção são utilizados para garantir a manutenção do suprimento de energia elétrica para os consumidores e também a integridade dos equipamentos. Essa proteção é feita através de uma gama de equipamentos, que basicamente são comandados por relés, dispositivos sensores que através de transformadores de medição são responsáveis pelo monitoramento de fatores do sistema elétrico como tensão, corrente, potência, entre outros. Quando detectada uma anomalia durante a operação do sistema, os relés enviam aos disjuntores um comando de abertura de seus contatos. Este trabalho tem como objetivo o estudo dos relés de sobrecorrente, direcional, distância e diferencial, equipamentos essenciais na proteção de sistemas elétricos de potência. Ao longo do texto será mostrado uma análise de seus modos de atuação, como os seus parâmetros podem ser ajustados e um estudo de caso de um sistema elétrico formado por 5 barras, utilizando dados de um estudo de curto-circuito realizado através de simulações do software ANAFAS.

Palavras-chave: Relé de sobrecorrente. Relé direcional. Relé de distância. Relé diferencial. ANAFAS.

ABSTRACT

Protection systems are used to ensure the maintenance of electricity supply for consumers as well as the integrity of equipment. This protection is done through a range of equipment, which are basically controlled by relays, sensor devices that through measurement transformers are responsible for the monitoring of electrical system factors such as voltage, current, power, among others. When an anomaly is detected during system operation, the relays send to the circuit breakers a command to open their contacts. This work has as a purpose the study of overcurrent, directional, distance and differential relays, essential equipments for the protection of power systems. Along this text it will be analyzed its actuation modes, how parameters can be adjusted and a case study of an electrical system formed by 5 busbars, using data from a short-circuit study simulated through ANAFAS software.

Keywords: Overcurrent relay. Directional relay. Distance relay. Differential relay. ANAFAS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de temporização para o relé de tempo inverso	24
Figura 2 - Curva de temporização para o relé de tempo definido	24
Figura 3 - Disco do relé de indução	25
Figura 4 - Curva Tempo Inverso do Relé de Sobrecorrente	26
Figura 5 - Diferentes Inclinações para as curvas de atuação dos relés de sobrecorrente de tempo inverso	27
Figura 6 - Característica do relé de sobrecorrente temporizado de tempo inverso com unidade instantânea.....	29
Figura 7 - Característica do relé de sobrecorrente temporizado de tempo definido com unidade instantânea.....	29
Figura 8 - Zona de atuação do relé de sobrecorrente 50/51.....	30
Figura 9 - Relé de neutro	31
Figura 10 - Zonas de ajuste do relé de neutro	32
Figura 11 - Coordenação dos tempos de atuação dos relés	34
Figura 12 - Coordenação de relés de sobrecorrente de tempo definido	35
Figura 13 - Coordenação de relés de sobrecorrente de tempo definido com elemento instantâneo	35
Figura 14 - Diagrama unifilar de um sistema de 4 barras	36
Figura 15 - Curva do relé C.....	37
Figura 16 - Curva do relé B.....	38
Figura 17 - Coordenação dos relés de sobrecorrente de tempo inverso	38
Figura 18 - Coordenação de relés de sobrecorrente de tempo Inverso com elemento instantâneo	39
Figura 19 - Diagrama unifilar do relé direcional de sobrecorrente	41
Figura 20 - Diagrama fasorial do relé direcional	42
Figura 21 - Diagrama fasorial do limiar de operação do relé direcional	43
Figura 22 - Polarização a 90°	45
Figura 23 - Polarização a 30°	45
Figura 24 - Polarização a 60°	46
Figura 25 - Princípio de funcionamento do relé impedância.....	47
Figura 26 - Região de operação do relé de impedância.....	49
Figura 27 - Zonas de atuação do relé de impedância	51
Figura 28 - Zonas de atuação do relé de impedância A	51
Figura 29 - Diagrama fasorial do limiar de operação do relé de admitância	54

Figura 30 - Diagrama fasorial $jXxR$ do relé de admitância	55
Figura 31 - Valor real do ajuste no relé admitância	56
Figura 32 - Ajustes de segunda e terceira zona do relé admitância	57
Figura 33 - Diagrama de atuação do relé de reatância	59
Figura 34 - Esquema da proteção diferencial comum	60
Figura 35 - Relé diferencial percentual	61
Figura 36 - Esquema do relé diferencial percentual	62
Figura 37 - Limiar de operação do relé diferencial percentual	63
Figura 38 - Sistema elétrico investigado	66
Figura 39 - Representação do Sistema Elétrico da Figura 37 no ANAFAS	68
Figura 40 - Diagrama fasorial da unidade direcional do relé D1 para um curto-circuito na barra 2	95
Figura 41 - Diagrama fasorial da unidade direcional do relé D4 para um curto-circuito na barra 2	96
Figura 42 - Diagrama fasorial da unidade direcional do relé D6 para um curto-circuito na barra 2	97
Figura 43 - Diagrama fasorial da unidade direcional do relé D1 para um curto-circuito na barra 3	98
Figura 44 - Diagrama fasorial da unidade direcional do relé D6 para um curto-circuito na barra 3	99
Figura 45 - Diagrama fasorial da unidade direcional do relé D1 para um curto-circuito na barra 4	100
Figura 46 - O Diagrama fasorial da unidade direcional do relé D7 para um curto-circuito na barra 4	101
Figura 47 - Diagrama fasorial da unidade direcional do relé D1 para um curto-circuito na barra 5	102
Figura 48 - Configuração do sistema elétrico durante um curto-circuito trifásico na barra 1	124
Figura 49 - Configuração do sistema elétrico durante um curto-circuito trifásico na barra 2	124
Figura 50 - Configuração do sistema elétrico durante um curto-circuito trifásico na barra 3	125
Figura 51 - Configuração do sistema elétrico durante um curto-circuito trifásico na barra 4	125
Figura 52 - Configuração do sistema elétrico durante um curto-circuito trifásico na barra 5	125

Figura 53 - Configuração do sistema elétrico durante um curto-circuito monofásico na barra 1	126
Figura 54 - Configuração do sistema elétrico durante um curto-circuito monofásico na barra 2	126
Figura 55 - Configuração do sistema elétrico durante um curto-circuito monofásico na barra 3	127
Figura 56 - Configuração do sistema elétrico durante um curto-circuito monofásico na barra 4	127
Figura 57 - Configuração do sistema elétrico durante um curto-circuito monofásico na barra 5	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Identificação dos relés de sobrecorrente.....	21
Tabela 2 - Tempo de atuação para um curto-circuito com M de 3,1.....	25
Tabela 3 - Coeficientes K, α , L obtidos pelas normas IEC e IEEE	28
Tabela 4 - Faixas de desequilíbrio para o ajuste do relé de neutro	33
Tabela 5 - Valores usuais para tempos de coordenação	34
Tabela 6 - Ajuste e temporização do relé de impedância de três zonas.....	52
Tabela 7 - Impedâncias do sistema elétrico da Figura 37	67
Tabela 8 - Curto-Circuito Trifásico em Cada Barra	69
Tabela 9 - Contribuições para o curto-circuito trifásico na barra 1.....	69
Tabela 10 - Contribuições para o curto-circuito trifásico na barra 2.....	70
Tabela 11 - Contribuições para o curto-circuito trifásico na barra 3.....	70
Tabela 12 - Contribuições para o curto-circuito trifásico na barra 4.....	70
Tabela 13 - Contribuições para o curto-circuito trifásico na barra 5.....	71
Tabela 14 - Resultados das correntes de curto-circuito obtidas pelo ANAFAS	71
Tabela 15 - Contribuições para o curto-circuito monofásico na barra 1.....	72
Tabela 16 - Contribuições para o curto-circuito monofásico na barra 2.....	72
Tabela 17 - Contribuições para o curto-circuito monofásico na barra 3.....	72
Tabela 18 - Contribuições para o curto-circuito monofásico na barra 4.....	73
Tabela 19 - Contribuições para o curto-circuito monofásico na barra 5.....	73
Tabela 20 - Contribuição do trecho do disjuntor D1 durante um curto-circuito a 85% da linha entre as barras 1 e 2.....	74
Tabela 21 - Contribuição do trecho do disjuntor D2 durante um curto-circuito a 85% da linha entre as barras 2 e 1.....	74
Tabela 22 - Contribuição do trecho do disjuntor D3 durante um curto-circuito a 85% da linha entre as barras 2 e 3.....	74
Tabela 23 - Contribuição do trecho do disjuntor D4 durante um curto-circuito a 85% da linha entre as barras 3 e 2.....	75
Tabela 24 - Contribuição do trecho do disjuntor D8 durante um curto-circuito a 85% da linha entre as barras 2 e 5.....	75
Tabela 25 - Relés de sobrecorrente com unidade direcional durante curto-circuito trifásico na barra 2.....	103
Tabela 26 - Relés de sobrecorrente com unidade direcional durante curto-circuito trifásico na barra 3.....	103

Tabela 27 - Relés de sobrecorrente com unidade direcional durante curto-circuito trifásico na barra 4.....	103
Tabela 28 - Relés de sobrecorrente com unidade direcional durante curto-circuito trifásico na barra 5.....	104
Tabela 29 - Relés de sobrecorrente de neutro durante curto-circuito monofásico na barra 2.....	118
Tabela 30 - Relés de sobrecorrente de neutro durante curto-circuito monofásico na barra 3.....	119
Tabela 31 - Relés de sobrecorrente de neutro durante curto-circuito monofásico na barra 4	119
Tabela 32 - Relés de sobrecorrente de neutro durante curto-circuito monofásico na barra 5.....	119

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANAFAS	Programa de Análise de Faltas Simultâneas
ANAREDE	Programa de Análise de Redes Elétricas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
LT	Linha de Transmissão
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
RTC	Relação de Transformação de Corrente
RTP	Relação de Transformação de Tensão
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potência
PU	Por Unidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	MOTIVAÇÃO	18
1.2	OBJETIVO.....	18
2	RELÉS DE PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS	19
2.1	RELÉ DE SOBRECORRENTE	20
2.1.1	Relés de Sobrecorrente Eletromecânicos.....	21
2.1.2	Ajuste do Relé	22
2.1.3	Temporização	23
2.1.3.1	Relé de Sobrecorrente de Tempo Inverso.....	24
2.1.3.2	Relés Digitais	27
2.1.4	Relé de Sobrecorrente Temporizado com Elemento Instantâneo – 50/51.....	28
2.1.4.1	Ajuste da Unidade Instantânea	30
2.1.5	Relé de Sobrecorrente de Neutro	31
2.1.5.1	Ajuste do Relé de Sobrecorrente de Neutro Temporizado – 51N	32
2.1.5.2	Ajuste do Relé de Sobrecorrente de Neutro Instantâneo – 50N.....	33
2.1.6	Coordenação de Relés de Sobrecorrente	33
2.1.6.1	Coordenação de Relés de Sobrecorrente de Tempo Definido	34
2.1.6.2	Coordenação de Relés de Sobrecorrente de Tempo Definido com Elemento Instantâneo.....	35
2.1.6.4	Coordenação de Relés de Sobrecorrente de Tempo Inverso com Elemento Instantâneo.....	39
2.1.6.4	Coordenação de Relés Digitais	40
2.2	RELÉ DIRECIONAL	40
2.2.1	Relé de Sobrecorrente Direcional – 67	40
2.2.1.1	Princípio de Funcionamento do Relé de Sobrecorrente Direcional – 67	41
2.2.1.2	Polarização.....	44
2.2.1.3	Proteção com Relé de Sobrecorrente e Relé de Sobrecorrente Direcional...	46
2.2.2	Relé Direcional de Potência – 32	46
2.3	RELÉ DE DISTÂNCIA – 21	47
2.3.1	Relé de Impedância.....	47

2.3.1.1	Zonas de Atuação e Ajuste do Relé de Impedância.....	51
2.3.2	Relé de Admitância	52
2.3.2.1	Ajuste do Relé de Admitância	55
2.4	RELÉ DIFERENCIAL – 87	59
2.4.1	Relé Diferencial Comum	60
2.4.2	Relé Diferencial Percentual	60
2.4.2.1	Ajustes do Relé Diferencial Percentual	63
2.4.2.2	Ajuste Do Relé Diferencial Percentual na Proteção do Transformador	64
3	ESTUDO DE CASO	65
3.1	SISTEMA INVESTIGADO E SUAS CARACTERÍSTICAS.....	65
3.1.1	Parâmetros do Sistema.....	67
3.2	SIMULAÇÃO	68
3.2.1	Curto-Circuito Trifásico Nas Barras	68
3.2.1.1	Contribuições Durante o Curto-Circuito Trifásico	69
3.2.2	Curto-Circuito Monofásico nas Barras.....	71
3.2.2.1	Contribuições Durante o Curto-Circuito Monofásico	72
3.2.3	Curto-Circuitos à 85% da Linha de Transmissão	74
4	AJUSTES DOS RELÉS	75
4.1	RELÉS DE SOBRECORRENTE DIRECIONAL DE FASE – 50/51	75
4.1.1	Ajuste de Corrente	75
4.1.1.1	Relé associado ao Disjuntor D1:	76
4.1.1.2	Relé associado ao Disjuntor D2	77
4.1.1.3	Relé associado ao Disjuntor D3	78
4.1.1.4	Relé Associado ao Disjuntor D4.....	79
4.1.1.5	Relé Associado ao Disjuntor D5.....	80
4.1.1.6	Relé Associado ao Disjuntor D6.....	81
4.1.1.7	Relé Associado ao Disjuntor D7.....	81
4.1.1.8	Relé Associado ao Disjuntor D8.....	82
4.1.1.9	Relé Associado ao Disjuntor D9.....	83
4.1.1.10	Relé Associado ao Disjuntor D10.....	84
4.1.2	Coordenação do Tempo de Atuação das Unidades Temporizadas de Fase	84
4.1.2.1	Curto-Circuito Trifásico na Barra 2	84
4.1.2.2	Curto-Circuito Trifásico na Barra 3	86

4.1.2.3	Curto-Circuito Trifásico na Barra 4	89
4.1.2.4	Curto-Circuito Trifásico na Barra 5	92
4.1.2.5	Curto-Circuito na Trifásico Barra 1	94
4.1.3	Ajuste da Unidade Direcional	95
4.1.3.1	Curto-Circuito Trifásico na Barra 2	95
4.1.3.2	Curto-Circuito Trifásico na Barra 3	97
4.1.3.3	Curto-Circuito Trifásico na Barra 4	99
4.1.3.4	Curto-Circuito Trifásico na Barra 5	101
4.1.4	Relés atuantes por Curto-Circuito Trifásico	102
4.2	AJUSTES DOS RELÉS DE DISTÂNCIA DE FASE – 21.....	104
4.2.1	Relé Associado ao Disjuntor D4	105
4.2.2	Relé Associado ao Disjuntor D3	105
4.3	RELÉS DE SOBRECORRENTE DE NEUTRO – 50/51N.....	106
4.3.1	Ajustes de Corrente da Unidade de Sobrecorrente de Neutro	106
4.3.1.1	Relé associado ao disjuntor D1	106
4.3.1.2	Relé Associado ao Disjuntor D2	107
4.3.1.3	Relé Associado ao Disjuntor D3	108
4.3.1.4	Relé Associado ao Disjuntor D4	109
4.3.1.5	Relé Associado ao Disjuntor D5	110
4.3.1.6	Relé Associado ao Disjuntor D6	110
4.3.1.7	Relé Associado ao Disjuntor D7	111
4.3.1.8	Relé Associado ao Disjuntor D8	111
4.3.1.9	Relé Associado ao Disjuntor D9	112
4.3.1.10	Relé Associado ao Disjuntor D10	113
4.3.2	Coordenação dos Tempos de Atuação das Unidades Temporizadas de Neutro	113
4.3.2.1	Curto-Circuito Monofásico na Barra 2	113
4.3.2.2	Curto-Circuito Monofásico na Barra 3	114
4.3.2.3	Curto-Circuito Monofásico na Barra 4	116
4.3.2.4	Curto-Circuito Monofásico na Barra 5	117
4.3.2.5	Curto-Circuito Monofásico na Barra 1	118
4.3.3	Relés atuantes por Curto-Circuito Monofásico	118
4.4	AJUSTE DO RELÉ DIFERENCIAL PERCENTUAL PARA PROTEÇÃO DO TRANSFORMADOR.....	119

5	CONCLUSÃO	122
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	122
	REFERÊNCIAS.....	123
	APÊNDICE A – Configurações do Sistema durante as Simulações	
	dos Curtos-Circuitos	124
A.1	CURTOS-CIRCUITOS TRIFÁSICOS.....	124
A.2	CURTOS-CIRCUITOS MONOFÁSICOS	126

1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico de potência interligado foi criado com o intuito de atender os centros consumidores às diversas fontes de energia, levando em consideração a diversidade da matriz energética e a distância a ser percorrida, assegurando a continuidade, conformidade e flexibilidade do abastecimento de energia elétrica. No entanto, o sistema elétrico está sempre sujeito a eventuais falhas devido a situações fora do padrão de operação, causadas por fatores que podem ser internos ou externos.

O curto-circuito é a falha mais frequente em sistemas de potência, responsável por dar origem a elevadas correntes que circulam todos os elementos energizados, causando grandes distúrbios de tensão por toda extensão do sistema elétrico, o que é capaz de trazer danos às instalações das unidades consumidoras e aos seus equipamentos. Outra anormalidade comum em sistemas de potência é a sobrecarga, agente causador de danos significativos em materiais (MAMEDE, 2011).

Para garantir a manutenção do suprimento de energia elétrica para os consumidores e também a integridade dos equipamentos é necessário proteger sistemas elétricos de potência. Um dos elementos fundamentais empregado nesse tipo de proteção são os relés, dispositivos sensores que são responsáveis pelo comando de disjuntores durante circunstâncias anormais de funcionamento do sistema que está sendo protegido.

Os relés são elementos imprescindíveis no sistema elétrico de proteção. São sensores responsáveis por monitorar as condições de operação do Sistema Elétrico. No caso de alguma anomalia, como a de um curto-circuito, a elevada corrente de curto-circuito sensibiliza o relé, que opera enviando um sinal para que o disjuntor abra seus contatos, isolando o trecho com defeito (KINDERMANN, 2005).

Esses dispositivos são encarregados de analisar diversos fatores do sistema elétrico como tensão, corrente, potência, entre outros e são divididos em vários tipos. Dessa forma, para que o sistema de proteção possa atuar de forma rápida, seletiva e segura, tomando esses fatores como critério, é necessário que os parâmetros dos relés sejam ajustados corretamente.

1.1 MOTIVAÇÃO

Realizar e discutir um estudo de proteção de um sistema elétrico disponibilizado em uma importante bibliografia acadêmica, Proteção de Sistemas Elétricos de João Mamede Filho. Além de se familiarizar com o software ANAFAS, relevante ferramenta de análise de curto-circuito utilizada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Universidades, entre outras entidades.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo discutir um dos elementos principais de um sistema de proteção: os relés. O texto visa apresentar detalhes do funcionamento e de que forma são realizados os ajustes dos relés de sobrecorrente, distância, direcional e diferencial. Além de mostrar suas aplicações através de um estudo de caso de um sistema elétrico de alta tensão contendo 5 barras.

Os valores de corrente de curto-circuito de cada barra e de curtos-circuitos intermediários foram obtidos através de simulações realizadas no software ANAFAS.

2 RELÉS DE PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

A proteção dos sistemas elétricos de potência é feita por esquemas de proteção formados por uma gama de equipamentos, entre eles os transformadores de corrente, transformadores de potência, fusíveis e disjuntores, que basicamente são comandados pelos relés. Esses dispositivos têm como principal atribuição monitorar e identificar os eventuais defeitos, localizá-los gerando alertas aos operadores do sistema e, a depender do caso, promover a abertura de disjuntores para que o trecho defeituoso possa ser retirado, mantendo o restante de sistema em operação (KINDERMANN, 2005).

Os relés são definidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) como um dispositivo através do qual um equipamento elétrico pode ser operado no momento em que são detectadas alterações nas condições nominais deste equipamento ou do circuito em que ele está inserido, ou em outro equipamento ou circuito associado.

Esses dispositivos podem ser classificados quanto a sua construção da seguinte forma:

- relés eletromecânicos (indução eletromagnética) - funcionam usando um princípio semelhante ao de um motor elétrico, se baseando na indução e ação de correntes a partir de campos magnéticos produzidos por um circuito fixo em um condutor móvel formado por um disco ou material metálico (KINDERMANN, 2005);
- relés eletrônicos ou estáticos - são construídos com dispositivos eletrônicos, sem que exista nenhum dispositivo mecânico em movimento. Sua regulação é baseada na mudança física no parâmetro de algum componente, como por exemplo variação do reostato, capacitância e etc;
- relés digitais - são compostos por circuitos eletrônicos equipados com chips de grande capacidade de processamento; programas dedicados são responsáveis por processar as informações vindas dos transformadores de medição (MAMEDE, 2011).

Também é possível classificar os relés de acordo com a sua temporização: instantâneo (sem retardo proposital) e temporizado (tempo inverso e tempo definido).

Os relés ainda são categorizados pela função que desempenham, sendo levado em consideração a grandeza que ele monitora e sua forma de atuação. Esse trabalho tem foco em 4 tipos de relés específicos:

- relé de sobrecorrente;
- relé direcional;
- relé de distância;
- relé diferencial.

2.1 RELÉ DE SOBRECORRENTE

São todos os relés responsáveis por atuar quando detectada uma corrente com valor superior à sua corrente de ajuste, podendo ser acionado de forma instantânea ou temporizada, conforme a necessidade do sistema elétrico protegido (KINDERMANN, 2005).

Esses relés podem ser divididos segundo o tipo de acionamento do disjuntor como:

- relés primários ou relés de ação direta - agem de forma mecânica sobre os disjuntores através de varetas isolantes; os relés primários não são aceitos pela norma brasileira NBR 14039 para a proteção geral de unidades consumidoras supridas em média tensão (MAMEDE, 2011);
- relés secundários ou relés de ação indireta - operam os disjuntores fechando um contato interno, introduzindo uma fonte externa, geralmente um banco de baterias sobre a bobina de abertura desse disjuntor; são conectados por transformadores de corrente ligados ao circuito que se deseja proteger e comumente encontrados em sistemas de proteção de subestações de sistemas de potência das concessionárias de energia elétrica (MAMEDE, 2011).

A Norma IEE/ANSI C37.2 identifica os relés de sobrecorrente levando em conta sua função e se possuem elemento temporizado, como é possível observar na Tabela 1.

Tabela 1 - Identificação dos relés de sobrecorrente

Nomenclatura	Denominação
50	Relé de fase instantâneo
51	Relé de fase temporizado
50N	Relé de neutro instantâneo
51N	Relé de neutro temporizado

Fonte: IEE/ANS (2008).

2.1.1 Relés de Sobrecorrente Eletromecânicos

Os relés de sobrecorrente eletromecânicos possuem como característica principal ter o seu funcionamento baseado em movimentos mecânicos causados pelo acoplamento elétrico e magnético. Esses relés podem ter dois modos de atuação diferentes: através de atração eletromagnética ou de indução eletromagnética.

2.1.1.2 Relés de Atração Eletromagnética

Se utiliza do princípio de funcionamento de um eletroímã, onde um êmbolo ou alavanca sempre irá se movimentar, o que permite dividir esse tipo de relé em dois grupos:

- relé de êmbolo - no momento em que acontece a sensibilização deste dispositivo, o campo magnético criado irá atrair um êmbolo e fechar o contato do circuito DC, consequentemente ativando o circuito de disparo do disjuntor;
- relé de alavanca - o campo magnético criado pela corrente que sensibiliza o relé irá rotacionar uma alavanca, acionando o circuito DC de disparo da bobina do disjuntor.

A operação dos dois relés irá acontecer instantaneamente, quando a corrente do secundário do transformador de corrente aos quais estes dispositivos estiverem conectados ultrapassar a corrente de seus ajustes.

Com isso posto, é possível chegar a três importantes conceitos de proteção de sistemas elétricos:

- limiar de operação do relé - valor de campo magnético mínimo responsável pelo início da operação do relé, caracterizado pelo equilíbrio das forças magnéticas e da mola (OLIVEIRA, 2019);
- pick-up - termo genérico utilizado para definir a menor corrente possível responsável pela operação do relé (OLIVEIRA, 2019);
- drop-up - termo genérico utilizado para desoperação do relé (OLIVEIRA, 2019).

2.1.2 Ajuste do Relé

Para que o relé funcione adequadamente e proteja o sistema elétrico de forma segura, é necessário que a sua corrente seja ajustada de acordo com a inequação mostra em (2.1) (OLIVEIRA, 2019).

$$\frac{(1,4 \text{ a } 1,5) \times I_N}{RTC} \leq I_{ajuste} \leq \frac{I_{cc_{min}}}{a \times RTC} \quad (2.1)$$

onde:

I_N é a corrente nominal de carga;

I_{ajuste} é a corrente de ajuste do relé;

$I_{cc_{min}}$ é a corrente de curto-circuito mínimo no final do trecho do sistema elétrico protegido;

RTC é a relação de transformação do transformador de corrente no qual o relé está conectado;

a é igual a 1,5 para relés eletromagnéticos ou 1,1 para relés digitais.

A menor corrente de curto-circuito no trecho protegido é a do curto bifásico e pode ser calculada pela equação mostrada (2.2) (OLIVEIRA, 2019).

$$I_{cc_{2\phi}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_{cc_{3\phi}} \quad (2.2)$$

Visando dar maior sensibilidade ao relé, é indicado escolher um valor mais próximo possível do limite inferior. É importante também que os relés suportem variações de carga de 40% a 50% que podem acontecer durante a operação normal

do sistema elétrico, o que justifica o fator de 1,4 a 1,5 da inequação, e ajustada para menor corrente de curto-circuito (OLIVEIRA, 2019).

A corrente de ajuste do relé é igual ao seu tap, que também corresponde ao limiar de operação. Para que essa situação fosse monitorada, foi criada o múltiplo do relé (M), termo responsável por indicar o número de vezes que a corrente de defeito é maior do que seu tap, como mostrado na equação (2.3).

$$M = \frac{I_s}{tap} = \frac{I_s}{I_{ajuste}} = \frac{I_p}{RTC \times I_{ajuste}} \quad (2.3)$$

onde:

I_s é a corrente de defeito no secundário do TC no qual o relé está conectado;

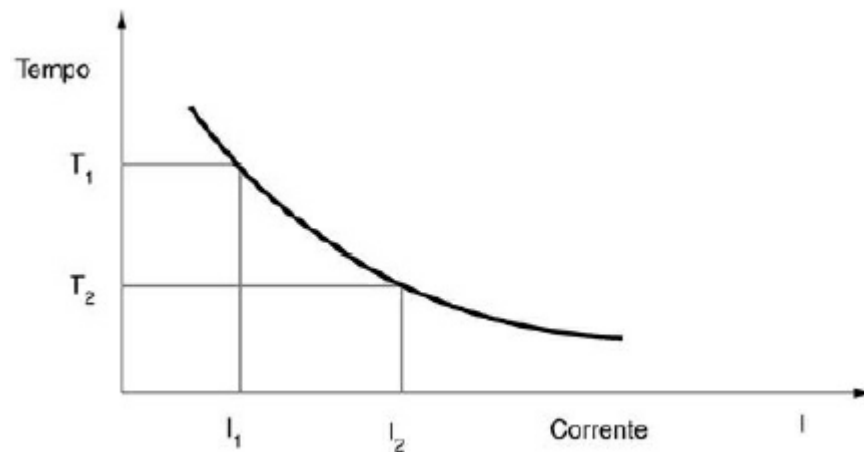
I_p é a corrente de defeito no primário do TC.

2.1.3 Temporização

Por questões de coordenação do sistema de proteção é necessário que os relés possuam uma determinada temporização antes que atue, fazendo com o que os contatos dos disjuntores sejam abertos. Diante disso, é possível classificar os relés quanto a seu tempo de atuação, como:

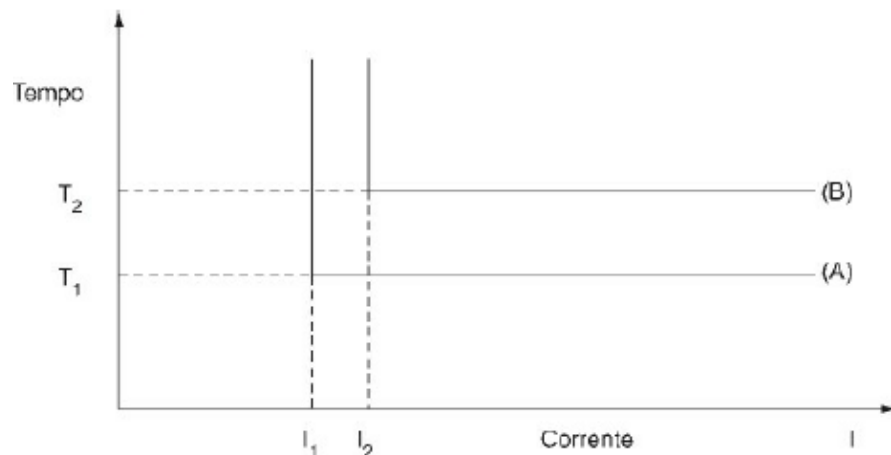
- relé Instantâneo - sua atuação apenas depende do tempo necessário para que a inércia natural do seu mecanismo seja superada (MAMEDE, 2011);
- relé de sobrecorrente de tempo inverso - seu tempo de atuação é caracterizado por uma curva de temporização normalmente inversa, de forma que seu atraso é função do valor da corrente de ajuste ou do múltiplo do relé (M), como representado na Figura 1. Esses relés apresentam um grupo de curvas com declividades variadas em razão das diferentes configurações dos sistemas de proteção (MAMEDE, 2011);
- relé de sobrecorrente de tempo definido - sua temporização independe do valor da corrente de ajuste. Seu ajuste depende da sua aplicação no projeto de proteção. É possível ver este tipo de curva representada na Figura 2 (MAMEDE, 2011).

Figura 1 - Curva de temporização para o relé de tempo inverso



Fonte: MAMEDE (2011).

Figura 2 - Curva de temporização para o relé de tempo definido



Fonte: MAMEDE (2011).

2.1.3.1 Relé de Sobrecorrente de Tempo Inverso

Sua corrente deve ser ajustada da mesma forma como mostrada na seção 2.1.2 pela inequação (2.1).

Nesse tipo de relé, não é escolhido o tempo de atuação e sim a curva de atuação, levando em consideração a coordenação dos relés presentes na proteção. Essa coordenação é feita através de uma escada de tempos diferentes para mesma corrente de curto-circuito. Com isso, é possível se obter uma sequência de seletividade na abertura dos disjuntores e tirar de operação apenas o trecho

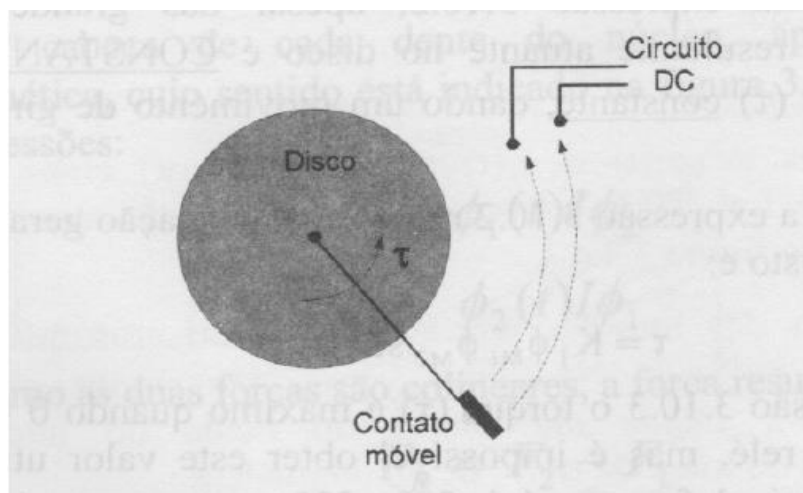
defeituoso, preservando o funcionamento do trecho que não foi afetado pela falha (OLIVEIRA, 2019).

Os fabricantes demarcam as curvas de atuação dos relés em porcentagem ou na base 10, da seguinte forma:

- curvas - 0,5 – 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9 – 10;
- curvas - 5% - 10% - 20% - 30% - 40% - 50% - 60% - 70% - 80% - 90% - 100%.

Essas curvas correspondem as diversas posições dos distanciamentos entre contatos fixos e móvel. A Figura 3 mostra um disco do relé de indução e sua alavanca de tempo, que produz uma curva inversa que depende da sua posição (KINDERMANN, 2005).

Figura 3 - Disco do relé de indução



Fonte: OLIVEIRA (2019).

O tempo de atuação é obtido sabendo-se o múltiplo do relé (M) e a curva. Como exemplo, para um curto-circuito com múltiplo M de 3,1, tem-se:

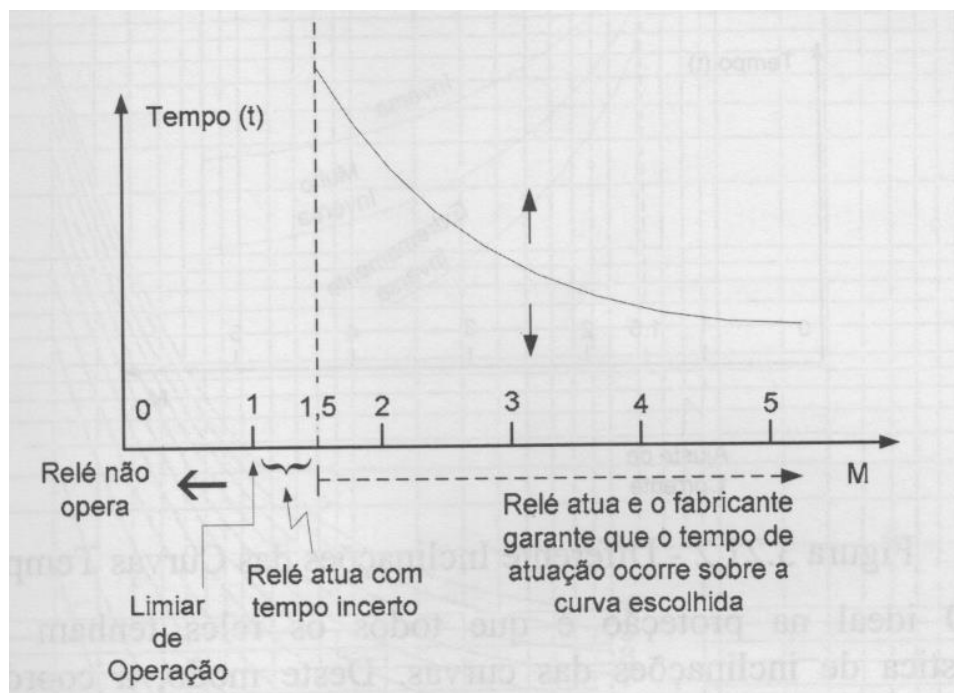
Tabela 2 - Tempo de atuação para um curto-circuito com M de 3,1

Curva	Tempo (s)
100%	6
50%	3
10%	0,6

Fonte: OLIVEIRA (2019).

A eficiência da atuação dos relés eletromecânicos para um múltiplo entre 1 e 1,5 não pode ser garantida, vide Figura 4, pois nesse intervalo o relé possui um baixo torque e o fechamento completo dos seus contatos não é assegurado. Isso se deve a fatores como o atrito dos mancais de rotação do disco, a elasticidade não repetitiva e não perfeita da ação da mola de retenção, entre outros (KINDERMANN, 2005).

Figura 4 - Curva Tempo Inverso do Relé de Sobrecorrente

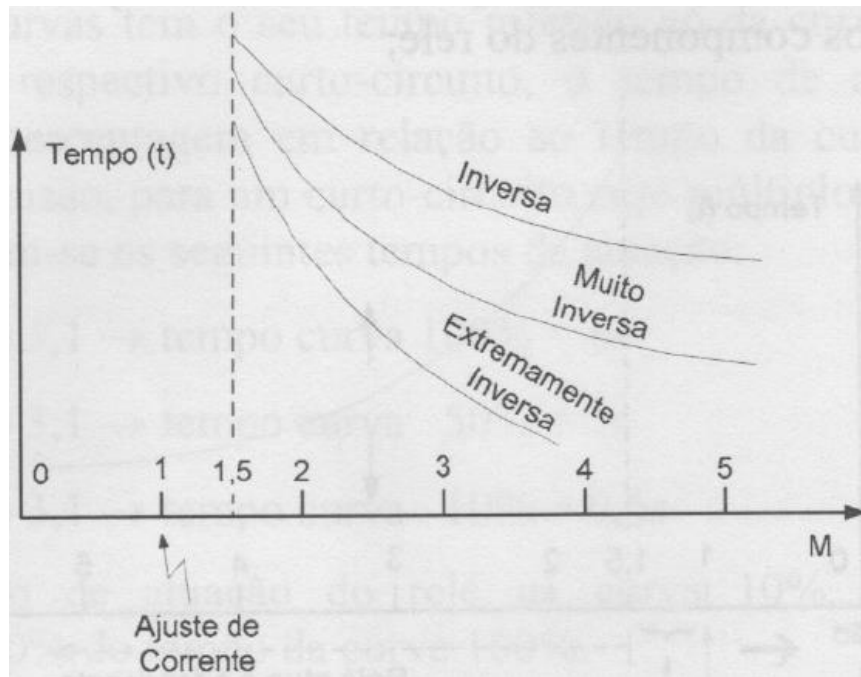


Fonte: KINDERMANN (2005).

Os relés de sobrecorrente de tempo inverso podem ser divididos quanto a inclinação das suas curvas, como visto na Figura 5, em:

- inversa;
- muito inversa;
- extremamente inversa.

Figura 5 - Diferentes Inclinações para as curvas de atuação dos relés de sobrecorrente de tempo inverso



Fonte: KINDERMANN (2005).

2.1.3.2 Relés Digitais

Os relés digitais atuam associando a curva de a uma função que reproduza a curva normalizada. Suas principais vantagens, em relação às curvas de tempo são:

- a possibilidade de ajustar as inclinações de suas curvas de tempo;
- personalização das curvas;
- emular as curvas normalizadas de atuação dos relés eletromecânicos (KINDERMANN, 2005).

A função que define a curva de temporização é dada pela expressão (2.4) (OLIVEIRA, 2019):

$$t_{rele} = T_{curva} \times \left(\frac{K}{M^{\alpha} - 1} + L \right) \quad (2.4)$$

em que:

t_{rele} é o tempo de atuação do relé em segundos (tempo de trip);

T_{curva} ou TMS é o múltiplo de tempo das curvas do relé;

M é o múltiplo do relé calculado pela equação (2.3);

K , α , L são coeficientes obtidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Coeficientes K , α , L obtidos pelas normas IEC e IEEE

Norma	Tipo de curva	K	α	L
IEC	Inversa	0,14	0,02	0
	Muito Inversa	13,5	1	0
	Extremamente Inversa	80	2	0
IEEE	Inversa	0,515	0,02	1,14
	Muito Inversa	196,1	2	4,91
	Extremamente Inversa	282	2	1,217

Fonte: KINDERMANN (2005).

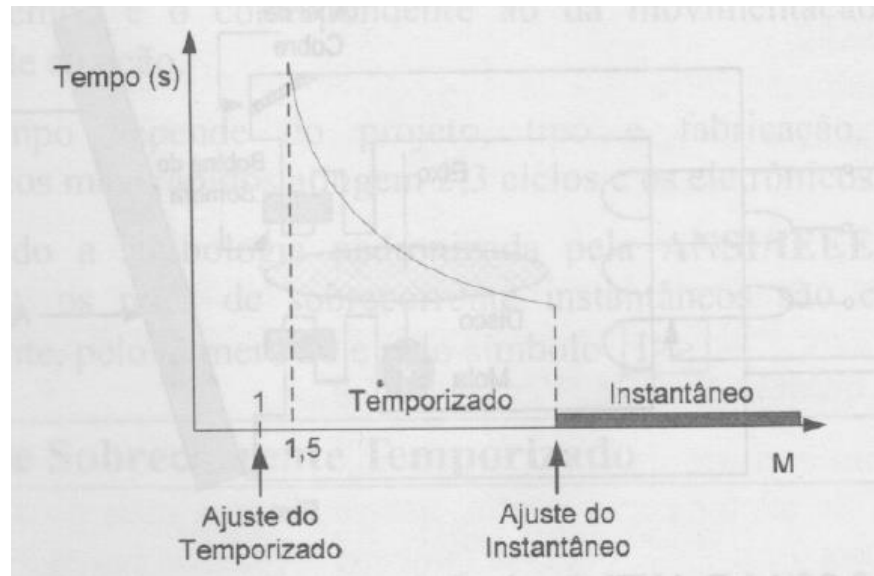
2.1.4 Relé de Sobrecorrente Temporizado com Elemento Instantâneo – 50/51

Os relés de sobrecorrente instantâneo (50), como mencionado anteriormente, são acionados de modo instantâneo (2,3 ciclos para os relés eletromecânico e 0,7 ciclos para os digitais) para um valor de corrente que ultrapasse o valor da corrente de seu ajuste. Enquanto que os relés de sobrecorrente temporizados (51) tem seu tempo de atuação definido, podendo ser de tempo definido ou de tempo inverso.

O relé de sobrecorrente temporizado com elemento instantâneo, ou simplesmente 50/51, conta com os dois tipos de proteção:

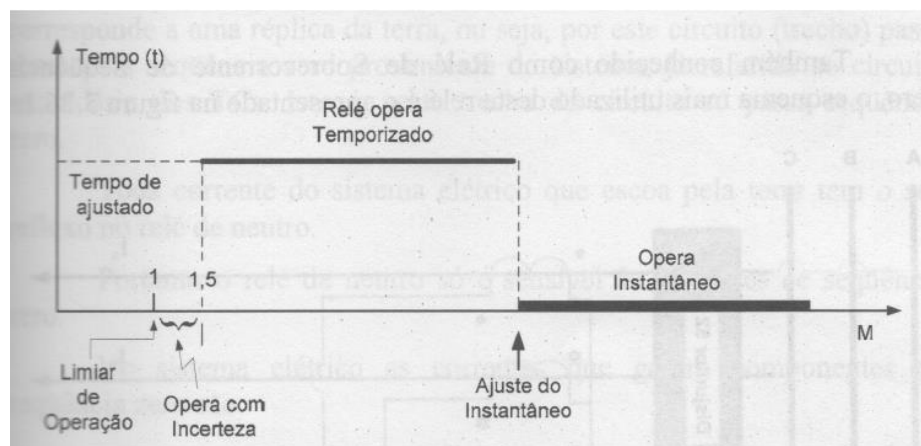
- sobrecorrente temporizado de tempo inverso com unidade instantânea conforme a ilustração contida na Figura 6;
- sobrecorrente temporizado de tempo definido com unidade instantânea conforme a ilustração contida na Figura 7.

Figura 6 - Característica do relé de sobrecorrente temporizado de tempo inverso com unidade instantânea



Fonte: KINDERMANN (2005).

Figura 7 - Característica do relé de sobrecorrente temporizado de tempo definido com unidade instantânea



Fonte: KINDERMANN (2005).

A atuação da unidade temporizada (51) acontecerá quando a inequação (2.5) for obedecida (KINDERMANN, 2005):

$$1,5I_{\text{ajuste do relé}} \leq I_{\text{corrente de curto-circuito}} \leq I_{\text{ajuste da unidade instantânea}} \quad (2.5)$$

Para o acionamento da unidade instantânea (50) a inequação (2.6) deve ser atendida (KINDERMANN, 2005):

$$I_{\text{corrente de curto-circuito}} > I_{\text{ajuste da unidade instantânea}} \quad (2.6)$$

2.1.4.1 Ajuste da Unidade Instantânea

O ajuste da corrente da unidade instantânea deve ser feito para um valor maior do que a corrente de ajuste da unidade temporizada. Esse ajuste deve ser feito levando em consideração na coordenação, de forma a não causar sobreposição das zonas de atuação de outros relés. Para que isso possa ser garantido, normalmente, se ajusta a unidade instantânea para um curto-circuito trifásico a 85% da linha de transmissão protegida. Na Figura 8 é possível visualizar a zona de proteção da unidade instantânea (OLIVEIRA, 2019).

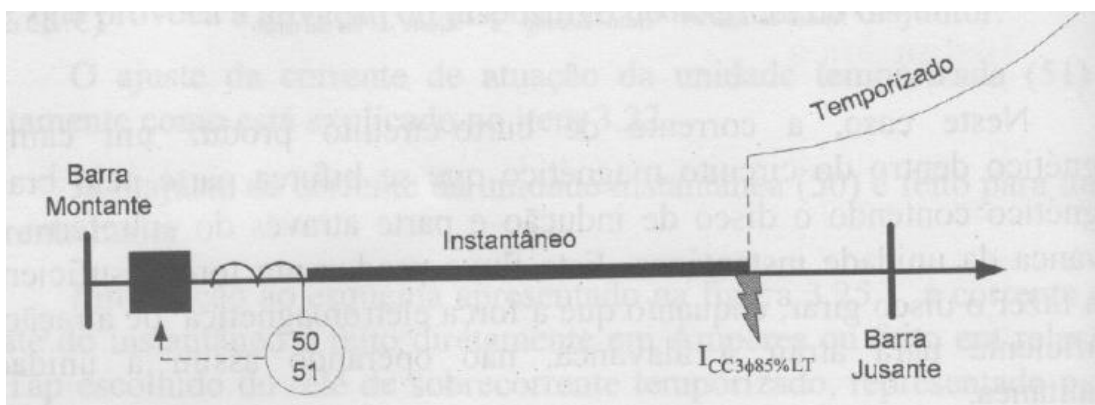
$$I_{\text{ajuste unidade instantânea}} = \frac{I_{cc3\phi_{85\%LT}}}{RTC} \quad (2.7)$$

em que:

$I_{cc3\phi_{85\%LT}}$ é a corrente de curto-circuito trifásico a 85% da linha de transmissão protegida;

RTC é a relação de transformação do transformador de corrente do qual o relé está conectado.

Figura 8 - Zona de atuação do relé de sobrecorrente 50/51

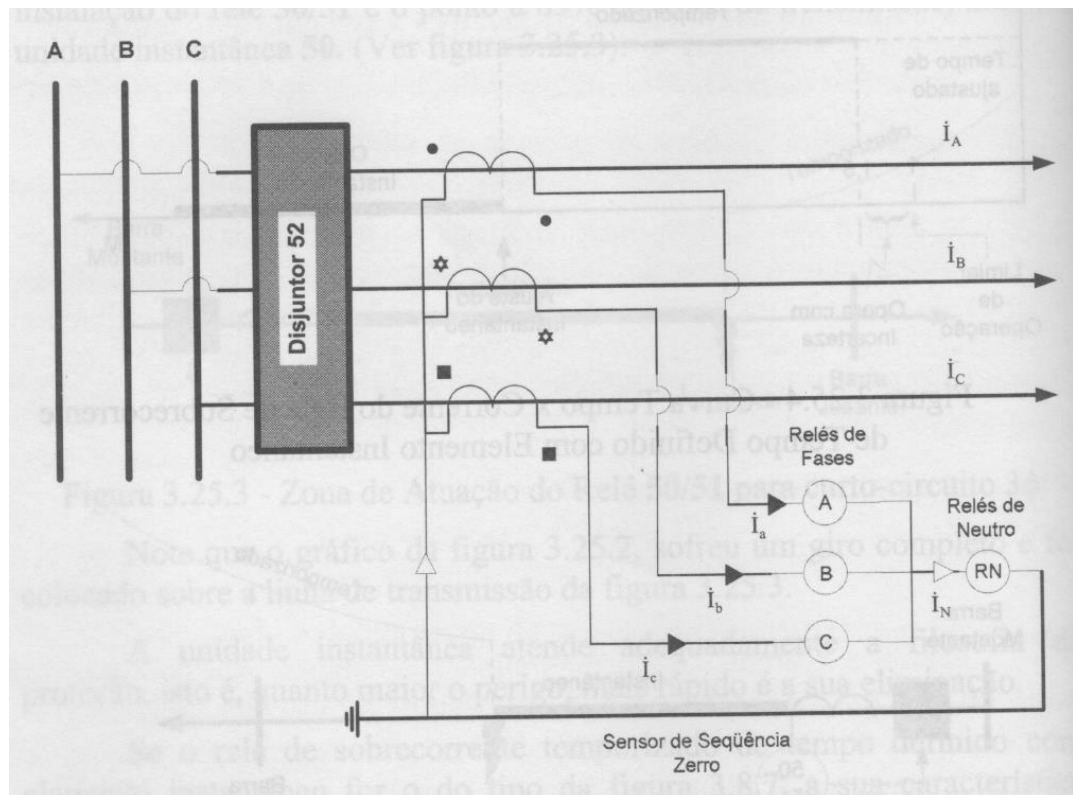


Fonte: KINDERMANN (2005).

2.1.5 Relé de Sobrecorrente de Neutro

Também conhecido como relé de sequência zero devido ao fato de ser sensível às componentes de sequência zero, como mostrada pela Figura 9 e a expressão (2.11), produzidas por correntes como de curto-circuito monofásico, curto-circuito bifásico com a terra, cargas desequilibradas aterradas e abertura de fases de sistemas aterrados (KINDERMANN, 2005).

Figura 9 - Relé de neutro



Fonte: KINDERMANN (2005).

A partir do esquema da Figura 9, aplicando-se a 1ª Lei de Kirchhoff e o conceito de componentes simétricas, tem-se:

$$I_N = I_a + I_b + I_c \quad (2.8)$$

$$I_N = (I_0 + I_1 + I_2) + (I_0 + \alpha^2 I_1 + \alpha I_2) + (I_0 + \alpha I_1 + \alpha^2 I_2) \quad (2.9)$$

$$I_N = (I_0 + I_0 + I_0) + (I_1 + \alpha^2 I_1 + \alpha I_1) + (I_2 + \alpha I_2 + \alpha^2 I_2) \quad (2.10)$$

$$I_N = 3I_0 \quad (2.11)$$

onde:

I_0 é a corrente de sequência zero;

I_1 é a corrente de sequência positiva;

I_2 é a corrente de sequência negativa;

α é o operador.

2.1.5.1 Ajuste do Relé de Sobrecorrente de Neutro Temporizado – 51N

Para uma operação normal do sistema elétrico aterrado as cargas devem estar equilibradas ou apresentarem um pequeno desequilíbrio dentro de uma faixa aceitável, o que resultaria em não existir corrente passando pelo relé neutro ou um baixo valor que não é capaz de sensibilizá-lo que depende da zona onde ele está instalado, como mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Zonas de ajuste do relé de neutro



Fonte: KINDERMANN (2005).

Seu ajuste deve seguir a inequação (2.12) (OLIVEIRA, 2019):

$$\frac{(10\% \text{ a } 45\%) \times I_N}{RTC} \leq I_{ajuste\ 51N} \leq \frac{I_{cc1\phi}}{\alpha \times RTC} \quad (2.12)$$

onde:

$I_{ajuste\ 51N}$ é a corrente de ajuste do relé de neutro;

(10% a 45%) representa a faixa de ajuste da zona do relé de neutro;

RTC é a relação de transformação do transformador de corrente do qual o relé está conectado;

α é igual a 1,5 para relés eletromagnéticos ou 1,1 para relés digitais.

É comum se considerar as seguintes faixas de desequilíbrio para o ajuste do relé de neutro:

Tabela 4 - Faixas de desequilíbrio para o ajuste do relé de neutro

Gerador síncrono	10 a 22% I_N
Linha de transmissão	22 a 33% I_N
Carga	33 a 45% I_N

Fonte: OLIVEIRA (2019)

2.1.5.2 Ajuste do Relé de Sobrecorrente de Neutro Instantâneo – 50N

Seu ajuste é semelhante ao ajuste da unidade instantânea de fase, mas agora é utilizado a corrente de curto-circuito monofásico a 85% da linha de transmissão (OLIVEIRA, 2019).

$$I_{ajuste\ 50N} = \frac{I_{cc1\phi_{85\%LT}}}{RTC} \quad (2.13)$$

2.1.6 Coordenação de Relés de Sobrecorrente

Uma parte fundamental de um projeto de proteção é a coordenação de atuação dos relés, que pode garantir seletividade, o que evita prejuízos causados por um desligamento de trecho sem necessidade de interrupção, e velocidade, protegendo equipamentos de danos causados por se submeterem continuamente a valores altos de correntes ocasionadas por falhas.

Na coordenação, para qualquer corrente de curto-circuito, existe uma escada de tempo no sentido do relé vanguarda para os relés de retaguarda, de modo a garantir e permitir seletividade ao desligamento do sistema (KINDERMANN, 2005).

Tempo de Coordenação (Δt) é um termo criado para definir a mínima diferença de tempo que dois relés mais próximos da rede de proteção devem ter para que a coordenação possa ser assegurada. É uma forma de garantir que a proteção mais próxima do defeito deve eliminá-lo, evitando que o relé a montante ative o seu circuito de abertura dos contatos do disjuntor. A equação (2.14) relaciona os tempos de

atuação dos relés do sistema elétrico da Figura 11 com o tempo de coordenação (OLIVEIRA, 2019).

$$t_{montante} - t_{jusante} \geq \Delta t \quad (2.14)$$

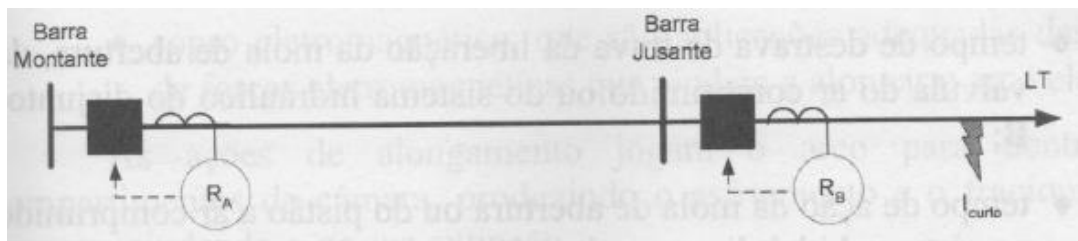
onde:

$t_{montante}$ é o tempo de atuação do relé a montante;

$t_{jusante}$ é o tempo de atuação do relé a jusante;

Δt é o tempo de coordenação.

Figura 11 - Coordenação dos tempos de atuação dos relés



Fonte: KINDERMANN (2005).

Usualmente os tempos de coordenação são escolhidos de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 - Valores usuais para tempos de coordenação

$\Delta t(s)$	Tipos de Relés
0,4 a 0,5	Eletrodinâmicos
0,35	Eletrônicos
0,30	Digitais

Fonte: OLIVEIRA (2019).

2.1.6.1 Coordenação de Relés de Sobrecorrente de Tempo Definido

A coordenação dos relés deve seguir os seguintes princípios:

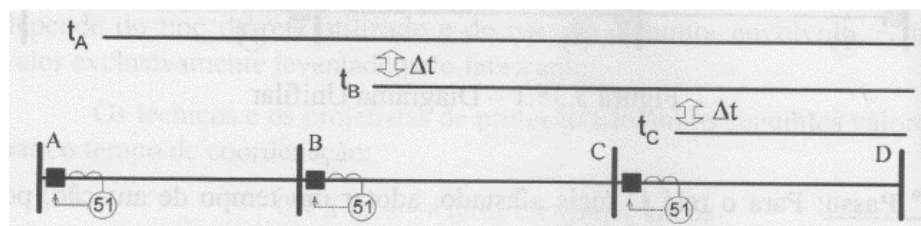
- o relé mais distante deve ter o menor ajuste de tempo possível;

- os relés a montante mais próximos devem ter um tempo de ajuste cuja a diferença de tempo é o tempo de coordenação Δt , como o indicado pela expressão (2.15)

$$t_{montante} = t_{jusante} + \Delta t; \quad (2.15)$$

- e, assim por diante, como mostrado no esquema de coordenação da Figura 12.

Figura 12 - Coordenação de relés de sobrecorrente de tempo definido

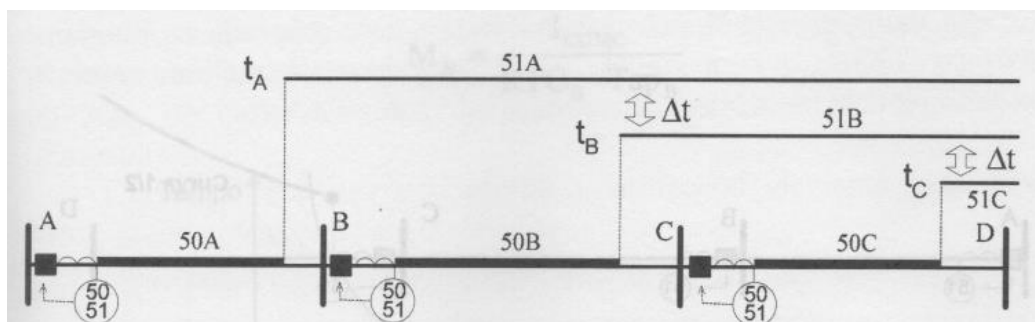


Fonte: KINDERMANN (2005).

2.1.6.2 Coordenação de Relés de Sobrecorrente de Tempo Definido com Elemento Instantâneo

Com a unidade instantânea adicionada, é necessário que primeiramente seja realizado o ajuste para sua corrente seguindo a expressão (2.13). Logo após, a coordenação seguindo as indicações descritas na seção 2.1.6.1. Na Figura 3 é possível encontrar uma representação para esse tipo de coordenação.

Figura 13 - Coordenação de relés de sobrecorrente de tempo definido com elemento instantâneo



Fonte: KINDERMANN (2005).

2.1.6.3 Coordenação de Relés de Sobrecorrente de Tempo Inverso

É necessário que os relés a montante coordenem com os relés a jusante em todo trecho de superposição de zona. O ponto crítico sempre é o curto-circuito no local do TC a jusante (KINDERMANN, 2005).

Será utilizado o sistema da Figura 14 como base para que possa ser explicado as regras para coordenação dos relés de tempo inverso.

Figura 14 - Diagrama unifilar de um sistema de 4 barras



Fonte: KINDERMANN (2005).

- Relé C: Para estabelecer o tempo de atuação t_C do relé mais distante, é escolhida a sua curva de atuação (geralmente a menor possível, 5% ou 0,5). Em seguida é calculado o múltiplo M_C do relé C utilizando a expressão (2.16). Com o M_C obtido e com a curva escolhida é possível chegar ao valor do tempo de atuação do relé C como mostrado na Figura 15.

$$M_C = \frac{I_{cc3\phi C}}{RTC_C \times I_{ajuste C}} \quad (2.16)$$

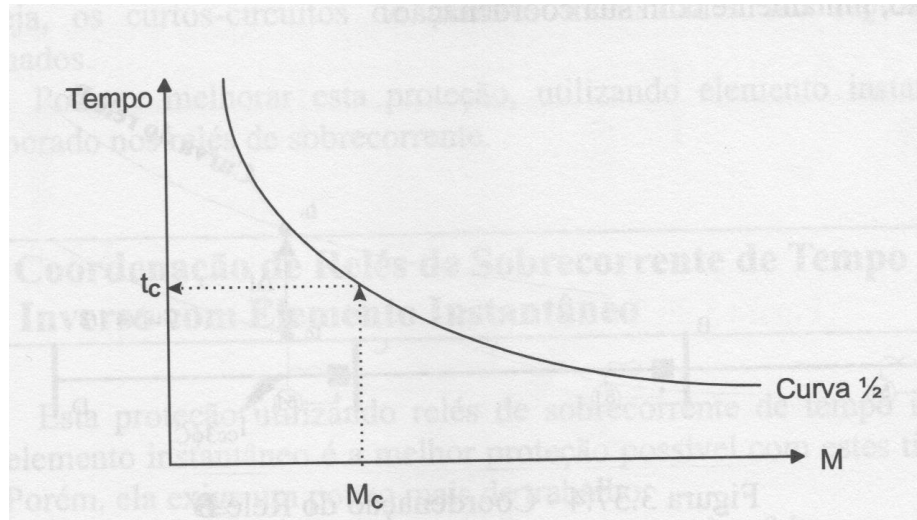
onde:

$I_{cc3\phi C}$ é a corrente de curto-circuito trifásico em C;

$I_{ajuste C}$ é a corrente de ajuste ou tap do relé C;

RTC_C é a relação de transformação do TC do relé C.

Figura 15 - Curva do relé C



Fonte: KINDERMANN (2005).

- Relé B: O tempo de coordenação Δt é somado ao tempo de atuação do relé C para se chegar ao tempo de atuação t_B do relé B, como na expressão (2.17). Calcula-se o seu múltiplo M_B utilizando a corrente de curto-circuito em C, como na expressão (2.18). Com o tempo de atuação e o seu múltiplo, achamos a sua curva de atuação como mostrado na Figura 16.

$$t_B = t_C + \Delta t \quad (2.17)$$

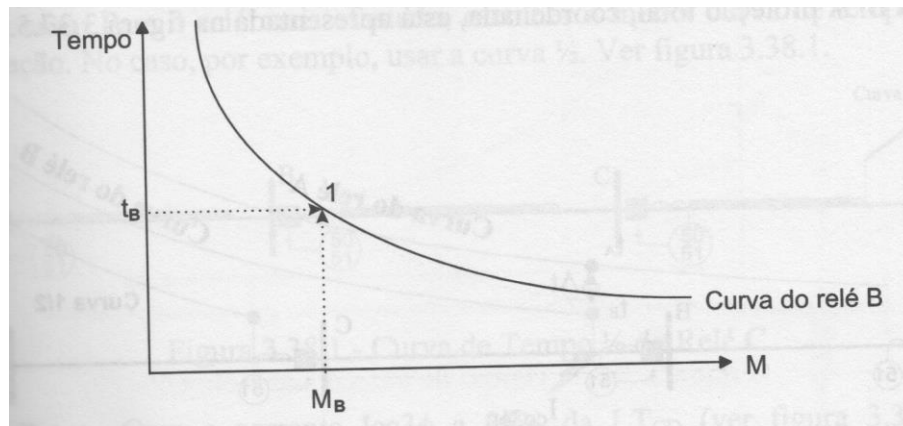
$$M_B = \frac{I_{cc3\phi C}}{RTC_B \times I_{ajuste B}} \quad (2.18)$$

em que:

$I_{ajuste B}$ é a corrente de ajuste ou tap do relé B;

RTC_B é a relação de transformação do TC do relé B.

Figura 16 - Curva do relé B



Fonte: KINDERMANN (2005).

- Relé A: O seu tempo de atuação e sua curva é encontrado da mesma forma que para o relé B. Como mostrado pelas equações (2.19) e (2.20).

$$t_A = t_B + \Delta t \quad (2.19)$$

$$M_A = \frac{I_{cc3\phi B}}{RTC_A \times I_{ajuste A}} \quad (2.20)$$

em que:

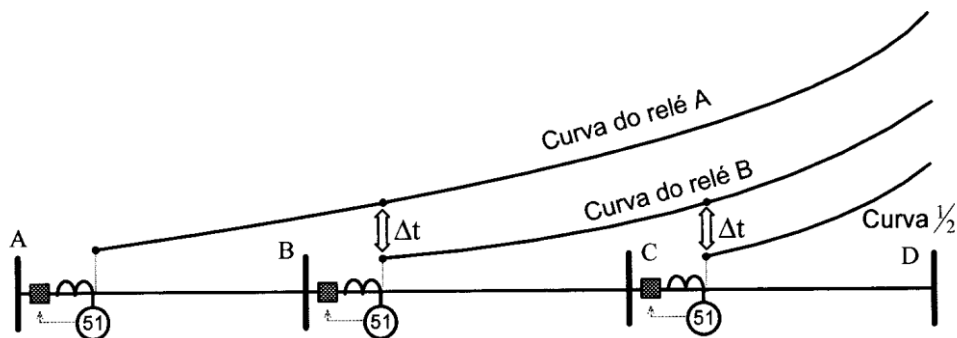
$I_{cc3\phi B}$ é a corrente de curto-circuito trifásico em B;

$I_{ajuste A}$ é a corrente de ajuste ou tap do relé A;

RTC_A é a relação de transformação do TC do relé A.

O esquema de coordenação final, após ter sido encontradas as curvas e os tempos de atuação de cada relé, está representado pela Figura 17.

Figura 17 – Coordenação dos relés de sobrecorrente de tempo inverso



Fonte: KINDERMANN (2005).

2.1.6.4 Coordenação de Relés de Sobrecorrente de Tempo Inverso com Elemento Instantâneo

É considerada por Kindermann como a melhor configuração possível para proteção utilizando relés de sobrecorrente.

Também iniciada com o ajuste das unidades instantâneas como na seção 2.1.6.2, enquanto o trabalho de coordenação das unidades de tempo inverso segue o procedimento da seção 2.1.6.3, porém os valores de corrente curto-circuito trifásico são calculados para 85% da linha (devido as zonas de atuação das unidades instantâneas), o que muda a equação para se obter os múltiplos dos relés.

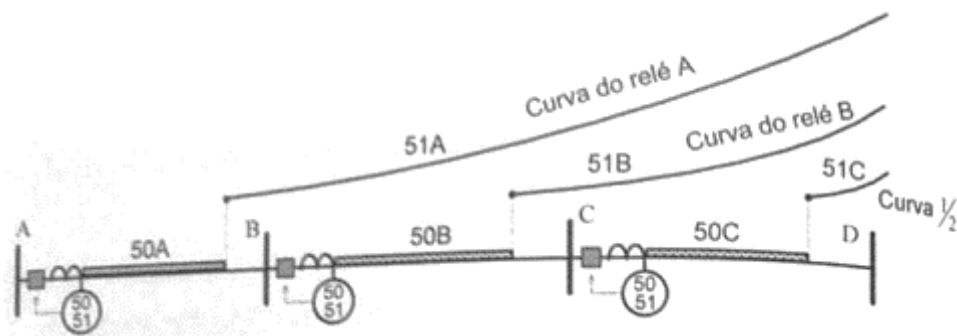
$$M_C = \frac{I_{cc3\phi_{85\%LTCD}}}{RTC_C \times I_{ajuste_C}} \quad (2.21)$$

$$M_B = \frac{I_{cc3\phi_{85\%LTCD}}}{RTC_B \times I_{ajuste_B}} \quad (2.22)$$

$$M_A = \frac{I_{cc3\phi_{85\%LTBC}}}{RTC_A \times I_{ajuste_A}} \quad (2.23)$$

Na Figura 18 é mostrado esse esquema de coordenação, onde é possível visualizar também as zonas de atuação das unidades instantâneas de cada relé.

Figura 18 - Coordenação de relés de sobrecorrente de tempo Inverso com elemento instantâneo



Fonte: KINDERMANN (2005).

2.1.6.4 Coordenação de Relés Digitais

Como não é necessário escolher a curva de atuação desse relé, a coordenação se torna mais simples.

Para relé mais distante, escolhe-se o tipo de curva de acordo com o IEEE e a IEC, o seu múltiplo de tempo T_{curva} e é obtido o seu múltiplo M pela equação (2.3). Com a equação (2.4) é possível encontrar o tempo de atuação $t_{jusante}$.

Para o relé a montante, utiliza-se a equação (2.15) onde o tempo de coordenação é adicionado ao tempo de atuação $t_{jusante}$. Logo após, o T_{curva} do relé a montante é encontrado o isolando na equação (2.4), como mostrado em (2.24).

$$T_{curva} = \frac{t_{montante}}{\left(\frac{K}{M^{\alpha} - 1} + L\right)} \quad (2.24)$$

O procedimento é repetido sucessivamente até o último relé.

2.2 RELÉ DIRECIONAL

A proteção de sistemas radiais pode ser feita através de relés de sobrecorrente temporizados, mas para um sistema com configuração em anel é indicado a combinação dessas unidades com dispositivos direcionais capazes de serem sensibilizados pelo sentido da corrente ou pelo fluxo da potência. Dessa forma é possível conferir ao sistema em anel, características de um sistema radial.

Mamede (2011) define a função do relé direcional como sendo a de identificar o sentido da corrente ou o da potência num determinado trecho do sistema. Em caso de uma dessas grandezas esteja fluindo em um sentido diferente do esperado, o relé direcional deve ser capaz de atuar, enviando o comando para a abertura dos contatos do disjuntor.

2.2.1 Relé de Sobrecorrente Direcional – 67

O relé de sobrecorrente direcional, função 67 pela norma IEEE/ANSI C37.2, é ajustado para atuar no momento que identifica que o sentido da corrente é diferente do sentido utilizado como sua referência.

O relé 67 necessita de duas grandezas de atuação:

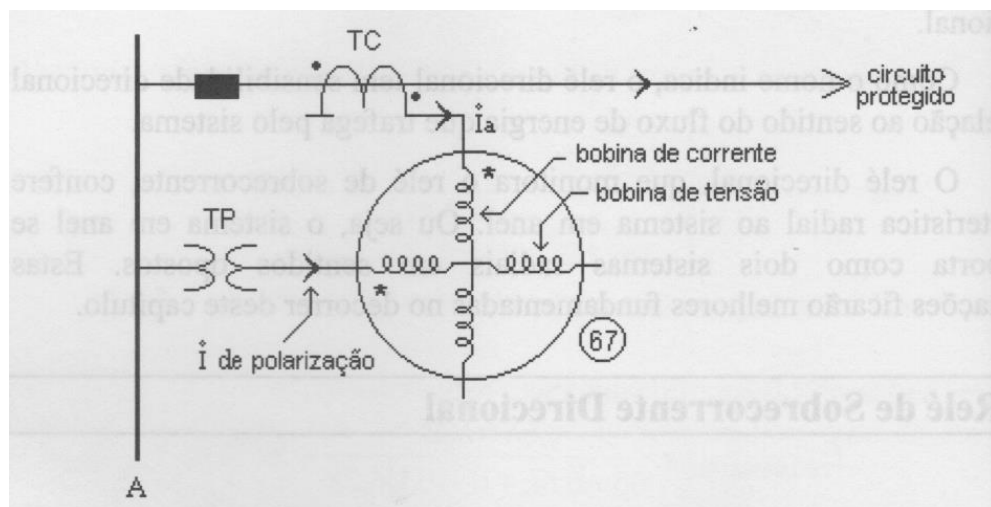
- uma grandeza de polarização que pode ser tensão ou corrente; normalmente é utilizado tensão;
- uma grandeza de operação, sendo usualmente escolhida a corrente elétrica (KINDERMANN, 2005).

A direcionalidade é baseada na comparação do ângulo de fase entre os fasores de tensão e de corrente. Esta defasagem é responsável pela produção do sentido da direção do fluxo de energia de corrente de operação ou do curto-circuito (KINDERMANN, 2005).

2.2.1.1 Princípio de Funcionamento do Relé de Sobrecorrente Direcional – 67

O relé de sobrecorrente direcional pode ser representado pelo diagrama unifilar da Figura 19. Ele é formado por dois conjuntos de bobinas, alimentados pela corrente elétrica e pela tensão de polarização.

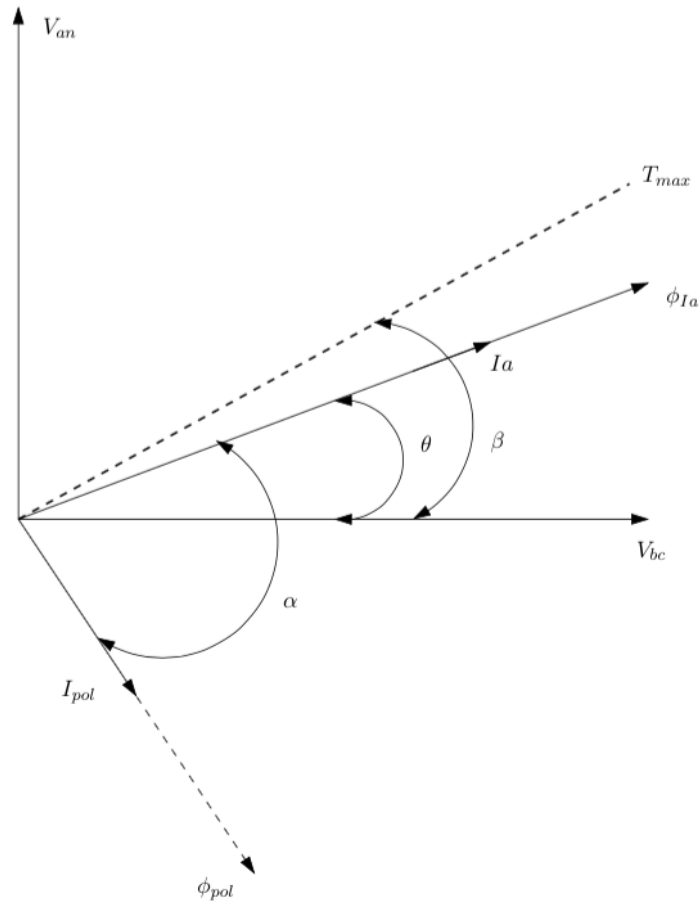
Figura 19 - Diagrama unifilar do relé direcional de sobrecorrente



Fonte: KINDERMANN (2005).

A partir do diagrama unifilar do circuito do relé de sobrecorrente direcional da Figura 19, é possível se chegar ao diagrama fasorial da Figura 20 e realizar algumas análises quanto o seu torque motor.

Figura 20 - Diagrama fasorial do relé direcional



Fonte: OLIVEIRA (2019).

Legenda da Figura 20:

- I_{pol} é a corrente que passa na bobina de tensão;
- V_{bc} é a tensão de polarização (referência);
- ϕ_{pol} é o fluxo magnético produzido pela bobina de tensão devido a I_{pol} ;
- I_a é a corrente da fase A;
- V_{an} é a tensão da fase A;
- ϕ_{Ia} é o fluxo magnético produzindo pela bobina de corrente do relé devido a I_a ;
- α é o ângulo entre ϕ_{Ia} e ϕ_{pol} ;
- β é o ângulo de máximo torque motor do relé;
- θ é o ângulo entre I_a e V_{bc} .

O torque motor do relé direcional (τ_{RD}) é dado pela expressão (2.25):

$$\tau_{RD} = K_1 I_a V_{bc} \sin \alpha \quad (2.25)$$

Considerando que:

$$\alpha = 90^\circ - \beta + \theta \quad (2.26)$$

Tem-se para expressão (2.27):

$$\tau_{RD} = K_1 I_a V_{bc} \cos(\beta - \theta) \quad (2.27)$$

Considerando o torque da mola (τ_{mola}), o torque resultante ($\tau_{Resultante}$) do sistema é representado pela equação (2.28).

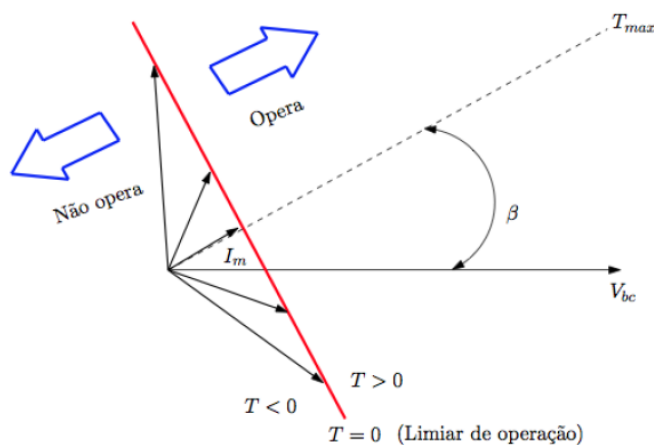
$$\tau_{Resultante} = \tau_{RD} - \tau_{mola} \quad (2.28)$$

Como K_1 é uma constante, V_{bc} é constante durante o curto-circuito e no limiar de operação o $\tau_{Resultante}$ é nulo, teremos:

$$I_a \cos(\beta - \theta) = \frac{\tau_{mola}}{V_{bc}} = K_2 \quad (2.29)$$

A linha de torque zero (limiar de operação) é ortogonal a linha de torque máximo e divide o plano em duas partes, como pode ser visto na Figura 21, na região de operação e na região de não operação do relé. A região de operação do relé no gráfico abrange o lado onde encontra-se a tensão de polarização (Oliveira, 2019).

Figura 21 - Diagrama fasorial do limiar de operação do relé direcional



Fonte: (OLIVEIRA, 2019).

Legenda da Figura 21:

- I_m é a corrente de ajuste do relé.

A partir da Figura 21, é possível inferir que durante o curto-circuito, se o fasor da corrente se posiciona à direita dessa linha, é produzido um torque positivo que faz com que o relé opere. Por outro lado, se o fasor da corrente de curto-circuito se posicionar à esquerda, o torque será negativo e o relé não irá ser acionado (Oliveira, 2019).

Observando a equação (2.29), têm-se que o máximo torque ocorre quando o β for igual ao θ . Nessa situação, o fasor da corrente estará posicionado sobre a linha de torque máximo. Dessa forma, é indicado que o β tenha o mesmo valor do ângulo da corrente de curto-circuito.

2.2.1.2 Polarização

A polarização se refere ao quanto a tensão de polarização está em atraso em relação a tensão de fase-neutro do sistema. Durante o projeto de proteção, considerar polarizações diferentes de 90° pode se tornar mais conveniente dependendo das características do sistema protegido.

As principais polarizações, utilizando-se as tensões referenciadas ao relé da fase A ao neutro e os conceitos de operações com vetores, são:

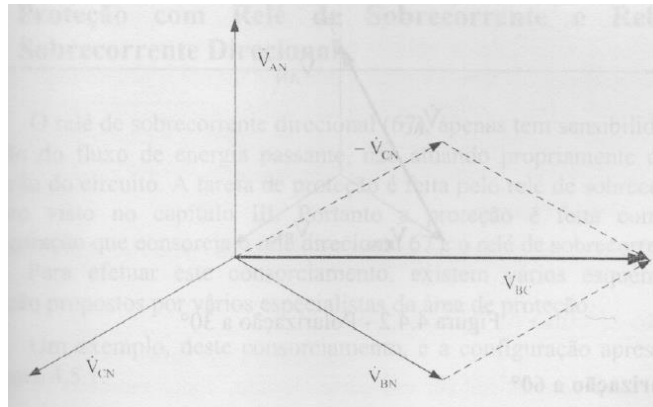
- Polarização em quadratura ou a 90°

A tensão de polarização será V_{BC} , como mostrado na Figura 22 e pelas equações (2.30) e (2.31):

$$V_{polarização} = V_{BN} - V_{CN} \quad (2.30)$$

$$V_{polarização} = V_{BC} \quad (2.31)$$

Figura 22 - Polarização a 90°

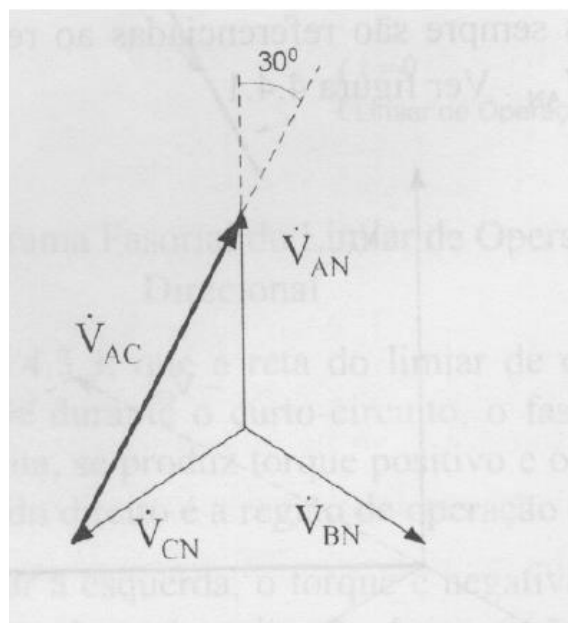


Fonte: KINDERMANN (2005).

- Polarização a 30°

A tensão de polarização será V_{AC} , como mostrado na Figura 23.

Figura 23 - Polarização a 30°



Fonte: KINDERMANN (2005).

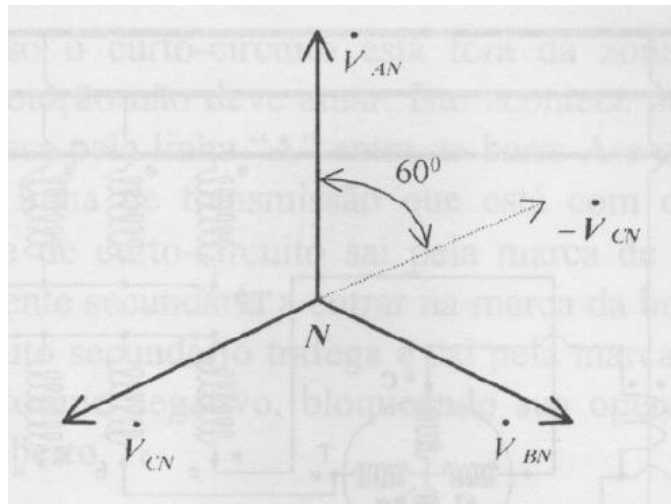
- Polarização a 60°

A tensão de polarização será $-V_{CN}$, como mostrado pela Figura 24 e pelas equações (2.32) e (2.33).

$$V_{polarização} = V_{AN} + V_{BN} \quad (2.32)$$

$$V_{polarização} = -V_{CN} \quad (2.33)$$

Figura 24 - Polarização a 60°



Fonte: KINDERMANN (2005).

2.2.1.3 Proteção com Relé de Sobrecorrente e Relé de Sobrecorrente Direcional

O relé de sobrecorrente direcional é responsável apenas por habilitar a atuação do relé de sobrecorrente, já que ele apenas é sensibilizado na direção do fluxo. Com isso, várias configurações para o consorciar os dois são possíveis (KINDERMANN, 2005).

Para sua coordenação deve ser levado em conta que o relé direcional confere ao sistema em anel a característica de um sistema radial. Logo, devem ser feitos os ajustes e coordenação dos relés de sobrecorrente em um sentido e depois para o outro.

2.2.2 Relé Direcional de Potência – 32

Utilizado principalmente pra evitar a motorização do gerador síncrono, o relé direcional de potência ou relé 32, segundo a norma IEE/ANSI C37.2, é muito semelhante ao relé direcional de sobrecorrente, porém construído de forma mais

robusta e sem necessidade de ser consorciado, agindo diretamente sobre o sistema protegido.

2.3 RELÉ DE DISTÂNCIA – 21

O relé de distância, ou de função 21 de acordo com a norma IEE/ANSI C37.2, tem sua operação fundamentada na medição do parâmetro de linha de transmissão até o ponto de curto-circuito ou da carga, o que torna fácil o ajuste e a coordenação desse relé (OLIVEIRA, 2019).

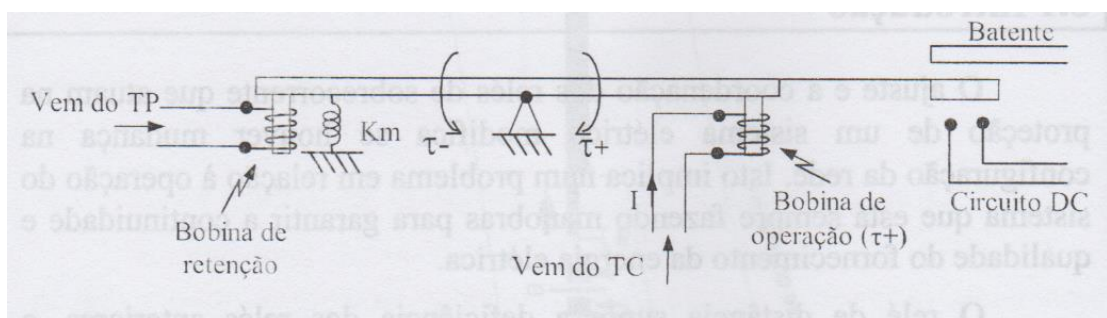
Existem três tipos de relé distância que se diferenciam pelo parâmetro do qual sua operação é baseada:

- impedância;
- admitância;
- reatância.

2.3.1 Relé de Impedância

O princípio de funcionamento do relé de impedância pode ser representado pela Figura 25.

Figura 25 - Princípio de funcionamento do relé impedância



Fonte: KINDERMANN (2005).

Observa-se na Figura 25 que a tensão, vinda do transformador de potencial, é responsável por produzir um torque que age no sentido contrário à ação de fechamento do relé, enquanto a corrente, vinda do transformador de corrente, exerce um torque favorável à ação de fechamento do relé (KINDERMANN, 2005).

O torque resultante $\tau_{\text{operação}}$ que age no braço (balanço) do relé será dado como:

$$\tau_{\text{operação}} = \tau_I - \tau_V - \tau_{\text{mola}} \quad (2.34)$$

$$\tau_{\text{operação}} = K_1 I^2 - K_2 V^2 - \tau_{\text{mola}} \quad (2.35)$$

onde:

τ_I é o torque de operação produzido pela corrente;

τ_V é o torque restringente produzido pela tensão;

τ_{mola} é o torque restringente devido à mola;

K_1 e K_2 são constantes.

Considerando o limiar de operação, onde $\tau_{\text{operação}} = 0$, é possível dividir ambos os termos da expressão (2.35) por $K_1 I^2$ para se chegar à expressão (2.38):

$$\left(\frac{V}{I}\right)^2 = \frac{K_1}{K_2} - \frac{\tau_{\text{mola}}}{K_1 I^2} \quad (2.36)$$

$$Z^2 = \frac{K_1}{K_2} - \frac{\tau_{\text{mola}}}{K_1 I^2} \quad (2.37)$$

$$Z = \sqrt{\frac{K_1}{K_2} - \frac{\tau_{\text{mola}}}{K_1 I^2}} \quad (2.38)$$

onde:

Z representa a impedância do sistema vista pelo relé.

No momento do curto-circuito, em que a equação (2.38) é aplicada, a corrente é muita elevada, fazendo com que:

$$\frac{\tau_{\text{mola}}}{K_1 I^2} \approx 0 \quad (2.39)$$

Logo:

$$Z = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} \quad (2.40)$$

$$Z = K \text{ (Constante)} \quad (2.41)$$

A impedância Z representa um número complexo, com parte real R caracterizando a resistência equivalente e X a reatância equivalente vistas pelo relé. Então:

$$Z = R + jX \quad (2.42)$$

O módulo de (2.42) é dado por (2.43):

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2.43)$$

Elevando ambos os membros ao quadrado:

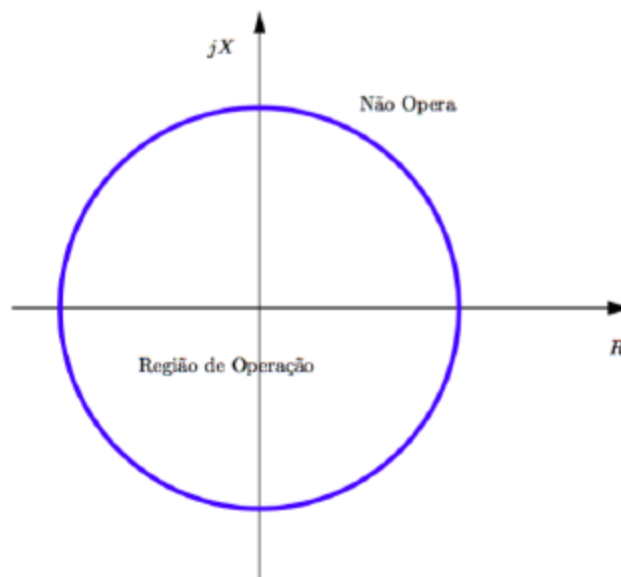
$$Z^2 = R^2 + X^2 \quad (2.44)$$

Substituindo (2.41) em (2.44):

$$K^2 = R^2 + X^2 \quad (2.45)$$

A equação (2.45) representa uma equação de circunferência centrada na origem e de raio K , como mostrado na Figura 26.

Figura 26 - Região de operação do relé de impedância



Fonte: OLIVEIRA (2019).

Essa circunferência caracteriza a região de operação do relé de impedância, indicado que a operação irá ocorrer no momento em que a impedância vista pelo relé for menor do que a ajustada.

Pela Figura 26 é possível ver que o relé de distância não apresenta direcionalidade, por isso é necessário utilizar um relé direcional (67) associado a ele para garantir tal característica para a proteção.

O relé de impedância é conectado no secundário do transformador de corrente, logo, a impedância secundária Z_s vista pelo relé é:

$$Z_s = \frac{V_s}{I_s} \quad (2.46)$$

Com:

$$V_s = \frac{V_p}{RTP} \quad (2.47)$$

$$I_s = \frac{I_p}{RTC} \quad (2.48)$$

Então:

$$Z_s = \frac{V_p}{I_p} \times \frac{RTC}{RTP} \quad (2.49)$$

$$Z_s = \frac{V_p}{I_p} \times \frac{RTC}{RTP} \quad (2.50)$$

$$Z_s = Z_p \times \frac{RTC}{RTP} \quad (2.51)$$

onde:

Z_p é a impedância primária;

V_s é a tensão no secundário do transformador de corrente;

I_s é a corrente no secundário do transformador de corrente;

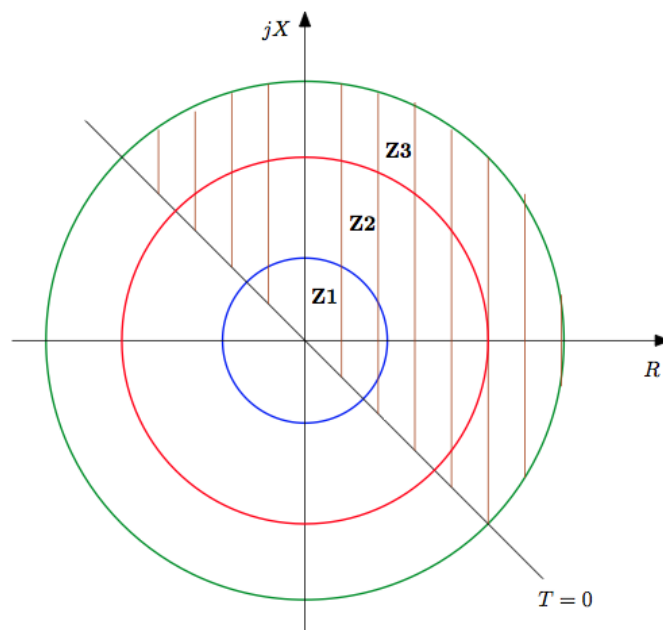
V_p é a tensão no primário do transformador de corrente;

I_p é a corrente no primário do transformador de corrente.

2.3.1.1 Zonas de Atuação e Ajuste do Relé de Impedância

O relé de impedância costuma funcionar com duas ou mais zonas de atuação, como indicado na Figura 27, sendo a primeira acionada instantaneamente e as demais de forma temporizada

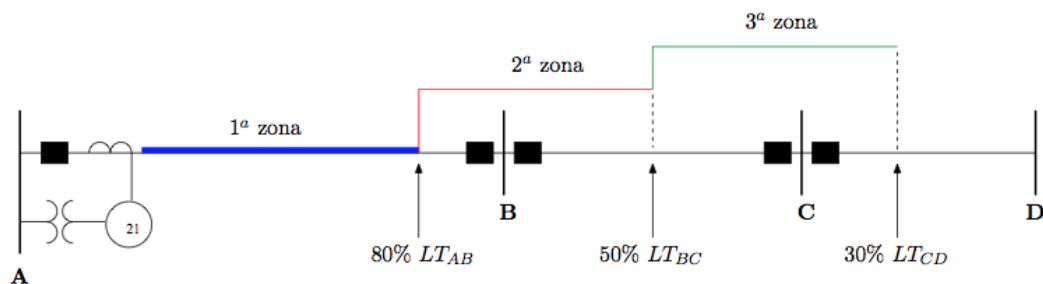
Figura 27 - Zonas de atuação do relé de impedância



Fonte: OLIVEIRA (2019).

A regulação de temporização e o ajuste de cada zona deve ser feita separadamente. Tomando como base o sistema da Figura 28, com um relé de impedância de três zonas, o ajuste poderá ser feito seguindo as regras da Tabela 6.

Figura 28 - Zonas de atuação do relé de impedância A



Fonte: OLIVEIRA (2019).

Tabela 6 - Ajuste e temporização do relé de impedância de três zonas

Zona	Impedância de Ajuste	Temporização
1º Zona	$Z_1 = 80\% \text{ da impedância } Z_{LTAB}$	$t_1 = 0$
2º Zona	$Z_2 = 100\% \text{ da } Z_{LTAB} + (50 \text{ a } 60)\% \text{ da } Z_{LTBC}$	$t_2 = \Delta t$
3º Zona	$Z_3 = 100\% \text{ da } Z_{LTAB} + 100\% \text{ da } Z_{LTBC} + (20 \text{ a } 30)\% \text{ da } Z_{LTCD}$	$t_3 = t_2 + \Delta t$

Fonte: OLIVEIRA (2019).

onde:

Z_{LTAB} representa a impedância da linha de transmissão entre as barras A e B;

Z_{LTBC} representa a impedância da linha de transmissão entre as barras B e C;

Z_{LTCD} representa a impedância da linha de transmissão entre as barras C e D.

2.3.2 Relé de Admitância

O relé admitância tem um funcionamento semelhante ao do relé de impedância e possui um cilindro de indução, onde a corrente elétrica produz o torque de operação e a tensão produz o torque de restrição.

A interação entre esses dois torques resulta em um torque motor do relé, que é dado pela equação (2.52):

$$\tau_{motor} = K_d EI \cos(\beta - \theta) - K_v E^2 - T_{mola} \quad (2.52)$$

onde:

E é a tensão de polarização do relé;

I é a corrente de operação do relé;

β é o ângulo de máximo torque;

θ é o ângulo de defasagem entre E e I .

. Considerando o limiar de operação ($\tau_{motor} = 0$) e desprezando o efeito da mola:

$$0 = K_d EI \cos(\beta - \theta) - K_v E^2 \quad (2.53)$$

Dividindo ambos os membros da equação (2.53) pelo termo $K_d E^2$, tem-se:

$$\frac{I}{E} \cos(\beta - \theta) = \frac{K_v}{K_d} \quad (2.54)$$

A admitância é dada por:

$$Y = \frac{I}{E} \quad (2.55)$$

Logo:

$$Y \cos(\beta - \theta) = \frac{K_v}{K_d} \quad (2.56)$$

β , K_v e K_d são constantes, enquanto a admitância é um número complexo, dada de acordo com a equação (2.57), é variável assim como o θ .

$$Y = G + jB \quad (2.57)$$

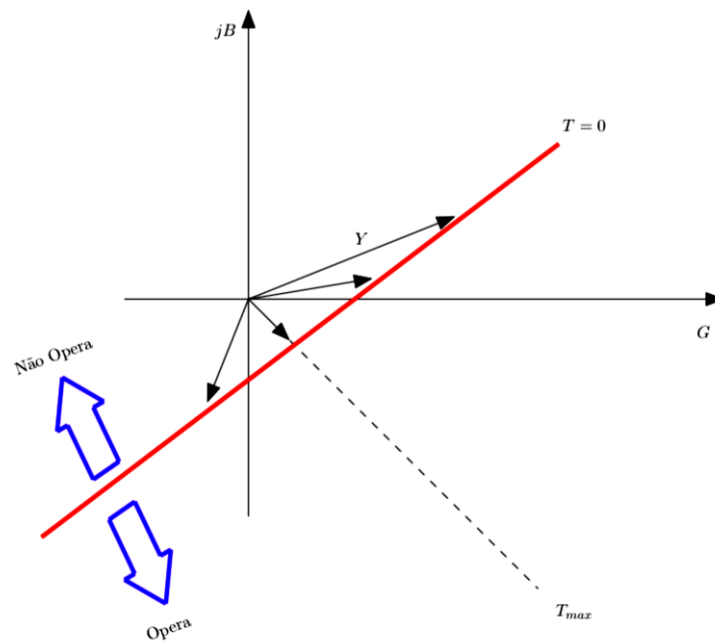
onde:

G representa a condutância;

B representa a susceptância.

Com isso, é possível construir o diagrama fasorial do limiar de operação do relé de admitância da Figura 29.

Figura 29 - Diagrama fasorial do limiar de operação do relé de admitância



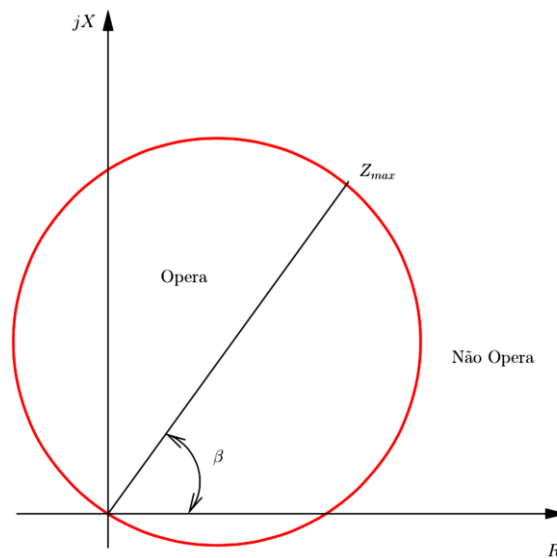
Fonte: OLIVEIRA (2019).

Sabendo-se que a impedância é o inverso da admitância é possível chegar à equação (2.59) e consequentemente ao diagrama fasorial $jXxR$ mostrado na Figura 30.

$$\frac{1}{Z} \cos(\beta - \theta) = \frac{K_V}{K_d} \quad (2.58)$$

$$Z = \cos(\beta - \theta) \frac{K_d}{K_V} \quad (2.59)$$

Figura 30 - Diagrama fasorial $jX \times R$ do relé de admitância



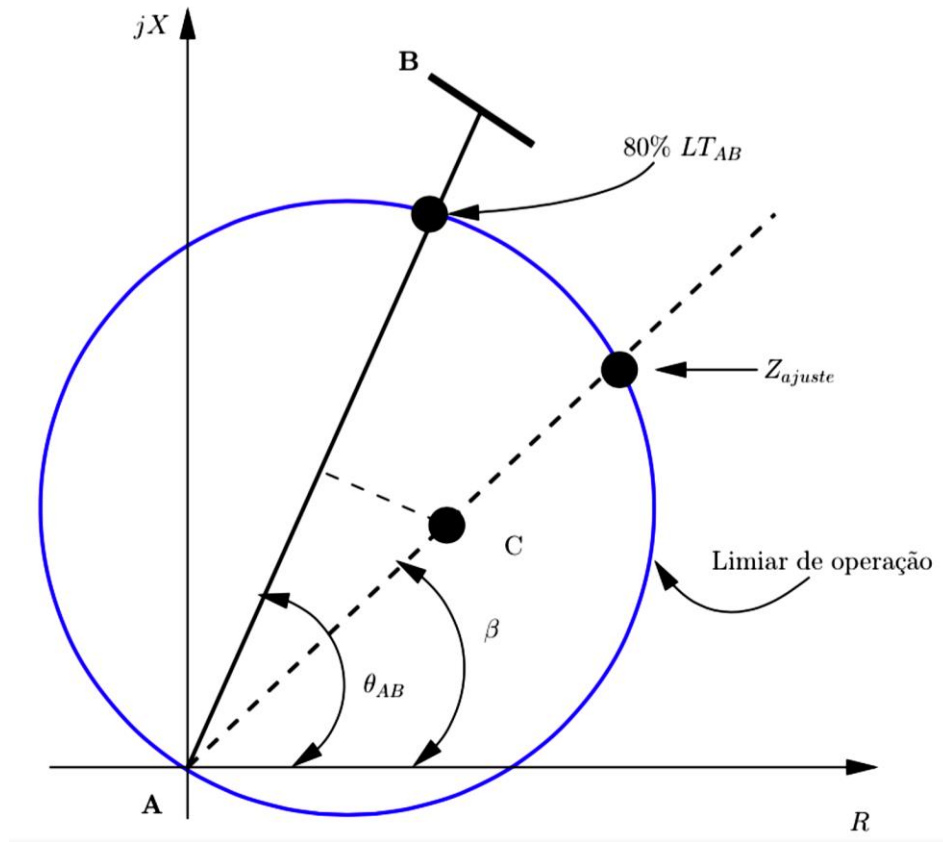
Fonte: OLIVEIRA (2019).

Tendo em vista o formato do diagrama fasorial mostrado na Figura 30, é possível afirmar que o relé de admitância tem direcionalidade.

2.3.2.1 Ajuste do Relé de Admitância

Inicialmente o procedimento de ajuste do relé admitância, que possui três zonadas de atuação, deve seguir o mesmo procedimento mostrado na Tabela 6 utilizada para o ajuste do relé de impedância. Entretanto, essas regulagens devem passar por um processo de correção devido ao ângulo de máximo torque β do relé não coincidir com o ângulo natural de impedância da linha de transmissão, vide Figura 31, a qual o relé está protegendo (OLIVEIRA, 2019).

Figura 31 - Valor real do ajuste no relé admitância



Fonte: OLIVEIRA (2019).

Utilizando o diagrama da Figura 31 e conceitos de trigonometria, o ajuste da impedância para a primeira zona de atuação do relé de admitância deve seguir a equação (2.62).

$$\frac{Z_{80\%LTAB}}{2} = \overline{CA} \cos(\theta_{AB} - \beta) \quad (2.60)$$

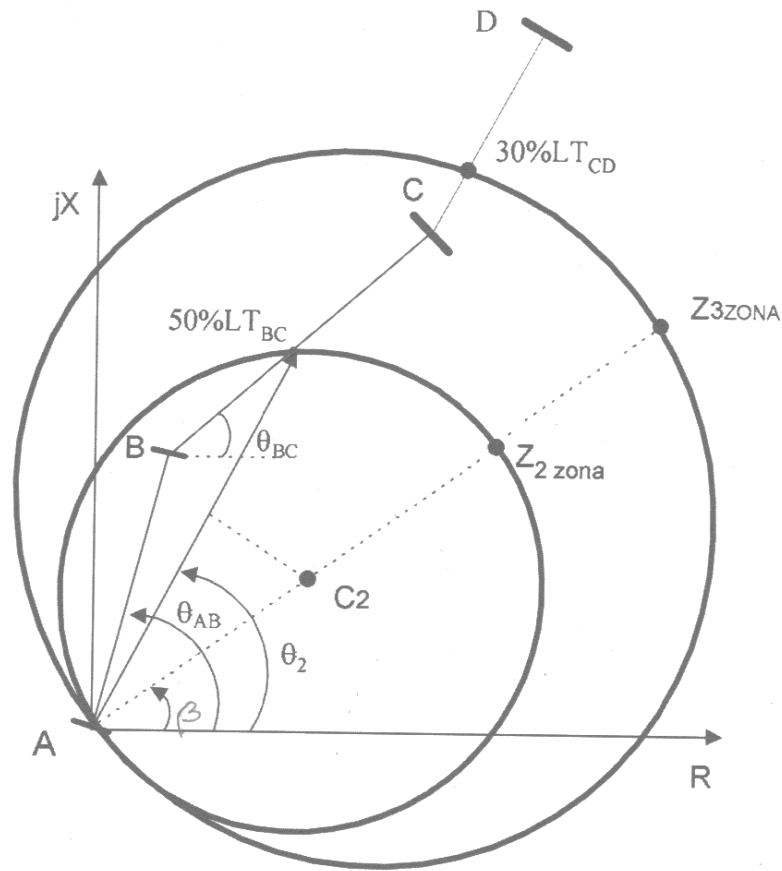
$$\frac{Z_{80\%LTAB}}{2} = \frac{Z_{ajuste}}{2} \cos(\theta_{AB} - \beta) \quad (2.61)$$

$$Z_{ajuste} = \frac{Z_{80\%LTAB}}{\cos(\theta_{AB} - \beta)} \quad (2.62)$$

$Z_{80\%LTAB}$ da equação (2.62) corresponde a 80% da impedância da linha de transmissão entre as barras A e B do diagrama da Figura 31.

O ajuste da segunda e terceira zona será baseado na Figura 32.

Figura 32 - Ajustes de segunda e terceira zona do relé admitância



Fonte: OLIVEIRA (2019).

Os valores reais a serem ajustados da segunda e terceira zonas são dadas pelas equações (2.63) e (2.64).

$$\vec{Z}_2 = Z_{LTAB} + 50\% Z_{LTBC} \quad (2.63)$$

$$\vec{Z}_3 = Z_{LTAB} + Z_{LTBC} + 30\% Z_{LTCD} \quad (2.64)$$

(2.63) e (2.64) podem ser dadas na sua forma polar como:

$$\vec{Z}_2 = Z_2 \angle \theta_2 \quad (2.65)$$

$$\vec{Z}_3 = Z_3 \angle \theta_3 \quad (2.66)$$

Para achar os valores de ajustes corrigidos se utiliza da semelhança com a expressão (2.62). Logo, tem-se:

$$Z_{zona2} = \frac{Z_2}{\cos(\theta_2 - \beta)} \quad (2.67)$$

$$Z_{zona3} = \frac{Z_3}{\cos(\theta_3 - \beta)} \quad (2.68)$$

Assim como no relé de impedância, a impedância vista pelo relé de admitância é a referida para o secundário do TC como mostrada pela expressão (2.51).

2.3.3 Relé de Reatância

A sensibilidade do relé de reatância é baseada na reatância do sistema. O seu torque motor resultante é dado por:

$$\tau_{motor} = K_I I^2 - K_E E I \sin \theta - \tau_{mola} \quad (2.69)$$

Durante o limiar de operação:

$$0 = K_I I^2 - K_E E I \sin \theta - \tau_{mola} \quad (2.70)$$

$$K_E E I \sin \theta = K_I I^2 - \tau_{mola} \quad (2.71)$$

Dividindo a expressão (2.71) por $K_E I^2$:

$$\frac{E}{I} \sin \theta = \frac{K_I}{K_E} - \frac{\tau_{mola}}{K_E I^2} \quad (2.72)$$

$$Z \sin \theta = \frac{K_I}{K_E} - \frac{\tau_{mola}}{K_E I^2} \quad (2.73)$$

Como no momento do curto-circuito a corrente é muito elevada:

$$\frac{\tau_{mola}}{K_E I^2} \approx 0 \quad (2.74)$$

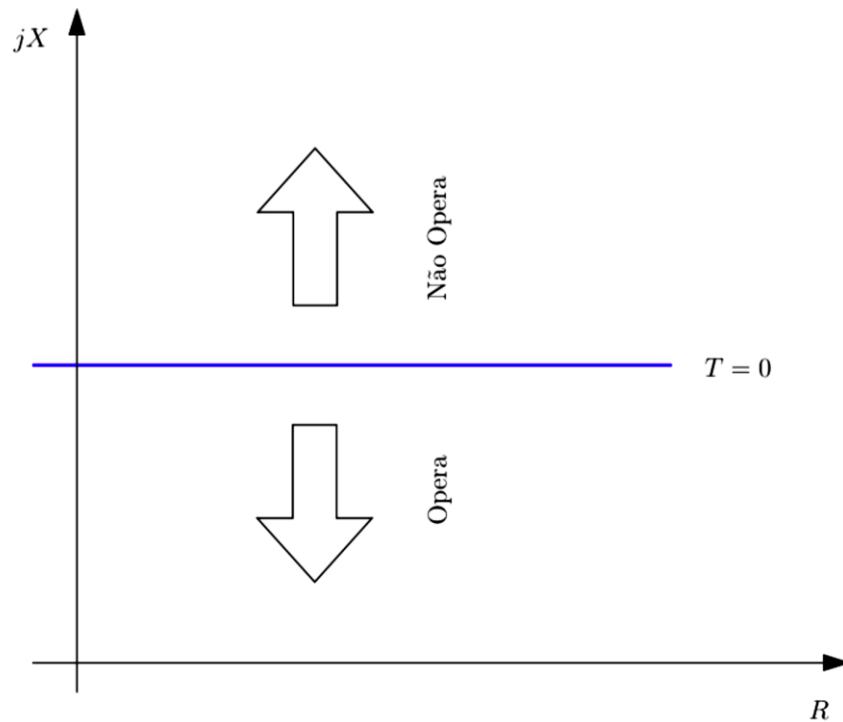
Logo:

$$Z \sin \theta = \frac{K_I}{K_E} \quad (2.75)$$

$$x = \frac{K_I}{K_E} \quad (2.76)$$

O diagrama de atuação do relé de reatância construído a partir da equação (2.76) está representado pela Figura 33.

Figura 33 - Diagrama de atuação do relé de reatância



Fonte: OLIVEIRA (2019).

2.4 RELÉ DIFERENCIAL – 87

O relé diferencial, função 87, tem sua ação apoiada pela comparação entre as correntes elétricas que circulam entre dois terminais, que delimitam a zona protegida, de um equipamento. O relé enviará o sinal de abertura para o disjuntor no momento em que seja detectado uma diferença, fora do valor ajustado, de módulos entre essas correntes, que geralmente são coletadas através de transformadores de corrente instalados nesses pontos (MAMEDE, 2011).

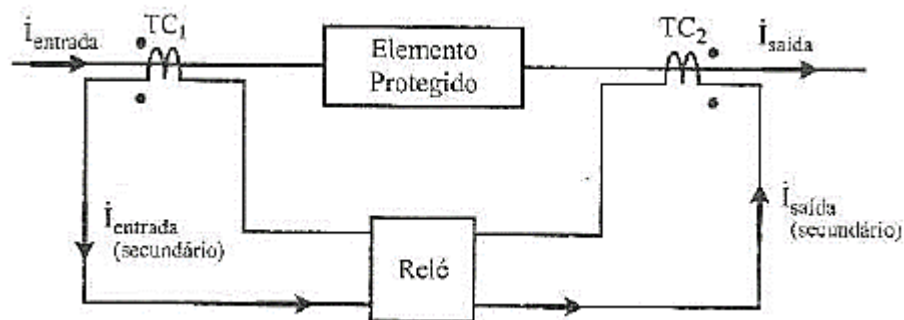
O relé diferencial é utilizado na proteção em uma variedade de casos, como:

- proteção de transformadores de potência;
- proteção de cabos subterrâneos;
- proteção de máquinas síncronas;
- proteção de barras;
- proteção de cubículos metálicos;
- proteção de linhas de transmissão curta.

2.4.1 Relé Diferencial Comum

São utilizados relés de sobrecorrente para realizar a função de relé diferencial, como na representação esquemática da Figura 34.

Figura 34 - Esquema da proteção diferencial comum



Fonte: KINDERMANN (2005).

Esse tipo de configuração pode ser utilizado tanto em sistemas com características radiais quanto em anel, devido ao fato da sua zona de sensibilidade estar delimitada entre os dois transformadores de corrente. Dessa forma, a proteção apenas será acionada caso o defeito seja dentro desta zona independente da configuração do sistema (KINDERMANN, 2005).

O relé diferencial comum não é muito utilizado devido a apresentação de problemas causados por:

- corrente de magnetização do transformador durante a sua energização;
- saturação dos transformadores de corrente em diferentes níveis, provocando correntes circulantes no circuito diferencial (MAMEDE, 2011).

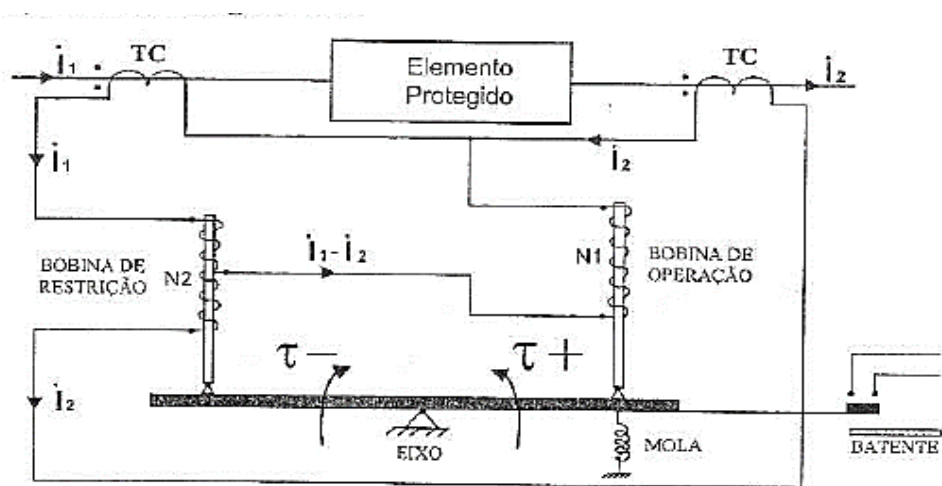
2.4.2 Relé Diferencial Percentual

A ação do relé diferencial percentual é fundamentada na interação entre duas bobinas:

- bobina de restrição, onde é gerado um campo magnético responsável por produzir um torque no sentido contrário ao de operação do relé, atraindo um êmbolo com um torque negativo;
- bobina de operação: onde é produzido um campo magnético devido a passagem da corrente que produz um torque positivo, no sentido de operação do relé, atraindo o êmbolo.

A atuação do relé irá acontecer quando o torque positivo da bobina de operação for maior que o torque negativo da bobina de restrição (KINDERMANN, 2005). Esse princípio de funcionamento é baseado no esquema representado na Figura 35.

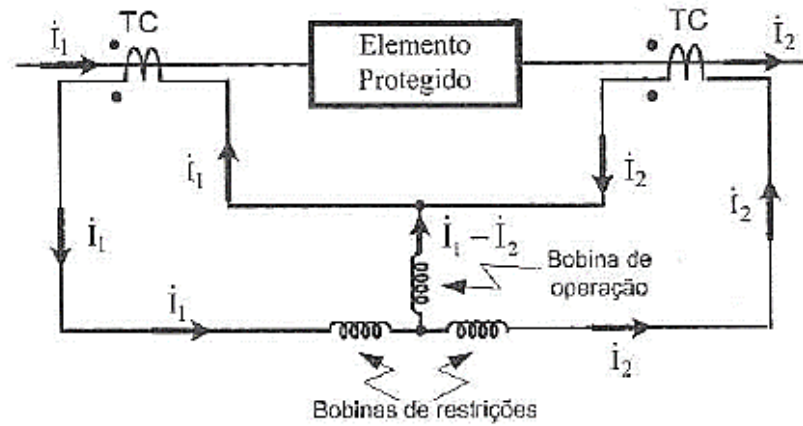
Figura 35 - Relé diferencial percentual



Fonte: KINDERMANN (2005).

Para análise e obtenção da expressão analítica de operação do relé diferencial percentual, o esquema da Figura 35 pode ser simplificado para o da Figura 36, onde a bobina de restrição é dividida em duas partes.

Figura 36 - Esquema do relé diferencial percentual



Fonte: KINDERMANN (2005).

O torque resultante que age no balanço do relé é dado por:

$$\tau_{relé87} = \tau_{operação} - \tau_{restrição} \quad (2.77)$$

$$\tau_{relé} = K_1(I_1 - I_2)^2 - K_2\left(\frac{I_1 + I_2}{2}\right)^2 \quad (2.78)$$

No limiar de operação, onde o torque resultante é nulo:

$$0 = K_1(I_1 - I_2)^2 - K_2\left(\frac{I_1 + I_2}{2}\right)^2 \quad (2.79)$$

$$I_1 - I_2 = \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} \times \frac{I_1 + I_2}{2} \quad (2.80)$$

Considerando:

$$a = \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} \quad (2.81)$$

Substituindo (2.81) em (2.80):

$$I_1 - I_2 = a \times \frac{I_1 + I_2}{2} \quad (2.82)$$

Fazendo:

$$I_1 - I_2 = y \quad (2.83)$$

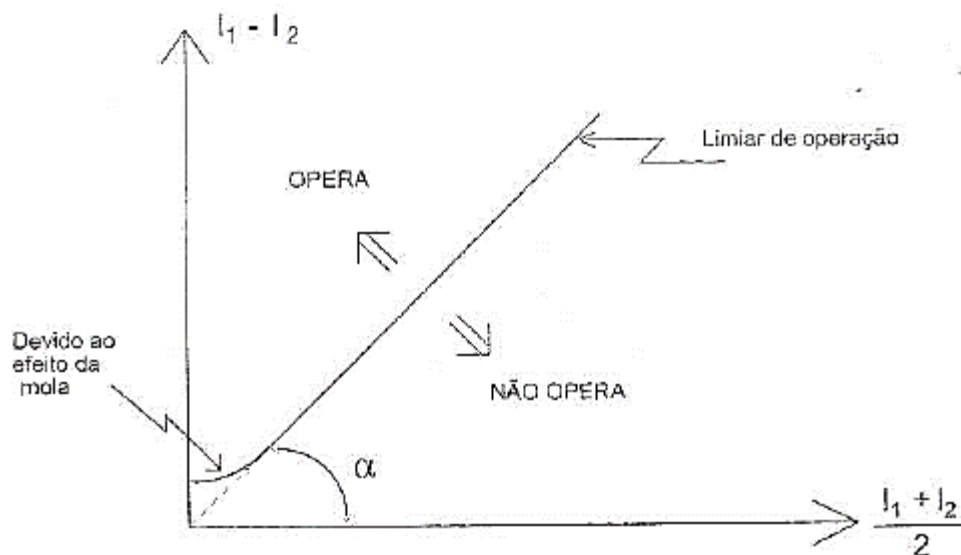
$$\frac{I_1 + I_2}{2} = x \quad (2.84)$$

Com isso, é possível escrever (2.82) como a equação de uma reta, que representa o limiar de atuação do relé diferencial percentual, onde (2.83) é dada em função de (2.84) e (2.81) é a inclinação ou declive(slope) da reta:

$$y = ax \quad (2.85)$$

Devido ao efeito de restauração da mola do relé, a sua curva de atuação apresenta um pequeno desvio da origem, como mostrado na Figura 37.

Figura 37 - Limiar de operação do relé diferencial percentual



Fonte: KINDERMANN (2005).

2.4.2.1 Ajustes do Relé Diferencial Percentual

Para o relé 87 existem dois ajustes a serem realizados:

- ajuste da inclinação ou declividade (slope): É indicado que seja ajustado 5 a 25% para máquinas síncrona e 10 a 45% para transformadores de potência. É importante se notar que quanto maior for a declividade da curva, menor será sua sensibilidade, pois a região de não operação será maior (KINDERMANN, 2005);

- ajuste para o pick-up do relé, que deve compensar o efeito da mola de restauração, tendo seu valor mínimo limitado por $\sqrt{\frac{K_3}{K_1}}$, onde K_3 corresponde ao efeito da mola.

2.4.2.2 Ajuste Do Relé Diferencial Percentual na Proteção do Transformador

A proteção do transformador trifásico pelo relé diferencial deve ser realizada fase a fase. A ligação dos secundários dos TCs depende da ligação dos transformadores de potência. Caso o transformador de potência esteja em delta (Δ), o secundário do TC deve estar em estrela (Y). No caso em que o transformador de potência esteja em Y , o secundário do TC deve estar em delta. Esse procedimento é necessário para corrigir a defasagem entre as correntes causada pela defasagem do transformador de potência. (KINDERMANN, 2005).

As correntes secundárias dos TCs devem alimentar o relé 87 de modo que as correntes nas bobinas de restrição sejam iguais. Porém, essas correntes estão associadas a erros causados por: Discrepância no casamento dos TCs, da classe de exatidão dos TCs, comutação dos taps do transformador de potências e dos taps das bobinas de restrição do relé. Por isso é necessária que a sensibilidade do relé 87 seja escolhida levando em consideração a soma de todos esses erros.

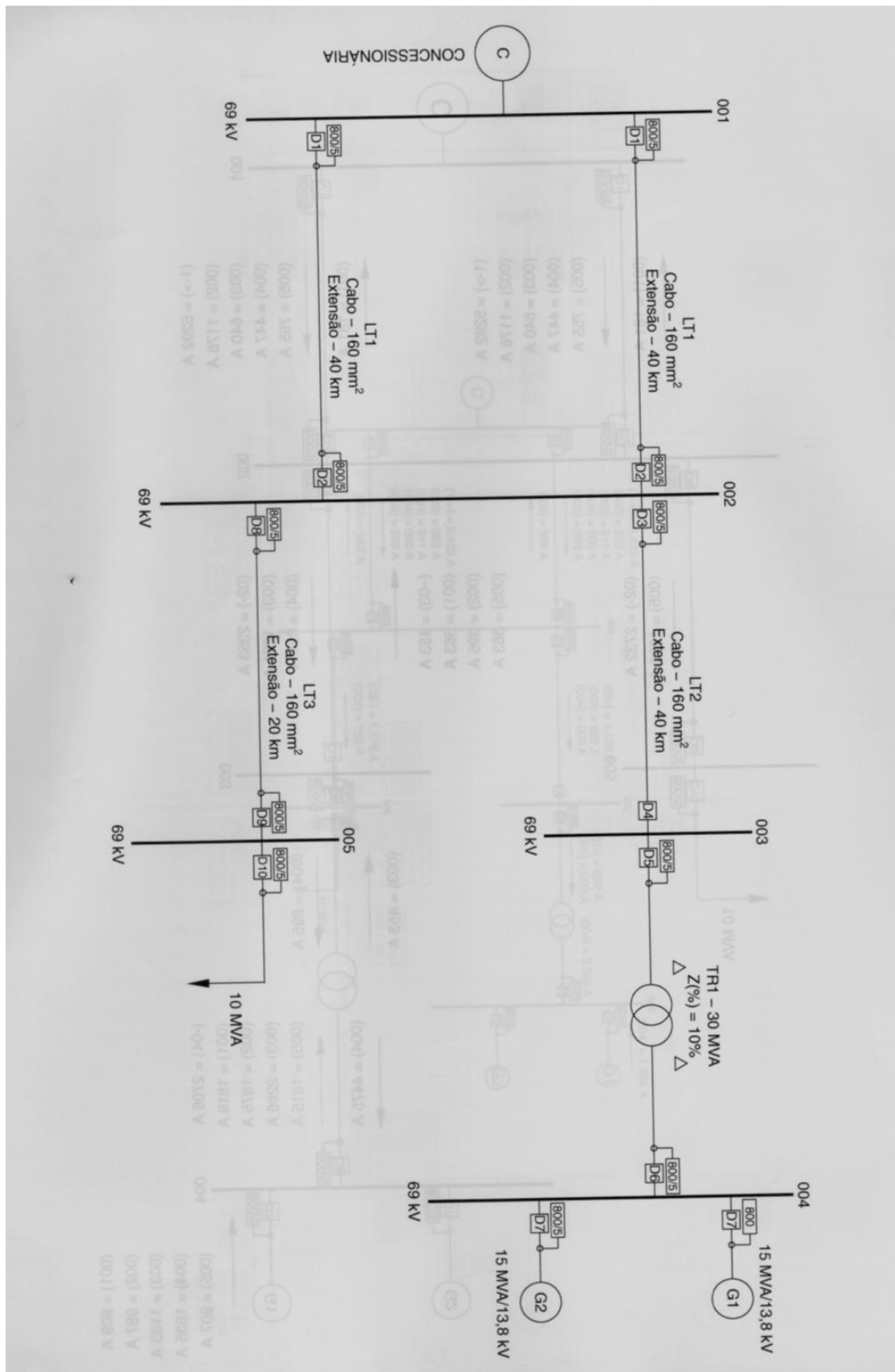
3 ESTUDO DE CASO

Esse estudo consiste na coordenação e ajuste dos relés possuindo proteções de sobrecorrente de fase e de neutro, direcional, distância e diferencial de transformador de um sistema de alta tensão. Os cálculos dos curtos-circuitos monofásico e trifásicos, necessários para realização dos ajustes, serão feitos através de simulação realizada com o programa computacional ANAFAS (Análise de Faltas Simultâneas) da CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica).

3.1 SISTEMA INVESTIGADO E SUAS CARACTERÍSTICAS

O sistema elétrico utilizado neste estudo, disponível no Anexo I do (Mamede, 2011), é constituído por 5 barras, duas delas pertencentes a uma usina geradora de energia formada por duas máquinas de 15MVA-13,8KV cada. Na subestação da usina é utilizado um transformador elevador de 30MVA-69/19,8KV. A barra 5 possui uma carga não motriz com valor máximo de 10MVA. O diagrama unifilar está representado pela Figura 38.

Figura 38 - Sistema elétrico investigado



Fonte: MAMEDE (2011).

3.1.1 Parâmetros do Sistema

Os valores das impedâncias dos elementos do sistema da Figura 38 foram retirados do (MAMEDE, 2011) e estão representados na Tabela 7 no sistema por unidade (PU) considerando como potência de base 100MVA e tensões de base 69KV e 13,8KV.

Tabela 7 - Impedâncias do sistema elétrico da Figura 37

Elemento	Impedância em pu	
	Sequência Positiva e Sequência Negativa	Sequência Zero
Concessionária	$0,1521\angle 73^\circ$	$0,7180\angle 82^\circ$
Linha de Transmissão 1 (LT_1)	$0,3972\angle 63^\circ$	$1,6220\angle 78,4^\circ$
Linha de Transmissão 2 (LT_2)	$0,2979\angle 63,6^\circ$	$1,2167\angle 78,4^\circ$
Linha de Transmissão 3 (LT_3)	$0,1986\angle 63,6^\circ$	$0,8110\angle 78,4^\circ$
Transformador	$0,30\angle 90^\circ$	$0,30\angle 90^\circ$
Geradores	$3,09\angle 90^\circ$	$0,5687\angle 90^\circ$

Fonte: MAMEDE (2011).

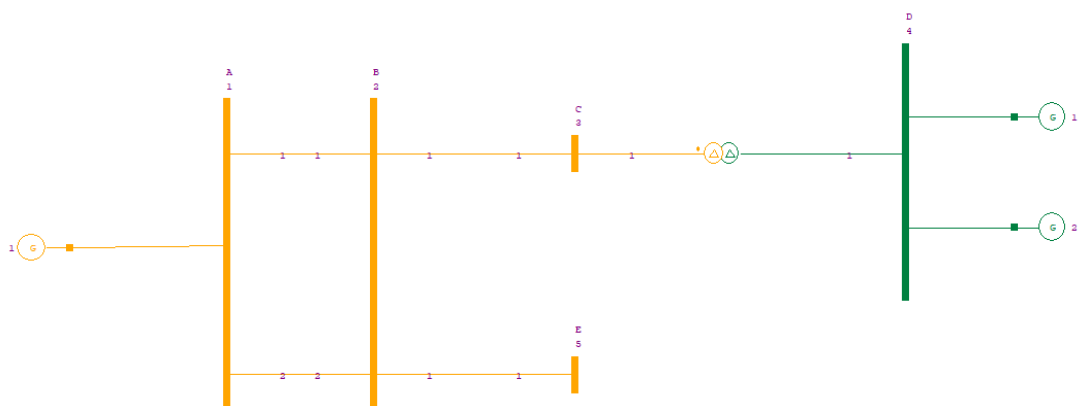
Todos os relés indicados no diagrama possuem proteções de sobrecorrente de fase e neutro, enquanto apenas os relés 3 e 4 possuem proteção de distância. Foi adicionado uma proteção diferencial para o transformador, que não existia nesse sistema. Os transformadores de corrente, aos quais os relés são conectados, possuem relação de transformação (RTC) de 800-5.

3.2 SIMULAÇÃO

Foi realizado a simulação dos curtos-circuitos monofásicos e trifásicos para cada uma das barras do sistema elétrico da Figura 38 no ANAFAS. Os valores utilizados como base foram os mesmos mencionados na seção 3.1.1, logo as impedâncias utilizadas foram tiradas da tabela 7, em sua forma retangular e em porcentagem, que é o formato de entrada aceito pelo software. As tensões pré-falta em todas as barras são de $1\angle 0^\circ$ pu. A figura 39 está a representação do sistema em estudo no ANAFAS.

O ANAFAS não permite a inserção de carga sem carregamento pré-falta. Com isso, as cargas só podem ser inseridas em simulações onde se foi realizado previamente o estudo de fluxo de potência no ANAREDE (SOUZA, 2018).

Figura 39 - Representação do Sistema Elétrico da Figura 37 no ANAFAS



Fonte: CEPEL (2018).

3.2.1 Curto-Circuito Trifásico Nas Barras

Os resultados das simulações do ANAFAS para o curto-circuito trifásicos de cada barra estão representados na Tabela 8. Nas subseções desta seção serão mostradas as contribuições em cada trecho do sistema.

Tabela 8 - Curto-Circuito Trifásico em Cada Barra

Barra	Corrente de Curto-Circuito Trifásico (A)
1	$5649,4\angle -73,7^\circ$
2	$2731,2\angle -70,4^\circ$
3	$1705,4\angle -72,1^\circ$
4	$7112,6\angle -79,7^\circ$
5	$1659,8\angle -67,7^\circ$

Fonte: O Autor (2019).

3.2.1.1 Contribuições Durante o Curto-Circuito Trifásico

A Tabela 9, 10, 11, 12 e 13 foram construídas para simplificar a análise dos resultados, nela é possível encontrar os valores das contribuições durante cada curto-circuito. As configurações destas simulações se encontram no Apêndice A deste trabalho.

Tabela 9 - Contribuições para o curto-circuito trifásico na barra 1

Curto-Circuito Trifásico na Barra 1	
Trecho dos Disjuntores	Contribuição (A)
D1 e D2	$181,9\angle -84,5^\circ$
D3 e D4	$363,7\angle -84,5^\circ$
D5	$363,7\angle -84,5^\circ$
D6	$1818,7\angle -84,5^\circ$
D7	$909,4\angle -84,5^\circ$
D8 e D9	0

Fonte: O Autor (2019).

Tabela 10 - Contribuições para o curto-circuito trifásico na barra 2

Curto-Circuito Trifásico na Barra 2	
Trecho dos Disjuntores	Contribuição (A)
D1 e D2	$1176,8\angle -67,8^\circ$
D3 e D4	$395,4\angle -86,4^\circ$
D5	$395,4\angle -86,4^\circ$
D6	$1977,2\angle -86,4^\circ$
D7	$988,6\angle -86,4^\circ$
D8 e D9	0

Fonte: O Autor (2019).

Tabela 11 - Contribuições para o curto-circuito trifásico na barra 3

Curto-Circuito Trifásico na Barra 3	
Trecho dos Disjuntores	Contribuição (A)
D1 e D2	$640,7\angle -65,9^\circ$
D3 e D4	$1281,4\angle -65,9^\circ$
D5	$453,5\angle -90^\circ$
D6	$2267,6\angle -90^\circ$
D7	$1133,8\angle -90^\circ$
D8 e D9	0

Fonte: O Autor (2019).

Tabela 12 - Contribuições para o curto-circuito trifásico na barra 4

Curto-Circuito Trifásico na Barra 4	
Trecho dos Disjuntores	Contribuição (A)
D1 e D2	$447,5\angle -73,4^\circ$
D3 e D4	$895,1\angle -73,4^\circ$
D5	$895,1\angle -73,4^\circ$
D6	$4475,3\angle -73,4^\circ$

D7	$1535,9\angle -90^\circ$
D8 e D9	0

Fonte: O Autor (2019).

Tabela 13 - Contribuições para o curto-circuito trifásico na barra 5

Curto-Circuito Trifásico na Barra 5	
Trecho dos Disjuntores	Contribuição (A)
D1 e D2	$715,2\angle -65,1^\circ$
D3 e D4	$240,3\angle -83,7^\circ$
D5	$240,3\angle -83,7^\circ$
D6	$1201,6\angle -83,7^\circ$
D7	$600,8\angle -83,7^\circ$
D8 e D9	$1659,8\angle -67,7^\circ$

Fonte: O Autor (2019).

3.2.2 Curto-Circuito Monofásico nas Barras

Os resultados das simulações do ANAFAS para o curto-circuito monofásico de cada barra estão representados na Tabela 14. Nas subseções desta seção serão mostradas as contribuições em cada trecho do sistema.

Tabela 14 - Resultados das correntes de curto-circuito obtidas pelo ANAFAS

Barra	Corrente de Curto-Circuito Monofásico (A)
1	$2480,4\angle -79,6^\circ$
2	$1175,8\angle -72,2^\circ$
3	$674,7\angle -77,4^\circ$
4	$8614,1\angle -81,7^\circ$
5	$753,2\angle -76,0^\circ$

Fonte: O Autor (2019).

3.2.2.1 Contribuições Durante o Curto-Circuito Monofásico

A Tabelas 15, 16, 17, 18 e 19 trazem os valores das contribuições para a corrente durante cada curto-circuito. As configurações destas simulações se encontram no Apêndice A deste trabalho.

Tabela 15 - Contribuições para o curto-circuito monofásico na barra 1

Curto-Circuito Monofásico na Barra 1	
Trecho dos Disjuntores	Contribuição (A)
D1 e D2	$53,2\angle -90,3^\circ$
D3 e D4	$106,5\angle -90,3^\circ$
D5	$106,5\angle -90,3^\circ$
D6	$532,3\angle -90,3^\circ$
D7	$266,2\angle -90,3^\circ$
D8 e D9	0

Fonte: O Autor (2019).

Tabela 16 - Contribuições para o curto-circuito monofásico na barra 2

Curto-Circuito Monofásico na Barra 2	
Trecho dos Disjuntores	Contribuição (A)
D1 e D2	$533,6\angle -75,7^\circ$
D3 e D4	$113,5\angle -93,3^\circ$
D5	$113,5\angle -93,3^\circ$
D6	$567,5\angle -93,3^\circ$
D7	$283,7\angle -93,3^\circ$
D8 e D9	0

Fonte: O Autor (2019).

Tabela 17 - Contribuições para o curto-circuito monofásico na barra 3

Curto-Circuito Monofásico na Barra 3	
Trecho dos Disjuntores	Contribuição (A)

D1 e D2	281,7∠-73,7°
D3 e D4	562,1∠-73,7°
D5	119,6∠-95,3°
D6	598,1∠-95,3°
D7	299,1∠-95,3°
D8 e D9	0

Fonte: O Autor (2019).

Tabela 18 - Contribuições para o curto-circuito monofásico na barra 4

Curto-Circuito Monofásico na Barra 4	
Trecho dos Disjuntores	Contribuição (A)
D1 e D2	361,3∠-75,4°
D3 e D4	722,7∠-73,4°
D5	722,7∠-73,4°
D6	3613,4∠-75,4°
D7	2518,7∠-86,1°
D8 e D9	0

Fonte: O Autor (2019).

Tabela 19 - Contribuições para o curto-circuito monofásico na barra 5

Curto-Circuito Monofásico na Barra 5	
Trecho dos Disjuntores	Contribuição (A)
D1 e D2	341,83∠-74,3°
D3 e D4	72,7∠-92,0°
D5	72,7∠-92,0°
D6	363,5∠-92,0°
D7	181,8∠-92,0°
D8 e D9	753,2∠-76,0°

Fonte: O Autor (2019).

3.2.3 Curtos-Circuitos à 85% da Linha de Transmissão

Para o ajuste das unidades de sobrecorrente instantâneas de fase e de neutro foram simulados os curtos-circuitos trifásicos e monofásicos a 85% da linha de transmissão e observado o valor de contribuição em cada trecho. Os resultados estão representados nas Tabelas 20, 21, 22, 23 e 24.

Tabela 20 - Contribuição do trecho do disjuntor D1 durante um curto-circuito a 85% da linha entre as barras 1 e 2

Curto-Circuito a 85% da Linha Entre as Barras 1 e 2		
Trecho do Disjuntor	Contribuição Para o Curto Trifásico (A)	Contribuição Para o Curto Monofásico (A)
D1	1382,3∠-67,9°	629,9∠-75,9°

Fonte: O Autor (2019).

Tabela 21 - Contribuição do trecho do disjuntor D2 durante um curto-circuito a 85% da linha entre as barras 2 e 1

Curto-Circuito a 85% da Linha Entre as Barras 2 e 1		
Trecho dos Disjuntor	Contribuição Para o Curto Trifásico (A)	Contribuição Para o Curto Monofásico (A)
D2	474,4∠-75,5°	187,9∠-81,3°

Fonte: O Autor (2019).

Tabela 22 - Contribuição do trecho do disjuntor D3 durante um curto-circuito a 85% da linha entre as barras 2 e 3

Curto-Circuito a 85% da Linha Entre as Barras 2 e 3		
Trecho do Disjuntor	Contribuição Para o Curto Trifásico (A)	Contribuição Para o Curto Monofásico (A)
D3	1375,4∠-66,0°	607,2∠-73,9°

Fonte: O Autor (2019).

Tabela 23 - Contribuição do trecho do disjuntor D4 durante um curto-circuito a 85% da linha entre as barras 3 e 2

Curto-Circuito a 85% da Linha Entre as Barras 3 e 2		
Trecho do Disjuntor	Contribuição Para o Curto Trifásico (A)	Contribuição Para o Curto Monofásico (A)
D4	403,3∠-86,9°	114,6∠-93,7°

Fonte: O Autor (2019).

Tabela 24 - Contribuição do trecho do disjuntor D8 durante um curto-circuito a 85% da linha entre as barras 2 e 5

Curto-Circuito a 85% da Linha Entre as Barras 2 e 5		
Trecho do Disjuntor	Contribuição Para o Curto Trifásico (A)	Contribuição Para o Curto Monofásico (A)
D8	1763,8∠-68,0°	796,2∠-76,1°

Fonte: O Autor (2019).

4 AJUSTES DOS RELÉS

Os ajustes dos relés devem ser feitos de forma bastante cuidadosa, visando conceder ao projeto fatores como sensibilidade, confiabilidade, rapidez e seletividade, requisitos básicos de sistemas de proteção.

4.1 RELÉS DE SOBRECORRENTE DIRECIONAL DE FASE – 50/51

Os relés associados aos disjuntores D2, D4, D6 e D7 são responsáveis por monitorar as correntes devido as contribuições dos geradores, ou seja, estão direcionados para esquerda. Já os disjuntores D1, D3 e D5 estão direcionados para as correntes devido a contribuição da concessionária.

4.1.1 Ajuste de Corrente

As unidades temporizadas devem ser ajustadas seguindo o que foi descrito na seção 2.1.2 e com inequação (2.1), com o fator de sobrecarga escolhido de 1,5 e α de

1,1 (relé digital). Com a finalidade de dar mais sensibilidade aos relés, será considerando apenas como critério o limite inferior na inequação.

Já para as unidades instantâneas, o ajuste segue de acordo com a seção 2.1.4.1 e a equação (2.7), utilizando-se os valores das contribuições para a corrente curto-circuito trifásicos a 85% da linha de transmissão.

Como os relés são digitais, os valores de ajuste devem ser múltiplos de 0,05.

4.1.1.1 Relé associado ao Disjuntor D1:

- Unidade temporizada - 51:

A corrente nominal do sistema:

$$I_N = \frac{30 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 69 \times 10^3}$$

$$I_N = 251,02 \text{ A}$$

A corrente nominal que passa pelas linhas de transmissão 1 (LT_1):

$$I_{NLT1} = \frac{I_N}{2}$$

$$I_{NLT1} = 125,51 \text{ A}$$

Então:

$$\frac{1,5 \times 125,51}{\frac{800}{5}} \leq I_{ajuste51D1}$$

$$1,177 \leq I_{ajuste51D1}$$

$$I_{ajuste51D1} = 1,2 \text{ A}$$

Essa corrente corresponde a uma corrente no primário do TC, e consequentemente de pick-up, de:

$$I_{pick-up_{51D1}} = I_{ajuste51D1} \times \frac{800}{5}$$

$$I_{pick-up_{51D1}} = 192 \text{ A}$$

- Unidade instantânea - 50:

Com a equação (2.7) para o ajuste desta unidade e o valor da contribuição para a corrente de curto-circuito trifásico a 85% da linha LT_1 , então:

$$I_{cc3\phi_{85\%D1}} = 1382 \angle -67,9^\circ A$$

$$I_{ajuste50D1} = \frac{1382}{\frac{800}{5}}$$

$$I_{ajuste50D1} \approx 8,64 A$$

Como o valor da corrente de ajuste deve ser múltiplo de 0,05:

$$I_{ajuste50D1} = 8,8 A$$

Essa corrente corresponde a uma corrente no primário do TC de:

$$I_{pick-up_{50D1}} = I_{ajuste50D1} \times \frac{800}{5}$$

$$I_{pick-up_{50D1}} = 1408 A$$

4.1.1.2 Relé associado ao Disjuntor D2

- Unidade temporizada - 51:

Como estão protegendo a mesma linha de transmissão e não existem derivações durante seu trajeto, a corrente de ajuste da unidade temporizada associada ao disjuntor D2 será igual a corrente de ajuste da unidade temporizada associada ao disjuntor D1. Logo:

$$I_{ajuste51D2} = I_{ajuste51D1}$$

$$I_{ajuste51D2} = 1,2 A$$

Essa corrente corresponde a uma corrente no primário do TC de:

$$I_{pick-up_{51D2}} = I_{ajuste51D2} \times \frac{800}{5}$$

$$I_{pick-up_{51D2}} = 192 A$$

- Unidade instantânea - 50:

O valor da contribuição para a corrente de curto-circuito trifásico a 85% da linha entre a barra 2 e 1 é:

$$I_{cc3\phi_{85\%D2}} = 474,4\angle -75,5^\circ A$$

Logo o ajuste da sua corrente será:

$$I_{ajuste50D2} = \frac{474,4}{\frac{800}{5}}$$

$$I_{ajuste50D1} \approx 2,965 A$$

Como o valor da corrente de ajuste deve ser múltiplo de 0,05:

$$I_{ajuste50D1} = 3 A$$

Essa corrente corresponde a uma corrente no primário do TC de:

$$I_{pick-up_{50D2}} = I_{ajuste50D2} \times \frac{800}{5}$$

$$I_{pick-up_{50D2}} = 480 A$$

4.1.1.3 Relé associado ao Disjuntor D3

- Unidade temporizada – 51

:

A corrente nominal que passa pela linha de transmissão 2 (LT_2) será igual a corrente nominal do sistema calculada no item 4.1.1:

$$I_{NLT2} = I_N$$

$$I_{NLT2} = 251,02 A$$

Logo:

$$\frac{1,5 \times 251,02}{\frac{800}{5}} \leq I_{ajuste51D3}$$

$$2,353 \leq I_{ajuste51D3}$$

$$I_{ajuste51D3} = 2,4 A$$

Essa corrente corresponde a uma corrente no primário do TC de:

$$I_{pick-up_{51D3}} = I_{ajuste51D1} \times \frac{800}{5}$$

$$I_{pick-up_51D3} = 384 A$$

- Unidade instantânea - 50:

Deve-se usar a equação (2.7) para o ajuste desta unidade e o valor da contribuição para a corrente de curto-circuito trifásico a 85% da linha entre as barras 2 e 3, então:

$$I_{cc3\phi_{85\%D3}} = 1375,4 \angle -66,0^\circ A$$

$$I_{ajuste50D3} = \frac{1375,4}{\frac{800}{5}}$$

$$I_{ajuste50D3} \approx 8,596 A$$

Como o valor da corrente de ajuste deve ser múltiplo de 0,05:

$$I_{ajuste50D3} = 8,6 A$$

Essa corrente corresponde a uma corrente no primário do TC de:

$$I_{pick-up_50D3} = I_{ajuste50D3} \times \frac{800}{5}$$

$$I_{pick-up_51D3} = 1376 A$$

4.1.1.4 Relé Associado ao Disjuntor D4

- Unidade temporizada - 51:

Pelo mesmo motivo mostrado no item 4.1.2.3, a corrente de ajuste da unidade temporizada associada ao disjuntor D4 será igual a corrente de ajuste da unidade temporizada associada ao disjuntor D3. Logo:

$$I_{ajuste51D4} = I_{ajuste51D3}$$

$$I_{ajuste51D4} = 2,4 A$$

Essa corrente corresponde a uma corrente no primário do TC de:

$$I_{pick-up_51D4} = I_{ajuste51D4} \times \frac{800}{5}$$

$$I_{pick-up_51D4} = 384 A$$

- Unidade instantânea - 50:

O valor da contribuição para a corrente de curto-circuito trifásico a 85% da linha entre a barra 3 e 2 é:

$$I_{cc3\phi_{85\%D4}} = 403,3\angle -86,9^\circ A$$

Logo o ajuste da sua corrente será:

$$I_{ajuste50D4} = \frac{403,3}{\frac{800}{5}}$$

$$I_{ajuste50D4} \approx 2,52 A$$

Como o valor da corrente de ajuste deve ser múltiplo de 0,05:

$$I_{ajuste50D4} = 2,55 A$$

Essa corrente corresponde a uma corrente no primário do TC de:

$$I_{pick-up_{50D4}} = I_{ajuste50D4} \times \frac{800}{5}$$

$$I_{pick-up_{50D4}} = 408 A$$

4.1.1.5 Relé Associado ao Disjuntor D5

- Ajuste da unidade temporizada:

O ajuste dessa unidade do relé D5 será igual ao ajuste do relé D4 porque a corrente nominal que passa por ambos é a mesma, então:

$$I_{ajuste51D5} = I_{ajuste51D4}$$

$$I_{ajuste51D5} = 2,4 A$$

Essa corrente corresponde a uma corrente no primário do TC de:

$$I_{pick-up_{51D5}} = I_{ajuste51D5} \times \frac{800}{5}$$

$$I_{pick-up_{51D5}} = 384 A$$

- Ajuste da unidade instantânea

A unidade instantânea será desabilitada.

4.1.1.6 Relé Associado ao Disjuntor D6

Como a tensão onde esse relé está instalado é de 13,8KV, a corrente nominal é dada por:

$$I_N = \frac{30 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 13,8 \times 10^3}$$

$$I_N = 1255,109 \text{ A}$$

- Unidade temporizada - 51:

Logo:

$$\frac{1,5 \times 1255,109}{\frac{800}{5}} \leq I_{ajuste51D6}$$

$$11,77 \leq I_{ajuste51D6}$$

$$I_{ajuste51D6} = 11,8 \text{ A}$$

Essa corrente corresponde a uma corrente no primário do TC de:

$$I_{pick-up_{51D6}} = I_{ajuste51D6} \times \frac{800}{5}$$

$$I_{pick-up_{51D6}} = 1888 \text{ A}$$

- Unidade instantânea - 50:

A unidade instantânea será desabilitada.

4.1.1.7 Relé Associado ao Disjuntor D7

- Unidade temporizada - 51:

A corrente nominal é dada por:

$$I_N = \frac{15 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 13,8 \times 10^3}$$

$$I_N = 627,554 \text{ A}$$

Logo:

$$\frac{1,5 \times 627,554}{\frac{800}{5}} \leq I_{ajuste51D7}$$

$$5,88 \leq I_{ajuste51D7}$$

$$I_{ajuste51D7} = 5,9A$$

Essa corrente corresponde a uma corrente no primário do TC de:

$$I_{pick-up_{51D7}} = I_{ajuste51D7} \times \frac{800}{5}$$

$$I_{pick-up_{51D7}} = 944A$$

- Unidade instantânea – 50

A unidade instantânea será desabilitada

4.1.1.8 Relé Associado ao Disjuntor D8

- Unidade temporizada - 51:

A corrente nominal é dada por:

$$I_N = \frac{10 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 13,8 \times 10^3}$$

$$I_N = 83,67A$$

Logo:

$$\frac{1,5 \times 83,67}{\frac{800}{5}} \leq I_{ajuste51D8}$$

$$0,78 \leq I_{ajuste51D8}$$

$$I_{ajuste51D8} = 0,8A$$

Essa corrente corresponde a uma corrente no primário do TC de:

$$I_{pick-up_{51D8}} = I_{ajuste51D8} \times \frac{800}{5}$$

$$I_{pick-up_{51D8}} = 128A$$

- Unidade instantânea - 50:

Deve-se usar a equação (2.7) para o ajuste desta unidade e o valor da contribuição para a corrente de curto-circuito trifásico a 85% da linha LT_3 , então:

$$I_{cc3\phi_{85\%D8}} = 1763\angle - 68^\circ A$$

$$I_{ajuste50D8} = \frac{1763,8}{\frac{800}{5}}$$

$$I_{ajuste50D8} \approx 11,02A$$

Como o valor da corrente de ajuste deve ser múltiplo de 0,05:

$$I_{ajuste50D8} = 11,05 A$$

Essa corrente corresponde a uma corrente no primário do TC de:

$$I_{pick-up_{50D8}} = I_{ajuste50D8} \times \frac{800}{5}$$

$$I_{pick-up_{50D8}} = 1768 A$$

4.1.1.9 Relé Associado ao Disjuntor D9

- Unidade temporizada - 51:

Esse relé é destinado para a proteção de carga, seu ajuste é igual ao do relé do disjuntor D8. Logo:

$$I_{ajuste51D9} = I_{ajuste51D8}$$

$$I_{ajuste51D9} = 0,8 A$$

Essa corrente corresponde a uma corrente no primário do TC de:

$$I_{pick-up_{51D9}} = I_{ajuste51D9} \times \frac{800}{5}$$

$$I_{pick-up_{51D9}} = 128 A$$

- Unidade instantânea - 50:

A unidade instantânea será desabilitada.

4.1.1.10 Relé Associado ao Disjuntor D10

Como não existe contribuição vinda da carga para curto-circuito nas barras, esse disjuntor D10 será desabilitado.

4.1.2 Coordenação do Tempo de Atuação das Unidades Temporizadas de Fase

Para encontrar o tempo de atuação será utilizada a equação (2.4), considerando os coeficientes dados pela IEE na Tabela 3 para uma curva inversa. O tempo de atuação de cada relé depende do local do curto-circuito, porque para cada caso o valor do múltiplo do relé muda. Quando necessário, o tempo de coordenação entre dois disjuntores próximos deve ser 0,30s.

4.1.2.1 Curto-Circuito Trifásico na Barra 2

Para um curto na barra 2 o relé D1 estaria protegendo a LT1 da contribuição vinda da concessionária, enquanto os relés dos disjuntores D4, D6 e D7 estariam protegendo o sistema das contribuições vindas dos geradores. D2, D3 e D5 não iriam atuar devido a sua direcionalidade não enxergar os curtos. Como não existe contribuição vinda da barra 5, os relés dos Disjuntores D8 e D9 também não iriam atuar.

- Relé associado ao Disjuntor D1

Para o curto na barra 2, a corrente de contribuição passando no trecho em que D1 está instalado seria:

$$I_{cc3\phi_{D1}} = 1176,8 \angle -67,68^\circ A$$

Logo o múltiplo do relé do disjuntor D1:

$$M_{rele_51D1} = \frac{1176,8}{\frac{800}{5} \times 1,2}$$

$$M_{rele_51D1} = 6,13$$

Assumindo um T_{curva} igual a 0,2, tempo de atuação será:

$$t_{rele_51D1} = 0,2 \times \frac{0,14}{(6,13)^{0,02} - 1}$$

$$t_{rele_51D1} = 0,76 \text{ s}$$

- Relé associado ao Disjuntor D4

Para o curto na barra 2, a corrente de contribuição passando no trecho em que D4 está instalado seria:

$$I_{cc3\phi_{D4}} = 395,4 \angle -86,4^\circ \text{ A}$$

Logo o múltiplo do relé do disjuntor D4:

$$M_{rele_51D4} = \frac{395,4}{\frac{800}{5} \times 2,4}$$

$$M_{rele_51D4} = 1,03$$

Assumindo um T_{curva} igual a 0,2, tempo de atuação será:

$$t_{rele_51D4} = 0,2 \times \frac{0,14}{(1,03)^{0,02} - 1}$$

$$t_{rele_51D4} = 1,92 \text{ s}$$

- Relé associado ao Disjuntor D6

Para o curto na barra 2, a corrente de contribuição passando no trecho em que D6 está instalado seria:

$$I_{cc3\phi_{D6}} = 1977,2 \angle -86,4^\circ \text{ A}$$

Logo o múltiplo do relé do disjuntor D6:

$$M_{rele_51D6} = \frac{1977,2}{\frac{800}{5} \times 11,8}$$

$$M_{rele_51D6} = 1,05$$

Assumindo um T_{curva} igual a 0,21, tempo de atuação será:

$$t_{rele_51D6} = 0,21 \times \frac{0,14}{(1,05)^{0,02} - 1}$$

$$t_{rele_51D6} = 30,11 \text{ s}$$

- Relé associado ao Disjuntor D7

Para o curto na barra 2, a corrente de contribuição passando no trecho em que D7 está instalado seria:

$$I_{cc3\phi_{D7}} = 988,6 \angle -86,4^\circ \text{ A}$$

Logo o múltiplo do relé do disjuntor D7:

$$M_{rele_51D7} = \frac{988,6}{\frac{800}{5} \times 5,9}$$

$$M_{rele_51D7} = 1,05$$

O relé D7 deve coordenar com o relé D6, por isso é imposto a ele um tempo de coordenação Δt de 0,30s. Então, tem-se:

$$t_{rele_51D7} = t_{rele_51D6} + \Delta t$$

$$t_{rele_51D7} = 30,41 \text{ s}$$

O T_{curva} do relé será dado por:

$$T_{curva} = \frac{28,98}{\frac{0,14}{(1,05)^{0,02} - 1}}$$

$$T_{curva} = 0,212$$

4.1.2.2 Curto-Circuito Trifásico na Barra 3

Para um curto na barra 3 o relé D1 estaria protegendo a LT1 da contribuição vinda da concessionária e o relé D3 a LT2, enquanto os relés dos disjuntores D6 e D7

estariam protegendo o sistema das contribuições vindas dos geradores. D2, D4 e D5 não iriam atuar devido a sua direcionalidade não enxergar os curtos. Como não existe contribuição vinda da barra 5, os relés dos Disjuntores D8 e D9 também não iriam atuar.

- Relé associado ao Disjuntor 3

Para o curto na barra 3, a corrente de contribuição passando no trecho em que D3 está instalado seria:

$$I_{cc3\phi_{D3}} = 1281,4 \angle -65,9^\circ A$$

Logo o múltiplo do relé do disjuntor D3:

$$M_{rele_51D3} = \frac{1281,4}{\frac{800}{5} \times 2,4}$$

$$M_{rele_51D3} = 3,34$$

Assumindo um T_{curva} igual a 0,2, tempo de atuação será:

$$t_{rele_51D3} = 0,2 \times \frac{0,14}{(3,34)^{0,02} - 1}$$

$$t_{rele_51D3} = 1,15 s$$

- Relé associado ao Disjuntor D1

Para o curto na barra 3, a corrente de contribuição passando no trecho em que D1 está instalado seria:

$$I_{cc3\phi_{D1}} = 640,7 \angle -65,9^\circ A$$

Logo o múltiplo do relé do disjuntor D1:

$$M_{rele_51D1} = \frac{640,7}{\frac{800}{5} \times 1,2}$$

$$M_{rele_51D1} = 3,34$$

O relé do disjuntor D1 é a proteção a montante do relé do disjuntor D3, portanto o seu tempo de atuação é o tempo de atuação do relé do disjuntor D3 acrescido do tempo de coordenação:

$$t_{rele_51D1} = t_{rele_51D3} + \Delta t$$

$$t_{rele_51D1} = 1,45 \text{ s}$$

O T_{curva} do relé será dado por:

$$T_{curva} = \frac{1,45}{\frac{0,14}{(3,34)^{0,02} - 1}}$$

$$T_{curva} = 0,25$$

- Relé associado ao Disjuntor D6

Para o curto na barra 3, a corrente de contribuição passando no trecho em que D6 está instalado seria:

$$I_{cc3\phi_{D6}} = 2267,6 \angle -90^\circ \text{ A}$$

Logo o múltiplo do relé do disjuntor D6:

$$M_{rele_51D6} = \frac{2267,6}{\frac{800}{5} \times 11,8}$$

$$M_{rele_51D6} = 1,20$$

Assumindo um T_{curva} igual a 0,21, tempo de atuação será:

$$t_{rele_51D6} = 0,21 \times \frac{0,14}{(1,20)^{0,02} - 1}$$

$$t_{rele_51D6} = 8,05 \text{ s}$$

- Relé associado ao Disjuntor D7

Para o curto na barra 3, a corrente de contribuição passando no trecho em que D7 está instalado seria:

$$I_{cc3\phi_{D7}} = 1133,8 \angle -90^\circ A$$

Logo o múltiplo do relé do disjuntor D7:

$$M_{rele_51D7} = \frac{1133,8}{\frac{800}{5} \times 5,9}$$

$$M_{rele_51D7} = 1,20$$

O relé D7 deve coordenar com o relé D4, por isso é imposto a ele um tempo de coordenação Δt de 0,30s. Então, tem-se:

$$t_{rele_51D7} = t_{rele_51D6} + \Delta t$$

$$t_{rele_51D7} = 8,35 s$$

O T_{curva} do relé será dado por:

$$T_{curva} = \frac{8,35}{\frac{0,14}{(1,20)^{0,02} - 1}}$$

$$T_{curva} = 0,22$$

4.1.2.3 Curto-Circuito Trifásico na Barra 4

Para um curto na barra 4 o relé D1 estaria protegendo a LT1 da contribuição vinda da concessionária, o relé D3 a LT2 e o relé D5 o trecho com o transformador, enquanto o relé D7 estaria protegendo os geradores. D2, D4 e D6 não iriam atuar devido a sua direcionalidade não enxergar os curtos. Como não existe contribuição vinda da barra 5, os relés dos Disjuntores D8 e D9 também não iriam atuar.

- Relé associado ao Disjuntor D5

Para o curto na barra 4, a corrente de contribuição passando no trecho em que D5 está instalado seria:

$$I_{cc3\phi_{D5}} = 895,1 \angle -73,4^\circ A$$

Logo o múltiplo do relé do disjuntor D5:

$$M_{rele_51D5} = \frac{895,1}{\frac{800}{5} \times 2,4}$$

$$M_{rele_51D5} = 2,33$$

Assumindo um T_{curva} igual a 0,2, tempo de atuação será:

$$t_{rele_51D5} = 0,2 \times \frac{0,14}{(2,33)^{0,02} - 1}$$

$$t_{rele_51D5} = 1,64 \text{ s}$$

- Relé associado ao Disjuntor D3

Como a corrente de ajuste e a contribuição para corrente de curto-circuito da barra 3 que passa pelo relé D3 e D4 são as mesmas, o seu múltiplo também será:

$$M_{rele_51D3} = 2,33$$

O relé D3 é o relé a montante do relé D5, por isso é imposto a ele um tempo de coordenação Δt de 0,30s em relação ao relé D5. Então, tem-se:

$$t_{rele_51D3} = t_{rele_51D5} + \Delta t$$

$$t_{rele_51D3} = 1,94 \text{ s}$$

O T_{curva} do relé será dado por:

$$T_{curva} = \frac{1,94}{\frac{0,14}{(2,33)^{0,02} - 1}}$$

$$T_{curva} = 0,24$$

- Relé associado ao Disjuntor D1

Para o curto na barra 4, a corrente de contribuição passando no trecho em que D1 está instalado seria:

$$I_{cc3\phi_{D1}} = 447,5 \angle -73,4^\circ \text{ A}$$

Logo o múltiplo do relé do disjuntor D1:

$$M_{rele_51D1} = \frac{447,5}{\frac{800}{5} \times 1,2}$$

$$M_{rele_51D1} = 2,33$$

O relé do disjuntor D1 é a proteção a montante do relé do disjuntor D3, portanto o seu tempo de atuação é o tempo de atuação do relé do disjuntor D3 acrescido do tempo de coordenação:

$$t_{rele_51D1} = t_{rele_51D3} + \Delta t$$

$$t_{rele_51D1} = 2,24 \text{ s}$$

O T_{curva} do relé será dado por:

$$T_{curva} = \frac{2,24}{\frac{0,14}{(2,24)^{0,02} - 1}}$$

$$T_{curva} = 0,26$$

- Relé associado ao Disjuntor D7

Para o curto na barra 4, a corrente de contribuição passando no trecho em que D7 está instalado seria:

$$I_{cc3\phi_{D7}} = 1353,9 \angle -90^\circ \text{ A}$$

Logo o múltiplo do relé do disjuntor D7:

$$M_{rele_51D7} = \frac{1353,9}{\frac{800}{5} \times 5,9}$$

$$M_{rele_51D7} = 1,43$$

Como o curto-circuito é na barra de alimentação dos geradores, será escolhido o tempo de atuação de 1 segundo visando manter a integridade do equipamento. É considerando um tempo de atuação conservador.

$$t_{rele_51D7} = 1 \text{ s}$$

O T_{curva} do relé será dado por:

$$T_{curva} = \frac{1}{\frac{0,14}{(2,33)^{0,02} - 1}}$$

$$T_{curva} = 0,12$$

4.1.2.4 Curto-Circuito Trifásico na Barra 5

Para um curto na barra 5 o relé D1 estaria protegendo a LT1 da contribuição vinda da concessionária, o relé D4 a LT2 e o relé D6 o trecho com o transformador, enquanto o relé D7 estaria protegendo os geradores. D2, D3, D5 e D9 não iriam atuar devido a sua direcionalidade não enxergar os curtos.

- Relé associado ao Disjuntor D8

Para o curto na barra 5, a corrente de contribuição passando no trecho em que D8 está instalado seria:

$$I_{cc3\phi_{D8}} = 1659,8 \angle -67,7^\circ A$$

Logo o múltiplo do relé do disjuntor D5:

$$M_{rele_51D8} = \frac{1659,8}{\frac{800}{5} \times 0,8}$$

$$M_{rele_51D8} = 12,97$$

Assumindo um T_{curva} igual a 0,2, tempo de atuação será:

$$t_{rele_51D8} = 0,2 \times \frac{0,14}{(12,97)^{0,02} - 1}$$

$$t_{rele_51D8} = 0,53 s$$

- Relé associado ao Disjuntor D1

Para o curto na barra 4, a corrente de contribuição passando no trecho em que D1 está instalado seria:

$$I_{cc3\phi_{D1}} = 715,2 \angle -65,1^\circ A$$

Logo o múltiplo do relé do disjuntor D1:

$$M_{rele_51D1} = \frac{715,2}{\frac{800}{5} \times 1,2}$$

$$M_{rele_51D1} = 3,73$$

O relé do disjuntor D1 é a proteção a montante do relé do disjuntor D8, portanto o seu tempo de atuação é o tempo de atuação do relé do disjuntor D8 acrescido do tempo de coordenação:

$$t_{rele_51D1} = t_{rele_51D8} + \Delta t$$

$$t_{rele_51D1} = 0,83 \text{ s}$$

O T_{curva} do relé será dado por:

$$T_{curva} = \frac{0,83}{\frac{0,14}{(3,73)^{0,02} - 1}}$$

$$T_{curva} = 0,16 \text{ s}$$

- Relé associado ao Disjuntor D4

Para o curto na barra 5, a corrente de contribuição passando no trecho em que D4 está instalado seria:

$$I_{cc3\phi_{D4}} = 240,3 \angle -83,7^\circ \text{ A}$$

Logo o múltiplo do relé do disjuntor D1:

$$M_{rele_51D4} = \frac{240,3}{\frac{800}{5} \times 2,4}$$

$$M_{rele_51D4} = 0,63$$

O relé D4 não irá atuar porque a contribuição para a corrente de curto-circuito na barra 5 que vem do gerador é menor do que a sua corrente de ajuste

- Relé associado ao Disjuntor D6

Para o curto na barra 5, a corrente de contribuição passando no trecho em que D6 está instalado seria:

$$I_{cc3\phi_{D6}} = 1201,6 \angle -83,7^\circ A$$

Logo o múltiplo do relé do disjuntor D6:

$$M_{relé_51D6} = \frac{1201,6}{\frac{800}{5} \times 11,8}$$

$$M_{relé_51D6} = 0,63$$

A unidade instantânea do relé D6 também não irá atuar.

- Relé associado ao Disjuntor D7

Para o curto na barra 3, a corrente de contribuição passando no trecho em que D7 está instalado seria:

$$I_{cc3\phi_{D7}} = 600,8 \angle -83,7^\circ A$$

Logo o múltiplo do relé do disjuntor D7:

$$M_{relé_51D7} = \frac{600,08}{\frac{800}{5} \times 5,9}$$

$$M_{relé_51D7} = 0,63$$

O relé D7 não irá atuar para esse curto-circuito.

4.1.2.5 Curto-Circuito na Trifásico Barra 1

Nenhuma unidade temporizada é acionada porque o valor da contribuição para corrente de curto-circuito vinda dos geradores é menor do que a corrente de pick-up dos relés.

4.1.3 Ajuste da Unidade Direcional

Para que a unidade de sobrecorrente atue, é necessário que a unidade direcional seja sensibilizada para a fase θ da corrente de curto-circuito. Ou seja, a corrente de curto-circuito deve estar na região de operação da unidade 87 para que seja enviado a unidade de sobrecorrente o comando para a atuação.

4.1.3.1 Curto-Circuito Trifásico na Barra 2

- Relé Associado ao Disjuntor D1

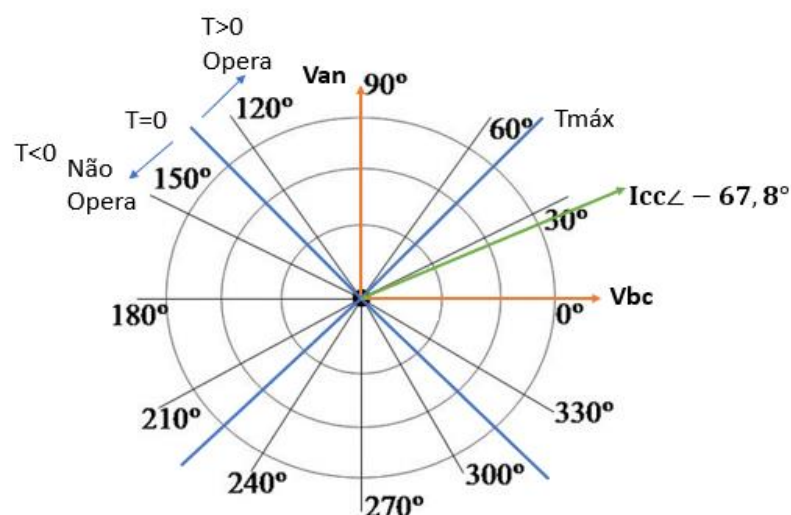
A corrente que passa por este relé durante o curto-circuito trifásico é:

$$I_{cc3\phi_{D1}} 1176,8 \angle -67,8^\circ A$$

A unidade direcional deve ser sensibilizada para uma fase igual a $-67,8^\circ$. Diante disso, escolhe-se um β de 45° e uma polarização de 90° como ajuste.

A Figura 40 representa o diagrama fasorial da unidade direcional do relé D1. O vetor tensão de fase-neutro V_{an} é a referência do diagrama.

Figura 40 - Diagrama fasorial da unidade direcional do relé D1 para um curto-circuito na barra 2



Fonte: O Autor (2019).

- Relé Associado ao Disjuntor D4

A contribuição para o curto-circuito que passa pelo disjuntor D4 é:

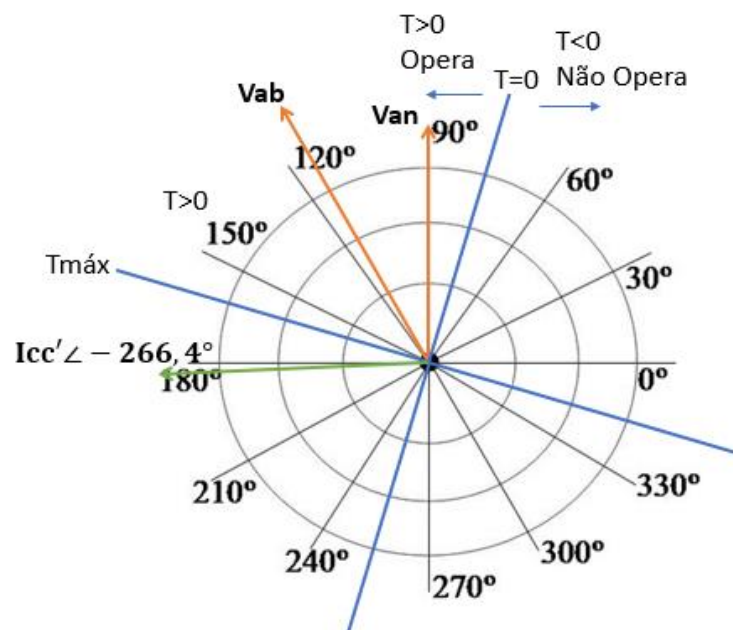
$$I_{cc3\phi_{D4}} = 395,4 \angle -86,4^\circ A$$

O sentido dessa contribuição é contrário ao sentido do fluxo de potência durante a operação normal do sistema. Por isso é necessário referir $I_{cc3\phi_{D4}}$ 180° no diagrama fasorial para que possa ser feito o ajuste da unidade direcional.

$$I_{cc3\phi_{D4}}' = 395,4 \angle -266,4^\circ A$$

A unidade direcional será sensibilizada para a fase $-266,4^\circ$, escolhe-se uma tensão de polarização de -30° e um β de 45° . A Figura 41 ilustra o diagrama fasorial da unidade direcional do relé D4. O vetor tensão de fase-neutro V_{an} é a referência do diagrama.

Figura 41 - Diagrama fasorial da unidade direcional do relé D4 para um curto-circuito na barra 2



Fonte: O Autor (2019).

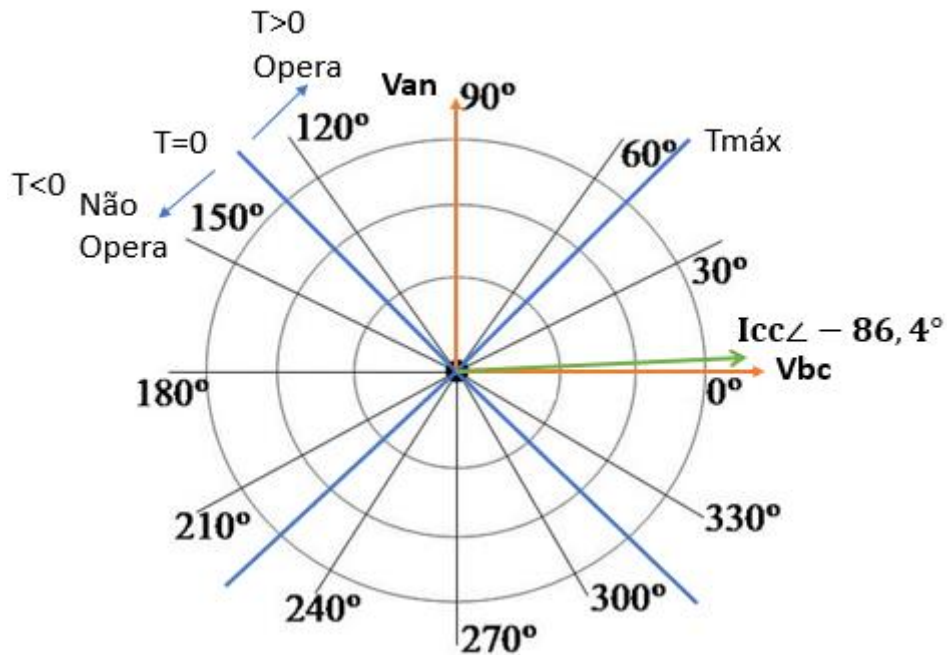
- Relé Associado ao Disjuntor D6

A contribuição para o curto-circuito que passa pelo disjuntor D6 é:

$$I_{cc3\phi_{D6}} = 1977,2 \angle -86,4^\circ A$$

A unidade direcional será sensibilizada para a fase -86.4° , escolhe-se então uma polarização de 90° e um β de 45° . O diagrama fasorial da unidade direcional do relé D6 está ilustrado na Figura 42.

Figura 42 - Diagrama fasorial da unidade direcional do relé D6 para um curto-circuito na barra 2



Fonte: O Autor (2019).

- Relé Associado ao Disjuntor D7

Como a corrente que passa pelo disjuntor D7 tem a mesma fase da corrente que passa pelo disjuntor D6 os ajustes de suas unidades direcionais serão iguais.

4.1.3.2 Curto-Circuito Trifásico na Barra 3

- Relé Associado ao Disjuntor D1

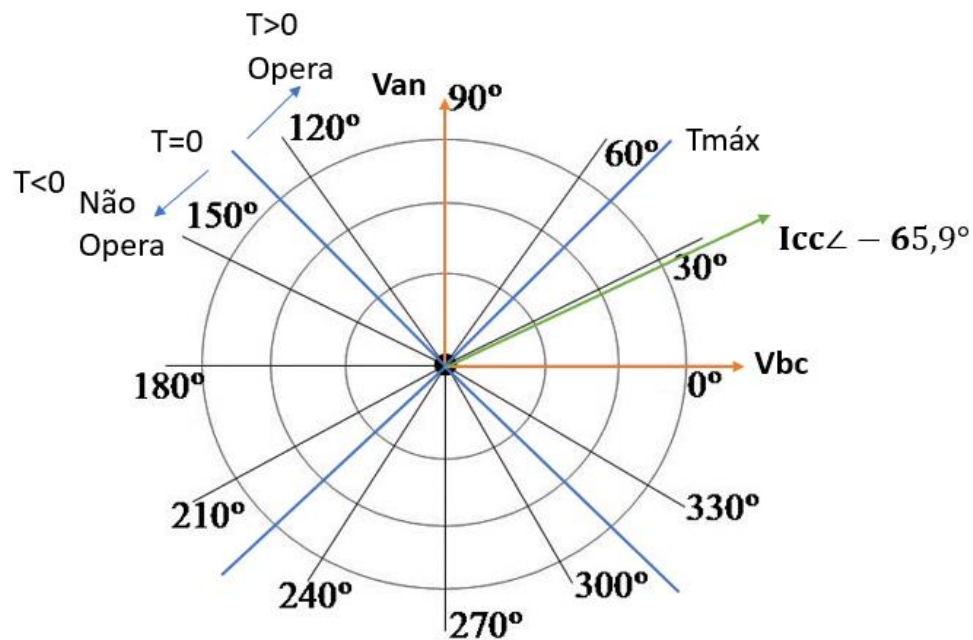
A corrente que passa por este relé durante o curto-circuito trifásico é:

$$I_{cc3\phi_{D1}} = 640,7 \angle -65,9^\circ A$$

A unidade direcional deve ser sensibilizada para uma fase igual a $-65,9^\circ$. Diante disso, escolhe-se um β de 45° e uma polarização de 90° como ajuste.

A Figura 43 representa o diagrama fasorial da unidade direcional do relé D1. O vetor tensão de fase-neutro V_{an} é a referência do diagrama.

Figura 43 - Diagrama fasorial da unidade direcional do relé D1 para um curto-circuito na barra 3



Fonte: O Autor (2019).

- Relé Associado ao Disjuntor D3

A corrente que passa pelo disjuntor D3 tem fase igual à da corrente que passa pelo disjuntor D1. Logo, os ajustes de suas unidades direcionais serão iguais.

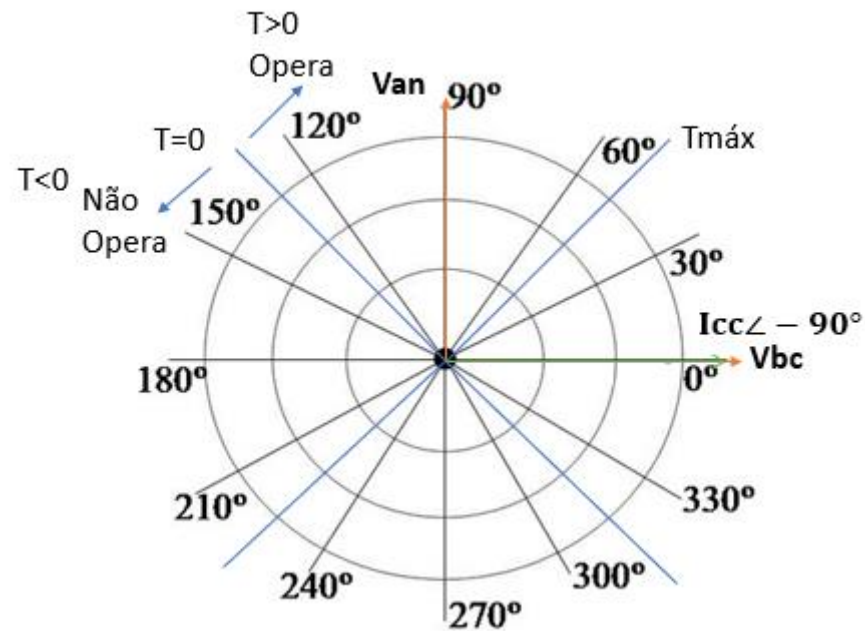
- Relé Associado ao Disjuntor D6

A contribuição para o curto-circuito que passa pelo disjuntor D6 é:

$$I_{cc3\phi_{D6}} = 2267,6 \angle -90^\circ A$$

A unidade direcional será sensibilizada para a fase -86.4° , escolhe-se então uma polarização de 90° e um β de 45° . O diagrama fasorial da unidade direcional do relé D6 está ilustrado na Figura 44.

Figura 44 - Diagrama fasorial da unidade direcional do relé D6 para um curto-circuito na barra 3



Fonte: O Autor (2019).

- Relé Associado ao Disjuntor D7

Como a corrente que passa pelo disjuntor D7 tem a mesma fase da corrente que passa pelo disjuntor D6 os ajustes de suas unidades direcionais serão iguais.

4.1.3.3 Curto-Circuito Trifásico na Barra 4

- Relé Associado ao Disjuntor D1

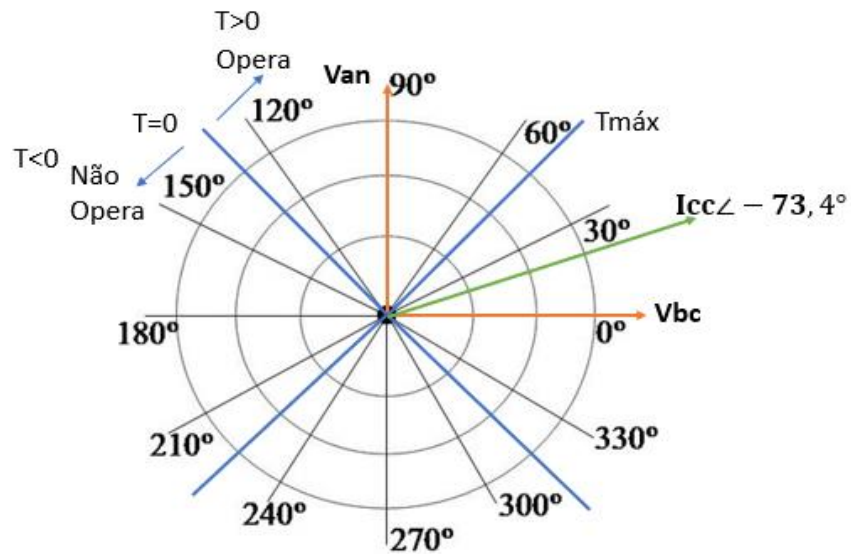
A corrente que passa por este relé durante o curto-circuito trifásico é:

$$I_{cc3\phi_{D1}} = 447,5 \angle -73,4^\circ A$$

A unidade direcional deve ser sensibilizada para uma fase igual a $-73,4^\circ$. Diante disso, escolhe-se um β de 45° e uma polarização de 90° como ajuste.

A Figura 45 representa o diagrama fasorial da unidade direcional do relé D1. O vetor tensão de fase-neutro V_{an} é a referência do diagrama.

Figura 45 - Diagrama fasorial da unidade direcional do relé D1 para um curto-circuito na barra 4



Fonte: O Autor (2019).

- Relé Associado ao Disjuntor D3

A corrente que passa pelo disjuntor D3 tem fase igual à da corrente que passa pelo disjuntor D1. Logo, os ajustes de suas unidades direcionais serão iguais.

- Relé Associado ao Disjuntor D5

A corrente que passa pelo disjuntor D5 tem fase igual à da corrente que passa pelo disjuntor D1. Logo, os ajustes de suas unidades direcionais serão iguais.

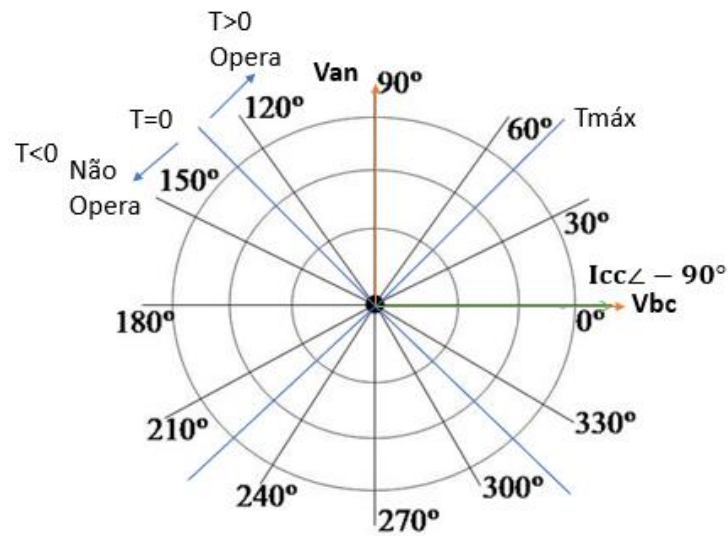
- Relé Associado ao Disjuntor D7

A corrente que passa por este relé durante o curto-circuito trifásico é:

$$I_{cc3\phi_{D7}} = 1535,9 \angle -90^\circ \text{ A}$$

A unidade direcional será sensibilizada para a fase -90° , escolhe-se então uma polarização de 90° e um β de 45° . O diagrama fasorial da unidade direcional do relé D7 está ilustrado na Figura 44.

Figura 46 - O Diagrama fasorial da unidade direcional do relé D7 para um curto-circuito na barra 4



Fonte: O Autor (2019).

4.1.3.4. Curto-Circuito Trifásico na Barra 5

- Relé Associado ao Disjuntor D1

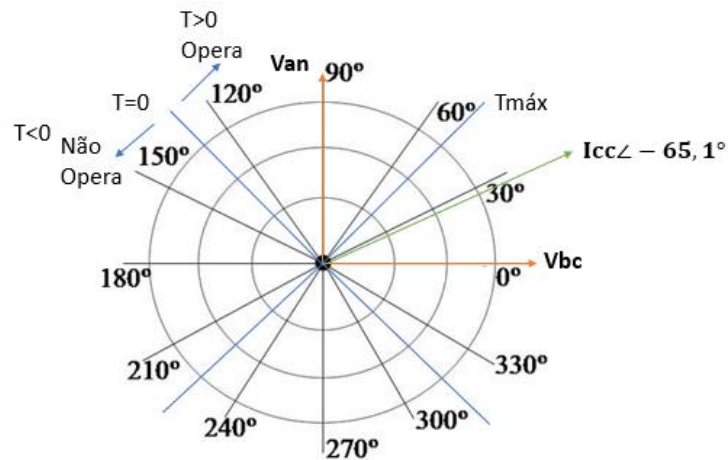
A corrente que passa por este relé durante o curto-circuito trifásico é:

$$I_{cc3\phi_{D1}} = 715,2 \angle -65,1^\circ A$$

A unidade direcional deve ser sensibilizada para uma fase igual a $-65,1^\circ$. Diante disso, escolhe-se um β de 45° e uma polarização de 90° como ajuste.

A Figura 45 representa o diagrama fasorial da unidade direcional do relé D1. O vetor tensão de fase-neutro V_{an} é a referência do diagrama.

Figura 47 - Diagrama fasorial da unidade direcional do relé D1 para um curto-circuito na barra 5



Fonte: O Autor (2019).

- Relé Associado ao Disjuntor D8

A corrente que passa por este relé durante o curto-circuito trifásico é:

$$I_{cc3\phi_{D8}} = 1659,8 \angle -67,1^\circ A$$

Como a fase da corrente que passa pelo disjuntor D8 é muito próxima a fase da corrente que passa pelo disjuntor D1, eles terão o mesmo ajuste para as suas unidades direcionais.

4.1.4 Relés atuantes por Curto-Circuito Trifásico

As Tabelas 16, 17, 18 e 19 foram montadas para resumir a atuação dos relés de sobrecorrente com unidade direcional. Para o curto na barra 1 nenhum disjuntor do sistema irá atuar, por isso deveria existir uma proteção na saída da concessionária visando a interrupção durante um curto-circuito nesta barra.

Tabela 25 - Relés de sobrecorrente com unidade direcional durante curto-circuito trifásico na barra 2

Curto – Circuito Trifásico na Barra 2			
Relé do Disjuntor	$I_{pick} - up_{51} (A)$	$t_{51} (s)$	$I_{pick} - up_{50} (A)$
D1	192	0,76	1408
D4	384	1,92	408
D6	1888	30,11	Desabilitado
D7	944	30,41	Desabilitado

Fonte: O Autor (2019).

Tabela 26 - Relés de sobrecorrente com unidade direcional durante curto-circuito trifásico na barra 3

Curto – Circuito Trifásico na Barra 3			
Relé do Disjuntor	$I_{pick} - up_{51} (A)$	$t_{51} (s)$	$I_{pick} - up_{50} (A)$
D1	192	1,45	1408
D3	384	1,15	408
D6	1888	8,05	Desabilitado
D7	944	8,35	Desabilitado

Fonte: O Autor (2019).

Tabela 27 - Relés de sobrecorrente com unidade direcional durante curto-circuito trifásico na barra 4

Curto – Circuito Trifásico na Barra 4			
Relé do Disjuntor	$I_{pick} - up_{51} (A)$	$t_{51} (s)$	$I_{pick} - up_{50} (A)$
D1	192	2,24	1408
D3	384	1,94	408
D5	1888	1,64	Desabilitado
D7	944	1	Desabilitado

Fonte: O Autor (2019).

Tabela 28 - Relés de sobrecorrente com unidade direcional durante curto-circuito trifásico na barra 5

Curto – Circuito Trifásico na Barra 5			
Relé do Disjuntor	$I_{pick} - up_{51} (A)$	$t_{51} (s)$	$I_{pick} - up_{50} (A)$
D1	192	0,83	1408
D8	384	0,53	408

Fonte: O Autor (2019).

4.2 AJUSTES DOS RELÉS DE DISTÂNCIA DE FASE – 21

Apenas os relés associados aos disjuntores D3 e D4 possuem a proteção de distância. O tipo escolhido para o relé 21 é do de admitância, com um ângulo de torque máximo (β) escolhido de 30° .

Da Tabela 7, tem-se os seguintes valores de impedância de sequência positiva para a linha de transmissão 2 e para o transformador em pu, com potência de base 100MVA e tensão de base de 69KV:

$$\overrightarrow{Z_{LT1}} = 0,3972 \angle 63,6^\circ pu$$

$$\overrightarrow{Z_{transfo}} = 0,30 \angle 90^\circ pu$$

A impedância de base é:

$$Z_{base} = \frac{(69 \times 10^3)^2}{100 \times 10^6}$$

$$Z_{base} = 47,61 \Omega$$

A impedância de sequência positiva real da linha de transmissão 2 (Z_{LT2_REAL}) será:

$$\overrightarrow{Z_{LT2_REAL}} = 0,2979 \angle 63,6^\circ \times 47,61$$

$$\overrightarrow{Z_{LT2_REAL}} = 14,1830 \angle 63,6^\circ \Omega$$

Enquanto que impedância do real do transformador é:

$$\overrightarrow{Z_{transfo_REAL}} = 0,30 \angle 90^\circ \times 47,61$$

$$\overrightarrow{Z_{transfo_REAL}} = 14,228 \angle 90^\circ \Omega$$

Os ajustes serão feitos como indicado pela seção 2.3.2.1

4.2.1 Relé Associado ao Disjuntor D4

O relé 4 será ajustado na direção do relé 3. Sua zona de proteção é ajustada de acordo com a equação (2.62):

$$Z_{ajusteD4} = \frac{Z_{80\%LT2}}{\cos(\theta_{ZLT2} - \beta)}$$

$$Z_{ajusteD4} = \frac{0,8 \times 14,1830}{\cos(63,60^\circ - 30^\circ)}$$

$$Z_{ajusteD4} = 13,57 \, \Omega$$

4.2.2 Relé Associado ao Disjuntor D3

O relé 3 será ajustado na direção do relé 4 para proteger a linha de transmissão 2 e parte do transformador.

O Ajuste da sua primeira zona tem o mesmo valor do ajuste da zona de proteção do relé 4, por ser tratar da mesma linha de transmissão:

$$Z_{zona1D3} = Z_{ajusteD3}$$

$$Z_{zona1D3} = 13,57 \, \Omega$$

Para encontrar o ajuste da zona 2 é necessário encontrar a impedância dessa zona, dada pela equação (2.63)

$$\overrightarrow{Z_2} = \overrightarrow{Z_{LT2_REAL}} + 50\% \overrightarrow{Z_{transfo_REAL}}$$

$$\overrightarrow{Z_2} = 14,1830 \angle 63,6^\circ + 0,5 \times 14,228 \angle 90^\circ$$

$$\overrightarrow{Z_2} = 20,8 \angle 72,35^\circ \, \Omega$$

O ajuste da zona 2 é realizado com equação (2.59):

$$Z_{zona2D3} = \frac{Z_2}{\cos(\theta_{Z2} - \beta)}$$

$$Z_{zona2D3} = \frac{20,8}{\cos(72,35^\circ - 30^\circ)}$$

$$Z_{zona2D3} = 28,14 \, \Omega$$

4.3 RELÉS DE SOBRECORRENTE DE NEUTRO – 50/51N

Os relés de sobrecorrente de neutro são responsáveis por monitorar o sistema contra correntes de falta que tenham componente de sequência zero, como as correntes de curto-circuito monofásico. Devido ao transformador delta-delta, apenas as unidades de sobrecorrente de neutro associadas aos disjuntores que monitoram as contribuições para o curto-circuito vindas da concessionária irão atuar.

4.3.1 Ajustes de Corrente da Unidade de Sobrecorrente de Neutro

A unidade temporizada será ajustada seguindo as características descritas na seção (2.1.5.1) e pela inequação (2.12), escolhendo-se o limite inferior para conferir maior sensibilidade. O desequilíbrio adotado será de 30%.

Para a unidade instantânea, vale o que foi mostrado na seção (2.1.5.2), com o ajuste seguindo a equação (2.13).

4.3.1.1 Relé associado ao disjuntor D1

- Unidade temporizada – 51N:

$$\frac{0,3 \times 125,51}{\frac{800}{5}} \leq I_{ajuste51ND1}$$

$$0,235 \leq I_{ajuste51ND1}$$

$$I_{ajuste51ND1} = 0,25 \text{ A}$$

Essa corrente corresponde a uma corrente no primário do TC de:

$$I_{pick-up_{51ND1}} = I_{ajuste51ND1} \times \frac{800}{5}$$

$$I_{pick-up_{51ND1}} = 40 \text{ A}$$

- Unidade instantânea – 50N:

Para o ajuste desta unidade, considerando o valor da corrente de curto-circuito monofásico a 85% da linha LT_1 , então:

$$I_{cc1\phi_{85\%D1}} = 629,9\angle -75,5^\circ A$$

$$I_{ajuste50ND1} = \frac{629,9}{\frac{800}{5}}$$

$$I_{ajuste50ND1} \approx 3,95 A$$

Como o valor da corrente de ajuste deve ser múltiplo de 0,05:

$$I_{ajuste50ND1} = 3,95$$

Essa corrente corresponde a uma corrente no primário do TC de:

$$I_{pick-up_{50ND1}} = I_{ajuste50ND1} \times \frac{800}{5}$$

$$I_{pick-up_{50ND1}} = 632 A$$

4.3.1.2 Relé Associado ao Disjuntor D2

- Unidade temporizada – 51N:

Este relé tem o mesmo ajuste do relé associado ao Disjuntor D1:

$$I_{ajuste51ND2} = I_{ajuste51ND1}$$

$$I_{ajuste51ND2} = 0,25 A$$

Essa corrente corresponde a uma corrente no primário do TC de:

$$I_{pick-up_{50ND2}} = I_{ajuste50ND1} \times \frac{800}{5}$$

$$I_{pick-up_{50ND2}} = 40 A$$

- Unidade instantânea – 50N:

Para o ajuste desta unidade, considerando o valor da corrente de curto-circuito monofásico a 85% da linha de transmissão 1 no sentido da barra 2 para 1, então:

$$I_{cc1\phi_{85\%D2}} = 187,9\angle -81,3^\circ A$$

$$I_{ajuste50ND2} = \frac{187,9}{\frac{800}{5}}$$

$$I_{ajuste50ND2} \approx 1,17A$$

Como o valor da corrente de ajuste deve ser múltiplo de 0,05:

$$I_{ajuste50ND2} = 1,20 A$$

Essa corrente corresponde a uma corrente no primário do TC de:

$$I_{pick-up_{50ND2}} = I_{ajuste50ND2} \times \frac{800}{5}$$

$$I_{pick-up_{50ND2}} = 192 A$$

4.3.1.3 Relé Associado ao Disjuntor D3

- Unidade temporizada – 51N:

$$I_{NLT2} = I_N$$

$$I_{NLT2} = 251,02 A$$

$$\frac{0,3 \times 251,02}{\frac{800}{5}} \leq I_{ajuste51ND3}$$

$$0,47 \leq I_{ajuste51ND3}$$

$$I_{ajuste51ND3} = 0,5 A$$

Essa corrente corresponde a uma corrente no primário do TC de:

$$I_{pick-up_{51ND3}} = I_{ajuste51ND3} \times \frac{800}{5}$$

$$I_{pick-up_{51ND3}} = 80 A$$

- Unidade instantânea – 50N:

Para o ajuste desta unidade, considerando o valor da corrente de curto-circuito monofásico a 85% da linha LT_2 , então:

$$I_{cc1\phi_{85\%D3}} = 607,2\angle -73,9^\circ A$$

$$I_{ajuste50ND3} = \frac{607,2}{\frac{800}{5}}$$

$$I_{ajuste50ND3} \approx 3,795 A$$

Como o valor da corrente de ajuste deve ser múltiplo de 0,05:

$$I_{ajuste50ND3} = 3,8 A$$

Essa corrente corresponde a uma corrente no primário do TC de:

$$I_{pick-up_{50ND3}} = I_{ajuste50ND3} \times \frac{800}{5}$$

$$I_{pick-up_{50ND3}} = 608 A$$

4.3.1.4 Relé Associado ao Disjuntor D4

- Unidade temporizada – 51N:

O seu ajuste será igual ao do relé associado ao disjuntor D3:

$$I_{ajuste51ND4} = I_{ajuste51ND3}$$

$$I_{ajuste51ND4} = 0,5 A$$

Logo:

$$I_{pick-up_{51ND4}} = 80 A$$

- Unidade instantânea – 50N:

Para o ajuste desta unidade, considerando o valor da corrente de curto-circuito monofásico a 85% da linha de transmissão 2 no sentido da barra 3 para 2, então:

$$I_{cc1\phi_{85\%D4}} = 114,6\angle -93,7^\circ A$$

$$I_{ajuste50ND4} = \frac{114,6}{\frac{800}{5}}$$

$$I_{ajuste50ND4} \approx 0,72A$$

Como o valor da corrente de ajuste deve ser múltiplo de 0,05:

$$I_{ajuste50ND4} = 0,75 A$$

Essa corrente corresponde a uma corrente no primário do TC de:

$$I_{pick-up_{50ND4}} = I_{ajuste50ND4} \times \frac{800}{5}$$

$$I_{pick-up_{50ND4}} = 120 A$$

4.3.1.5 Relé Associado ao Disjuntor D5

- Unidade temporizada – 51N:

O seu ajuste será igual ao do relé associado ao disjuntor D3:

$$I_{ajuste51ND5} = I_{ajuste51ND3}$$

$$I_{ajuste51ND5} = 0,5 A$$

Logo:

$$I_{pick-up_{51ND5}} = 80 A$$

- Unidade instantânea – 50N:

A unidade instantânea será desabilitada.

4. 3.1.6 Relé Associado ao Disjuntor D6

- Unidade temporizada – 51N:

$$I_N = 1255,109 A$$

$$\frac{0,3 \times 1255,109}{\frac{800}{5}} \leq I_{ajuste51ND6}$$

$$2,3533 \leq I_{ajuste51ND6}$$

$$I_{ajuste51ND6} = 2,4 \text{ A}$$

Essa corrente corresponde a uma corrente no primário do TC de:

$$I_{pick-up_{51ND6}} = I_{ajuste51ND6} \times \frac{800}{5}$$

$$I_{pick-up_{51ND6}} = 384 \text{ A}$$

- Unidade instantânea – 50N:

A unidade instantânea será desabilitada.

4.3.1.7 Relé Associado ao Disjuntor D7

- Unidade temporizada – 51N:

$$I_N = 627,554 \text{ A}$$

$$\frac{0,3 \times 627,554}{\frac{800}{5}} \leq I_{ajuste51ND7}$$

$$1,177 \leq I_{ajuste51ND7}$$

$$I_{ajuste51ND7} = 1,2 \text{ A}$$

Essa corrente corresponde a uma corrente no primário do TC de:

$$I_{pick-up_{51ND7}} = I_{ajuste51ND7} \times \frac{800}{5}$$

$$I_{pick-up_{51ND7}} = 192 \text{ A}$$

- Unidade instantânea – 50N:

A unidade instantânea será desabilitada.

4.3.1.8 Relé Associado ao Disjuntor D8

- Unidade temporizada – 51N:

$$I_N = 83,67 \text{ A}$$

$$\frac{0,3 \times 83,67}{\frac{800}{5}} \leq I_{ajuste51ND8}$$

$$0,157 \leq I_{ajuste51ND8}$$

$$I_{ajuste51ND8} = 0,2 A$$

Essa corrente corresponde a uma corrente no primário do TC de:

$$I_{pick-up_{51ND8}} = I_{ajuste51ND8} \times \frac{800}{5}$$

$$I_{pick-up_{51ND8}} = 32 A$$

- Unidade instantânea – 50N:

Para o ajuste desta unidade, considerando o valor da corrente de curto-circuito monofásico a 85% da linha LT_3 , então:

$$I_{cc1\phi_{85\%D8}} = 796,2 \angle -76,1^\circ A$$

$$I_{ajuste50ND8} = \frac{796,2}{\frac{800}{5}}$$

$$I_{ajuste50ND8} \approx 4,97 A$$

Como o valor da corrente de ajuste deve ser múltiplo de 0,05:

$$I_{ajuste50ND8} = 5 A$$

Essa corrente corresponde a uma corrente no primário do TC de:

$$I_{pick-up_{50ND8}} = I_{ajuste50ND8} \times \frac{800}{5}$$

$$I_{pick-up_{50ND8}} = 800 A$$

4.3.1.9 Relé Associado ao Disjuntor D9

- Unidade temporizada – 51N:

O seu ajuste será igual ao do relé associado ao disjuntor D8:

$$I_{ajuste51ND9} = I_{ajuste51ND8}$$

$$I_{ajuste51ND9} = 0,5 A$$

Logo:

$$I_{pick-up_{51ND9}} = 80 A$$

- Unidade instantânea – 50N:

A unidade instantânea será desabilitada.

4.3.1.10 Relé Associado ao Disjuntor D10

Como não existe contribuição vinda da carga para curto-circuito nas barras, esse disjuntor D10 será desabilitado.

4.3.2 Coordenação dos Tempos de Atuação das Unidades Temporizadas de Neutro

Essa coordenação é realizada de modo semelhante à das unidades temporizadas de fase, onde a equação (2.4) é utilizada. Porém, o múltiplo do relé agora é calculado a partir da corrente de curto-circuito monofásico.

4.3.2.1 Curto-Circuito Monofásico na Barra 2

Para um curto na barra 2 os relés D1 e D4 seriam os responsáveis pela proteção de sobrecorrente de neutro. Não existe componente de sequência zero na contribuição dos geradores para esse curto, logo os relés não irão atuar.

- Relé associado ao Disjuntor D1

Para o curto na barra 2, a corrente de contribuição passando no trecho em que D1 está instalado seria:

$$I_{cc1\phi_{D1}} = 533,6 \angle -75,7^\circ A$$

Logo o múltiplo do relé do disjuntor D1:

$$M_{rele_51ND1} = \frac{533,6}{\frac{800}{5} \times 0,25}$$

$$M_{rele_51ND1} = 13,34$$

Assumindo um T_{curva} igual a 0,2, tempo de atuação será:

$$t_{rele_51ND1} = 0,2 \times \frac{0,14}{(13,34)^{0,02} - 1}$$

$$t_{rele_51ND1} = 0,53 \text{ s}$$

- Relé associado ao Disjuntor D4

Para o curto na barra 2, a corrente de contribuição passando no trecho em que D4 está instalado seria:

$$I_{cc1\phi_{D4}} = 113,5 \angle -93,3^\circ \text{ A}$$

Logo o múltiplo do relé do disjuntor D1:

$$M_{rele_51ND4} = \frac{113,5}{\frac{800}{5} \times 0,5}$$

$$M_{rele_51ND4} = 1,42$$

Assumindo um T_{curva} igual a 0,2, tempo de atuação será:

$$t_{rele_51ND4} = 0,2 \times \frac{0,14}{(1,42)^{0,02} - 1}$$

$$t_{rele_51ND4} = 3,98 \text{ s}$$

4.3.2.2 Curto-Circuito Monofásico na Barra 3

Para um curto na barra 3 os relés D1 e D3 irão atuar. Não existe componente de sequência zero na contribuição dos geradores para esse curto, logo os relés não irão atuar.

- Relé associado ao Disjuntor 3

Para o curto na barra 3, a corrente de contribuição passando no trecho em que D3 está instalado seria:

$$I_{cc1\phi_{D3}} = 562,1 \angle -73,7^\circ A$$

Logo o múltiplo do relé do disjuntor D3:

$$M_{rele_51ND3} = \frac{562,1}{\frac{800}{5} \times 0,5}$$

$$M_{rele_51ND3} = 7,03$$

Assumindo um T_{curva} igual a 0,2, tempo de atuação será:

$$t_{rele_51ND3} = 0,2 \times \frac{0,14}{(7,03)^{0,02} - 1}$$

$$t_{rele_51ND3} = 0,70s$$

- Relé associado ao Disjuntor D1

Para o curto na barra 3, a corrente de contribuição passando no trecho em que D1 está instalado seria:

$$I_{cc1\phi_{D1}} = 281,02 \angle -73,7^\circ A$$

Logo o múltiplo do relé do disjuntor D1:

$$M_{rele_51ND1} = \frac{281,02}{\frac{800}{5} \times 0,25}$$

$$M_{rele_51ND1} = 7,03$$

O relé do disjuntor D1 é a proteção a montante do relé do disjuntor D3, portanto o seu tempo de atuação é o tempo de atuação do relé do disjuntor D3 acrescido do tempo de coordenação:

$$t_{rele_51ND1} = t_{rele_51ND3} + \Delta t$$

$$t_{rele_51ND1} = 1 s$$

O T_{curva} do relé será dado por:

$$T_{curva} = \frac{1}{\frac{0,14}{(7,03)^{0,02} - 1}}$$

$$T_{curva} = 0,28$$

4.3.2.3 Curto-Circuito Monofásico na Barra 4

Para um curto na barra 4 o relé D7 irá atuar. Não existe componente de sequência zero na contribuição dos geradores para esse curto, logo os relés não irão atuar.

- Relé associado ao Disjuntor D7

Para o curto na barra 4, a corrente de contribuição passando no trecho em que D7 está instalado seria:

$$I_{cc1\phi_{D7}} = 2518,7 \angle -90^\circ A$$

Logo o múltiplo do relé do disjuntor D7:

$$M_{rele_51ND7} = \frac{2518,7}{\frac{800}{5} \times 1,2}$$

$$M_{rele_51ND7} = 13,12$$

Como o curto-circuito é na barra de alimentação dos geradores, será escolhido o tempo de atuação de 1 segundo visando manter a integridade do equipamento.

$$t_{rele_51D7} = 1 s$$

O T_{curva} do relé será dado por:

$$T_{curva} = \frac{1}{\frac{0,14}{(13,12)^{0,02} - 1}}$$

$$T_{curva} = 0,38$$

4.3.2.4 Curto-Circuito Monofásico na Barra 5

Para um curto na barra 5 os relés D1 e D8 irão atuar. Não existe componente de sequência zero na contribuição dos geradores para esse curto, logo os relés não irão atuar.

- Relé associado ao Disjuntor D8

Para o curto na barra 5, a corrente de contribuição passando no trecho em que D8 está instalado seria:

$$I_{cc1\phi_{D8}} = 753,2 \angle -76^\circ A$$

Logo o múltiplo do relé do disjuntor D5:

$$M_{rele_51ND5} = \frac{753,2}{\frac{800}{5} \times 0,2}$$

$$M_{rele_51ND5} = 23,54$$

Assumindo um T_{curva} igual a 0,2, tempo de atuação será:

$$t_{rele_51ND5} = 0,2 \times \frac{0,14}{(23,54)^{0,02} - 1}$$

$$t_{rele_51ND5} = 0,43 s$$

- Relé associado ao Disjuntor D1

Para o curto na barra 5, a corrente de contribuição passando no trecho em que D1 está instalado seria:

$$I_{cc1\phi_{D1}} = 341,83 \angle -74,3^\circ A$$

Logo o múltiplo do relé do disjuntor D1:

$$M_{rele_51ND1} = \frac{341,83}{\frac{800}{5} \times 0,25}$$

$$M_{rele_51ND1} = 8,55$$

O relé do disjuntor D1 é a proteção a montante do relé do disjuntor D8, portanto o seu tempo de atuação é o tempo de atuação do relé do disjuntor D8 acrescido do tempo de coordenação:

$$t_{rele_51ND1} = t_{rele_51D8} + \Delta t$$

$$t_{rele_51ND1} = 0,73 \text{ s}$$

O T_{curva} do relé será dado por:

$$T_{curva} = \frac{0,73}{\frac{0,14}{(8,55)^{0,02} - 1}}$$

$$T_{curva} = 0,023$$

4.3.2.5 Curto-Circuito Monofásico na Barra 1

Como não existe contribuição de sequência zero na contribuição dos geradores, nenhum dos relés irá atuar. Deveria existir uma proteção antes da barra para proteção contra a contribuição para o curto-circuito vinda da concessionária.

4.3.3 Relés atuantes por Curto-Circuito Monofásico

As Tabelas 20, 21, 22 e 23 foram montadas para resumir a atuação dos relés de sobrecorrente de neutro. Para o curto na barra 1 nenhum disjuntor do sistema irá atuar, por isso deveria existir uma proteção na saída da concessionária visando a interrupção durante um curto-circuito nesta barra.

Tabela 29 - Relés de sobrecorrente de neutro durante curto-circuito monofásico na barra 2

Curto – Circuito Monofásico na Barra 2			
Relé do Disjuntor	$I_{pick} - up_{51N} \text{ (A)}$	$t_{51N} \text{ (s)}$	$I_{pick} - up_{50N} \text{ (A)}$
D1	40	0,53	632
D4	80	3,98	120

Fonte: O Autor (2019).

Tabela 30 - Relés de sobrecorrente de neutro durante curto-circuito monofásico na barra 3

Curto – Circuito Monofásico na Barra 3			
Relé do Disjuntor	$I_{pick} - up_{51} (A)$	$t_{51} (s)$	$I_{pick} - up_{50} (A)$
D1	40	1	632
D3	80	0,70	608

Fonte: O Autor (2019).

Tabela 31 - Relés de sobrecorrente de neutro durante curto-circuito monofásico na barra 4

Curto – Circuito Monofásico na Barra 4			
Relé do Disjuntor	$I_{pick} - up_{51} (A)$	$t_{51} (s)$	$I_{pick} - up_{50} (A)$
D7	944	1	Desabilitado

Fonte: O Autor (2019).

Tabela 32 - Relés de sobrecorrente de neutro durante curto-circuito monofásico na barra 5

Curto – Circuito Monofásico na Barra 5			
Relé do Disjuntor	$I_{pick} - up_{51} (A)$	$t_{51} (s)$	$I_{pick} - up_{50} (A)$
D1	40	0,73	632
D8	32	0,43	800

Fonte: O Autor (2019).

4.4 AJUSTE DO RELÉ DIFERENCIAL PERCENTUAL PARA PROTEÇÃO DO TRANSFORMADOR

Foi adicionada uma proteção, não contemplada pelo sistema em estudo, para a proteção do transformador de potencial.

Como mostrado na seção 2.4.2.2, os TCs devem alimentar as bobinas de restrição do relé 87 com correntes iguais ou o mais próximo possível.

- Dimensionando os TCs da proteção diferencial:

A corrente nominal do lado de alta tensão do transformador é:

$$I_{N_Alta} = \frac{30 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 69 \times 10^3}$$

$$I_{N_Alta} = 251,02 \text{ A}$$

A corrente nominal do lado de baixa tensão do transformador é:

$$I_{N_Baixa} = \frac{30 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 13,8 \times 10^3}$$

$$I_{N_Baixa} = 1255,109 \text{ A}$$

Seguindo os valores de correntes para o primário de TCs de medição estabelecidos pela Norma ANSI, e considerando o valor padrão de 5A para a corrente do secundário, se escolhe como relação de transformação RTC_1 para o TC instalado no primário do transformador de potencial:

$$RTC_1 = \frac{300}{5}$$

A corrente no secundário do TC 1, e, portanto, a que passa na bobina de restrição deste transformador de corrente:

$$I_{restrição_{TC1}} = \frac{251,02}{\frac{300}{5}}$$

$$I_{restrição_{TC1}} = 4,184 \text{ A}$$

Como as correntes que passam pelas bobinas de restrição devem ser iguais:

$$I_{restrição_{TC2}} = I_{restrição_{TC1}}$$

$$I_{restrição_{TC2}} = 4,184 \text{ A}$$

Logo a relação de transformação RTC_2 do TC colocado no secundário do transformador deveria ser:

$$RTC_2 = \frac{I_{N_Baixa}}{I_{restrição_{TC2}}}$$

$$RTC_2 = \frac{1255,109}{4,184}$$

$$RTC_2 \approx 300$$

$$RTC_2 = 300 \times \frac{5}{5}$$

$$RTC_2 = \frac{1500}{5}$$

- Ajustes do relé 87

Para o ajuste do relé, deve-se encontrar a soma total de todos erros das correntes diferenciais:

- a. Erro de classes de exatidão dos TCs: Considerando TCs de classe de exatidão de 2,5%:

$$\varepsilon_{\text{classe de exatidão}} = 2,5\% + 2,5\%$$

$$\varepsilon_{\text{classe de exatidão}} = 5\%$$

- b. Erro de comutação do transformador de potência atribuído pela comutação máxima do transformador

$$\varepsilon_{\text{comutação}} = 10\%$$

- c. Erro introduzido levando em consideração uma margem de segurança:

$$\varepsilon_{\text{segurança}} = 5\%$$

Logo o erro total será de:

$$\varepsilon_{\text{total}} = \varepsilon_{\text{classe de exatidão}} + \varepsilon_{\text{comutação}} + \varepsilon_{\text{segurança}}$$

$$\varepsilon_{\text{total}} = 20\%$$

A sensibilidade do relé deve ser maior que a soma de todos os erros introduzidos:

$$\text{Sensibilidade} > 20\%$$

Geralmente os ajustes de sensibilidades fornecidos pelos fabricantes são: 25%, 30% e 45%.

Então a sensibilidade escolhida será:

$$\text{Sensibilidade} = 25\%$$

5 CONCLUSÃO

O estudo conduzido neste trabalho teve o intuito de apresentar os principais relés utilizados na proteção de sistemas elétricos, com um foco na proteção de linhas de transmissão, através da análise de um sistema de alta tensão formado por 5 barras, auxiliado com resultados obtidos com simulações de curtos-circuitos feitas com o ANAFAS.

A elaboração de um projeto de proteção é um processo que deve ser realizado de forma bastante cuidadosa devido a sua grande responsabilidade dentro dos sistemas elétricos e a quantidade de detalhes para que os seus parâmetros possam ser corretamente ajustados. Um estudo de proteção realizado de forma adequada garante a continuidade da transmissão de energia elétrica, seletividade durante falhas e a segurança de dispositivos e equipamentos.

O software ANAFAS se mostrou uma ferramenta muito útil durante os ajustes dos relés. Além de fornecer os valores de curto-circuito em cada barramento elétrico, sua praticidade permitiu obter os valores de corrente em cada trecho do sistema durante os curtos de forma rápida e fácil de se visualizar.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como esse trabalho apresentou maior foco em proteção de linhas de transmissão, é recomendado que seja efetuado um estudo da utilização dos relés de sobrecorrente, diferencial e direcional na proteção elementos específicos do sistema elétrico como os geradores, transformadores e barras.

REFERÊNCIAS

CAMINHA, A. C. **Introdução à proteção de sistemas elétricos**. 1. Ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1977.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **Programa de análise de faltas simultâneas** - versão 7.2.3. Rio de Janeiro: CEPEL, 2018.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE C37.2:** Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations. New York: IEEE, 2008.

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

KINDERMANN, G. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 1. ed. Florianópolis-SC: UFSC, 2008. v. 2.

MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE, D. R. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

OLIVEIRA, A. C. C. **Notas de aula da disciplina de proteção de sistema elétricos**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2019.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Nota à imprensa 3**. Brasília: ONS, 2018. Disponível em:
<http://ons.org.br/Paginas/Noticias/20180322notaaimpressacomplementar2.aspx>.
Acesso em: 13/04/2019.

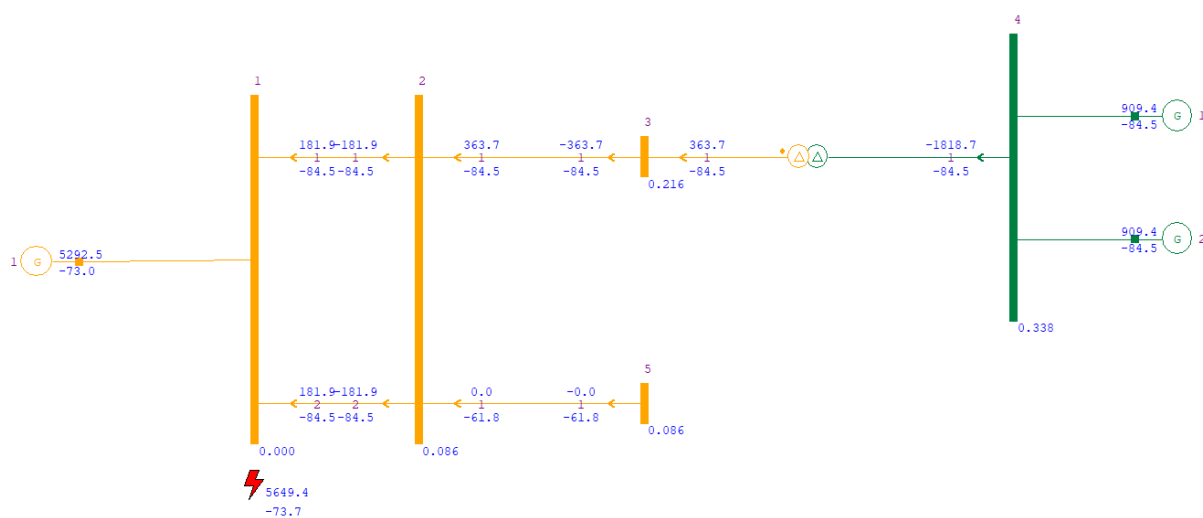
SOUZA, T. S. **Estudo de curto-circuito no sistema elétrico utilizando o Anafas**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

APÊNDICE A – Configurações do Sistema durante as Simulações dos Curtos-Circuitos

Neste apêndice se encontra as configurações do sistema estudado durante o curto-circuito em cada uma das barras. É possível visualizar a contribuição para corrente de curto-circuito de cada trecho do sistema no momento do curto.

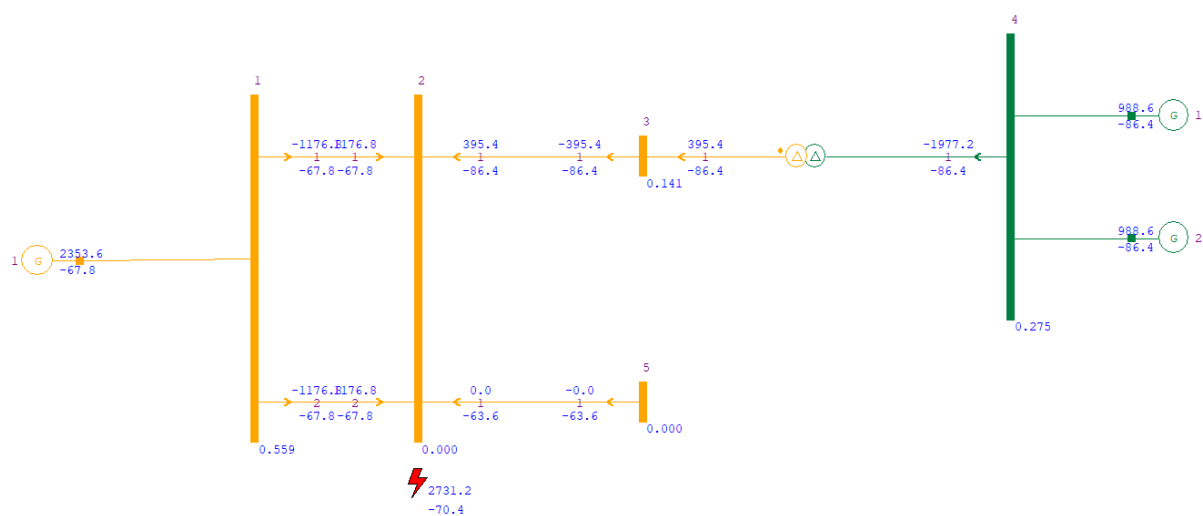
A.1 CURTOS-CIRCUITOS TRIFÁSICOS

Figura 48 - Configuração do sistema elétrico durante um curto-circuito trifásico na barra 1



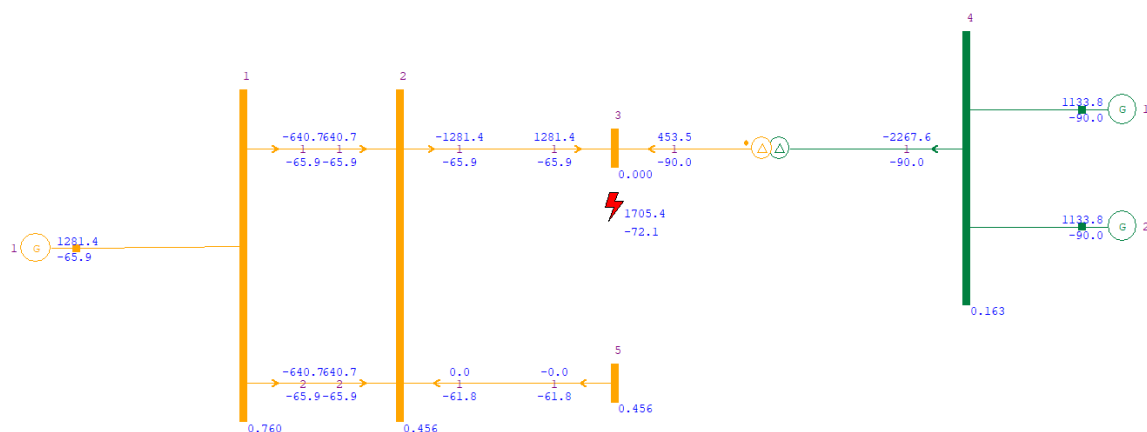
Fonte: CEPEL (2018).

Figura 49 - Configuração do sistema elétrico durante um curto-circuito trifásico na barra 2



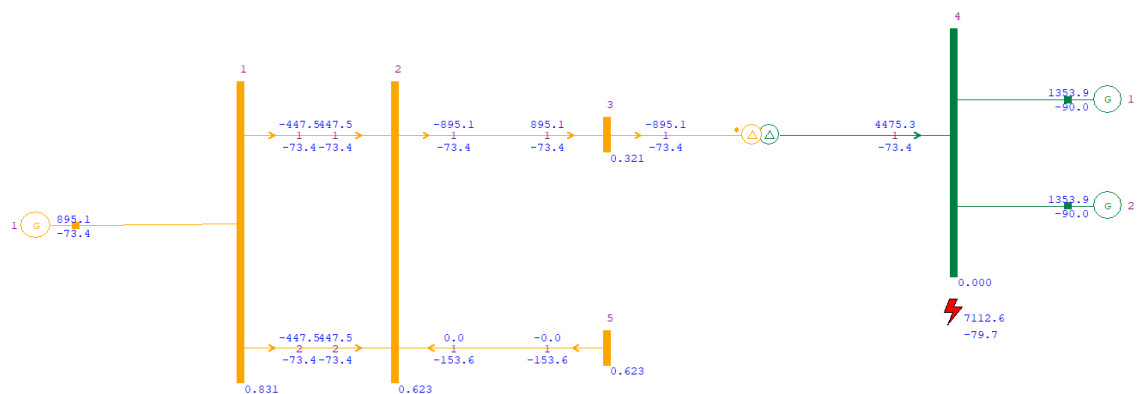
Fonte: CEPEL (2018).

Figura 50 - Configuração do sistema elétrico durante um curto-circuito trifásico na barra 3



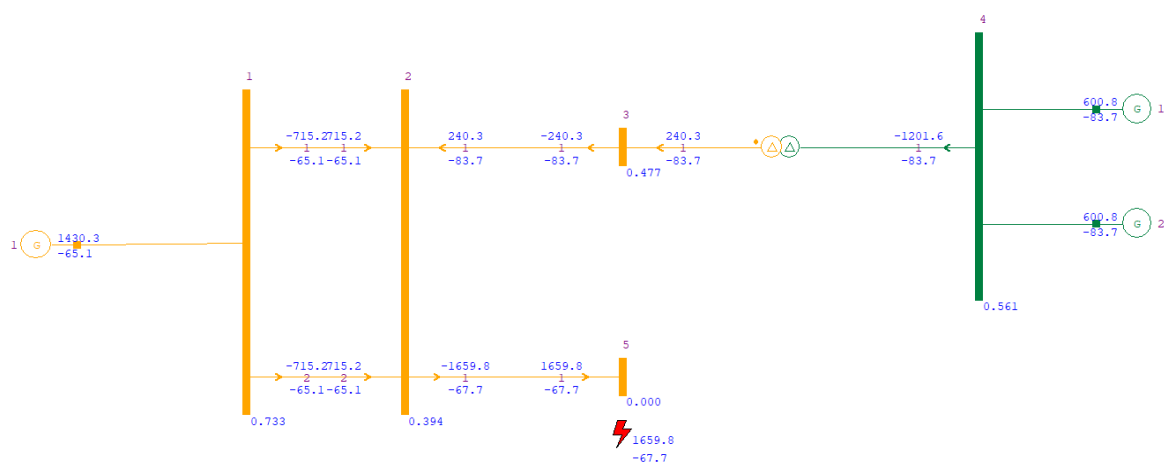
Fonte: CEPEL (2018).

Figura 51 - Configuração do sistema elétrico durante um curto-circuito trifásico na barra 4



Fonte: CEPEL (2018).

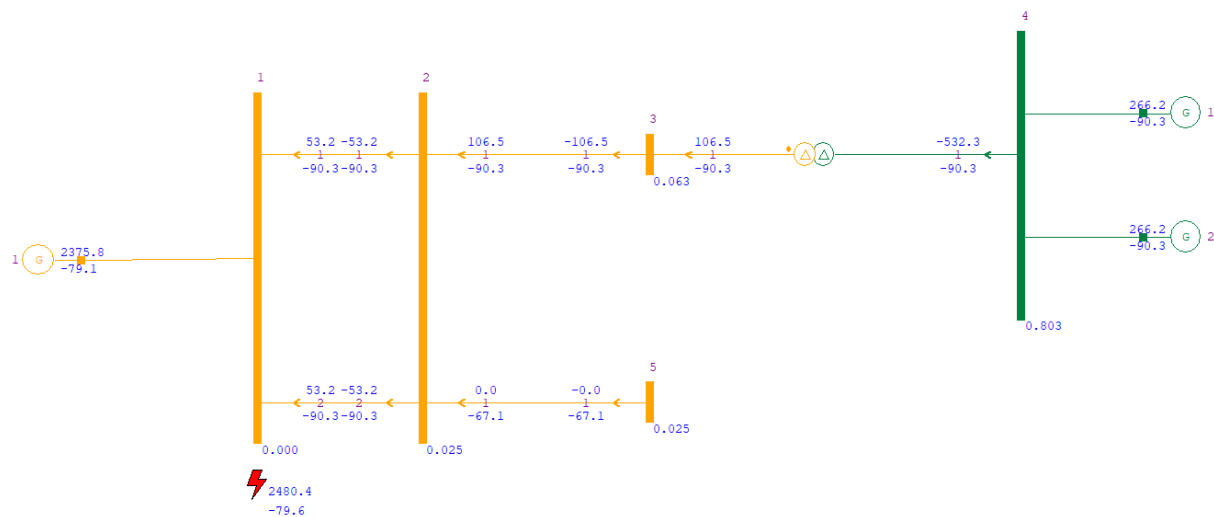
Figura 52 - Configuração do sistema elétrico durante um curto-circuito trifásico na barra 5



Fonte: CEPEL (2018).

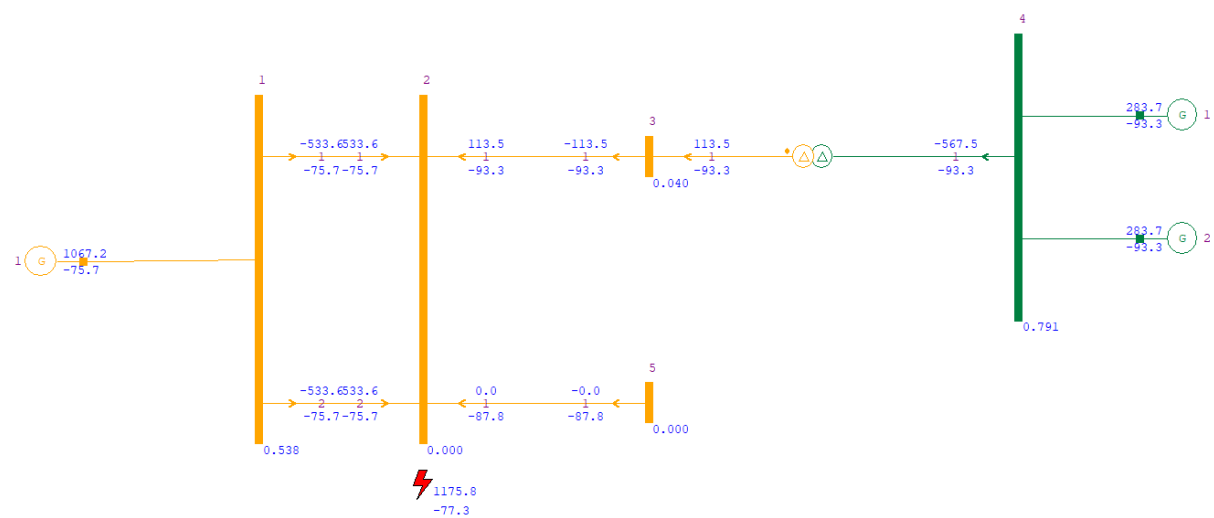
A.2 CURTOS-CIRCUITOS MONOFÁSICOS

Figura 53 - Configuração do sistema elétrico durante um curto-circuito monofásico na barra 1



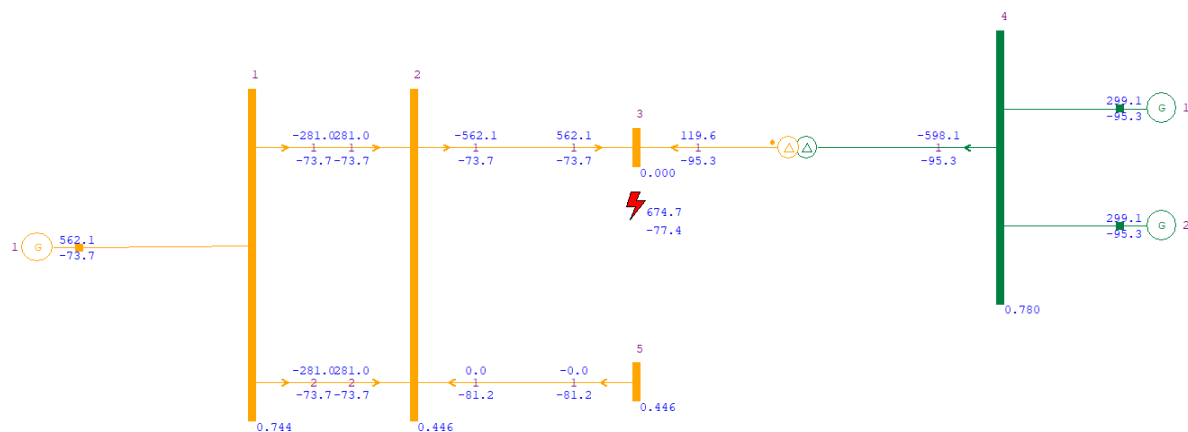
Fonte: CEPEL (2018).

Figura 54 - Configuração do sistema elétrico durante um curto-circuito monofásico na barra 2



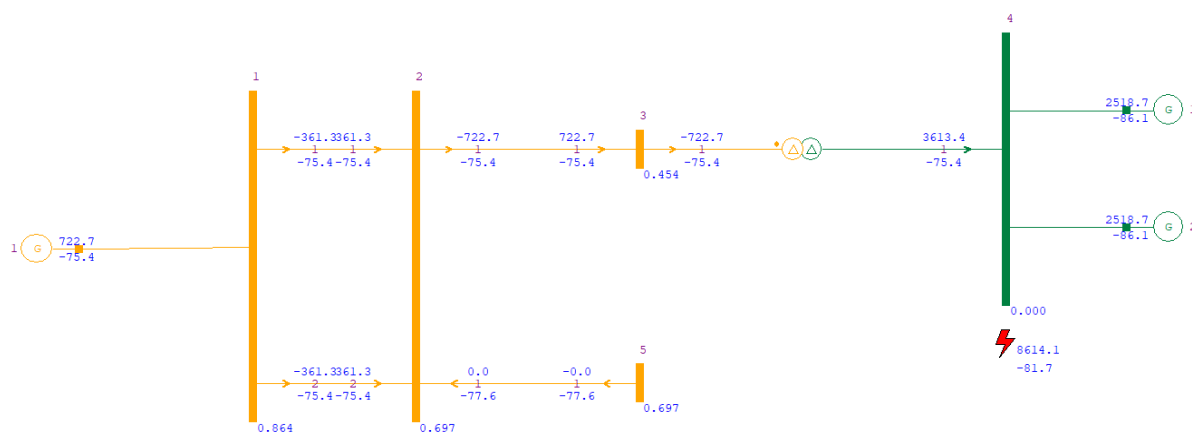
Fonte: CEPEL (2018).

Figura 55 - Configuração do sistema elétrico durante um curto-circuito monofásico na barra 3



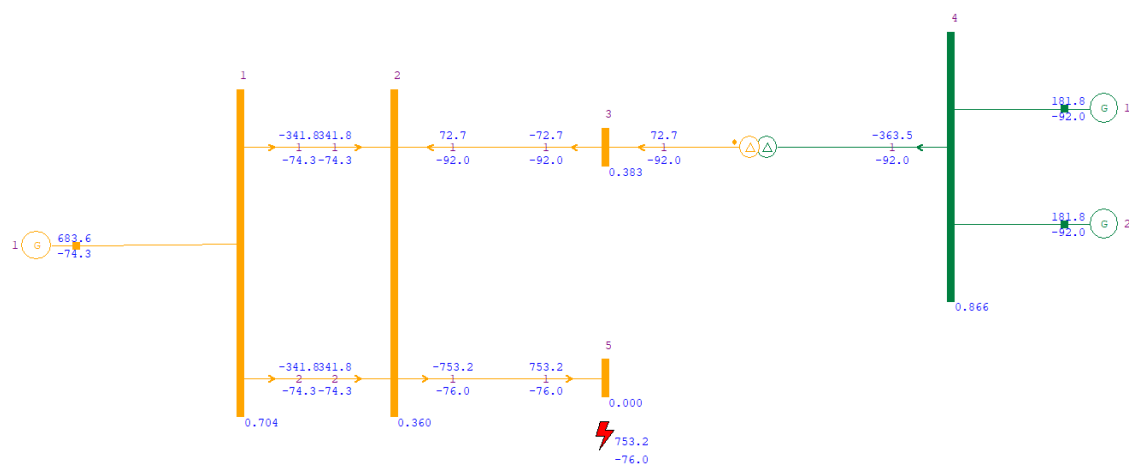
Fonte: CEPEL (2018).

Figura 56 - Configuração do sistema elétrico durante um curto-circuito monofásico na barra 4



Fonte: CEPEL (2018).

Figura 57 - Configuração do sistema elétrico durante um curto-circuito monofásico na barra 5



Fonte: CEPEL (2018).