



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica

MATTEUS CORRÊA MENDES

**PROJETO DE PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE PARA FALTAS
TRIFÁSICAS E MONOFÁSICAS DE UMA INSTALAÇÃO INDUSTRIAL**

Uberlândia
2018

MATTEUS CORRÊA MENDES

**PROJETO DE PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE PARA
FALTAS TRIFÁSICAS E MONOFÁSICAS DE UMA INSTALAÇÃO
INDUSTRIAL**

Trabalho apresentado como requisito parcial
de avaliação na disciplina Trabalho de
Conclusão de Curso do Curso de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de
Uberlândia.

Uberlândia, 06 de dezembro de 2018

Banca examinadora

Prof. Dr. Adélio José de Moraes

Prof. Dr. José Rubens Macedo Júnior

Prof. Dr. José Wilson Resende

Uberlândia
2018

Dedico este trabalho a Deus, meus pais,
minha irmã, meus avós e minha noiva
pelo estímulo, carinho e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, pela saúde e força que meu deu para que hoje estivesse realizando um sonho.

Aos meus pais, Aldirvan e Dasdores, minha irmã Maryna pelo apoio, carinho e atenção dispensados durante toda vida.

Aos meus avós Dativo, Maria Pires, Dirceu e Alfinda (in memorian) pelo incentivo e apoio durante os momentos difíceis.

A minha noiva Sabriny, pelo amor, compreensão e carinho depositado em todos os momentos do curso.

Aos meus amigos e demais familiares pelo apoio, incentivo e ajuda em situações adversas que passamos durante o curso.

Aos professores José Wilson Resende, que tão bondosamente me orientou neste trabalho, Adélio José de Moraes e José Rubens Macedo Júnior que se prontificaram ao convite de fazerem parte da minha banca. A FEELT pela estrutura oferecida e a todos os professores que compõem esta faculdade.

A Universidade Federal de Uberlândia pela possibilidade a mim oferecida de cursar um curso superior numa tão prestigiada instituição.

Enfim, a todos, meu muito obrigado.

RESUMO

O presente trabalho propõe o estudo de proteção contra sobrecorrentes oriundas de faltas trifásicas e monofásicas para planta de uma empresa de alimentos da cidade de Uberlândia-MG. Neste trabalho, é dimensionado os equipamentos de proteção desta planta, a saber, funções temporizadas (51), instantânea (50) e temporizada de neutro (51N) dos relés digitais de sobrecorrente, além da proteção diferencial (relé 87).

ABSTRACT

The present work proposes the study of protection against overcurrent from three-phase and single-phase faults for a food company in the city of Uberlândia-MG. In this work, the protection equipments of this plant, namely, timed (51), instantaneous (50) and neutral (51N) timed functions of the digital overcurrent relays, in addition to the differential protection (relay 87) are dimensioned.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS DA BARRA 1	19
FIGURA 2 – DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS DA BARRA 2	19
FIGURA 3 – DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS DA BARRA 3	20
FIGURA 4 – DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS DA BARRA 5	20
FIGURA 5 – DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS DA BARRA 9	21
FIGURA 6 – DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS DA BARRA 1BT	22
FIGURA 7 – DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS DA BARRA 2BT	23
FIGURA 8 – DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS DA BARRA 3BT	23
FIGURA 9 – DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS DA BARRA 4BT	24
FIGURA 10 – DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS DA BARRA 5BT	24
FIGURA 11 – CLASSE DE EXATIDÃO TC	29
FIGURA 12 – CURVA TÍPICA DO RELÉ 50 E 51	31
FIGURA 13 – CURVA TÍPICA DO RELÉ 50 E 51	32
FIGURA 14 – CURVAS DO TIPO NORMALMENTE INVERSA	34
FIGURA 15 – CURVA DO TIPO MUITO INVERSA	35
FIGURA 16 – CURVA DO TIPO EXTREMAMENTE INVERSA	36
FIGURA 17 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO RELÉ DIFERENCIAL .	38
FIGURA 18 – CONEXÃO DOS TC'S PARA COMPENSAR O DEFASAMENTO ANGULAR	39
FIGURA 19 – CORTE A DA PLANTA DO ANEXO B MOSTRANDO A LOCALIZAÇÃO DOS RELÉS	43
FIGURA 20 – CORTE B DA PLANTA DO ANEXO B MOSTRANDO A LOCALIZAÇÃO DOS RELÉS	43
FIGURA 21 – SÍNTESE DO CIRCUITO PARA FALTA TRIFÁSICA PELO RAMAL DE MENOR CARREGAMENTO	44
FIGURA 22 – COORDENOGRAMA PARA RAMAL DE MENOR CARREGAMENTO	52
FIGURA 23 – SÍNTESE DO CIRCUITO PARA FALTA TRIFÁSICA PELO RAMAL DE MAIOR CARREGAMENTO	53
FIGURA 24 – COORDENOGRAMA PARA RAMAL DE MENOR CARREGAMENTO	61
FIGURA 25 – COORDENOGRAMA PARA CONFERÊNCIA DE SELETIVIDADE	63
FIGURA 26 – LIGAÇÃO SÉRIE E SHUNT PARA DIAGRAMA DE SEQUÊNCIA	

ZERO	64
FIGURA 27 – CIRCUITO PARA SEQUÊNCIA ZERO DE UM TRANSFORMADOR DELTA ESTRELA ATERRADO.....	65
FIGURA 28 – DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS DE SEQUÊNCIA ZERO DA BARRA 1.....	65
FIGURA 29 – DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS DE SEQUÊNCIA ZERO DA BARRA 2.....	66
FIGURA 30 – DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS DE SEQUÊNCIA ZERO DA BARRA 3.....	66
FIGURA 31 – DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS DE SEQUÊNCIA ZERO DA BARRA 5.....	67
FIGURA 32 – DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS DE SEQUÊNCIA ZERO DA BARRA 9.....	67
FIGURA 33 – SÍNTESE DO CIRCUITO PARA FALTA MONOFÁSICA	68
FIGURA 34 – COORDENOGRAMA DOS RELÉS PARA CURTO MONOFÁSICO	75
FIGURA 35 – PLANTA DO TRABALHO USADA PARA LOCALIZAÇÃO DOS RELÉS	77

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – IMPEDÂNCIA DOS CABOS PELA BITOLA	16
TABELA 2 – IMPEDÂNCIA DOS CABOS EM OMHS E POR UNIDADE	17
TABELA 3 – IMPEDÂNCIA PERCENTUAL DOS TRANSFORMADORES	17
TABELA 4 – CORRENTE NOMINAL E DE CURTO QUE PASSARÁ NOS TC'S	21
TABELA 5 – RESUMO DOS VALORES DE ICCMÁX E O TEMPO ADMISSÍVEL PELA IMPEDÂNCIA DO TRANSFORMADOR NOMINAL	25
TABELA 6 – PONTO ANSI DOS TRANSFORMADORES	26
TABELA 7 – CORRENTE DE INRUSH DOS TRANSFORMADORES	27
TABELA 8 – ESCOLHA DA RTC	28
TABELA 9 – DETERMINAÇÃO DA CLASSE DE EXATIDÃO DOS TC'S	30
TABELA 10 – VARIEDADE DOS VALORES DE K E α PELO TIPO DE CURVA	37
TABELA 11 – VALORES DE K E α APLICADOS PARA CÁLCULO DO TEMPO DE CADA CURVA.....	37
TABELA 12 – VALORES DE CURTO MONOFÁSICO EM CADA BARRA	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFU – Universidade Federal de Uberlândia

FEELT – Faculdade de Engenharia Elétrica

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANSI – American National Standards Institute

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

TC – Transformador de Corrente

RTC – Relação de transformação de corrente

AT – Alta Tensão

BT – Baixa Tensão

Trafo - Transformador

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 O SISTEMA.....	13
3 CORRENTES NOMINAIS	14
4 DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS.....	15
5 CÁLCULO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICOS	18
6 CÁLCULOS DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO EM BAIXA TENSÃO	22
7 PONTO ANSI DOS TRANSFORMADORES.....	25
8 ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR.....	27
9 CÁLCULO DAS RTC'S	28
10 DETERMINAÇÃO DA CLASSE DE EXATIDÃO	29
11 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE	30
12 AJUSTE DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE.....	32
13 CURVAS DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE	33
13.1 NORMALMENTE INVERSA.....	34
13.2 MUITO INVERSA.....	35
13.3 EXTREMAMENTE INVERSA.....	36
14 RELÉS DIFERENCIAIS 87 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	37
15 AJUSTE DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE - PREMISSAS.....	41
15.1 PARAMETRIZAÇÃO DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE	42
15.2 RELÉ 13 – UNIDADE 51 E 50.....	44
16 CONCLUSÃO.....	46
17 REFERÊNCIAS.....	47
ANEXO A	48
A.1 RELÉ 12 – UNIDADE 51 E 50.....	48
A.1.2 RELÉ 1 – UNIDADE 51 E 50	49
A.2 COORDENOGRAMA.....	52
A.3 PARAMETRIZAÇÃO PELO OUTRO RAMAL.....	53
A.3.1 RELÉ 9 – UNIDADE 51 E 50	53
A.3.2 RELÉ 8 – UNIDADE 51 E 50	54
A.3.3 RELÉ 3 – UNIDADE 51 E 50	56
A.3.4 RELÉ 2 – UNIDADE 51 E 50.....	57

	12
A.3.5 RELÉ 1 – UNIDADE 51 E 50	59
A.4 COORDENOGRAMA.....	61
A.5 COORDENOGRAMA – CONFERÊNCIA DE SELETIVIDADE	62
A.6 CURTOS CIRCUITOS MONOFÁSICOS	63
A.6.1 INTRODUÇÃO.....	63
A.6.2 CÁLCULO DAS CORRENTES DE CURTO.....	65
A.6.3 AJUSTE DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE DE NEUTRO	68
A.6.3.1 RELÉ 9 – FUNÇÃO 51N	69
A.6.3.2 RELÉ 8 – FUNÇÃO 51N	70
A.6.3.3 RELÉ 3 – FUNÇÃO 51N.....	71
A.6.3.4 RELÉ 2 – FUNÇÃO 51N	72
A.6.3.5 RELÉ 1 – FUNÇÃO 51N.....	73
A.6.4 COORDENOGRAMA CURTOS MONOFÁSICOS.....	74
ANEXO B	76

1 INTRODUÇÃO

Quando um sistema de proteção de sistemas elétricos é bem coordenado, este consegue com rapidez e seletividade, retirar uma falta, através de um equipamento que sinta a sobrecorrente e dê ordem para isolação desta, minimizando danos a concessionária e possíveis reclamações do consumidor quanto a prejuízos que este possa ter tido, além de reduzir os riscos para o sistema e quem está próximo de tal ocorrência.

No intuito de retirar o defeito (falta) no menor tempo possível, a proteção deve ser feita em todo o sistema, possibilitando então a redução de possíveis danos e custos. Com a proteção feita em todo o sistema, este deve estar bem coordenado e com boa seletividade, considerando as cargas mais importantes quando não seja possível coordenar todos os elementos que asseguram a proteção do sistema.

O presente projeto objetiva a atuação do sistema de proteção com a existência de curto-circuito ou sobrecarga, retirando o mínimo de cargas possível de tal forma a minimizar também os prejuízos à empresa. Neste trabalho não é incluído a proteção direta das cargas, apenas das entradas dos barramentos principais e dos transformadores.

2 O SISTEMA

A planta usada neste trabalho é de uma empresa do setor alimentício da cidade de Uberlândia cuja entrada é em 138[kV]. Esta é a tensão do primário de um transformador (dito "T1") de 20[MVA], o qual abaixa a tensão para 13,8[kV], alimentando um barramento (Barra 1) de onde derivará ramais para outros transformadores de menor potência.

Da Barra 1, saem três ramais, o primeiro alimenta o transformador T2 de 45[kVA], 13,8[kV]/220[V]. O segundo ramal alimenta a Barra 2 que se divide em dois ramais, um alimentando a Barra 3 onde o primário dos transformadores T3, T4 e T5 estão conectados e a Barra 4 que conecta o primário dos transformadores T6, T7 e T8. Desta Barra 4, sai um ramal para alimentar o transformador T9 de 1000[kVA], 13,8[kV]/380[V] cujo primário está conectado à Barra 5 presente entre seu primário e a Barra 4. O terceiro ramal alimenta a Barra 6 onde está o transformador T10 de 300[kVA], 13,8[kV]/220[V] e bifurca em

outros dois ramais que alimentam a Barra 7 onde o primário dos transformadores T11, T12, T13 e T14 estão conectados e a Barra 8 alimenta o transformador T15 e T16, sendo que entre este último transformador e a Barra 8, tem-se a Barra 9 de onde o primário deste transformador recebe alimentação. Os transformadores T3,T4,T5,T6,T7,T8,T11,T12,T13,T14, T15 e T16 tem cada um a potência de 1500[kVA], 13,8[kV]/380[V]. Tais informações podem ser vistas no Anexo B.

3 CORRENTES NOMINAIS

Para o cálculo das correntes nominais, admitiu-se a potência nominal de cada transformador, obedecendo a equação 1:

$$I_{\text{nominal}} = \frac{S_{\text{nominal}}}{\sqrt{3} * U_{\text{nominal}}} \quad (1)$$

Para calcular a corrente que passará no relé, aplicando a equação 1, somou-se as cargas a jusante de cada relé conforme apresentado a seguir.

$$I_{\text{secundário(T1)}} = \frac{20\text{M}}{\sqrt{3} * 13,8\text{k}} = 836,7395[\text{A}]$$

$$I_{\text{n(relé2;3)}} = \frac{(1500\text{k} * 6) + 1000\text{k}}{\sqrt{3} * 13,8\text{k}} = 418,3698[\text{A}]$$

$$I_{\text{n(relé4)}} = \frac{(1500\text{k} * 3)}{\sqrt{3} * 13,8\text{k}} = 188,2664[\text{A}]$$

$$I_{\text{n(relé5;6;7)}} = \frac{1500\text{k}}{\sqrt{3} * 13,8\text{k}} = 62,7554[\text{A}]$$

$$I_{\text{n(relé8)}} = \frac{(1500\text{k} * 3) + 1000\text{k}}{\sqrt{3} * 13,8\text{k}} = 230,1034[\text{A}]$$

$$I_{\text{n(relé9;10;11)}} = \frac{1500\text{k}}{\sqrt{3} * 13,8\text{k}} = 62,7554[\text{A}]$$

$$I_{\text{n(relé12)}} = \frac{(1500\text{k} * 6) + 300\text{k}}{\sqrt{3} * 13,8\text{k}} = 389,0839[\text{A}]$$

$$I_{\text{n(relé13;14;15;16;17;18)}} = \frac{1500\text{k}}{\sqrt{3} * 13,8\text{k}} = 62,7554[\text{A}]$$

4 DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS

Como parte primordial para o cálculo das correntes de curto-circuito, o diagrama de impedâncias precisa ser feito e os valores devem estar todos na mesma base.

Neste projeto foi preciso fazer a correção de algumas impedâncias que estavam em bases diferentes e outras que tinham valores em Omhs.

No trabalho usou-se as respectivas bases de tensão e potência, $U_{base}=13,8[kV]$ em média tensão e $U_{base}=138[kV]$ em alta e $S_{base}=1500[kVA]$, das quais extraiu-se a impedância e corrente base conforme pode ser observado nas equações 2 e 3 respectivamente.

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

$$Z_{base \text{ em } 13,8kV} = \frac{13,8k^2}{1500k} = 126,96[\Omega]$$

$$Z_{base \text{ em } 138kV} = \frac{138k^2}{1500k} = 12696[\Omega]$$

$$I_{base \text{ em } 13,8kV} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} * U_{base}} = \frac{1500k}{\sqrt{3} * 13,8k} = 62,75[A] \quad (3)$$

$$I_{base \text{ em } 380V} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} * U_{base}} = \frac{1500k}{\sqrt{3} * 380} = 2279,014[A]$$

Como não teve-se acesso ao nível de curto da entrada, adotou-se 100[MVA] no ponto de acoplamento entre a concessionária e a unidade consumidora, com isso consegue-se calcular o valor da impedância de entrada, chamada aqui de $Z_{entrada}$ cujos valores em Omhs e pu (por unidade) foram calculados pelas equações 4 e 5 respectivamente.

$$Z_{entrada(\Omega)} = \frac{138k^2}{100M} = 190,44[\Omega] \quad (4)$$

$$Z_{entrada(pu)} = \frac{190,44}{12696} = 0,015_{[pu]} \quad (5)$$

Considerou-se também uma distância de 200 metros ($l=0,2[Km]$) para interligação de alguns barramentos.

Extraiu-se do catálogo de cabos de média tensão da General Cable [1] os valores por bitola dos cabos de resistência (R) e indutância (X_L) em Omhs por quilômetro. Através destes valores calculou-se a impedância de cada bitola conforme visto na Tabela 1.

Tabela 1 – Impedância dos cabos pela bitola

Bitola	R(Ω/km)	X _L (Ω/km)	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ (6)	Z(Ω/km)
35mm ²	0,6720	0,1752	$\sqrt{0,6720^2 + 0,1752^2}$	0,694463
95mm ²	0,2482	0,1508	$\sqrt{0,2482^2 + 0,1508^2}$	0,290420
240mm ²	0,0989	0,1318	$\sqrt{0,0989^2 + 0,1318^2}$	0,164780

Fonte: Catálogo de Cabos de média e alta tensão [1].

Como dito, assumindo a distância de 200m (l=0,2[km]), multiplicou-se o comprimento pelos valores de impedâncias.

Valores de impedâncias em Omhs após a multiplicação pela distância.

$$Z_{L1} = Z_{L5} = 0,032956[\Omega]$$

$$Z_{L2} = Z_{L3} = Z_{L4} = Z_{L6} = Z_{L7} = 0,058084[\Omega]$$

$$Z_{L8} = 0,138893[\Omega]$$

Dividindo os valores em Omhs pela base, tem-se:

$$Z_{L1} = Z_{L5} = \frac{0,032956}{126,96} = 0,0002595_{[pu]}$$

$$Z_{L2} = Z_{L3} = Z_{L4} = Z_{L6} = Z_{L7} = \frac{0,058084}{126,96} = 0,0004575_{[pu]}$$

$$Z_{L8} = \frac{0,138893}{126,96} = 0,001094_{[pu]}$$

A Tabela 2 mostra os resultados de cada trecho em Omhs e os respectivos valores em pu.

Tabela 2 – Impedância dos cabos em Ohms e por unidade

Bitola	Z(Ω)	Z(Ω)	Z _{pu}
Z _{L1} = #240[mm ²]	Z _{L1} =0,2*0,164780	0,032956[Ω]	0,0002595 _[pu]
Z _{L2} = #95[mm ²]	Z _{L2} =0,2*0,290420	0,058084[Ω]	0,0004575 _[pu]
Z _{L3} = #95[mm ²]	Z _{L3} =0,2*0,290420	0,058084[Ω]	0,0004575 _[pu]
Z _{L4} = #95[mm ²]	Z _{L4} =0,2*0,290420	0,058084[Ω]	0,0004575 _[pu]
Z _{L5} = #240[mm ²]	Z _{L5} =0,2*0,164780	0,032956[Ω]	0,0002595 _[pu]
Z _{L6} = #95[mm ²]	Z _{L6} =0,2*0,290420	0,058084[Ω]	0,0004575 _[pu]
Z _{L7} = #95[mm ²]	Z _{L7} =0,2*0,290420	0,058084[Ω]	0,0004575 _[pu]
Z _{L8} = #35[mm ²]	Z _{L8} =0,2*0,694463	0,138893[Ω]	0,001094 _[pu]

A impedância dos transformadores também tem relevância no cálculo dos curtos, por isso, necessita-se considera-las e para tal, sua impedância deve estar na mesma base considerada.

A Tabela 3 apresenta a relação da relação de transformação, potência e impedância percentual dos 16 transformadores da planta.

Tabela 3 – Impedância percentual dos transformadores

Transformador	Relação de transformação	Potência	Impedância percentual
T1	138[kV]-13,8[kV]	20[MVA]	5%
T2	13,8[kV]-220/127[V]	1500[kVA]	5%
T3	13,8[kV]-380/220[V]	1500[kVA]	5,65%
T4	13,8[kV]-380/220[V]	1500[kVA]	5,71%
T5	13,8[kV]-380/220[V]	1500[kVA]	5,58%
T6	13,8[kV]-380/220[V]	1500[kVA]	5,53%
T7	13,8[kV]-380/220[V]	1500[kVA]	5,46%
T8	13,8[kV]-380/220[V]	1500[kVA]	5,60%
T9	13,8[kV]-380/220[V]	1000kVA]	5,79%
T10	13,8[kV]-380/220[V]	300kVA]	3,55%
T11	13,8[kV]-380/220[V]	1500[kVA]	6,93%
T12	13,8[kV]-380/220[V]	1500[kVA]	6,99%

T13	13,8[kV]-380/220[V]	1500[kVA]	5,60%
T14	13,8[kV]-380/220[V]	1500[kVA]	5,00%
T15	13,8[kV]-380/220[V]	1500[kVA]	5,00%
T16	13,8[kV]-380/220[V]	1500[kVA]	5,80%

Corrigindo a impedância dos transformadores para valores base ($U_{base}=13,8[kV]$ e $S_{base}=1500[kVA]$) por meio da equação 7.

$$Z_b = Z_a * \left(\frac{U_a}{U_b}\right)^2 * \frac{M_b}{M_a} \quad (7)$$

$$Z_{T1(pu)} = 0,05 \left(\frac{13,8k}{13,8k}\right)^2 * \frac{1500k}{20M} = 0,00375_{[pu]}$$

$$Z_{T9(pu)} = 0,0579 \left(\frac{13,8k}{13,8k}\right)^2 * \frac{1500k}{1000k} = 0,08685_{[pu]}$$

$$Z_{T10(pu)} = 0,0355 \left(\frac{13,8k}{13,8k}\right)^2 * \frac{1500k}{300k} = 0,1775_{[pu]}$$

As demais impedâncias Z_{T2} , Z_{T3} , Z_{T4} , Z_{T5} , Z_{T6} , Z_{T7} , Z_{T8} , Z_{T11} , Z_{T12} , Z_{T3} , Z_{T14} , Z_{T15} , Z_{T16} já estão na base de tensão e potência adotados.

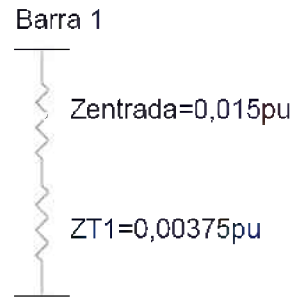
5 CÁLCULO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICOS

De posse destes valores, montou-se o diagrama de impedâncias conforme Figuras de 1 a 5, e calculou-se o curto em cada barra.

Como não se tem o conhecimento de cargas como gerador, ou outras que possam cooperar para o curto, admitiu-se que o “caminho da corrente” será radial, logo, o curto está sendo alimentado apenas pela concessionária.

Assumiu-se o valor de tensão igual a 1 pu para o cálculo dos curtos pois a razão entre a tensão em pu e a impedância equivalente em pu (equação 8), resulta na corrente de curto em pu que será multiplicada pela corrente base fornecendo o valor do curto na barra em ampères.

Figura 1 – Diagrama de impedâncias da Barra 1

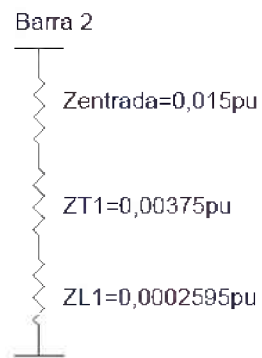


$$Z_{\text{equivalente}} = 0,015 + 0,00375 = 0,01875_{[\text{pu}]}$$

$$I_{\text{cc}} = \frac{1}{0,01875} = 53,33_{[\text{pu}]} \quad (8)$$

$$I_{\text{cc(A)}} = 53,33 * 62,75 = 3346,457[\text{A}]$$

Figura 2 – Diagrama de impedâncias da Barra 2

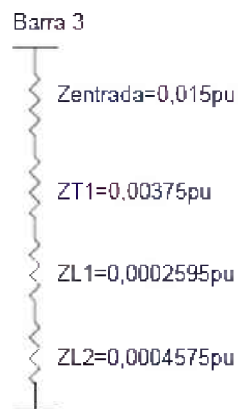


$$Z_{\text{equivalente}} = 0,015 + 0,00375 + 0,0002595 = 0,0190095_{[\text{pu}]}$$

$$I_{\text{cc}} = \frac{1}{0,0190095} = 52,6052_{[\text{pu}]}$$

$$I_{\text{cc(A)}} = 52,6052 * 62,75 = 3300,976[\text{A}]$$

Figura 3 – Diagrama de impedâncias da Barra 3

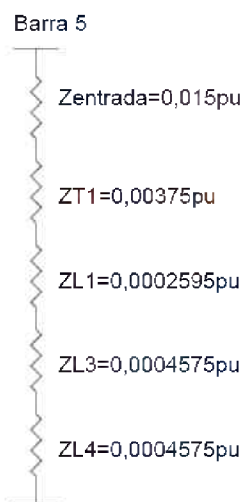


$$Z_{\text{equivalente}} = 0,015 + 0,00375 + 0,0002595 + 0,0004575 = 0,019467_{[\text{pu}]}$$

$$I_{\text{cc}} = \frac{1}{0,019467} = 51,3689_{[\text{pu}]}$$

$$I_{\text{cc(A)}} = 51,3689 * 62,75 = 3223,398[\text{A}]$$

Figura 4 – Diagrama de impedâncias da Barra 5

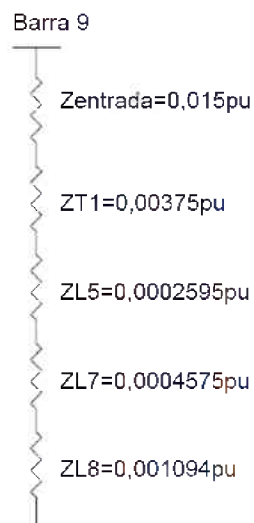


$$Z_{\text{equivalente}} = 0,015 + 0,00375 + 0,0002595 + 0,0004575 + 0,0004575 \\ = 0,0199245_{[\text{pu}]}$$

$$I_{\text{cc}} = \frac{1}{0,0199245} = 50,1894_{[\text{pu}]}$$

$$I_{\text{cc(A)}} = 50,1894 * 62,75 = 3149,385[\text{A}]$$

Figura 5 – Diagrama de impedâncias da Barra 9



$$Z_{\text{equivalente}} = 0,015 + 0,00375 + 0,0002595 + 0,0004575 + 0,001094$$

$$= 0,020561_{[\text{pu}]}$$

$$I_{\text{cc}} = \frac{1}{0,020561} = 48,6357_{[\text{pu}]} \quad I_{\text{cc(A)}} = 48,6357 * 62,75 = 3051,89[\text{A}]$$

As demais barras tem valores iguais a estes calculados. A relação de corrente de curto calculado de cada uma está mostrada na Tabela 4.

Tabela 4 – Corrente nominal e de curto que passará nos TC's

Barra	TC	I _{cc} [A]	I _{nominal} [A]
Barra 1	TC 1	3346,457	836,7395
	TC 2	3346,457	418,3698
Barra 2	TC 3	3300,976	418,3698
Barra 3	TC 4	3223,398	188,2664
	TC 5	3223,398	62,7554
	TC 6	3223,398	62,7554
	TC 7	3223,398	62,7554
	TC 8	3223,398	230,1034
	TC 9	3223,398	62,7554
	TC 10	3223,398	62,7554
Barra 1	TC 11	3223,398	62,7554
	TC 12	3346,457	389,0839
Barra 3	TC 13	3223,398	62,7554
	TC 14	3223,398	62,7554

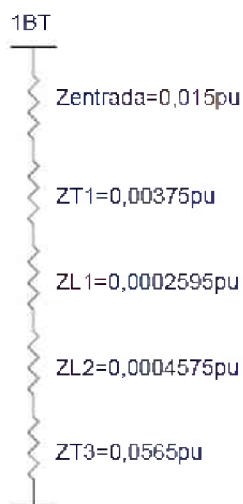
	TC 15	3223,398	62,7554
	TC 16	3223,398	62,7554
	TC 17	3223,398	62,7554
Barra 9	TC 18	3051,89	62,7554

6 CÁLCULOS DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO EM BAIXA TENSÃO

Para efeito de conhecimento, calculou-se também os valores de curto trifásicos em baixa tensão (380[V]), de forma análoga aos curtos em média tensão (13,8[kV]), montou-se o diagrama de impedâncias conforme Figuras de 6 a 10, incluindo a impedância de cada transformador abaixador de média para baixa tensão.

Nomeou-se também o local dos curtos (conforme diagrama do Anexo B) como 1BT para o secundário de T1, 2BT para o secundário de T6, 3BT para o secundário de T9, 4BT para o secundário de T11, e 5BT para o secundário de T16.

Figura 6 – Diagrama de impedâncias da Barra 1BT



$$Z_{\text{equivalente}} = 0,015 + 0,00375 + 0,0002595 + 0,0004575 + 0,0565$$

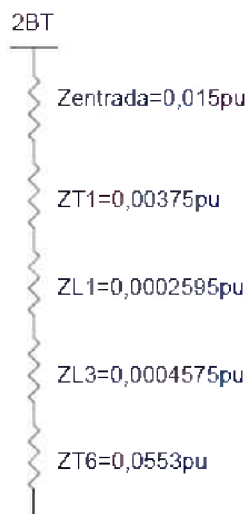
$$= 0,075967_{[\text{pu}]}$$

$$I_{\text{cc}} = \frac{1}{0,075967} = 13,1636_{[\text{pu}]}$$

$$I_{\text{cc-BT(A)}} = 13,1636 * 2279,014 = 30000,02869[\text{A}]$$

$$I_{cc-MT(A)} = 13,1636 * 62,75 = 826,0159[A]$$

Figura 7 – Diagrama de impedâncias da Barra 2BT



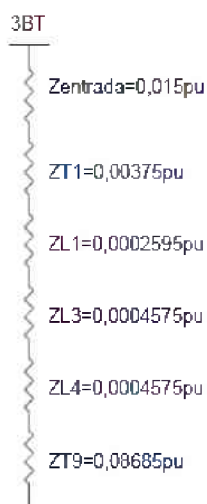
$$Z_{equivalente} = 0,015 + 0,00375 + 0,0002595 + 0,0004575 + 0,0553 = 0,07476_{[pu]}$$

$$I_{cc} = \frac{1}{0,07476} = 13,3749_{[pu]}$$

$$I_{cc-BT(A)} = 13,3749 * 2279,014 = 30481,55[A]$$

$$I_{cc-MT(A)} = 13,3749 * 62,75 = 839,2749[A]$$

Figura 8 – Diagrama de impedâncias da Barra 3BT



$$Z_{equivalente} = 0,015 + 0,00375 + 0,0002595 + 0,0004575 + 0,0004575 + 0,08685$$

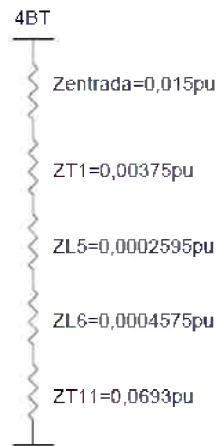
$$= 0,10677_{[pu]}$$

$$I_{cc} = \frac{1}{0,10677} = 9,3659_{[pu]}$$

$$I_{cc-BT(A)} = 9,3659 * 2279,014 = 21345,017[A]$$

$$I_{cc-MT(A)} = 9,3659 * 62,75 = 587,71[A]$$

Figura 9 – Diagrama de impedâncias da Barra 4BT



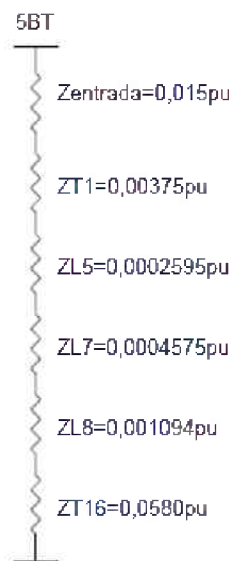
$$Z_{equivalente} = 0,015 + 0,00375 + 0,0002595 + 0,0004575 + 0,0693 = 0,2237_{[pu]}$$

$$I_{cc} = \frac{1}{0,2237} = 4,47_{[pu]}$$

$$I_{cc-BT(A)} = 4,47 * 2279,014 = 10187,1926[A]$$

$$I_{cc-MT(A)} = 4,47 * 62,75 = 280,4925^a$$

Figura 10 – Diagrama de impedâncias da Barra 5BT



$$Z_{\text{equivalente}} = 0,015 + 0,00375 + 0,0002595 + 0,0004575 + 0,001094 + 0,0580$$

$$= 0,07856_{[\text{pu}]}$$

$$I_{\text{cc}} = \frac{1}{0,07856} = 12,7291_{[\text{pu}]}$$

$$I_{\text{cc-BT(A)}} = 12,7291 * 2279,014 = 29009,797[\text{A}]$$

$$I_{\text{cc-MT(A)}} = 12,7291 * 62,75 = 798,751[\text{A}]$$

7 PONTO ANSI DOS TRANSFORMADORES

Como todos os equipamentos, os transformadores têm um limite térmico que corresponde a máxima corrente simétrica de curto-circuito que ele suporta, em um intervalo de tempo, sem que os seus enrolamentos e a sua vida útil sejam prejudicados.

Esses valores, determinados pela norma ANSI, são dependentes da impedância do transformador, conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 – Resumo dos valores de $I_{\text{ccmáx}}$ e o tempo admissível pela impedância do transformador nominal

Impedância percentual do transformador	I_{ccmáx} simétrico em múltiplos de I_n [A]	Tempo admissível [s]
4%	25*I _n	2
5%	20*I _n	3
6%	16,6*I _n	4
7%	14,3*I _n	5

Diante desta recomendação da ANSI, calculou-se para cada transformador seu limite térmico, estabelecendo a corrente máxima suportada e o respectivo tempo. Tais relações estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Ponto ANSI dos transformadores

Transformador	Ponto ANSI		In (lado de MT-13,8[kV])	Valor da Corrente
T1	20*In	3s	836,739	16734,78
T2	20*In	3s	1,8826	37,652
T3	16,6*In	4s	62,7554	1041,73964
T4	16,6*In	4s	62,7554	1041,73964
T5	16,6*In	4s	62,7554	1041,73964
T6	16,6*In	4s	62,7554	1041,73964
T7	16,6*In	4s	62,7554	1041,73964
T8	16,6*In	4s	62,7554	1041,73964
T9	16,6*In	4s	41,837	694,4942
T10	25*In	2s	12,55	313,75
T11	14,3*In	5s	62,7554	897,40222
T12	14,3*In	5s	62,7554	897,40222
T13	16,6*In	4s	62,7554	1041,73964
T14	20*In	3s	62,7554	1255,108
T15	20*In	3s	62,7554	1255,108
T16	16,6*In	4s	62,7554	1041,73964

A corrente usada para fazer o cálculo anterior, foi baseada na corrente nominal de cada transformador cuja indicação abaixo.

Para os transformadores T₃, T₄, T₅, T₆, T₇, T₈, T₁₁, T₁₂, T₁₃, T₁₄, T₁₅ e T₁₆ a corrente nominal $I_{n(MT)}$ fica:

$$I_{n(MT)} = \frac{1500k}{\sqrt{3} * 13,8k} = 62,7554[A]$$

Para os transformadores T₁, T₂, T₉, T₁₀, as correntes nominais ficam, respectivamente:

$$I_{n(T1)} = \frac{20M}{\sqrt{3} * 138k} = 83,6739[A]$$

$$\text{referindo para } 13,8kV, I_{n(MT)} = 83,6739 * \frac{138k}{13,8k} = 836,739[A]$$

$$I_{n(T2)} = \frac{45k}{\sqrt{3} * 13,8k} = 1,8826[A]$$

$$I_{n(T9)} = \frac{1000k}{\sqrt{3} * 13,8k} = 41,837[A]$$

$$I_{n(T10)} = \frac{300k}{\sqrt{3} * 13,8k} = 12,55[A]$$

8 ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR

A energização de transformadores também leva a uma corrente que atinge altos valores durante um pequeno intervalo de tempo, e a esta, dá-se o nome de corrente de inrush ou de magnetização, por isso é necessário garantir que o sistema de proteção não atue durante a energização.

A relação de I_{NRUSH}/I_N é dada pelo fabricante, contudo, por não conseguir estes dados, neste trabalho foi admitido que a corrente de magnetização atinge valores de até 8 vezes a corrente nominal, por um intervalo de tempo de 0,1 segundo e isso resulta nos dados mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Corrente de Inrush dos transformadores

Transformador	* I_N	t(s)	I_N (lado de MT-13,8kV)	linrush
T1	8	0,1	836,739	6693,912
T2	8	0,1	1,8826	15,0608
T3	8	0,1	62,7554	502,0432
T4	8	0,1	62,7554	502,0432
T5	8	0,1	62,7554	502,0432
T6	8	0,1	62,7554	502,0432
T7	8	0,1	62,7554	502,0432
T8	8	0,1	62,7554	502,0432
T9	8	0,1	41,837	334,696
T10	8	0,1	12,55	100,4
T11	8	0,1	62,7554	502,0432
T12	8	0,1	62,7554	502,0432
T13	8	0,1	62,7554	502,0432
T14	8	0,1	62,7554	502,0432
T15	8	0,1	62,7554	502,0432
T16	8	0,1	62,7554	502,0432

9 CÁLCULO DAS RTC's

Para a escolha das RTC's, seguiu-se dois critérios, o primeiro é que a corrente nominal não pode ser maior que o "primário" da RTC e o segundo é que a RTC deve ser maior que a razão de I_{cc} por 20, conforme equação 9.

$$RTC \geq \frac{I_{cc \text{ máx}}}{20} \quad (9)$$

Onde 20 é o fator de segurança da norma ANSI.

As RTC's estão na Tabela 8.

Tabela 8 – Escolha da RTC

Barra	TC	$I_{cc}(A)$	$I_{nominal} (A)$	Fórmula de referência	$RTC \geq I_{ccmáx}/Fs$	RTC
Barra 1	TC 1	3346,457	836,7395	I(secundário T1)	167,32285	1200/5
	TC 2	3346,457	418,3698	ln(TC 2,3)	167,32285	600/5
Barra 2	TC 3	3300,976	418,3698	ln(TC 2,3)	165,0488	600/5
Barra 3	TC 4	3223,398	188,2664	ln(TC 4)	161,1699	200/5
	TC 5	3223,398	62,7554	ln(TC 5,6,7)	161,1699	200/5
	TC 6	3223,398	62,7554	ln(TC 5,6,7)	161,1699	200/5
	TC 7	3223,398	62,7554	ln(TC 5,6,7)	161,1699	200/5
	TC 8	3223,398	230,1034	ln(TC 8)	161,1699	300/5
	TC 9	3223,398	62,7554	ln(TC 9,10,11)	161,1699	200/5
	TC 10	3223,398	62,7554	ln(TC 9,10,11)	161,1699	200/5
	TC 11	3223,398	62,7554	ln(TC 9,10,11)	161,1699	200/5
Barra 1	TC 12	3346,457	389,0839	ln(TC 12)	167,32285	1200/5
Barra 3	TC 13	3223,398	62,7554	ln(TC 13-18)	161,1699	200/5
	TC 14	3223,398	62,7554	ln(TC 13-18)	161,1699	200/5
	TC 15	3223,398	62,7554	ln(TC 13-18)	161,1699	200/5
	TC 16	3223,398	62,7554	ln(TC 13-18)	161,1699	200/5
	TC 17	3223,398	62,7554	ln(TC 13-18)	161,1699	200/5
Barra 9	TC 18	3051,89	62,7554	ln(TC 13-18)	152,5945	200/5

10 DETERMINAÇÃO DA CLASSE DE EXATIDÃO

É preciso saber o erro de transformação máximo, e a este, dá-se o nome de classe de exatidão. Para determiná-lo, deve-se levar em conta alguns fatores, como, a tensão máxima do secundário, o Erro Máximo de transformação esperado e o tipo de impedância do TC (Alta ou Baixa impedância).

Neste trabalho, usou-se TC's de alta impedância (H) com erro máximo de 10%.

A classe de exatidão de um TC é definida pela norma ANSI conforme Figura 11.

Figura 11 – Classe de exatidão TC



Logo, é necessário ajustar a tensão máxima no secundário para cada TC.

Pela norma ANSI, calcula-se essa tensão utilizando as equações 10 e 11:

$$I_{sec_{m\acute{a}x}} = \frac{I_{cc_{prim}}}{RTC} \quad (10)$$

Onde $I_{sec_{m\acute{a}x}}$ é a corrente que circulará no secundário quando estiver circulando no primário a corrente de curto-circuito $I_{cc_{prim}}$, para uma determinada RTC.

E também:

$$V_{m\acute{a}x} = Z_t * I_{sec_{m\acute{a}x}} \quad (11)$$

Onde $V_{m\acute{a}x}$ é a tensão máxima que surgirá nos terminais do secundário do TC, para uma carga de impedância Z_t .

A Tabela 9 apresenta as classes de exatidão dos transformadores de corrente do sistema estudado neste trabalho, para uma impedância Z_t igual a 1Ω na qual já está contemplada a carga do cabo e do relé.

Tabela 9 – Determinação da classe de exatidão dos TC's

Barra	TC	Icc[A]	RTC	Isecmáx = Iccprim/RTC [A]	Vmáx = Zt*Isecmáx [A]	Classe de Exatidão
Barra 1	TC 1	3346,457	1200/5	13,94357083	13,94357083	10H20
	TC 2	3346,457	600/5	27,88714167	27,88714167	10H50
Barra 2	TC 3	3300,976	600/5	27,50813333	27,50813333	10H50
Barra 3	TC 4	3223,398	200/5	80,58495	80,58495	10H100
	TC 5	3223,398	200/5	80,58495	80,58495	10H100
	TC 6	3223,398	200/5	80,58495	80,58495	10H100
	TC 7	3223,398	200/5	80,58495	80,58495	10H100
	TC 8	3223,398	300/5	53,7233	53,7233	10H100
	TC 9	3223,398	200/5	80,58495	80,58495	10H100
	TC 10	3223,398	200/5	80,58495	80,58495	10H100
Barra 1	TC 11	3223,398	200/5	80,58495	80,58495	10H100
	TC 12	3346,457	1200/5	13,94357083	13,94357083	10H20
Barra 3	TC 13	3223,398	200/5	80,58495	80,58495	10H100
	TC 14	3223,398	200/5	80,58495	80,58495	10H100
	TC 15	3223,398	200/5	80,58495	80,58495	10H100
	TC 16	3223,398	200/5	80,58495	80,58495	10H100
	TC 17	3223,398	200/5	80,58495	80,58495	10H100
Barra 9	TC 18	3051,89	200/5	76,29725	76,29725	10H100

11 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE

De acordo com a ABNT, o relé é um dispositivo por meio do qual um equipamento elétrico é operado quando se produzem variações nas condições deste equipamento (ou no circuito ou equipamento a ele associado).

Há uma enormidade de relés e cada qual desempenha uma função e tem seu uso específico, entre estes tem-se os relés de sobrecorrente temporizados, 51, e instantâneo, 50 e os relés de sobrecorrente de neutro temporizado, 51N, e o relé de proteção diferencial, 87, que são os utilizados neste trabalho.

Como sugerido pelo nome, o relé de sobrecorrente temporizado atua abrindo o circuito, caso a corrente que circule por ele seja maior que a ajustada. O relé é alimentado pelo TC, e quando essa corrente de alimentação ultrapassa o valor estabelecido, o relé começa a contar tempo e em conformidade com sua curva, provoca a abertura do disjuntor.

O relé de sobrecorrente instantâneo, também atua semelhantemente ao temporizado, contudo, a diferença se dá quando a corrente que passa por ele ultrapassa a nominal, sua atuação ocorre instantaneamente, sem a contagem de tempo.

O relé 51 opera da mesma forma que o relé 51N, a diferença é que este último atua apenas para correntes que circulam no neutro do sistema.

A atuação das unidades 50 e 51 podem ser combinadas conforme as Figuras 12 e 13 e assim, a partir de determinado valor de corrente ajustado, a unidade 51 conta tempo para atuar, e para outro valor de corrente maior que o anterior, a unidade 50 atua instantaneamente. Essa associação, faz com que apenas uma curva de atuação exista.

Figura 12 – Curva típica dos relés 50 e 51

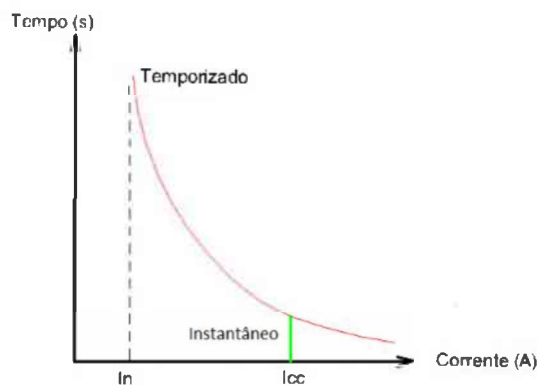
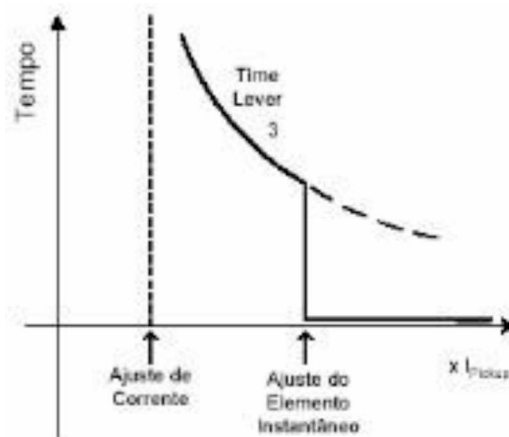


Figura 13 – Curva típica dos relés 50 e 51



12 AJUSTE DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE

Para o ajuste destes relés, é preciso calcular o TAPE, no qual é contemplado o valor pelo qual o relé começará contar tempo (unidade 51).

Na intenção do relé não atuar indevidamente para uma situação de sobrecarga intencional momentânea (com tempo na casa de minutos por exemplo), é considerada uma sobrecarga admissível que resultará na corrente de sobrecarga que nada mais é que a corrente nominal mais um fator de sobrecarga (geralmente de 20 a 30% da nominal, valor este que depende da sensibilidade do projetista).

O TAPE é calculado pela razão da corrente de sobrecarga pela RTC conforme equação 12.

$$\text{TAPE} = \frac{I_{\text{sobrecarga}}}{\text{RTC}} \quad (12)$$

Para a determinação dum relé digital de sobrecorrente, faz-se necessário o conhecimento do RTC (relação de transformação) do TC (já ajustado) e do DT(dial de tempo) que é a curva de tempo, no qual o relé irá operar.

O DT é o multiplicador de tempo, que é um ajuste utilizado para temporizar o relé. Tem-se que o dial de tempo [DT] é dado pela equação 13:

$$\text{DT} = \frac{t * (M^{\infty} - 1)}{K} \quad (13)$$

Onde,

- M é o múltiplo de corrente equivalente;
- t é o tempo de atuação do relé;
- K é a constante característica do relé;
- α é a constante característica da curva;

Pode-se trabalhar esta equação 13 de jeito a obter “t” conforme visto na equação 14.

$$t = \frac{K * DT}{(M^\alpha - 1)} \quad (14)$$

Para calcular DT, é preciso calcular o múltiplo da corrente (M) conforme equação 15.

$$M = \frac{I_{CCrelé}}{TAPE} \quad (15)$$

E para obter o valor de M, é preciso obter o $I_{CCrelé}$ pela equação 16.

$$I_{CCrelé} = \frac{I_{CC}}{RTC} \quad (16)$$

Onde,

- $I_{CCrelé}$ é a corrente no secundário do TC;
- I_{CC} é a corrente no primário do TC;

13 CURVAS DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE

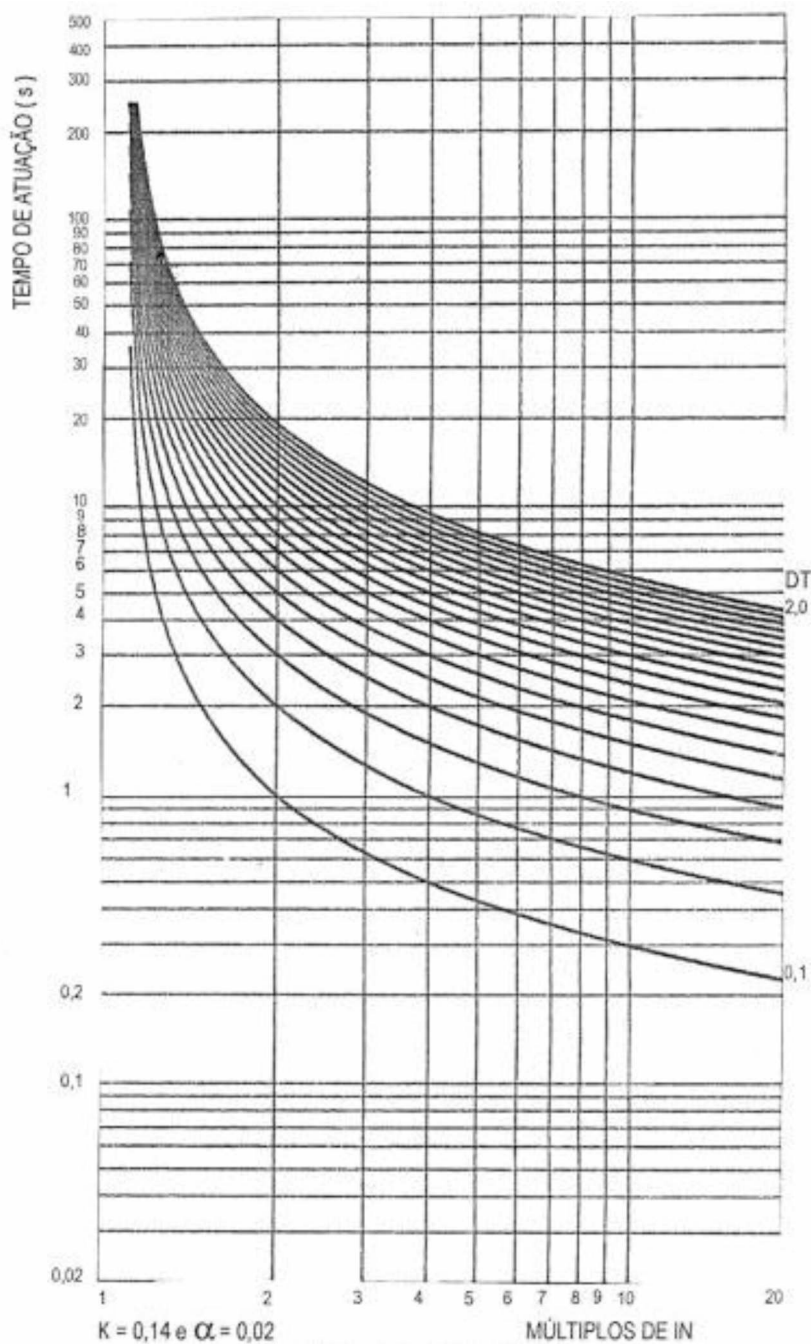
Conforme referido anteriormente, os relés microprocessados apresentam curvas características construídas conforme a equação de DT.

É possível verificar que existem variações de curvas, isso se dá alterando os valores de K e α .

Dá-se o nome a estas variações, de curvas tipo normalmente inversa (Figura 14), muito inversa (Figura 15), extremamente inversa (Figura 16) e de tempo longo conforme visto a seguir.

13.1 NORMALMENTE INVERSA

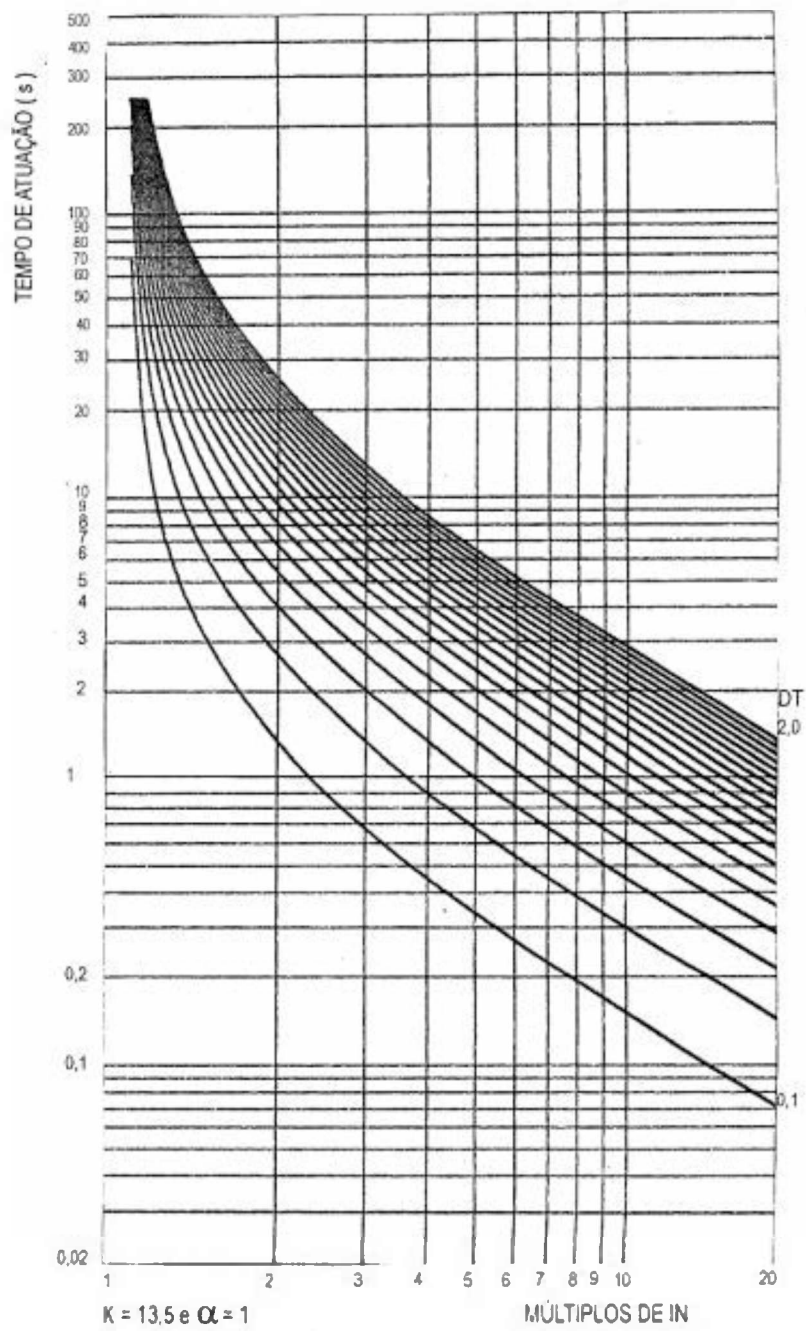
Figura 14 - Curvas do tipo normalmente inversa



Fonte: Apostila de Introdução à proteção de sistemas elétricos de potência [2].

13.2 MUITO INVERSA

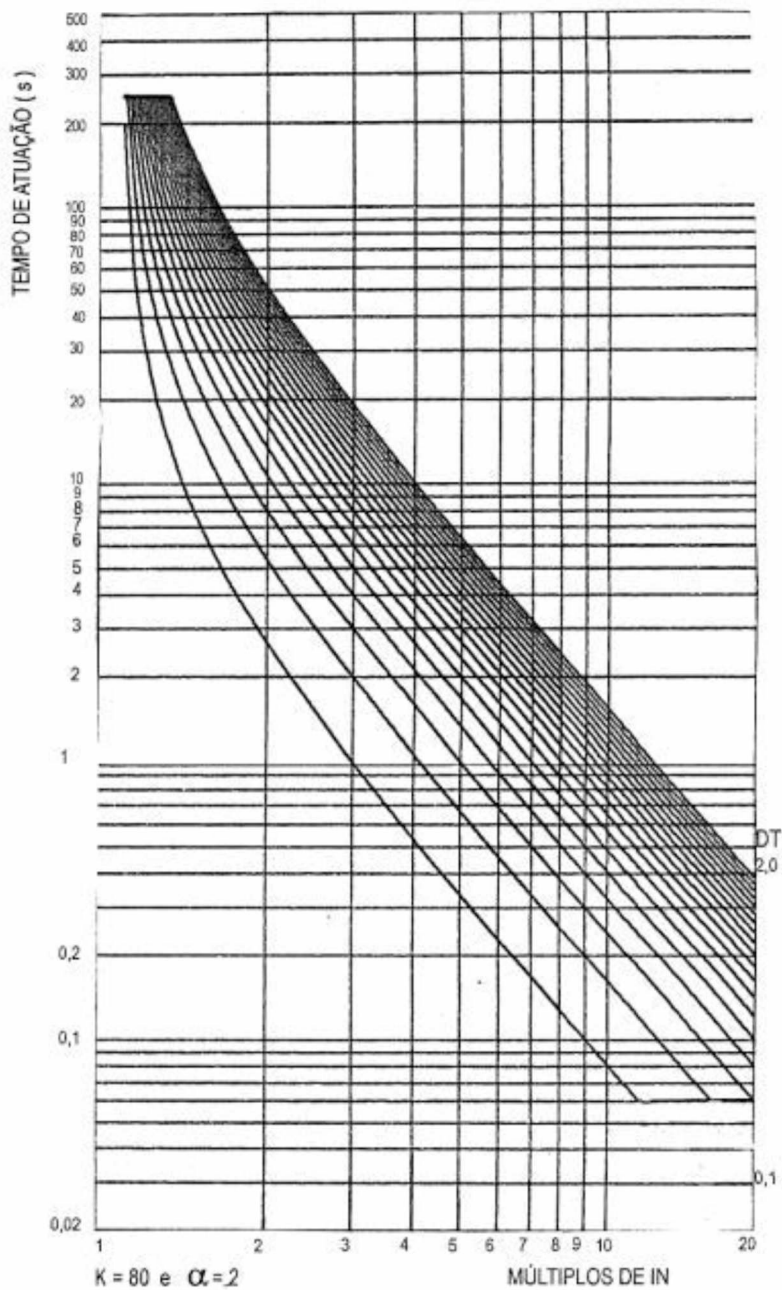
Figura 15 – Curva do tipo muito inversa



Fonte: Apostila de Introdução à proteção de sistemas elétricos de potência [2].

13.3 EXTREMAMENTE INVERSA

Figura 16 – Curva do tipo extremamente inversa



Fonte: Apostila de Introdução à proteção de sistemas elétricos de potência [2].

As variações de K e α que difere as curvas pode ser melhor vista na Tabela 10.

Tabela 10 – Variedade dos valores de K e α pelo tipo de curva

Curva	Normalmente inversa	Muito inversa	Extremamente inversa	Tempo Longo
K	0,14	13,5	80	80
α	0,02	1	2	1

Fonte: Apostila de Introdução à proteção de sistemas elétricos de potência [2].

Estes valores aplicados à equação de DT após isolar “t”, estão na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores de K e α aplicados para cálculo do tempo de cada curva

Normalmente inversa	Muito inversa	Extremamente inversa	Tempo Longo
$t = \frac{0,14 * DT}{(M^{0,02} - 1)}$	$t = \frac{13,5 * DT}{(M^1 - 1)}$	$t = \frac{80 * DT}{(M^2 - 1)}$	$t = \frac{80 * DT}{(M^1 - 1)}$

Fonte: Apostila de Introdução à proteção de sistemas elétricos de potência [2]

Para este trabalho foram consideradas curvas do tipo muito inversa uma vez que elas não apresentam um tempo de atuação tão curto ou tão longo quando comparado às demais.

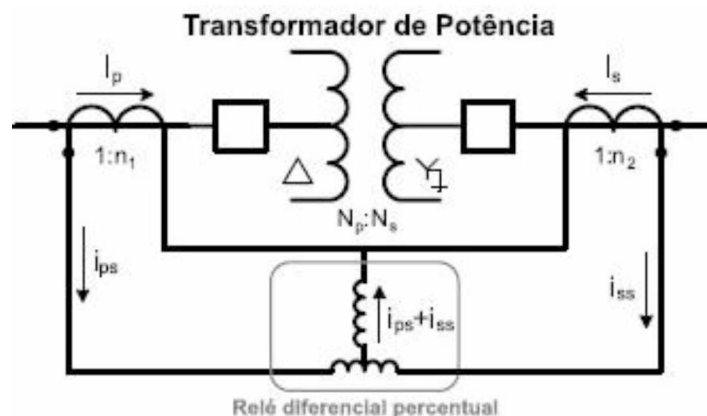
14 RELÉS DIFERENCIAIS 87 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Estes relés usualmente utilizados na proteção de transformadores, comparam as correntes que nele entra e sai, que em condições de operação normal serão iguais (já considerando a relação de transformação do transformador), logo, protegem um trecho limitado pelos seus TCs.

Em situações de anormalidade como uma falta estas correntes serão diferentes e isto sensibilizará o relé que enviará um comando ao disjuntor.

A seguir, vê-se na Figura 17 a operação do relé diferencial na proteção de um transformador de potência.

Figura 17 – Esquema de funcionamento do relé diferencial



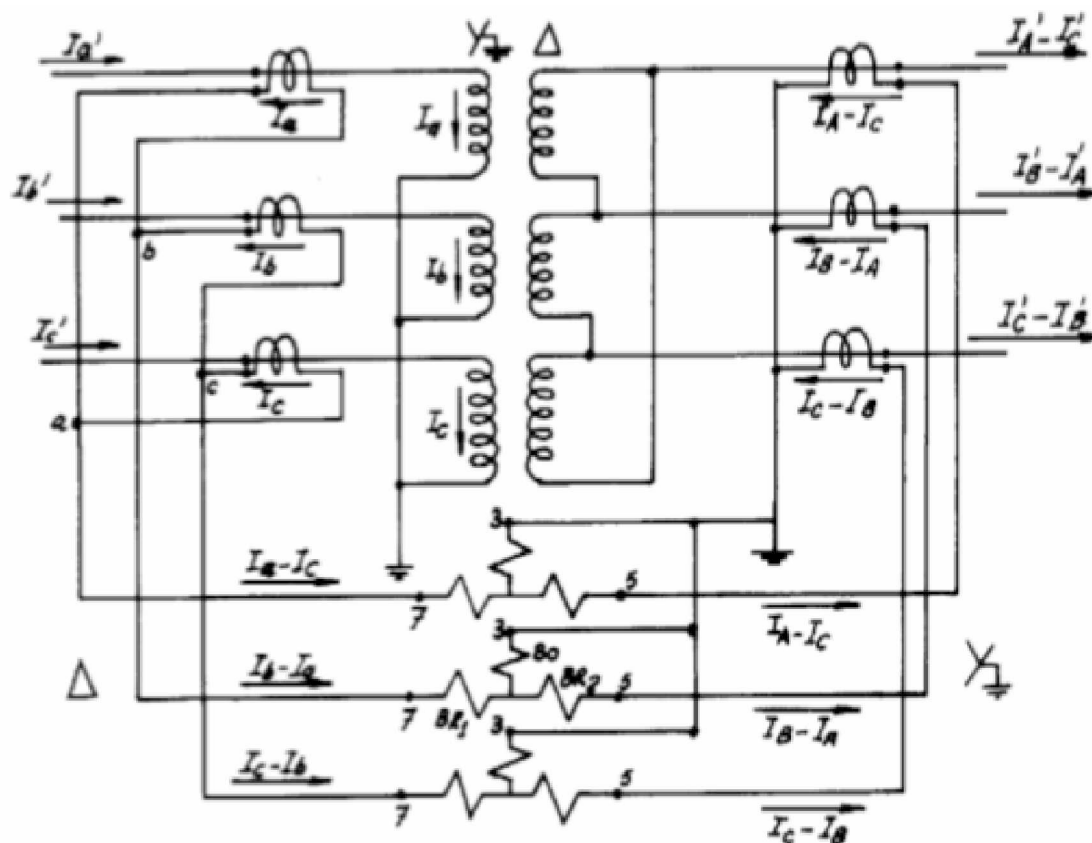
Os relés diferenciais mais comumente utilizados são os diferenciais percentuais, estes têm duas bobinas, uma dita restrição e a outra de operação.

Para ajustar um relé diferencial percentual, é preciso ter as correntes da alta e da média tensão, as RTCs dos TCs de cada lado, e as respectivas correntes do secundário dos TCs.

Quando o transformador a ser protegido sofrer defasamento angular, entre o primário e o secundário, esta deverá ser levada em consideração uma vez que as diferenças entre as correntes nos secundários dos TCs não serão nulas, levando a uma atuação indevida do relé. Para corrigir o efeito do defasamento, os TCs deverão ser conectados de forma específica.

Neste projeto, o transformador protegido pelo relé diferencial é o T1 cuja conexão é delta (primário) e estrela aterrada (secundário), logo, haverá defasamento angular e este será compensado na ligação dos TCs de forma que no lado Y os TCs sejam conectados em Δ , e os conectados no lado Δ do transformador seja conectado em Y, conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18 – Conexão dos TC's para compensar o defasamento angular



Devido a esta conexão para solucionar o defasamento angular, é preciso tomar alguns cuidados para que não ocorra operação indevida dos relés devido a pequenos desequilíbrios, ajustando-os à insensibilidade para pequenas porcentagens de corrente diferencial, portanto, faz-se necessário mensurar o erro (ou mismatch) que deverá ficar abaixo de 15%, se este ficar acima desta referência, deverá ser escolhido um novo TAPE para o transformador de alta tensão. O cálculo deste erro é visto na equação 17.

$$\varepsilon[\%] = \frac{\frac{I_{secBT}}{I_{secAT}} - \frac{Tape_{BT}}{Tape_{AT}}}{S} * 100\% \quad (17)$$

Como o relé diferencial percentual está protegendo T1, os valores utilizados para mensurar o erro foram relativos a este transformador.

$$I_{nprim(AT)} = \frac{20M}{\sqrt{3} * 138k} = 83,67[A]$$

O TAPE deve ser escolhido de forma a ser maior que 83,67A, sendo assim, escolheu-se o de 150.

$$RTC_{(AT)} = \frac{150}{5}$$

$$I_{nprim(BT)} = \frac{20M}{\sqrt{3} * 13,8k} = 836,74[A]$$

$$RTC_{(BT)} = \frac{1200}{5}$$

$$I_{n-sec(BT)} = \frac{I_{nprim(BT)}}{RTC_{(BT)}} = \frac{836,74}{\left(\frac{1200}{5}\right)} = 3,486[A]$$

$$I_{r(BT)} = \sqrt{3} * 3,486 \angle 30^\circ = 6,038 \angle 30^\circ$$

Os TAPES disponíveis para ajuste do relé 87 (eletromecânico) são 2,9; 3,5; 3,8; 4,2; 4,6; 5,0; 8,7, com isso deve-se escolher um maior que 6,038, logo, o próximo maior é 8,7.

$$TAPE = 8,7$$

$$I_{n-sec(AT)} = \frac{I_{nprim(AT)}}{RTC_{(AT)}} = \frac{83,67}{\left(\frac{150}{5}\right)} = 2,789[A] = I_{r(AT)}$$

Devido a ligação dos TCs, a corrente deverá ser corrigida, portanto, o TAPE do TC do lado de alta tensão, deverá ser calculado relativo a esse novo valor de corrente conforme equação 18.

$$T_A = T_B * \left(\frac{I_{rA}}{I_{rB}}\right) = 8,7 * \left(\frac{2,789}{6,038}\right) = 4,018 \quad (18)$$

O próximo valor de TAPE superior a 4,018A é 4,2.

$$TAPE = 4,2$$

Agora pode-se calcular o valor do erro de acordo com a equação 17.

$$\varepsilon = \frac{\frac{6,038}{2,789} - \frac{8,7}{4,2}}{2,07} = \frac{2,164933 - 2,071428}{2,071428} = 0,04514 * 100 = 4,51\% < 15\% \quad \text{OK!!!}$$

Como o erro foi de 4,51% e este valor é inferior a referência de 15%, os valores de TAPES podem ser utilizados.

15 AJUSTE DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE - PREMISSAS

Num bom sistema de proteção deve-se ter a priorização de ramais de maior importância concernente a carga ou até mesmo aquele ramal que tenha um maior carregamento.

Na intenção de assegurar a abertura do circuito na ocasião de uma falta, é recomendada a existência de relé dito principal e um de retaguarda, sendo que este último deve atuar caso o principal falhe.

Os relés principais, são localizados de forma a estabelecer uma zona de proteção em torno de cada elemento do sistema, de forma a possibilitar a desconexão apenas do elemento faltoso, restringindo a interrupção do fornecimento de energia à menor quantidade de carga possível, promovendo então a seletividade.

A proteção chamada retaguarda não deve atuar imediatamente na ocorrência de um defeito na zona de proteção principal, mas apenas se o defeito persistir caso o primeiro relé falhe. Para este trabalho, a retaguarda foi feita por meio da coordenação dos relés.

É preciso ficar atento ao ajuste dos relés para que as suas curvas de operação não se interceptem, provocando perda de seletividade, já que poderá haver atuação indevida destes dispositivos. Para evitar este erro, as curvas dos relés deverão estar espaçadas por um intervalo de tempo definido como 0,3 segundos a partir do instante definido para a atuação da unidade instantânea.

Neste projeto, como há dois ramais que alimentam vários transformadores, fez-se o ajuste/coordenograma para os dois ramais, a saber, aquele que alimenta a Barra 2 e tudo que há a jusante desta e o ramal que alimenta a Barra 6 e tudo que há a jusante desta.

Inicialmente foi feito o cálculo para o ramal que alimenta a Barra 6 onde o primeiro relé a ser ajustado foi o Relé 13 uma vez que é o mais distante da fonte deste sistema radial. Em seguida o relé 12 foi coordenado com o relé 13 e o relé 12 foi coordenado com o relé 1.

Em um segundo momento, fez-se os cálculos para o ramal que alimenta a Barra 2 onde o primeiro relé a ser ajustado foi o relé 5, que foi coordenado com o relé 4 e este que foi coordenado com o relé 3 que por sua vez foi coordenado com o relé 2 que foi coordenado com o relé 1.

Como não há possibilidade do relé 1 ser coordenado com os dois ramais, escolheu-se o ramal mais importante como sendo o ramal que alimenta a barra 2 e após fazer o coordenograma, “congelou” as informações obtidas neste ramal mais importante e verificou se há coordenação com os relés do ramal “menos importante”.

15.1 PARAMETRIZAÇÃO DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE

É mostrado nos cortes A e B, (Figuras 19 e 20 - corte da planta do Apêndice B) a localização dos relés 13, 12 e 1 com suas respectivas unidades 50 e 51, onde os cálculos para parametrização que resultou no coordenograma estão apresentados a seguir.

Figura 19 – Corte A da planta do Anexo B mostrando a localização dos relés

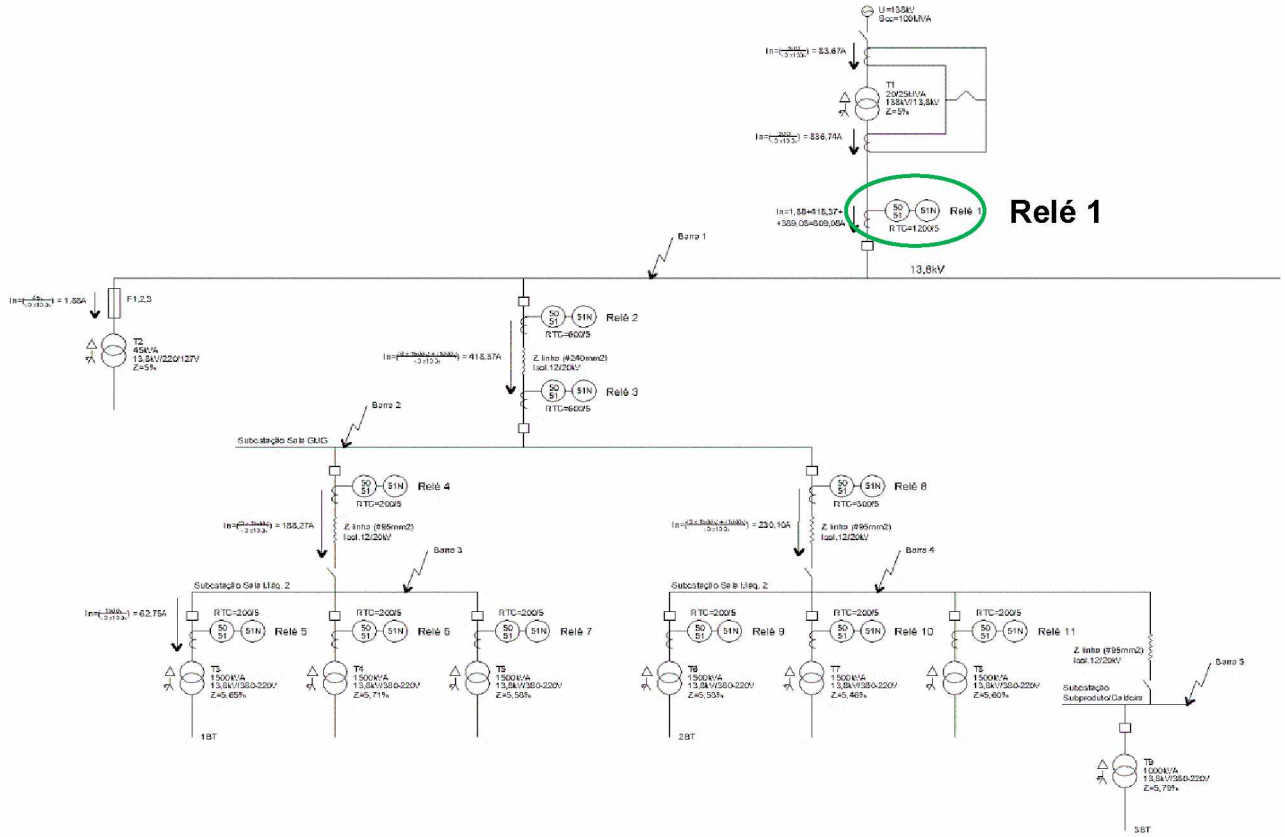
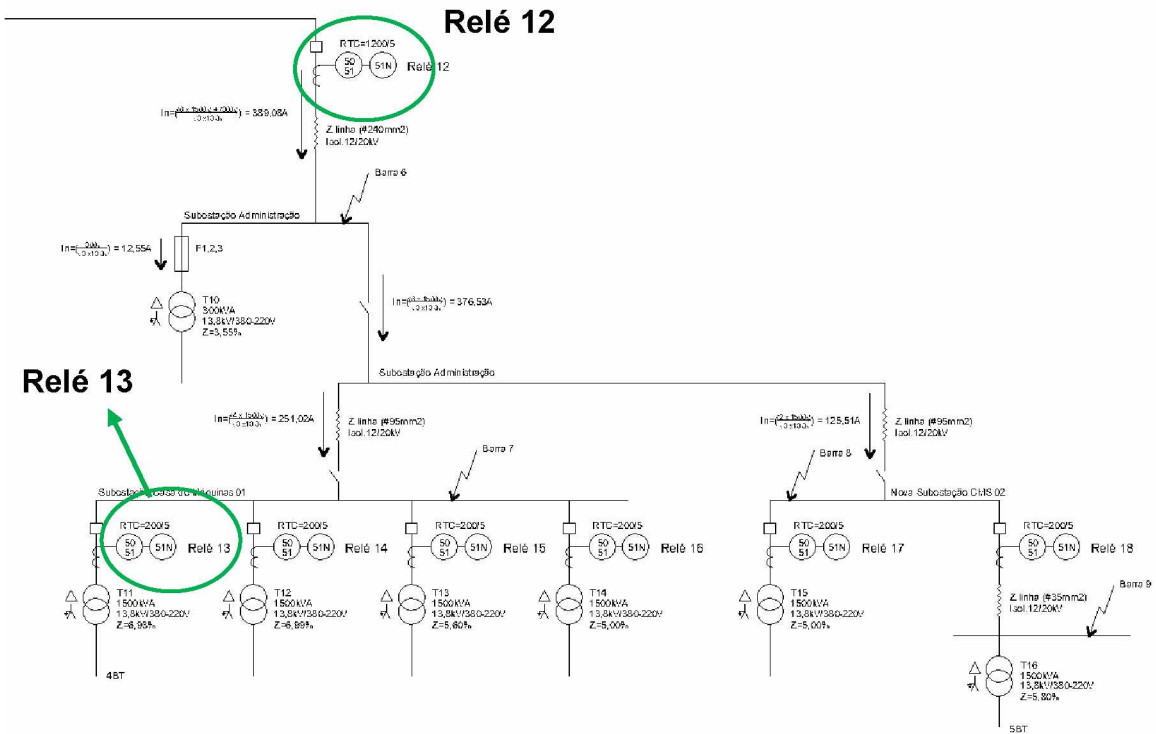


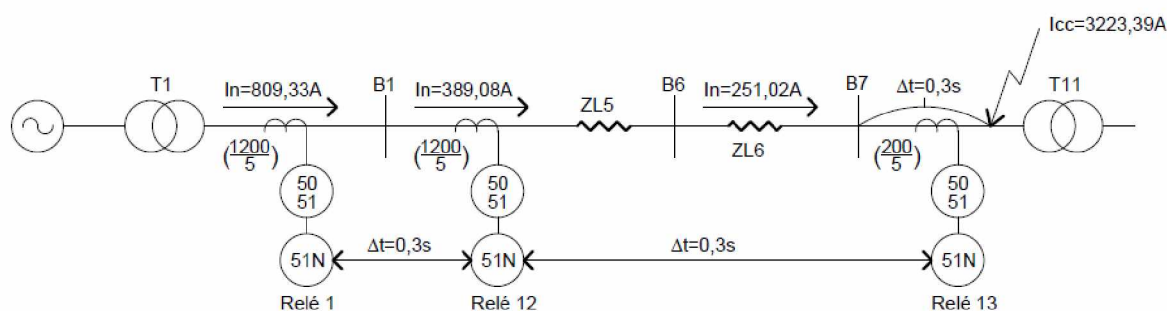
Figura 20 – Corte B da planta do Anexo B mostrando a localização dos relés



A proteção tem o dimensionamento iniciado a partir do relé mais próximo da carga em direção ao mais distante desta, isso é feito para garantir a seletividades da proteção, sendo assim, o primeiro relé a ser parametrizado foi o relé 13, que está acima do transformador T11 conforme o corte B.

Uma síntese do circuito que será parametrizado pode ser vista na Figura 21.

Figura 21 – Síntese do circuito para falta trifásica pelo ramo de menor carregamento



15.2 RELÉ 13 – UNIDADE 51 E 50

Como apresentado no capítulo 12, as correntes correspondentes ao barramento B7, fonte de alimentação de T11 são:

$$I_n = 62,75[A]$$

$$I_{CCrelé} = 3223,398[A]$$

$$RTC = \left(\frac{200}{5}\right)$$

Estas correntes estão todas referidas a 13,8kV, que é a tensão base usada para confecção do coordenograma.

De acordo com a equação 19, foi considerado um fator de 20% acima da corrente nominal afim de flexibilizar sobrecargas intencionais, de tal forma que a unidade 51 só começará a contagem de tempo após esta sobrecarga.

A unidade 51 começará a contar tempo a partir de 75,3A.

$$I_{sobrecarga} = 62,75 * 1,2 = 75,3[A] \quad (19)$$

Dessa forma, conforme a equação 12, o TAPE será,

$$\text{TAPE} = \frac{I_{\text{sobrecarga}}}{\text{RTC}} = \frac{62,75 * 1,2}{\left(\frac{200}{5}\right)} = \frac{75,3}{40} = 1,8825$$

De acordo com a equação 16 e o TAPE de 1,8825 iniciou-se o cálculo da corrente de curto no secundário do relé.

$$I_{\text{CCrelé}} = \frac{I_{\text{cc}}}{\text{RTC}} = \frac{3223,398}{\left(\frac{200}{5}\right)} = 80,58[\text{A}]$$

De posse destes valores, calculou-se o múltiplo da corrente, conforme equação 15

$$M = \frac{I_{\text{CCrelé}}}{\text{Tape}} = \frac{80,58}{1,8825} = 42,8048$$

E por fim, obteve-se o DT por meio da equação 13 para os relés digitais para família de curvas do tipo muito inversa e o tempo de 0,3[s].

$$\text{DT} = \frac{t * (M^{\alpha} - 1)}{K} = \frac{0,3 * (42,8048^1 - 1)}{13,5} = 0,9289$$

Portanto, o TAPE e o DT da unidade 51 deste relé, é 1,8825 e 0,9289 respectivamente.

Ainda no relé 13, ajustou-se sua unidade 50, sabendo que:

$$I < I_{\text{cc}} * 0,8$$

$$I < 2578,7184\text{A}$$

Então, para uma corrente de curto-circuito máxima de 2578,7184A, o barramento deve ser protegido pelo relé, logo, pela equação 16 tem-se,

$$I_{\text{CCrelé}} = \frac{3223,398 * 0,8}{\left(\frac{200}{5}\right)} = \frac{2578,7184}{40} = 64,4679[\text{A}]$$

Com isso tem-se os dados do relé 13: TAPE=1,8825, DT=0,9289 e I=64,4679[A].

16 CONCLUSÃO

Um bom sistema de proteção deve atuar de forma seletiva e rápida, isso para minimizar ou até mesmo evitar danos às cargas.

Neste trabalho, garantiu-se rapidez e seletividade em todos os barramentos, mesmo naquele de menor carga onde, para efeito de constatação, "congelou-se" os parâmetros/curva do Relé 1 do ramal dito mais importante (de maior carregamento) e lançou-os no coordenograma do outro ramal de menor carregamento, onde ficou evidenciado a informação.

Estas afirmações podem ser vistas nos coordenogramas presentes no trabalho, nos quais não houve cruzamentos de curvas, implicando na ação indevida de um relé quando na verdade outro deveria ter atuado.

Caso o relé que deveria ter atuado falhe, foi pensado em relés de retaguarda que atuarão isolando o defeito.

Se ocorrer faltas monofásicas, os relés de neutro (51N) atuarão de modo a isolar a falta, também de forma rápida e seletiva. Nestas faltas, deve-se monitorar o valor de corrente que circula no neutro em regime permanente para caso necessário, fazer os ajustes nestes relés.

Para o relé diferencial (87), que protege o transformador de maior carga, constatou-se que não foi preciso alterar os TAPES calculados uma vez que os erros não ultrapassaram o valor limite que é de 15%.

17 REFERÊNCIAS

[1] Catálogo General Cable e Cabos de média e alta tensão
(www.generalcablebrasil.com)

[2] RESENDE, José Wilson. Apostila de Introdução à proteção de sistemas elétricos de potência. Uberlândia. Universidade Federal de Uberlândia, 2009.

ANEXO A

Continuando os cálculos apresentados no corpo do trabalho, baseado nos valores calculados do relé.

A.1 RELÉ 12 – UNIDADE 51 E 50

Este é o próximo relé a ser parametrizado na ordem da carga (mais distante) para a fonte.

Tem-se as correntes para o barramento B1:

$$I_n = 389,08[A]$$

$$I_{CCrelé} = 3223,398[A]$$

$$RTC = \left(\frac{1200}{5}\right)$$

Também foi considerado um fator de 20% e a corrente de sobrecarga é:

$$I_{sobrecarga} = 389,08 * 1,2 = 466,896[A]$$

Com esta corrente, o TAPE é 1,94, conforme abaixo.

$$TAPE = \frac{389,08 * 1,2}{\left(\frac{1200}{5}\right)} = \frac{466,896}{240} = 1,94$$

Evitando que esse relé não atue ao mesmo tempo que o relé anterior, da barra 6, é necessário coordená-los. Isso deve ser feito de forma que, para um curto na barra 6, primeiro atue o relé 13, e no caso de o mesmo não atuar, aí então, o relé 12 deve entrar em operação.

Para que isso aconteça, deve-se saber o tempo em que o relé 13 leva para atuar para 2578,7184[A]:

$$I_{CCrelé} = \frac{3223,398 * 0,8}{\left(\frac{200}{5}\right)} = \frac{2578,7184}{40} = 64,4679[A]$$

$$M = \frac{I_{CCrelé}}{TAPE} = \frac{64,4679}{1,8825} = 34,2459$$

$$t = \frac{K * DT}{(M^\alpha - 1)} = \frac{13,5 * 0,9289}{(34,2459^1 - 1)} = 0,3772[s]$$

Sabe-se então que o relé 13 atua em 0,377[s], então, o relé 12 deve levar um tempo maior para esta mesma corrente. Para isso, considerou-se um tempo 0,3[s] maior.

$$t_f = t_c + 0,3 = 0,377 + 0,3 = 0,677[s]$$

Daí, pode-se calcular o DT do relé 12, levando em conta que este atuará em 0,677[s] para 2578,7184[A].

Como é necessário o valor do múltiplo da corrente para calcular o dial de tempo, calcula-se primeiro:

$$M = \frac{\left(\frac{I_{CCrelé}}{RTC}\right)}{TAPE} = \frac{\frac{3223,398 * 0,8}{(1200/5)}}{1,94} = 5,5385$$

$$DT = \frac{t * (M^\alpha - 1)}{K} = \frac{0,6772 * (5,5385^1 - 1)}{13,5} = 0,2277$$

A unidade 50 será parametrizada para:

$$I < I_{cc} * 0,85$$

$$I < 2844,489[A]$$

Como o valor do curto das barras é próximo (3223,398[A] e 3346,457[A]), adotou-se um valor de 0,85 do curto de 3346,457[A] que é a máxima corrente de curto nesta barra.

$$I_{CCrelé} = \frac{3346,457 * 0,85}{\left(\frac{1200}{5}\right)} = \frac{2844,489}{240} = 11,85[A]$$

Com isso tem-se os dados do relé 12: TAPE=1,94, DT=0,2277 e I=11,85[A].

A.1.2 RELÉ 1 – UNIDADE 51 E 50

Análogo a unidade 51 do relé 13 e 12, admitiu-se uma sobrecarga de 20% para que após ela se comesse a contar o tempo para abertura do circuito, com isso, o TAPE é igual a 4,04 para uma corrente de sobrecarga de 971,19[A] e RTC de 1200/5.

$$I_{\text{sobrecarga}} = 809,33 * 1,2 = 971,19[\text{A}]$$

$$\text{TAPE} = \frac{809,33 * 1,2}{\left(\frac{1200}{5}\right)} = \frac{971,19}{240} = 4,04$$

De posse deste valor, é preciso saber em quanto tempo o relé 12 abre para um curto de 2844,489[A].

$$I_{\text{CCrelé}} = \frac{3346,457 * 0,85}{\left(\frac{1200}{5}\right)} = \frac{2844,489}{240} = 11,85[\text{A}]$$

Calculando o múltiplo de corrente para 2844,489[A].

$$M = \frac{11,85}{1,94} = 6,11$$

De posse destes valores, calcula-se o tempo de atuação do relé 12 para este valor de corrente, o qual adiciona-se 0,3[s] para que se escolha a curva do relé 1.

$$t = \frac{13,5 * 0,2277}{(6,11^1 - 1)} = 0,6017[\text{s}]$$

$$t = 0,6017 + 0,3 = 0,9017[\text{s}]$$

Agora, diante destes valores calculados, calcula-se o valor do múltiplo de corrente e do dial de tempo do relé 1.

$$M = \frac{\left(\frac{I_{\text{CCrelé}}}{\text{RTC}}\right)}{\text{TAPE}} = \frac{\frac{3346,457 * 0,85}{\left(\frac{1200}{5}\right)}}{4,04} = 2,9336$$

$$\text{DT} = \frac{t * (M^\alpha - 1)}{K} = \frac{0,9017 * (2,9336^1 - 1)}{13,5} = 0,13$$

A unidade 50 será parametrizada para:

$$I < I_{\text{cc}} * 0,95$$

$$I < 3179,13[\text{A}]$$

Adotou-se 0,95 do curto 3346,457[A] para que a unidade 50 dos relés 12 e 1 não tenham atuação instantânea para mesma corrente.

$$I_{CCrelé} = \frac{3346,457 * 0,95}{\left(\frac{1200}{5}\right)} = \frac{3179,1341}{240} = 13,24[A]$$

Para $I_{cc}=3179,1341A$, sabe-se que o relé atuará em 0,77[s].

$$M = \frac{\frac{3179,13}{\left(\frac{1200}{5}\right)}}{4,04} = 3,2789$$

$$t = \frac{13,5 * 0,13}{(3,2789^1 - 1)} = 0,77[s]$$

Com isso tem-se os dados do relé 1: TAPE=4,04, DT=0,13 e I=13,24[A]

Diante destes cálculos, fez-se o coordenograma destes relés e neste, marcou-se os pontos ANSI devido ao transformador T11,

$14,3 * I_n$ em 5[s] (devido a impedância percentual)

$$14,3 * 62,75[A] = 897,325 \text{ em } 5[s]$$

E o ponto de Inrush,

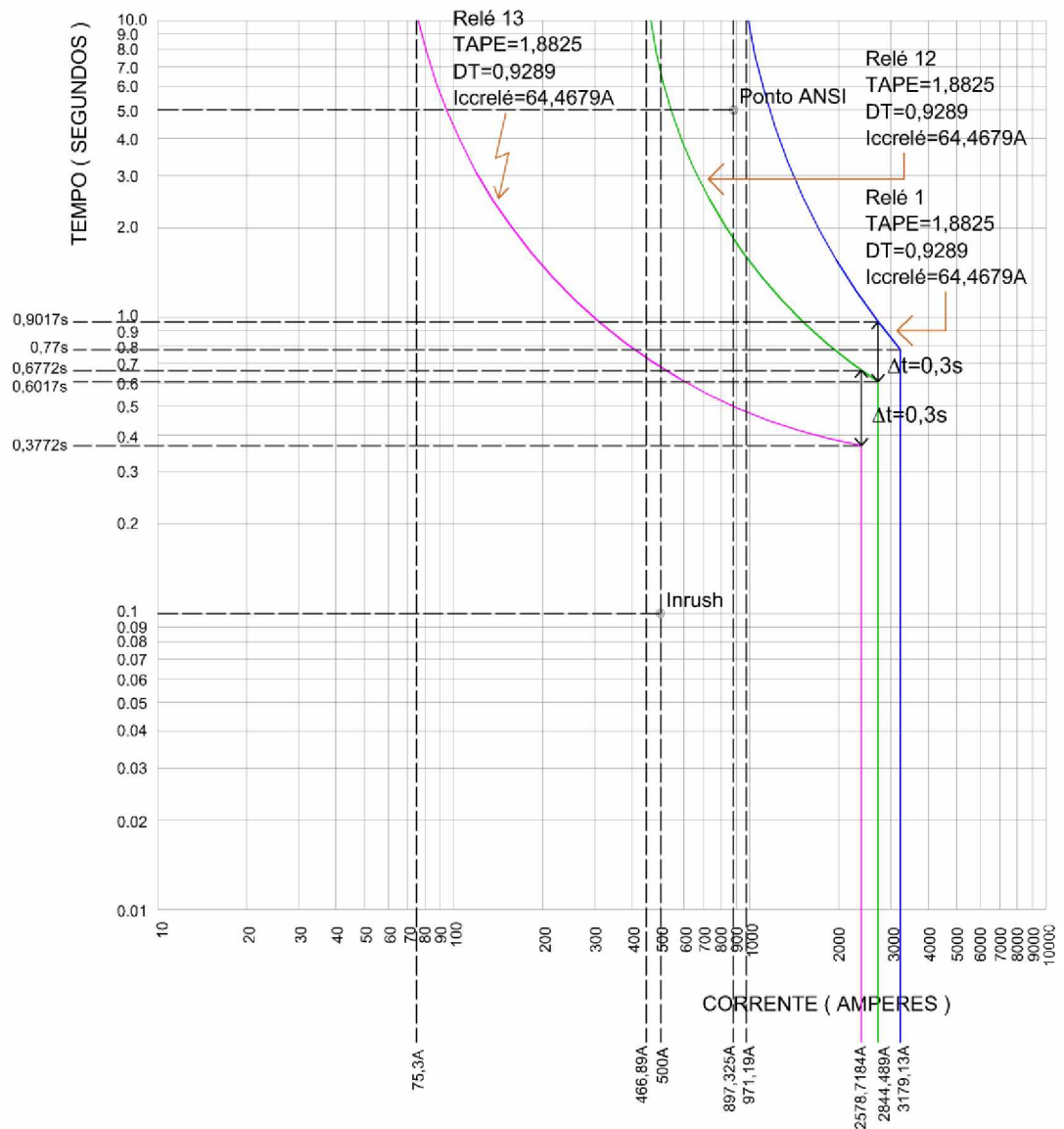
$8 * I_n$ em 0,1[s]

$$8 * 62,75 = 500[A] \text{ em } 0,1[s]$$

A.2 COORDENOGRAMA

Como resultado dos cálculos feitos acima, tem-se o coordenograma da Figura 22.

Figura 22 – Coordenograma para ramal de menor carregamento

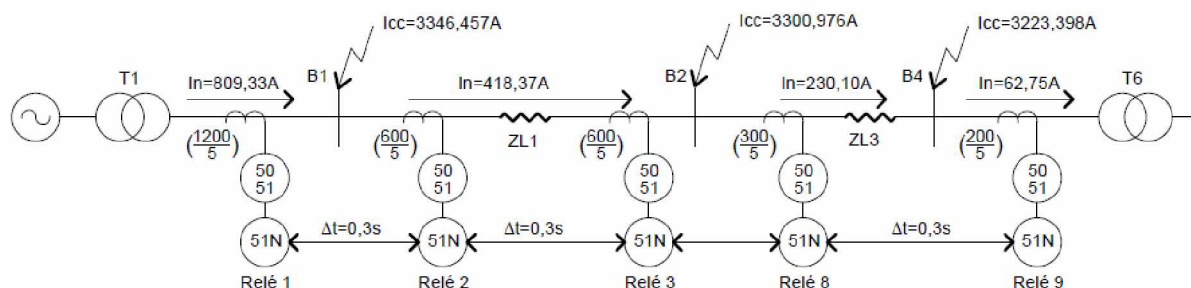


A.3 PARAMETRIZAÇÃO PELO OUTRO RAMAL

Na intenção de verificar a seletividade entre o outro “braço” que deriva da Barra 1, fez-se o ajuste dos outros relés, a saber, Relé 9, Relé 8, Relé 3, Relé 2 e Relé 1.

O circuito equivalente deste outro caminho é apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Síntese do circuito para falta trifásica pelo ramal de maior carregamento



O ajuste dos relés se deu também do relé mais distante da “fonte” para o mais próximo, logo, começou-se pelo Relé 9.

A.3.1 RELÉ 9 – UNIDADE 51 E 50

As correntes (referidas a 13,8kV) do barramento (Barra 4) onde está o relé 9 são:

$$I_n = 62,75[A]$$

$$I_{CCrelé} = 3223,398[A]$$

$$RTC = \left(\frac{200}{5}\right)$$

Admitindo uma sobrecarga de 20% para o início da contagem de tempo deste relé, calculou-se o TAPE para $I_{sobrecarga} = 75,3[A]$.

$$I_{sobrecarga} = 62,75 * 1,2 = 75,3[A]$$

$$TAPE = \frac{I_{sobrecarga}}{RTC} = \frac{62,75 * 1,2}{\left(\frac{200}{5}\right)} = \frac{75,3}{40} = 1,8825$$

Para calcular o múltiplo da corrente é preciso ter o valor da corrente de curto no secundário do relé, que neste caso será 80,58[A].

$$I_{CCrelé} = \frac{I_{cc}}{RTC} = \frac{3223,398}{\left(\frac{200}{5}\right)} = 80,58[A]$$

Agora é possível calcular o múltiplo da corrente,

$$M = \frac{I_{CCrelé}}{TAPE} = \frac{80,58}{1,8825} = 42,8048$$

Com os dados obtidos, obtém-se o valor do dial de tempo para um tempo de 0,3[s].

$$DT = \frac{t * (M^{\alpha} - 1)}{K} = \frac{0,3 * (42,8048^1 - 1)}{13,5} = 0,9289$$

Para ajustar a unidade 50, sabe-se que

$$I < I_{cc} * 0,7$$

$$I < 2256,38[A]$$

Admitiu-se 0,7 da corrente de curto na barra pois os valores de curto são muito próximos e poderia ocorrer uma perda de seletividade no conjunto dos relés.

Para uma RTC de 200/5, sabe-se que $I_{CCrelé}=64,4679[A]$.

$$I_{CCrelé} = \frac{3223,398 * 0,8}{\left(\frac{200}{5}\right)} = \frac{2578,7184}{40} = 64,4679[A]$$

Com isso tem-se os dados do relé 9: TAPE=1,8825, DT=0,9289 e I=56,41[A].

A.3.2 RELÉ 8 – UNIDADE 51 E 50

O próximo elemento a ser ajustado é o relé 8, cujas correntes de barra são:

$$I_n = 230,10[A]$$

$$I_{CCrelé} = 3223,398[A]$$

$$RTC = \left(\frac{300}{5}\right)$$

Assumindo 20% de sobrecarga em relação a corrente nominal para começar a contagem de tempo da unidade 51, tem-se uma $I_{\text{sobrecarga}}=276,12[\text{A}]$ que através da razão desta pela RTC, resulta o valor do TAPE.

$$\text{TAPE} = \frac{230,10 * 1,2}{\left(\frac{300}{5}\right)} = \frac{276,12}{60} = 4,6$$

Para ajustar o dial de tempo deste relé, é preciso saber em quanto tempo o Relé 9 atua para uma corrente de 2256,38[A].

Isso é possível estabelecendo o valor do múltiplo de corrente com o TAPE e o dial de tempo do Relé 9.

$$I_{\text{CCrelé}} = \frac{3223,398 * 0,7}{\left(\frac{200}{5}\right)} = \frac{2256,38}{40} = 56,41[\text{A}]$$

$$M = \frac{I_{\text{CCrelé}}}{\text{TAPE}} = \frac{56,41}{1,8825} = 29,9652$$

$$t = \frac{13,5 * 0,9289}{(29,9652^1 - 1)} = 0,4329[\text{s}]$$

É adicionado 0,3[s] para fazer a escolha do dial de tempo do Relé 8.

$$t = 0,4329 + 0,3 = 0,7329[\text{s}]$$

Agora, com todos os dados necessários, calculou-se o valor do dial de tempo.

$$M = \frac{\left(\frac{I_{\text{CCrelé}}}{\text{RTC}}\right)}{\text{TAPE}} = \frac{\frac{3223,398 * 0,7}{(300/5)}}{4,6} = 8,17$$

$$\text{DT} = \frac{t * (M^\infty - 1)}{K} = \frac{0,7329 * (8,17^1 - 1)}{13,5} = 0,39$$

Para a Unidade 50 do Relé 8, sabe-se que

$$I < I_{\text{cc}} * 0,75$$

$$I < 2475,73[\text{A}]$$

Admitiu-se 0,75 da corrente de curto na barra pois os valores de curto são muito próximos e poderia ocorrer uma perda de seletividade no conjunto dos relés.

Para uma RTC de 300/5 e $I_{cc}=3300,976[A]$ que é a máxima corrente de curto na Barra 2, sabe-se que $I_{CCrelé}=41,2622[A]$.

$$I_{CCrelé} = \frac{3300,976 * 0,75}{\left(\frac{300}{5}\right)} = \frac{2475,73}{60} = 41,2622[A]$$

Com isso tem-se os dados do relé 8: TAPE=4,6, DT=0,39 e $I=41,2622[A]$.

A.3.3 RELÉ 3 – UNIDADE 51 E 50

Para ajustar o a unidade 51 do Relé 3, admitiu-se 20% de sobrecarga em relação a sua corrente nominal para início da contagem de tempo, com isso e o valor da RTC, pode-se calcular o TAPE.

$$I_n = 418,37[A]$$

$$I_{sobrecarga} = 418,37 * 1,2 = 502,044[A]$$

$$RTC = \left(\frac{600}{5}\right)$$

O TAPE calculado é 4,1837.

$$TAPE = \frac{418,37 * 1,2}{\left(\frac{600}{5}\right)} = \frac{502,044}{120} = 4,1837$$

Antes de dar sequência nos cálculos do Relé 3, deve-se saber em quanto tempo o Relé 9 abre para um curto de 2475,73[A]. Isso é feito calculando um novo valor do múltiplo de corrente para o mesmo valor de TAPE e dial de tempo do Relé 9.

$$I_{CCrelé} = \frac{3300,976 * 0,75}{\left(\frac{300}{5}\right)} = \frac{2475,73}{60} = 41,2622A$$

$$M = \frac{41,2622}{4,6} = 8,97$$

$$t = \frac{13,5 * 0,39}{(8,97^1 - 1)} = 0,66[s]$$

Portanto, para uma corrente de 2475,73[A], o Relé 9 atua em 0,66[s], logo, a este tempo, é acrescido 0,3[s] para correta atuação.

$$t = 0,66 + 0,3 = 0,96[s]$$

Agora já é possível o ajuste do múltiplo da corrente e o dial de tempo do Relé 3.

$$M = \frac{\left(\frac{I_{CCrelé}}{RTC}\right)}{TAPE} = \frac{\frac{3300,976 * 0,75}{(600/5)}}{4,1837} = 4,93$$

$$DT = \frac{t * (M^\alpha - 1)}{K} = \frac{0,96 * (4,93^1 - 1)}{13,5} = 0,2795$$

Para a unidade 50 deste relé, sabe-se que:

$$I < I_{cc} * 0,85$$

$$I < 2805,8296[A]$$

Admitiu-se 0,85 da corrente de curto na barra pois os valores de curto são muito próximos e poderia ocorrer uma perda de seletividade no conjunto dos relés.

Para uma RTC de 600/5 e $I_{cc}=3300,976[A]$, sabe-se que $I_{CCrelé}=23,38[A]$.

$$I_{CCrelé} = \frac{3300,976 * 0,85}{\left(\frac{600}{5}\right)} = \frac{2805,8296}{120} = 23,38[A]$$

Com isso tem-se os dados do relé 3: TAPE=4,1837, DT=0,2795 e $I=23,38[A]$.

A.3.4 RELÉ 2 – UNIDADE 51 E 50

Neste relé, para calcular o TAPE, adotou-se 30% de sobrecarga para que houvesse uma maior diferença entre o início da contagem de tempo do Relé 3 com o Relé 2 já que estes estão próximos e as correntes nominais são as mesmas.

As correntes do barramento próximo a este relé são:

$$I_n = 418,37[A]$$

$$I_{\text{sobrecarga}} = 418,37 * 1,3 = 543,88[\text{A}]$$

$$\text{RTC} = \left(\frac{600}{5}\right)$$

A razão entre a corrente de sobrecarga e a RTC resulta no TAPE que neste caso é de 4,5323.

$$\text{TAPE} = \frac{418,37 * 1,3}{\left(\frac{600}{5}\right)} = \frac{543,88}{120} = 4,5323$$

O Relé 3, atua em 0,822[s] para uma corrente de 2805,8296[A] conforme pode ser visto abaixo.

$$I_{\text{CCrelé}} = \frac{3300,976 * 0,85}{\left(\frac{600}{5}\right)} = \frac{2805,8296}{120} = 23,38[\text{A}]$$

$$M = \frac{23,38}{4,1837} = 5,589$$

$$t = \frac{13,5 * 0,2795}{(5,589^1 - 1)} = 0,822[\text{s}]$$

Acresceu-se 0,3[s] ao tempo de atuação do Relé 3 para usar este tempo no cálculo do dial de tempo do Relé 2.

$$t = 0,822 + 0,3 = 1,122[\text{s}]$$

Lançando estes valores nas equações 13,15 e 16, calcula-se o valor do múltiplo da corrente que será necessário na obtenção do dial de tempo do Relé 2.

$$M = \frac{\left(\frac{I_{\text{CCrelé}}}{\text{RTC}}\right)}{\text{TAPE}} = \frac{\frac{3300,976 * 0,85}{\left(\frac{600}{5}\right)}}{4,5323} = 5,1589$$

$$\text{DT} = \frac{t * (M^\alpha - 1)}{K} = \frac{1,122 * (5,1589^1 - 1)}{13,5} = 0,3456$$

Para a unidade 50 deste relé, sabe-se que:

$$I < I_{\text{cc}} * 0,9$$

$$I < 3011,8113[\text{A}]$$

Admitiu-se 0,9 da corrente de curto na barra pois os valores de curto são muito próximos e poderia ocorrer uma perda de seletividade no conjunto dos relés.

Para uma RTC de 600/5 e $I_{cc}=3346,457[A]$, sabe-se que $I_{CCrelé}=25,098[A]$.

$$I_{CCrelé} = \frac{3346,457 * 0,9}{\left(\frac{600}{5}\right)} = \frac{3011,8113}{120} = 25,098[A]$$

Com isso tem-se os dados do relé 2: TAPE=4,5323, DT=0,3456 e $I=25,098[A]$.

A.3.5 RELÉ 1 – UNIDADE 51 E 50

Considerando 20% de sobrecarga, as correntes do barramento onde o Relé 1 está, são:

$$I_n = 809,33[A]$$

$$I_{sobrecarga} = 809,33 * 1,2 = 971,196[A]$$

$$RTC = \left(\frac{1200}{5}\right)$$

Dividindo a corrente de sobrecarga pela RTC, temos o TAPE.

$$TAPE = \frac{809,33 * 1,2}{\left(\frac{1200}{5}\right)} = \frac{971,196}{240} = 4,046$$

Para descobrir o dial de tempo deste relé, é preciso saber em quanto tempo o Relé 2 atua para uma corrente de 3011,8183[A].

Inicialmente, verificou qual o valor de corrente estaria no secundário do relé, obedecendo a RTC do Relé 2.

$$I_{CCrelé} = \frac{3346,457 * 0,9}{\left(\frac{600}{5}\right)} = \frac{3011,8113}{120} = 25,098[A]$$

Daí dividiu-se o $I_{CCrelé}$ pelo TAPE do Relé 2 e obteve-se o múltiplo da corrente que será usado para calcular o tempo.

$$M = \frac{25,098}{4,5323} = 5,5376$$

$$t = \frac{13,5 * 0,3456}{(5,5376^1 - 1)} = 1,028[s]$$

Acresceu-se 0,3[s] ao tempo encontrado para fazer a escolha da curva do Relé 1.

$$t = 1,028 + 0,3 = 1,328[s]$$

Agora já é possível obter o múltiplo da corrente e posteriormente o dial de tempo do Relé 1.

$$M = \frac{\frac{3346,457 * 0,9}{(1200/5)}}{4,046} = 3,1016$$

$$DT = \frac{t * (M^\alpha - 1)}{K} = \frac{1,328 * (3,1016^1 - 1)}{13,5} = 0,2067$$

A unidade 50 será parametrizada para:

$$I < I_{cc} * 0,95$$

$$I < 3179,13[A]$$

Adotou-se 0,95 do curto 3346,457[A] para que a unidade 50 dos relés 12 e 1 não tenham atuação instantânea para mesma corrente.

$$I_{CCrelé} = \frac{3346,457 * 0,95}{\left(\frac{1200}{5}\right)} = \frac{3179,13}{240} = 13,2463[A]$$

Para $I_{cc}=3179,1341A$, sabe-se que o relé atuará em 1,2271[s].

$$M = \frac{\left(\frac{I_{CCrelé}}{RTC}\right)}{TAPE} = \frac{\frac{3179,13}{(1200/5)}}{4,046} = 3,27$$

$$t = \frac{13,5 * 0,2067}{(3,27^1 - 1)} = 1,2271[s]$$

Com isso tem-se os dados do relé 1: TAPE=4,046, DT=0,2067 e I=13,2463[A].

Diante destes cálculos, fez-se o coordenograma destes relés e neste, marcou-se os pontos ANSI devido ao transformador T6,

$$16,6 * I_n \text{ em } 4[s] \text{ (devido a impedância percentual)}$$

$$16,6 * 62,75[A] = 1041,74 \text{ em } 4[s]$$

E o ponto de Inrush,

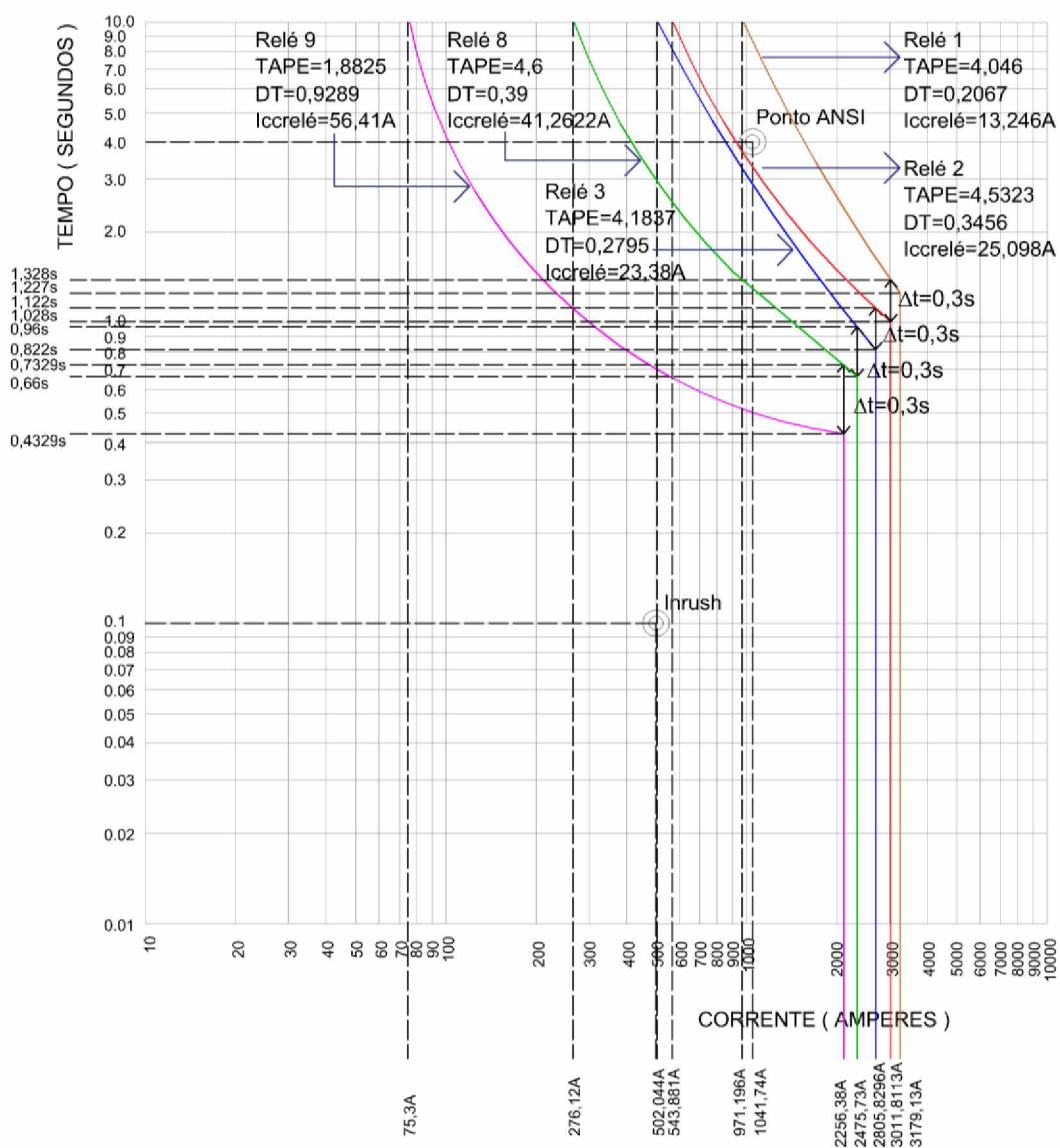
$$8 * I_n \text{ em } 0,1[s]$$

$$8 * 62,75 = 500[A] \text{ em } 0,1[s]$$

A.4 COORDENOGRAMA

Como resultado dos cálculos feitos acima, tem-se o coordenograma da Figura 24.

Figura 24 – Coordenograma para ramal de menor carregamento

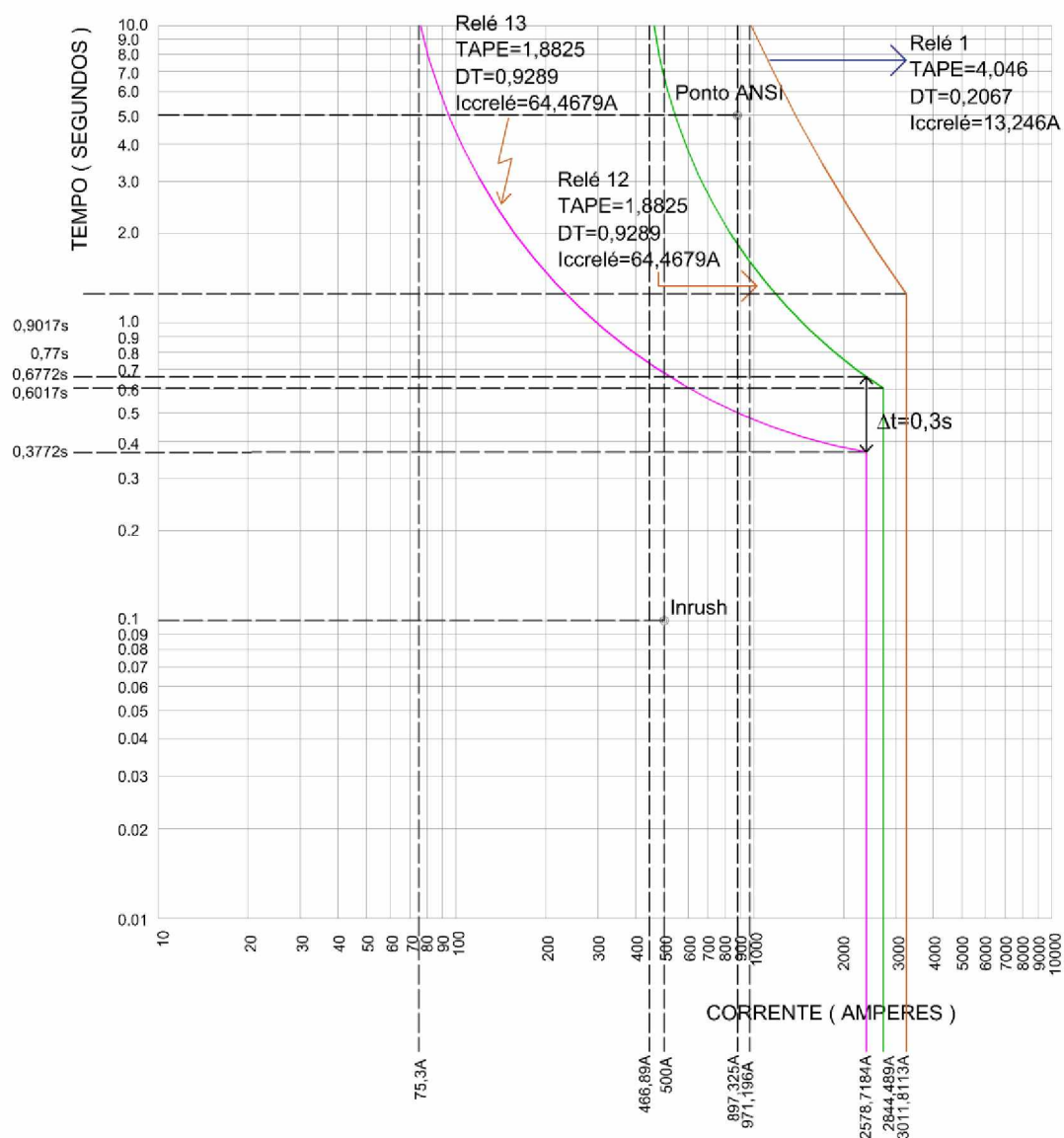


A.5 COORDENOGRAMA – CONFERÊNCIA DE SELETIVIDADE

Como o relé 1 não pode ser parametrizado pelos dois “braços” do sistema, opta-se por manter este último coordenograma (oriundo do “braço” de maior carregamento e maior quantidade de relés) que onde é composto pelos relés, 9,8,3,2 e 1 onde os demais relés da planta devem ser ajustados conforme o ajuste destes.

No intuito de verificar se há seletividade no “braço” onde há 3 relés (de menor carregamento), “congelou-se” os ajustes do Relé 1 e refez o coordenograma destes 3 relés, verificou-se então uma similaridade no ajuste deste relé feito pelos dois braços e vê-se que está seletivo para um curto neste outro ramal de menor carregamento. O coordenograma refeito pode ser visto na Figura 25.

Figura 25 – Coordenograma para conferência de seletividade



A.6 CURTOS-CIRCUITOS MONOFÁSICOS

A.6.1 INTRODUÇÃO

Como os curtos mais comuns são os monofásicos, fez-se também os ajustes dos relés de neutro (unidade 51) que tem a função de “ver” estes curtos.

Os valores dos curtos trifásicos, em geral são menores que os trifásicos, contudo, podem ser maiores também, dependendo da impedância de aterramento.

Neste trabalho, os curtos monofásicos têm valores maiores que os trifásicos pois não se tem a impedância de aterramento Z_f .

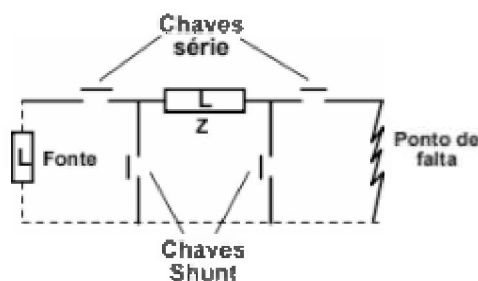
Considerou-se para o cálculo das correntes de curto monofásicas os valores das impedâncias de sequência positiva e negativa iguais às dos cálculos trifásicos e a impedância de sequência zero, o dobro da impedância de sequência positiva. Esta consideração não implica em grandes erros uma vez que esta ordem de grandeza é comum em medições.

Foi feito o detalhamento dos circuitos para o diagrama de sequência zero que sofre alteração no caminho da corrente dependendo do fechamento de certos elementos.

Para fazer o diagrama de impedâncias equivalente do circuito de sequência zero, onde há transformador, fechou-se a chave série APENAS quando o enrolamento do lado desta “chave” for em ESTRELA ATERRADO, que é o que proporciona um circuito de retorno para a corrente que circula pela terra e fechou-se a chave shunt APENAS quando o enrolamento do lado desta “chave” for em DELTA, pois este proporciona um circuito fechado para a corrente de compensação de f.m.m.

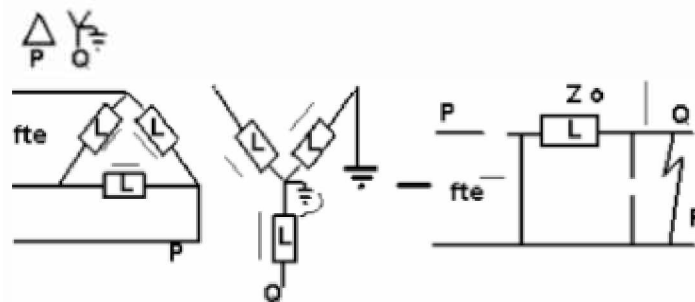
Na Figura 26 é mostrado o que se chama shunt e série.

Figura 26 – Ligação série e shunt para diagrama de sequência zero



No caso deste trabalho, todos os transformadores são fechados em delta estrela aterrado, com isso, seu diagrama de impedâncias equivalente do circuito de sequência zero pode ser expresso conforme Figura 27.

Figura 27 – Circuito para sequência zero de um transformador delta estrela aterrado



Como está sendo utilizado o método de componentes simétricos, é válido lembrar que a corrente na fase "A" por exemplo, é a soma das correntes $I_{a0} = I_{a1} = I_{a2}$, que são iguais, o que implica em $I_a = 3 * I_{a0}$.

A.6.2 CÁLCULO DAS CORRENTES DE CURTO

O cálculo de I_a também pode ser representado conforme equação 20.

$$I_a = \frac{3 * E}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + (3 * Z_f)} \quad (20)$$

Onde assumiu-se que E vale 1 pu e a impedância de aterramento $Z_f=0$.

Foi montado um circuito para cada barra. Como há barras onde seu circuito equivalente é idêntico (em valores) a outra já calculada, usou-se então os valores calculados.

Nos diagramas de impedâncias de sequência zero dispostos abaixo (Figuras 28,29,30,31 e 32) há uma seta indicando o possível local de falta e através deste é calculado o caminho onde a corrente de curto passará.

Figura 28 – Diagrama de impedâncias de sequência zero da Barra 1



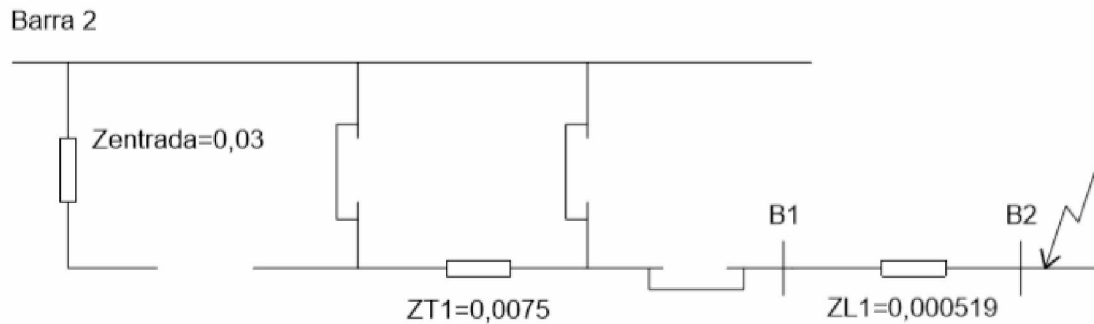
Cálculo da corrente de curto monofásico.

$$I_a = \frac{3 * 1}{0,01875 + 0,01875 + 0,0075 + (3 * 0)} = \frac{3}{0,045} = 66,67_{[pu]}$$

$$I_a = 66,67_{[pu]}$$

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = 22,22_{[pu]}$$

Figura 29 – Diagrama de impedâncias de sequência zero da Barra 2



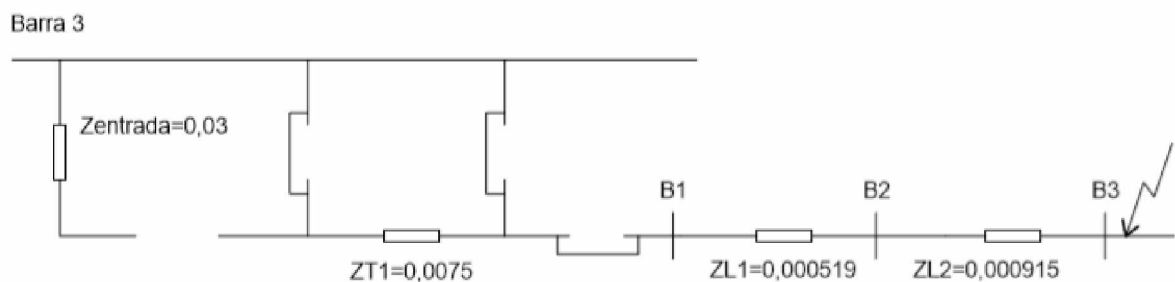
$$Z_{equivalente} = (0,0075 + 0,000519) = 0,008019_{[pu]}$$

$$I_a = \frac{3 * 1}{0,0190095 + 0,0190095 + 0,008019 + (3 * 0)} = \frac{3}{0,046038} = 65,1635_{[pu]}$$

$$I_a = 65,1635_{[pu]}$$

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = 21,7211_{[pu]}$$

Figura 30 – Diagrama de impedâncias de sequência zero da Barra 3



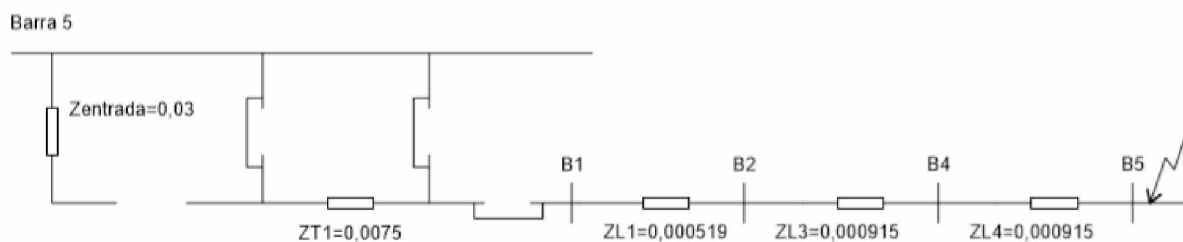
$$Z_{equivalente} = (0,0075 + 0,000519 + 0,000915) = 0,008934_{[pu]}$$

$$I_a = \frac{3 * 1}{0,019467 + 0,019467 + 0,008934 + (3 * 0)} = \frac{3}{0,47868} = 62,6723_{[pu]}$$

$$I_a = 62,6723_{[pu]}$$

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = 20,89078_{[pu]}$$

Figura 31 – Diagrama de impedâncias de sequência zero da Barra 5



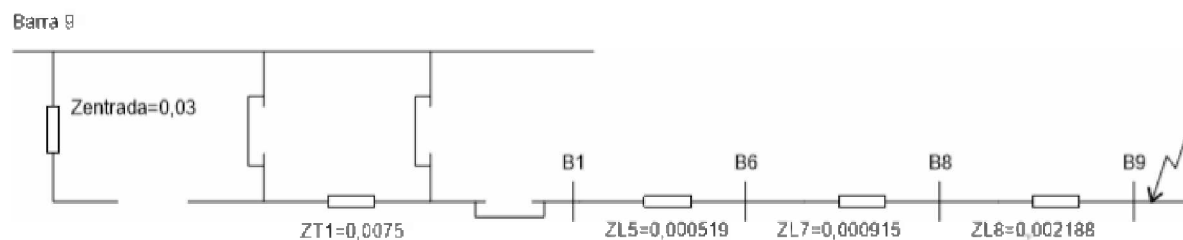
$$Z_{\text{equivalente}} = (0,0075 + 0,000519 + 0,000915 + 0,000915) = 0,009849_{[\text{pu}]}$$

$$I_a = \frac{3 * 1}{0,0199245 + 0,0199245 + 0,009849 + (3 * 0)} = \frac{3}{0,049698} = 60,3646_{[\text{pu}]}$$

$$I_a = 60,3646_{[\text{pu}]}$$

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = 20,1215_{[\text{pu}]}$$

Figura 32 – Diagrama de impedâncias de sequência zero da Barra 9



$$Z_{\text{equivalente}} = (0,0075 + 0,000519 + 0,000915 + 0,002188) = 0,011122_{[\text{pu}]}$$

$$I_a = \frac{3 * 1}{0,020561 + 0,020561 + 0,011122 + (3 * 0)} = \frac{3}{0,052244} = 57,4228_{[\text{pu}]}$$

$$I_a = 57,4228_{[\text{pu}]}$$

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = 19,1409_{[\text{pu}]}$$

A corrente base é 62,75[A], logo, multiplicou-se os valores em pu obtidos nos cálculos acima por ela e os resultados estão na Tabela 12.

Tabela 12 – Valores de curto monofásico em cada barra

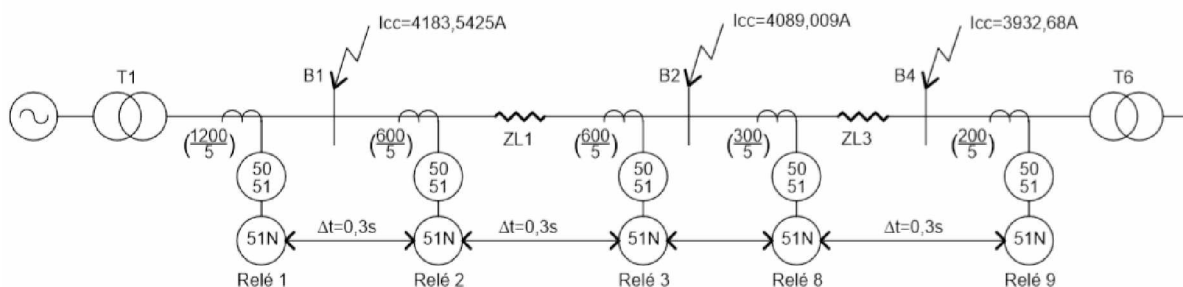
Barra	$I_{a[pu]}$	$I_{a[A]}$
Barra 1	66,67	4183,5425
Barra 2	65,1635	4089,009
Barra 3	62,6723	3932,68
Barra 4	62,6723	3932,68
Barra 5	60,3646	3787,88
Barra 6	65,1635	4089,009
Barra 7	62,6723	3932,68
Barra 8	62,6723	3932,68
Barra 9	57,4228	3603,28

Adotou-se os mesmos valores de RTC apresentados nos curtos trifásicos pois mesmo com valores de correntes de curto monofásicos maiores, os critérios para escolha da RTC não foram feridos.

A.6.3 AJUSTE DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE DE NEUTRO

Com os valores dos curtos em cada barra, chegou-se ao circuito da Figura 33, que é a síntese do caminho da corrente, desde a fonte até o transformador T6. Este caminho foi escolhido para fazer a coordenação dos relés pelo grau de importância uma vez que tem maior carga e mais relés a serem coordenados.

Figura 33 – Síntese do circuito para falta monofásica



Começou-se o ajuste dos relés do relé mais distante da fonte para o mais próximo.

A.6.3.1 RELÉ 9 – FUNÇÃO 51N

Foi preciso adotar um valor mínimo de corrente para o cálculo do TAPE, uma vez que não é possível medir localmente o valor de corrente nominal que circula no neutro.

É de se esperar para esta situação que a corrente de neutro não seja muito alta, logo, caso passe maior corrente que a ajustada, o relé contará um tempo para atuar. Com esta sensibilidade e a sugestão da literatura de admitir 0,3 vezes do valor do curto mais distante, adotou valores que ao serem multiplicados pela corrente de curto calculada, traga a valores significativamente menor que o do curto de cada barra.

Para este relé, admitiu-se 0,3 vezes o valor da corrente de curto calculada (equação 22) e a esta, deu-se o nome de $I_{cc \text{ mínimo}}$. Para chegar ao valor da corrente que comporá o cálculo do TAPE, multiplicou-se $I_{cc \text{ mínimo}}$ por 0,2 (equação 21) e a este resulta deu-se nome de $I_{sobrecarga}$.

$$"I_{sobrecarga}" = (0,2 * I_{cc \text{ mínimo}}) \quad (21)$$

$$I_{cc \text{ mínimo}} = (0,3 * I_{cc \text{ calculado}}) \quad (22)$$

$$"I_{sobrecarga}" = [0,2 * (0,3 * I_{cc \text{ calculado}})]$$

Após estas considerações, pode-se calcular o valor do TAPE.

$$TAPE = \frac{I_{sobrecarga}}{RTC} = \frac{0,2 * 0,3 * 3932,68}{\left(\frac{200}{5}\right)} = \frac{235,96}{40} = 5,899$$

Para se calcular o valor do dial de tempo deste relé, calculou-se a corrente vista pelo relé como sendo 0,3 vezes o valor do curto calculado e de posse deste resultado, obteve-se o múltiplo de corrente e por fim o dial de tempo.

$$I_{CCrelé} = \frac{3932,68 * 0,3}{\left(\frac{200}{5}\right)} = \frac{1179,80}{40} = 29,49[A]$$

$$M = \frac{29,49}{5,899} = 5$$

$$DT = \frac{0,3 * (5,1 - 1)}{13,5} = 0,0889$$

A.6.3.2 RELÉ 8 – FUNÇÃO 51N

Para não ter o mesmo ponto de início, adotou-se a corrente I_{cc} mínimo como sendo 0,4 vezes do valor de corrente calculado para a Barra 2. Já a “ $I_{sobrecarga}$ ” assumiu-se 0,2 vezes de I_{cc} mínimo.

$$“I_{sobrecarga}” = (0,2 * I_{cc \text{ mínimo}})$$

$$I_{cc \text{ mínimo}} = (0,4 * I_{cc \text{ calculado}})$$

$$“I_{sobrecarga}” = [0,2 * (0,4 * I_{cc \text{ calculado}})]$$

Após calcular a “ $I_{sobrecarga}$ ”, calculou-se o TAPE.

$$TAPE = \frac{“I_{sobrecarga}”}{RTC} = \frac{0,4 * 0,2 * 4089,009}{\left(\frac{300}{5}\right)} = \frac{327,12}{60} = 5,45$$

Para fazer a coordenação com o a unidade 51N do Relé 9, é preciso saber em quanto tempo ele atua para uma corrente de 3932,68[A].

Isso é feito calculando o valor da corrente vista pelo relé quando houver uma corrente de 3932,68[A]. Este valor é dividido pelo TAPE calculado para o Relé 9 e resulta no múltiplo de corrente.

$$I_{cc \text{ relé}} = \frac{3932,68}{\left(\frac{200}{5}\right)} = 98,317[A]$$

$$M = \frac{98,317}{5,899} = 16,67$$

Ao lançar estes valores para calcular o tempo, obtém-se 0,077[s] que adicionando 0,3[s] auxiliará na escolha da curva do Relé 8.

$$t = \frac{13,5 * 0,0889}{(16,67^1 - 1)} = 0,077[s]$$

$$t = 0,077 + 0,3 = 0,377[s]$$

Agora já se pode calcular o múltiplo da corrente e o dial de tempo do Relé 8, admitindo que o relé verá 0,3 vezes a corrente calculada de 4089,009[A].

$$I_{cc \text{ relé}} = \frac{0,3 * 4089,009}{\left(\frac{300}{5}\right)} = \frac{1226,70}{60} = 20,445[A]$$

$$M = \frac{20,445}{5,45} = 3,7514$$

$$DT = \frac{0,377 * (3,7514^1 - 1)}{13,5} = 0,0768$$

A.6.3.3 RELÉ 3 – FUNÇÃO 51N

Admitiu-se que $I_{cc \text{ mínimo}}$ é 0,5 vezes o valor da corrente de curto calculada e a “ $I_{sobrecarga}$ ” 0,2 vezes a $I_{cc \text{ mínimo}}$.

$$“I_{sobrecarga}” = (0,2 * I_{cc \text{ mínimo}})$$

$$I_{cc \text{ mínimo}} = (0,5 * I_{cc \text{ calculado}})$$

$$“I_{sobrecarga}” = [0,2 * (0,5 * I_{cc \text{ calculado}})]$$

Dividindo “ $I_{sobrecarga}$ ” pela RTC, tem-se o valor do TAPE.

$$TAPE = \frac{0,5 * 0,2 * 4089,009}{\left(\frac{600}{5}\right)} = \frac{408,9009}{120} = 3,4075$$

Para coordenar o Relé 3 com o Relé 8, é preciso saber em quanto tempo o relé 8-51N atua para uma corrente de curto de 4089,009[A].

A razão da corrente de curto calculada pela RTC resulta no valor que o relé enxerga para este curto.

$$I_{cc \text{ relé}} = \frac{4089,009}{\left(\frac{300}{5}\right)} = 68,1501[A]$$

$$M = \frac{I_{cc \text{ relé}}}{RTC} = \frac{68,1501}{5,45} = 12,5046$$

$$t = \frac{13,5 * 0,0768}{(12,5046^1 - 1)} = 0,09012[s]$$

Acrescendo 0,3[s] ao tempo de atuação do Relé 8, temos o tempo que auxiliará a escolher a curva do Relé 3.

$$t = 0,09012 + 0,3 = 0,39012[s]$$

Ao se dividir 0,4 vezes o curto calculado pela RTC do Relé 8, teremos o valor que o relé enxerga.

$$I_{CCrelé} = \frac{0,4 * 4089,009}{\left(\frac{600}{5}\right)} = \frac{1635,6036}{120} = 13,63[A]$$

Agora já é possível calcular o valor do múltiplo de corrente e o dial de tempo deste relé.

$$M = \frac{I_{CCrelé}}{RTC} = \frac{13,63}{3,4075} = 4$$

$$DT = \frac{0,3901 * (4^1 - 1)}{13,5} = 0,08669$$

A.6.3.4 RELÉ 2 – FUNÇÃO 51N

Admitiu-se que $I_{CC\text{ mínimo}}$ é 0,4 vezes o valor da corrente de curto calculada e a “ $I_{sobrecarga}$ ” 0,3 vezes a $I_{CC\text{ mínimo}}$.

$$“I_{sobrecarga}” = (0,3 * I_{CC\text{ mínimo}})$$

$$I_{CC\text{ mínimo}} = (0,4 * I_{CC\text{ calculado}})$$

$$“I_{sobrecarga}” = [0,3 * (0,4 * I_{CC\text{ calculado}})]$$

Calculando o TAPE do Relé 2 pela razão da “ $I_{sobrecarga}$ ” pela RTC.

$$TAPE = \frac{0,4 * 0,3 * 4183,5425}{\left(\frac{600}{5}\right)} = \frac{502,0251}{120} = 4,1835$$

Como já calculado, o relé 3 atuará para uma corrente de curto de 4089,009[A] em $t = 0,39012[s]$

Somando 0,3[s] a este tempo, tem-se o tempo que comporá o cálculo para obtenção do dial de tempo do Relé 2.

$$t = 39012 + 0,3 = 0,69012[s]$$

Admitindo 0,3 vezes o valor da corrente de curto calculado, obteve-se o valor que o relé enxergará para esta situação.

$$I_{CCrelé} = \frac{0,3 * 4183,5425}{\left(\frac{600}{5}\right)} = \frac{1255,06275}{120} = 10,4589[A]$$

$$M = \frac{I_{CCrelé}}{RTC} = \frac{10,4589}{4,1835} = 2,5$$

Por fim, calcula-se o dial de tempo do Relé 2.

$$DT = \frac{0,69012 * (2,5^1 - 1)}{13,5} = 0,0766$$

A.6.3.5 RELÉ 1 – FUNÇÃO 51N

Admitiu-se que $I_{CC\text{ mínimo}}$ é 0,5 vezes o valor da corrente de curto calculada e a “ $I_{sobrecarga}$ ” 0,3 vezes a $I_{CC\text{ mínimo}}$.

$$“I_{sobrecarga}” = (0,3 * I_{CC\text{ mínimo}})$$

$$I_{CC\text{ mínimo}} = (0,5 * I_{CC\text{ calculado}})$$

$$“I_{sobrecarga}” = [0,3 * (0,5 * I_{CC\text{ calculado}})]$$

Calcula-se o TAPE para “ $I_{sobrecarga}$ ” = 627,5314[A] e RTC 1200/5.

$$TAPE = \frac{0,5 * 0,3 * 4183,5425}{\left(\frac{1200}{5}\right)} = \frac{627,5314}{240} = 2,6147$$

Antes de dar sequência ao ajuste do Relé 1, calculou-se em quanto tempo o Relé 2 abre para um curto de 4183,5425[A]. Para isso dividiu-se a corrente de curto pela RTC do Relé 2.

$$I_{CCrelé} = \frac{4183,5425}{\left(\frac{600}{5}\right)} = 34,8628[A]$$

Calculou-se um novo valor de M que associado ao DT calculado resultará o tempo desejado.

$$M = \frac{34,8628}{4,1835} = 8,333$$

$$t = \frac{13,5 * 0,0766}{(8,333^1 - 1)} = 0,141[s]$$

A este tempo acresceu-se 0,3[s] para achar a curva do Relé 1.

$$t = 0,141 + 0,3 = 0,441[s]$$

Assumindo 0,4 vezes o valor do curto da Barra 1 e dividindo pela RTC do Relé 1, tem-se o valor de corrente que o relé enxergará, onde será posteriormente dividido pelo TAPE, resultando o múltiplo da corrente.

$$I_{CCrelé} = \frac{0,4 * 4183,5425}{\left(\frac{1200}{5}\right)} = \frac{1673,417}{240} = 6,9725[A]$$

$$M = \frac{6,9725}{2,6147} = 2,667$$

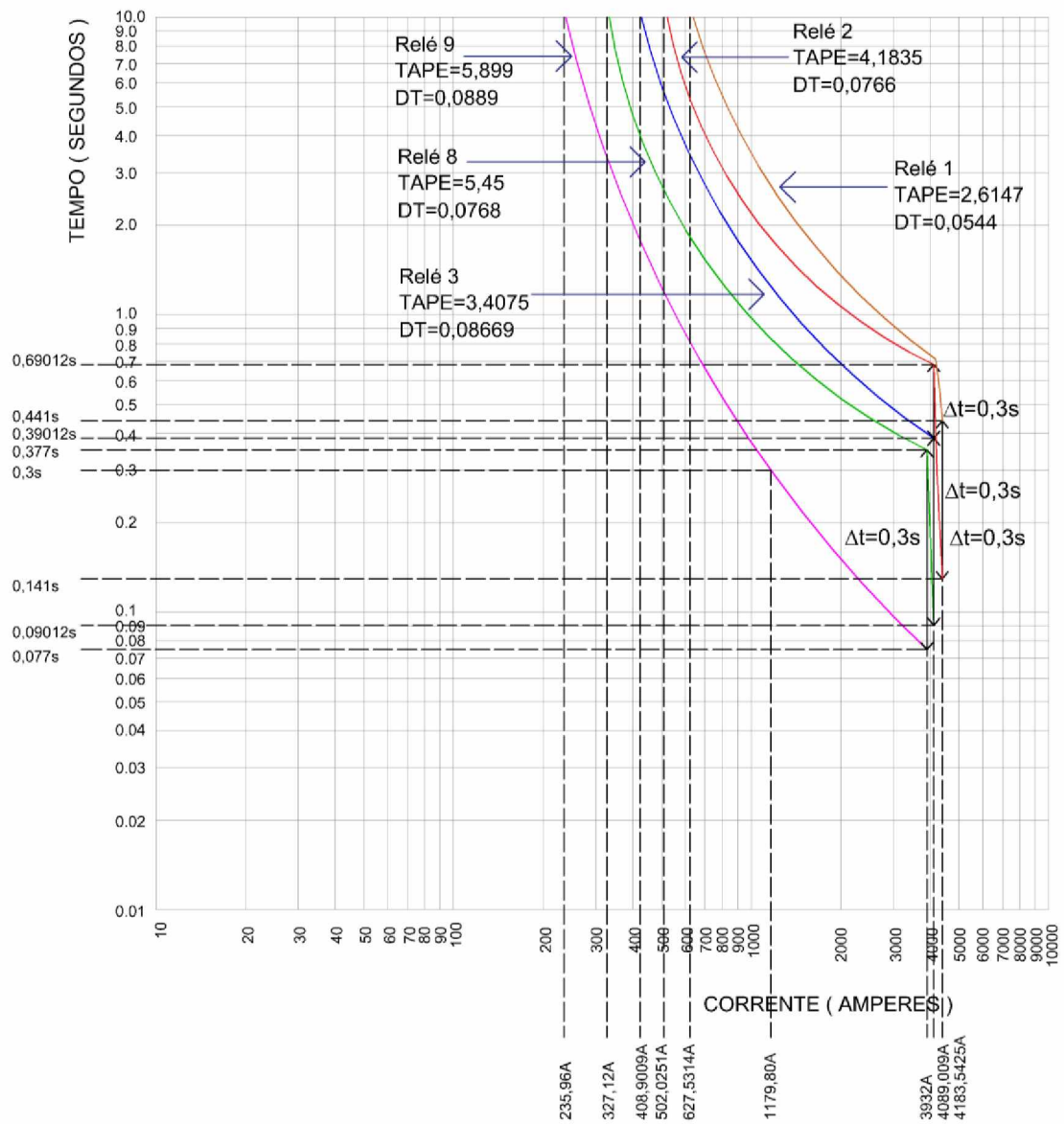
Com todos os dados necessários, lançou-se na fórmula para calcular o dial de tempo.

$$DT = \frac{0,441 * (2,667^1 - 1)}{13,5} = 0,0544$$

A.6.4 COORDENOGRAMA CURTOS MONOFÁSICOS

Como resultado dos cálculos feitos anteriormente, tem-se o coordenograma da Figura 34.

Figura 34 – Coordenograma dos relés para curto monofásico



ANEXO B

Planta completa do sistema, dividida em dois cortes (Figura 35) para melhor apresentar a localização dos relés.

Figura 35 – Planta do trabalho usada para localização dos relés

