



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica

LILLIAN FERNANDA DA COSTA E SILVA

**PROJETO DE PROTEÇÃO DE SISTEMA ELÉTRICO DE UMA
INDÚSTRIA DE SEMENTES**

Uberlândia
2018

LILLIAN FERNANDA DA COSTA E SILVA

**PROJETO DE PROTEÇÃO DE UM SISTEMA ELÉTRICO DE
UMA INDÚSTRIA DE SEMENTES**

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, 09 de julho de 2018

Banca examinadora

Prof. Dr. Adélio José de Moraes

Prof. Dr. José Rubens Macedo Júnior

Prof. Dr. José Wilson Resende

Uberlândia
2018

Dedico esse trabalho a Deus e aos meus pais, pelo incentivo, motivação e carinho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo cuidado e sabedoria, durante toda minha caminhada.

Aos meus avós, Hugo, Arima, Adão e Maria, pelo amor, conselhos e exemplos de vida.

Aos meus pais, Miguel e Tânia, pela vida, apoio e compreensão.

Aos meus irmãos, Vitor e Lilliane, pelo companheirismo e amor.

Ao meu noivo, Luis Eduardo, pela amizade, paciência e incentivo.

A todos os familiares e amigos, pelo apoio e motivação.

A todos os professores e funcionários da Universidade Federal de Uberlândia, que de alguma maneira colaboraram para essa conquista.

Aos professores Adélio José de Moraes e José Rubens Macedo Jr., pela disponibilidade e boa vontade para participar da banca examinadora deste trabalho.

Por fim, ao professor José Wilson Resende, pela excelente orientação, atenção dispensada e pelo conhecimento compartilhado.

RESUMO

Tendo em vista a importância de um sistema de proteção para uma indústria e a demanda de profissionais capacitados nesse ramo, este trabalho apresenta um estudo de proteção do sistema elétrico de uma indústria de sementes. O mesmo consiste no dimensionamento e coordenação dos elementos de proteção dessa instalação, utilizando as funções de neutro (50N e 51N), instantânea e temporizada (50 e 51, respectivamente) dos relés de sobrecorrente digitais, além da proteção diferencial dos transformadores de potência (relé 87).

ABSTRACT

Considering the importance of a protection system for the industry and the demand of professionals trained in this field, this work presents a study of the protection of the electrical system of a seed industry. The same consists in the design and coordination of the protection elements of this installation, using the neutral (50N and 51N), instantaneous and timed functions (50 and 51, respectively) of the digital overcurrent relays, in addition to the differential protection of the power transformers relay 87).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama unifilar do sistema elétrico da indústria.	15
Figura 2 - Diagrama unifilar simplificado.....	18
Figura 3 - Sistema com as correntes de curto-circuito e TPs alocados	21
Figura 4 - Curva da corrente limite para a saturação do TC.	25
Figura 5 - Classes de exatidão dos TCs.	25
Figura 6 - Curvas dos relés 51 (curva vermelha) e 50 (curva verde); e curva da associação desses dois relés.	30
Figura 7 - Curva do tipo normalmente inversa	32
Figura 8 - Curva do tipo muito inversa	32
Figura 9 - Curva do tipo extremamente inversa	33
Figura 10 - Circulação de correntes para falta interna.	34
Figura 11 - Esquema de funcionamento do relé diferencial do tipo percentual em uma falta externa.	35
Figura 12 - Esquema de funcionamento do relé diferencial do tipo percentual em uma falta interna.	36
Figura 13 - Característica de atuação da proteção diferencial percentual.	36
Figura 14 - Esquema de ligação dos TCs na proteção dos transformadores.	37
Figura 15 - Posicionamento dos relés RF e RC.....	42
Figura 16 - Coordenograma dos relés RC e RF.	46
 Figura A 1- Diagrama unifilar da indústria.....	 51
Figura A 2 - Diagrama de impedâncias.....	53
 Figura B 1 - Representação de um curto-circuito no barramento F.	 55
Figura B 2 - Representação das impedâncias que limitam um curto-circuito no barramento F.	56
Figura B 3 - Impedância equivalente para um curto no barramento F.	56

Figura B 4 - Representação de um curto-circuito no barramento A.....	57
Figura B 5 - Representação das impedâncias que limitam um curto-circuito no barramento A.	58
Figura B 6 - Impedância equivalente para um curto no barramento A.....	58
Figura B 7 - Representação de um curto-circuito no barramento A1.....	59
Figura B 8 - Representação das impedâncias que limitam um curto-circuito no barramento A1.	60
Figura B 9 - Representação de um curto-circuito no barramento A2.....	61
Figura B 10 - Representação das impedâncias que limitam um curto-circuito no barramento A2.	62
Figura B 11 - Representação de um curto-circuito no barramento B.....	63
Figura B 12 - Representação das impedâncias que limitam um curto-circuito no barramento B.	64
Figura B 13 - Impedância equivalente para um curto no barramento B.....	64
Figura B 14 - Representação de um curto-circuito no barramento B1.....	65
Figura B 15 - Representação das impedâncias que limitam um curto-circuito no barramento B1.	66
Figura B 16 - Representação de um curto-circuito no barramento B2.....	67
Figura B 17 - Representação das impedâncias que limitam um curto-circuito no barramento B2.	68
Figura B 18 - Representação de um curto-circuito no barramento C.....	69
Figura B 19 - Representação das impedâncias que limitam um curto-circuito no barramento C.....	70
Figura B 20 - Impedância equivalente para um curto no barramento C.	70
Figura B 21 - Representação de um curto-circuito no barramento C1.....	71
Figura B 22 - Representação das impedâncias que limitam um curto-circuito no barramento C1.....	72
Figura B 23 - Representação de um curto-circuito no barramento D.....	73
Figura B 24 - Representação das impedâncias que limitam um curto-circuito no barramento D.....	74
Figura B 25 - Impedância equivalente para um curto no barramento D.	74
Figura B 26 - Representação de um curto-circuito no barramento D1.....	75
Figura B 27 - Representação das impedâncias que limitam um curto-circuito no barramento D1.....	76

Figura B 28 - Representação de um curto-circuito no barramento E.....	77
Figura B 29 - Representação das impedâncias que limitam um curto-circuito no barramento E.	77
Figura B 30 - - Impedância equivalente para um curto no barramento E.	78
Figura B 31- Representação de um curto-circuito no barramento E1.....	79
Figura B 32 - Representação das impedâncias que limitam um curto-circuito no barramento E1.	79
Figura C 1 - Posicionamento dos relés RF e RD.	81
Figura C 2 - Coordenograma dos relés RD e RF.....	83
Figura C 3- Posicionamento dos relés RF e RE.	84
Figura C 4 - Coordenograma dos relés RE e RF.....	86
Figura C 5 - Posicionamento dos relés RF e RA.	867
Figura C 6 - Coordenograma dos relés RA e RF.....	879
Figura C 7 - Posicionamento dos relés RF e RB.	90
Figura C 8 - Coordenograma dos relés RB e RF.....	92
Figura C 9 - Coordenograma dos relés RA e RF com o disjuntor.....	93
Figura C 10 - Coordenograma dos relés RB e RF com o disjuntor	95
Figura C 11 - Representação do sistema com os relés.	956

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Alteração das reatâncias dos transformadores.....	20
Tabela 2 - Impedâncias dos cabos.	20
Tabela 3 - Correntes de curto-circuito trifásicas nos barramentos.....	21
Tabela 4 - Correntes de curto-circuito e nominais, considerando sobrecarga de 20%.....	23
Tabela 5 - Cálculos das RTCs dos Transformadores de Corrente para os relés de sobrecorrente.....	23
Tabela 6 - Cálculos das RTCs dos Transformadores de Corrente para os relés diferenciais.	24
Tabela 7 – Cálculos da classes de exatidão dos TCs especificados para os relés de sobrecorrente.....	26
Tabela 8 - Cálculos da classes de exatidão dos TCs do lado de alta tensão, especificados para os relés diferenciais.	27
Tabela 9 - Cálculos da classes de exatidão dos TCs do lado de baixa tensão, especificados para os relés diferenciais.	27
Tabela 10 - Limite térmico dos transformadores pela norma ANSI.	28
Tabela 11 - Correntes do limite térmico dos transformadores.	28
Tabela 12 - Tempo admissível dos transformadores para as correntes do limite térmico.....	28
Tabela 13 - Correntes de inrush dos transformadores.	29
Tabela 14 - Constantes das curvas características dos relés	33
Tabela 15 - Equações das curvas características dos relés.	34
 Tabela A 1 - Parâmetros elétricos dos Cabos de Média tensão	 50
Tabela A 2 - Cálculo dos parâmetros elétricos dos cabos.....	50
Tabela A 3 - Cálculo de impedância dos cabos (P.U.)	52

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

TC – Transformador de Corrente

AT – Alta Tensão

BT – Baixa Tensão

Trafo - Transformador

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 O SISTEMA	15
3 CÁLCULOS DAS CORRENTES.....	17
3.1 CORRENTE NOMINAL	17
3.2 DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS	19
3.3 CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO.....	20
4 - ESPECIFICAÇÃO DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE	21
4.1 CÁLCULOS DAS RTCS PARA OS RELÉS DE SOBRECORRENTE	22
4.2 CÁLCULOS DAS RTCS PARA OS RELÉS DIFERENCIAIS	24
4.3 DETERMINAÇÃO DAS CLASSES DE EXATIDÃO	24
5 CARACTERÍSTICAS DOS TRANSFORMADORES.....	27
5.1 LIMITES TÉRMICOS DOS TRANSFORMADORES.....	27
5.2 CORRENTE DE ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR	29
6 PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE	29
6.1 PARAMETRIZAÇÃO DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE.....	30
6.2 CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE ...	31
7 PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DOS RELÉS DIFERENCIAIS PERCENTUAIS	34
8 PARAMETRIZAÇÃO DOS RELÉS E COORDENAÇÃO DA PROTEÇÃO ..	38
8.1 PARAMETRIZAÇÃO DOS RELÉS DIFERENCIAIS PERCENTUAIS.....	38
8.1.1 RELÉ DIFERENCIAL DO TRANSFORMADOR TC E TD.....	38

8.1.1 RELÉ DIFERENCIAL DO TRANSFORMADOR TE	40
8.2 PARAMETRIZAÇÃO DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE E SEUS RESPECTIVOS COORDENOGRAMAS	42
8.2.1 RELÉS DE SOBRECORRENTE DO RAMAL FC DO BARRAMENTO C	42
8.2.1.1 RELÉ 51 E 50 DO TRANSFORMADOR TC	43
8.2.1.2 RELÉ 51 E 50 DA ENTRADA DA INDÚSTRIA, RF	44
9 CONCLUSÃO	48
10 REFERÊNCIAS	49
APÊNDICE A – CONSTRUÇÃO DO DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS	50
APÊNDICE B – CÁLCULO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO	54
B.1 – CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA NO BARRAMENTO F:	55
B.2 CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA NO BARRAMENTO A:	57
B.2.1 – CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA NA SAÍDA DO TRANSFORMADOR A1:	59
B.2.2 – CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA NA SAÍDA DO 2º TRANSFORMADOR A2:	61
B.3 – CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA NO BARRAMENTO B:	63
B.3.1 – CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA SAÍDA DO TRANSFORMADOR B1:	65
B.3.2 – CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA NA SAÍDA DO TRANSFORMADOR B2:	67
B.4 – CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA NO BARRAMENTO C:	69
B.4.1 – CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA NA SAÍDA DO TRANSFORMADOR C:	71

B.5 – CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA NO BARRAMENTO D:	73
B.5.1 – CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA NA SAÍDA DO TRANSFORMADOR D:	75
B.6 – CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA NO BARRAMENTO E:	76
B.6.1 – CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA NA SAÍDA DO TRANSFORMADOR E:	78
APÊNDICE C – PARAMETRIZAÇÃO DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE DOS RAMAIS FD, FE, FA E FB	81
C.1 RELÉ 51 E 50 DO TRANSFORMADOR TD	81
C.2 RELÉ 51 E 50 DO TRANSFORMADOR TE.....	84
C.3 RELÉ 51 E 50 DOS TRANSFORMADORES TA1 E TA2.....	87
C.4 RELÉ 51 E 50 DOS TRANSFORMADORES TB1 E TB2.....	90
C.5 ESPECIFICAÇÃO DE DISJUNTORES	92
C.5.1 ESPECIFICAÇÃO DE DISJUNTORES PARA TRANSFORMADOR A1 E A2	93
C.5.2 ESPECIFICAÇÃO DE DISJUNTORES PARA TRANSFORMADOR TB1 E TB2.....	94

1 INTRODUÇÃO

Percebe-se hoje, o aumento da instalação de cargas sensíveis a variações de tensão, e de corrente no sistema elétrico, assim como o grande crescimento e automação das indústrias. Logo, espera-se que as plantas industriais estejam repletas de computadores, microcontroladores, grandes motores, transformadores, etc. Visto a importância dessas cargas para a indústria, a mesma requer um sistema elétrico estável e confiável, de forma que não aja perdas durante sua operação.

O sistema elétrico está sempre susceptível a vários distúrbios, tais como: sobretensão, sobrecorrentes, distorções de ondas, desequilíbrios, entre outros. Existem algumas ações corretivas, que podem ser tomadas de modo a amenizar ou prevenir alguns desses distúrbios. No entanto, isso nem sempre é possível, já que muitos deles não são previsíveis, como é o caso dos curtos circuitos, que geram sobrecorrentes no sistema. Esse distúrbio, é o que será o foco desse estudo.

A proteção de sistemas elétricos, se bem projetada, é capaz de garantir que o sistema elétrico opere de forma confiável e estável. Para isso, o sistema de proteção deve sempre atuar, caso ocorra algum evento que possa causar danos aos seus equipamentos; ser sensível a esses eventos; atuar de forma rápida e seletiva, retirando o mínimo de cargas possível da rede, permitindo a máxima continuidade; e por fim, deve ser econômico.

O projeto de proteção elétrica aqui realizado, diz respeito apenas às cargas da indústria e ao ponto de entrega da concessionária. Esse estudo também não inclui a proteção direta às cargas, mas somente nas entradas dos barramentos principais e dos transformadores.

O objetivo é impedir que, em caso de curto-circuitos, ou sobrecargas, na entrada da indústria, ou nos barramentos principais, o sistema de proteção atue, retirando o mínimo de cargas possível, causando o mínimo de prejuízo à empresa.

2 O SISTEMA

O sistema estudado é um sistema real da instalação elétrica de uma indústria de sementes, que segue ilustrado na página seguinte.

Figura 1 - Diagrama unifilar do sistema elétrico da indústria.

A alimentação da instalação é feita em 11,4KV pela concessionária, por apenas um ramal que alimenta o barramento principal F. A partir desse barramento, saem outros 5 ramais que alimentam 5 barramentos que se conectam às cargas da indústria através de transformadores de potência.

O primeiro ramal, que sai do barramento principal, alimenta o barramento A, que alimenta outros dois barramentos através de dois transformadores, TA1 e TA2 em paralelo, de 500KVA, 11,4KV/440V. O segundo ramal, alimenta o barramento B, que alimenta outros dois barramentos, também, através de dois transformadores em paralelo, TB1 e TB2 de 300KVA, 11,4KV/440V. O terceiro, quarto e quinto ramais alimentam os barramentos C, D e E respectivamente, que alimentam outros barramento através de 3 transformadores, TC e TD de 2000KVA e TE de 1000KVA respectivamente, todos de 11,4KV/440V.

Existem outros ramais no projeto elétrico da indústria, porém, não têm sua carga especificada ainda, logo, não é possível dimensionar um sistema de proteção para os mesmos.

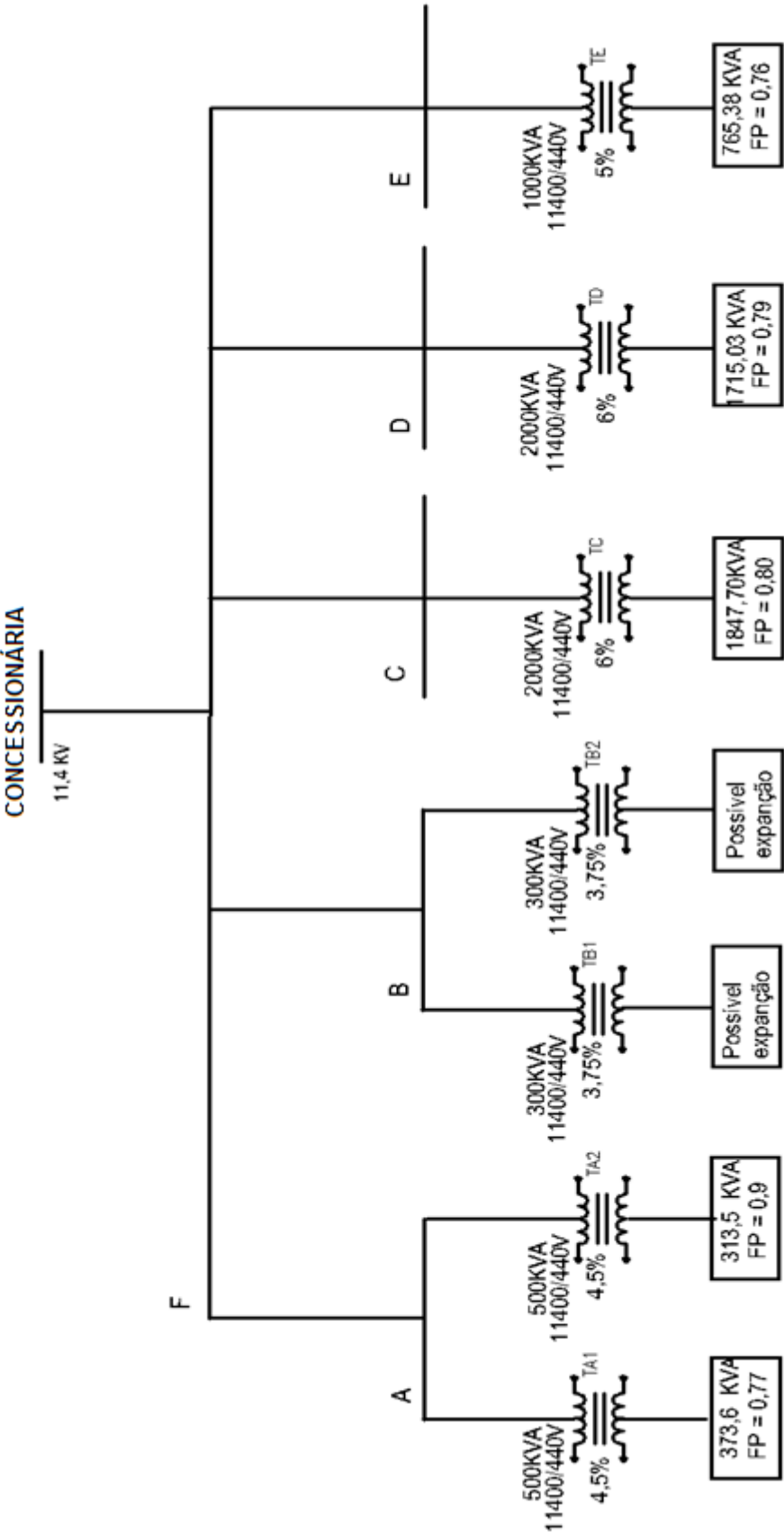
Os relés de sobrecorrente serão colocados, como será visto de forma detalhada mais à frente, em cada um dos ramais já citados acima, de forma que protejam cada um dos barramentos já mencionados.

3 CÁLCULOS DAS CORRENTES

3.1 CORRENTE NOMINAL

O cálculo das correntes nominais é necessário para o dimensionamento dos TCs e dos relés, já que os TCs devem suportar a corrente nominal que passará por ele, assim como o relé não deve atuar para a corrente nominal, e nem mesmo para uma pequena sobrecarga do sistema. Como está mostrado de forma detalhada no Apêndice A, inicialmente foi realizada a soma de todas as cargas de cada barramento do sistema e então determinada a corrente nominal requerida em cada ramal. Na figura 2 tem-se o sistema apresentado de maneira simplificada, afim de facilitar os estudos do mesmo.

Figura 2 - Diagrama unifilar simplificado.



3.2 DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS

A elaboração do diagrama de impedâncias é imprescindível, já que será necessário calcular as correntes de curto-circuito no sistema. Todo processo da elaboração do diagrama encontra-se detalhado no apêndice A.

Outro passo importante para a determinação das correntes de curto-circuito, é a passagem de todo o sistema para uma mesma base. A potência base considerada foi 2 [MVA] e as tensões base 11,4 [KV] e 440 [V].

A impedância base do sistema na alta tensão é:

$$Z_{base}(\Omega) = \frac{V^2}{S} = 64.98 \Omega \quad (1)$$

O nível de curto-circuito fornecido pela concessionária foi de 12,7 [KA], ou seja, 250 [MVA], na tensão de 11,4 [KV]. Dessa forma, a impedância no ponto de acoplamento com a mesma é dada por:

$$X_{sis} [\Omega] = \frac{(11,4KV)^2}{250MVA} = 0.5198\Omega \quad (2)$$

$$X_{sis} [pu] = \frac{0.5198\Omega}{64.98\Omega} = 0,008 pu \quad (3)$$

As impedâncias dos transformadores e dos cabos também devem ser passadas para a mesma base. A fórmula de mudança de base é dada pela expressão 4:

$$X_n = X_a * \left(\frac{V_a}{V_n}\right)^2 * \left(\frac{S_n}{S_a}\right) \quad (4)$$

Onde:

- X_n é a impedância alterada para as bases adotadas;
- X_a é a impedância original do sistema;
- V_a é a tensão do sistema;
- V_n é a tensão base;
- S_n é a potência aparente base;
- S_a é a potência aparente do sistema.

Para esse sistema, como a tensão base adotada é a própria tensão do sistema, as demais tensões não precisaram sofrer alterações, dessa forma, apenas a potência aparente será usada na mudança de bases. A tabela 1 mostra as impedâncias dos transformadores antes e depois das alterações:

Tabela 1 - Alteração **das** reatâncias dos transformadores.

TRAFOS	Vb (V)	Sa (VA)	Sn (VA)	Z%(a)	Z%(n)
TA1	11400	500.000	2.000.000	4,5	18
TA2	11400	500.000	2.000.000	4,5	18
TB1	11400	300.000	2.000.000	3,75	25
TB2	11400	300.000	2.000.000	3,75	25
TC	11400	2.000.000	2.000.000	6	6
TD	11400	2.000.000	2.000.000	6	6
TE	11400	1.000.000	2.000.000	5	10

A seguir, a tabela 2 com os valores de impedância dos cabos, em ohms e em pu, já nas bases escolhidas:

Tabela 2 - Impedâncias dos cabos.

Ramal	Z (Ω /KM)	Z (pu)
F	0,1722	0,004200
FA	0,1785	0,002700
FB	0,1923	0,003000
FC	0,1408	0,002166
FD	0,1030	0,001600
FE	0,0055	0,000085

3.3 CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

Os relés, são dispositivos que atuam por sensibilidade a variações nas condições operacionais do equipamento ou circuito a que estão conectados. Assim, o cálculo das correntes de curto-circuito será imprescindível para o dimensionamento dos mesmos (no que se diz respeito aos relés de sobrecorrente), assim como os TCs.

O sistema elétrico aqui estudado está sujeito a faltas elétricas de todos os tipos, porém, as faltas do tipo curto-circuito trifásico, são as que provocam as mais altas correntes e quedas de tensão no sistema. Logo, estando o sistema protegido das mesmas, também estará protegido das demais.

Outra questão importante, é onde os relés de proteção deverão ser instalados, e assim também se faz necessário obter as correntes de curto-circuito em diversos pontos do sistema. Esses cálculos estarão apresentados de forma detalhada no Apêndice B. A seguir tem-se a tabela 3 com as correntes de curto-circuito em cada barra.

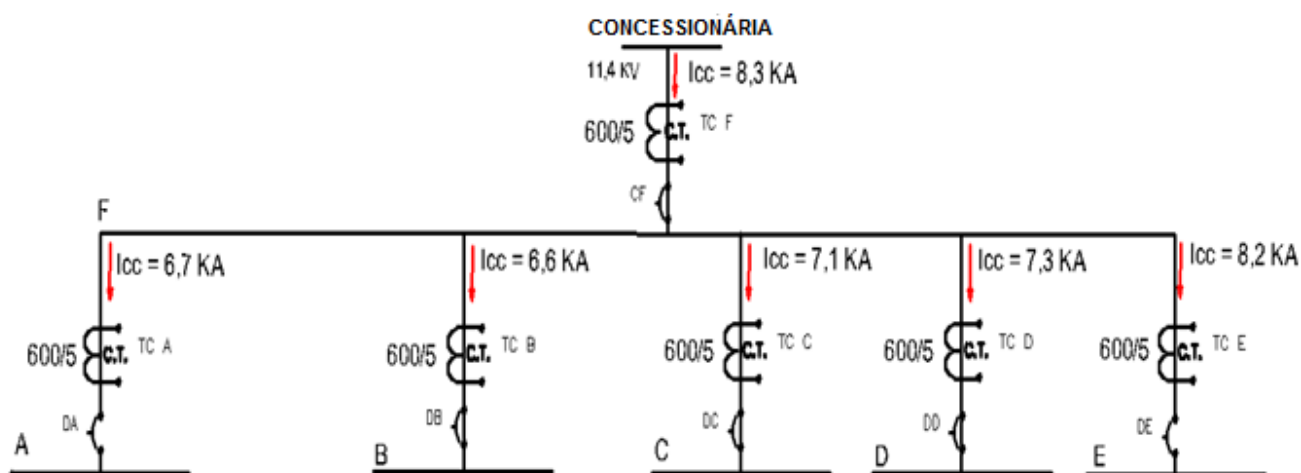
Tabela 3 - Correntes de curto-circuito trifásicas nos barramentos.

Barramento	I_{cc} (A)
F	8302,45
A	6797,98
B	6663,81
C	7083,21
D	7339,85
E	8245,01

4 - ESPECIFICAÇÃO DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE

A figura 3 representa o circuito, barramento por barramento, com suas correntes de curto-circuito determinadas. Para a elaboração desses circuitos foi utilizado o software Auto Cad.

Figura 3 - Sistema com as correntes de curto-circuito e TP's alocados



Os transformadores de corrente (TCs) alimentam instrumentos de medição, proteção ou controle nos sistemas elétricos. Eles operam reduzindo a corrente do sistema a um valor adequado ao dispositivo a que está conectado, fazendo isso eles

isolam esses dispositivos do restante do sistema de potência. Como são usados para reduzir a corrente, suas espiras tem a seguinte relação: $N1 \leq N2$.

A norma NBR 6856 da ABNT estipula o valor de 5 [A] de corrente no secundário dos TCs, porém, ainda existem alguns onde essa corrente é de 1A. Essa norma, ainda se posiciona quanto a classificação dos TCs. Eles são classificados em dois tipos: TCs para serviços de medição e TCs para serviços de proteção. Os TCs de proteção ainda se dividem quanto à sua reatância dispersão, sendo os de classe A, os que possuem alta reatância no secundário, e os de classe B, os que possuem baixa reatância mesmo enrolamento.

A relação de corrente no secundário com a do primário, é denominada de RTC, ou seja, relação de transformação de corrente [RTC]:

$$RTC = \frac{I_{nom\ 1^\circ}}{5} \quad (5)$$

Sendo $I_{nom\ 1^\circ}$ a corrente do sistema, ou seja, a que circula no enrolamento primário do TC. De acordo com a norma ANSI, os valores de RTC disponíveis para 5 [A] no secundário são: 10, 15, 25, 40, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800, 1200, 3000 e 4000.

4.1 CÁLCULOS DAS RTCS PARA OS RELÉS DE SOBRECORRENTE

As RTCs devem ser determinadas de forma que:

- O TC e o relé suportem a corrente especificada da carga;
- A suportabilidade dos relés seja considerada, de modo que a corrente no secundário não exceda seus limites. Isso é estabelecido pela norma ANSI que recomenda a utilização de um Fator de sobrecorrente (FS) de $20 \times I_{nom}$.

Percebe-se, que como as impedâncias dos cabos são muito pequenas, a diferença entre as correntes de curto nas barras é também pequena. Assim, como os TCs devem ser dimensionados para a maior corrente, para efeito de cálculos, as correntes em todas as barras serão consideradas como sendo iguais à da barra F.

Segue na tabela 4, os valores de correntes nominais e de curto-circuitos em cada barra:

Tabela 4 - Correntes de curto-circuito e nominais, considerando sobrecarga de 20%.

Barramento	TC	I_{cc} (A)	1,2*In (A)
BF	TCF	8 302,45	326,23
BA	TCA	8 302,45	41,48
BB	TCB	8 302,45	36,45
BC	TCC	8 302,45	112,28
BD	TCD	8 302,45	104,22
BE	TCE	8 302,45	46,5

Obedecendo o fator de sobrecorrente e a corrente de carga, tem-se respectivamente:

$$RTC \geq \frac{I_{cc}}{20} \quad (6)$$

$$RTC \geq 1,2 * In \quad (7)$$

Dessa forma, deve ser considerado, o maior valor de RTC encontrado para cada barra. Assim, na tabela 5 tem-se os valores encontrados para seus respectivos barramentos:

Tabela 5 - Cálculos das RTCs dos Transformadores de Corrente para os relés de sobrecorrente.

Barramento	TC	1,2*In (A)	RTC ≥ 1,2*In	I_{cc} (A)	RTC ≥ I_{cc}max/20	RTC escolhido
F	TCF	326,23	350/5	8 302,45	600/5	600/5
A	TCA	41,48	50/5	8 302,45	600/5	600/5
B	TCB	36,45	50/5	8 302,45	600/5	600/5
C	TCC	112,28	150/5	8 302,45	600/5	600/5
D	TCD	104,22	150/5	8 302,45	600/5	600/5
E	TCE	46,5	50/5	8 302,45	600/5	600/5

4.2 CÁLCULOS DAS RTCS PARA OS RELÉS DIFERENCIAIS

A relação de transformação de corrente para os TCs na proteção dos transformadores, será baseada na corrente nominal dos próprios transformadores. Esses, serão protegidos pelos relés diferenciais à porcentagem, que serão vistos detalhadamente no capítulo 7.

Na tabela 6, tem-se os valores das correntes nominais e RTCs escolhidas para cada transformador:

Tabela 6 - Cálculos das RTCs dos Transformadores de Corrente para os relés diferenciais.

Transformador	TC	In AT (A)	RTC - AT	In BT (A)	RTC - BT
TA1	TC (TA1)	25,35	40/5	656,86	800/5
TA2	TC (TA2)	25,35	40/5	656,86	800/5
TB1	TC(TB1)	15,21	25/5	394,11	400/5
TB2	TC(TB2)	15,21	25/5	394,11	400/5
TC	TC(TC)	101,41	150/5	2627,43	3000/5
TD	TC(TD)	101,41	150/5	2627,43	3000/5
TE	TC(TE)	50,7	75/5	1313,72	2000/5

4.3 DETERMINAÇÃO DAS CLASSES DE EXATIDÃO

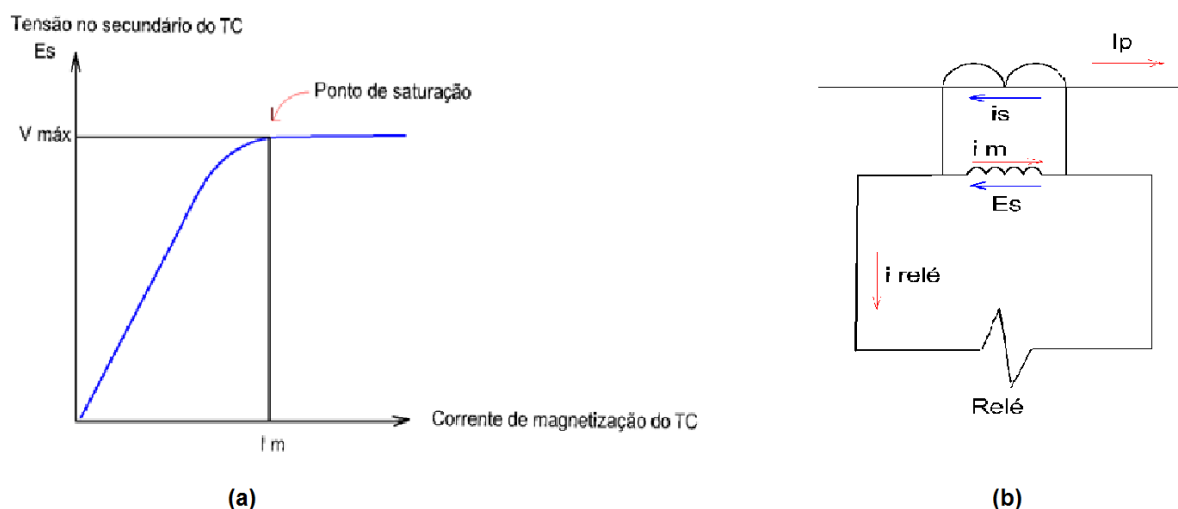
A classe de exatidão de um transformador de corrente mostra o erro máximo esperado do TC, na transformação da corrente. Para determiná-la, deve-se em primeiro lugar, considerar o tipo de TC escolhido, ou seja, se será um TC de alta ou de baixa impedância, e a tensão máxima permitida no secundário, sem que o TC sature.

Os TCs de proteção conseguem suportar altas correntes, desde que sejam especificados para isso. Por isso, na especificação do TC deve-se considerar a tensão secundária máxima, a partir da qual o TC passa a sofrer os efeitos da saturação.

Apartir desse ponto de saturação, o TC deixa de operar corretamente. Então, no dimensionamento de um TC deve-se ter o cuidado de fazer isso para a maior corrente de curto-circuito esperada no local da instalação do mesmo.

A seguir, segue a curva de saturação de um TC:

Figura 4 – (a) Curva da corrente limite para a saturação do TC, (b) Circuito do TC.



Na figura 4-b, tem-se o circuito de um TC, onde i_p é a corrente no primário do TC, i_s é a corrente no secundário, i_m é a corrente de magnetização, E_s a tensão interna do TC, e $i_{\text{relé}}$ a corrente que chega ao relé através do TC. O TC será especificado para a maior corrente que poderá circular pelo mesmo. Para essa corrente, haverá no TC uma corrente de magnetização, como demonstrado na figura acima, e logo, uma tensão interna, E_s , que será a tensão máxima do TC. Como mostrado na figura 4-a, para valores acima desse valor máximo de tensão, o TC irá saturar.

Nesse estudo, como os TCs utilizados serão os de proteção, eles terão alta impedância e erro máximo de 10%. Pela norma ANSI, tem-se que as classes de exatidão disponíveis são apresentadas na figura 5:

Figura 5 - Classes de exatidão dos TCs.



Essa norma também determina a tensão máxima no secundário do TC, de forma que o mesmo não sature, que é dada por:

$$V_{\text{máx}} = Z_t * I_{\text{sec máx}} \quad (8)$$

Onde:

$$I_{\text{sec máx}} = \frac{I_{\text{cc prim}}}{RTC} \quad (9)$$

Sendo:

- $V_{\text{máx}}$: tensão máxima no secundário do TC;
- Z_t : carga que o relé, medidores e os fios representam para o TC;
- $I_{\text{sec máx}}$: corrente no secundário, quando no primário circular a corrente de curto-circuito;
- $I_{\text{cc prim}}$: corrente de curto circuito que circulará no primário;
- RTC : relação de transformação do TC.

Então, quando no primário do TC surgir uma corrente de curto-circuito, no secundário do TC terá uma corrente máxima, que passando pela impedância Z_t fará surgir uma tensão máxima no secundário do mesmo. Aqui, considera-se a impedância total com o valor de $0,5 \Omega$, devido à incerteza do comprimento dos fios de ligação e demais aspectos, sendo esse um valor de impedância razoável para essa aplicação. O erro máximo admitido será de 10%, como já foi mencionado. As tabelas 7,8 e 9, mostram então, esses cálculos para cada TC, e suas respectivas classes de exatidão:

Tabela 7 – Cálculos da classes de exatidão dos TCs especificados para os relés de sobrecorrente.

Barramento	TC	Icc (A)	RTC	Isec máx (A)	V máx (V)	Classe de exatidão
BF	TCF	8302,45	600/5	69,19	34,59	10H50
BA	TCA	8302,45	600/5	69,19	34,59	10H50
BB	TCB	8302,45	600/5	69,19	34,59	10H50
BC	TCC	8302,45	600/5	69,19	34,59	10H50
BD	TCD	8302,45	600/5	69,19	34,59	10H50
BE	TCE	8302,45	600/5	69,19	34,59	10H50

Tabela 8 - Cálculos da classes de exatidão dos TCs do lado de alta tensão, especificados para os relés diferenciais.

Transformador	TC	In AT (A)	RTC - AT	Isec máx (A)	V máx (V)	Classe de exatidão
TA1	TC (TA1)	25,35	40/5	3,17	1,58	10H10
TA2	TC (TA2)	25,35	40/5	3,17	1,58	10H10
TB1	TC(TB1)	15,21	25/5	3,04	1,52	10H10
TB2	TC(TB2)	15,21	25/5	3,04	1,52	10H10
TC	TC(TC)	101,41	150/5	3,38	1,69	10H10
TD	TC(TD)	101,41	150/5	3,38	1,69	10H10
TE	TC(TE)	50,7	75/5	3,38	1,69	10H10

Tabela 9 - Cálculos da classes de exatidão dos TCs do lado de baixa tensão, especificados para os relés diferenciais.

Transformador	TC	In BT (A)	RTC - BT	Isec máx (A)	V máx (V)	Classe de exatidão
TA1	TC (TA1)	656,86	800/5	4,11	2,05	10H10
TA2	TC (TA2)	656,86	800/5	4,11	2,05	10H10
TB1	TC(TB1)	394,11	400/5	4,93	2,46	10H10
TB2	TC(TB2)	394,11	400/5	4,93	2,46	10H10
TC	TC(TC)	2627,43	3000/5	4,38	2,19	10H10
TD	TC(TD)	2627,43	3000/5	4,38	2,19	10H10
TE	TC(TE)	1313,72	2000/5	3,28	1,64	10H10

5 - CARACTERÍSTICAS DOS TRANSFORMADORES

Os transformadores possuem características que devem ser consideradas em um projeto de proteção de um sistema elétrico, como a corrente de magnetização e seu limite térmico. Isso deve ser feito de modo que o sistema de proteção não atue para a corrente de inrush, e atue quando o limite térmico do transformador for atingido.

5.1 LIMITES TÉRMICOS DOS TRANSFORMADORES

Limite térmico de um transformador é o quanto ele pode suportar de uma corrente simétrica de curto-circuito por determinado tempo, sem que sofra algum tipo de dano ou perda de vida útil. Esse limite, determinado pela norma ANSI, depende da impedância do transformador e é apresentado na tabela 10 a seguir:

Tabela 10 - Limite térmico dos transformadores pela norma ANSI.

Impedância do transformador	$I_{ccm\acute{a}x}$ simétrico [A]	Tempo admissível [s]
4%	$25 \cdot I_n$	2
5%	$20 \cdot I_n$	3
6%	$16,6 \cdot I_n$	4
7%	$14,3 \cdot I_n$	5

Na tabela 11 têm-se as correntes do ponto ANSI calculadas para os transformadores do sistema:

Tabela 11 - Correntes do limite térmico dos transformadores.

Transformador	I_n (A)	I Ponto ANSI (A)
TA1	25,35	507,05
TA2	25,35	507,05
TB1	15,21	304,23
TB2	15,21	304,23
TC	101,41	2028,19
TD	101,41	2028,19
TE	50,70	1014,10

E de acordo com a impedância de cada transformador, na tabela 12 tem-se o tempo admissível para cada corrente:

Tabela 12 - Tempo admissível dos transformadores para as correntes do limite térmico.

Transformador	I_n (A)	I Ponto ANSI (A)	Z%	Tempo admissível (s)
TA1	25,35	507,05	4,5	3
TA2	25,35	507,05	4,5	3
TB1	15,21	304,23	3,75	2
TB2	15,21	304,23	3,75	2
TC	101,41	2028,19	6	4
TD	101,41	2028,19	6	4
TE	50,70	1014,10	5	3

5.2 CORRENTE DE ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR

Sabe-se que um transformador necessita de uma corrente consideravelmente alta durante sua energização, denominada de corrente de inrush. Diante disso, deve-se considerar essa corrente no sistema de proteção, para que o mesmo não atue durante esse período. Considera-se então essa corrente como sendo oito vezes a nominal, por 0,1 segundos. Na tabela 13, são apresentadas as corrente de inrush dos transformadores desse sistema:

Tabela 13 - Correntes de inrush dos transformadores.

Transformador	In (A)	I inrush
TA1	25,35	202,82
TA2	25,35	202,82
TB1	15,21	121,69
TB2	15,21	121,69
TC	101,41	811,28
TD	101,41	811,28
TE	50,70	405,64

6 PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS 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).

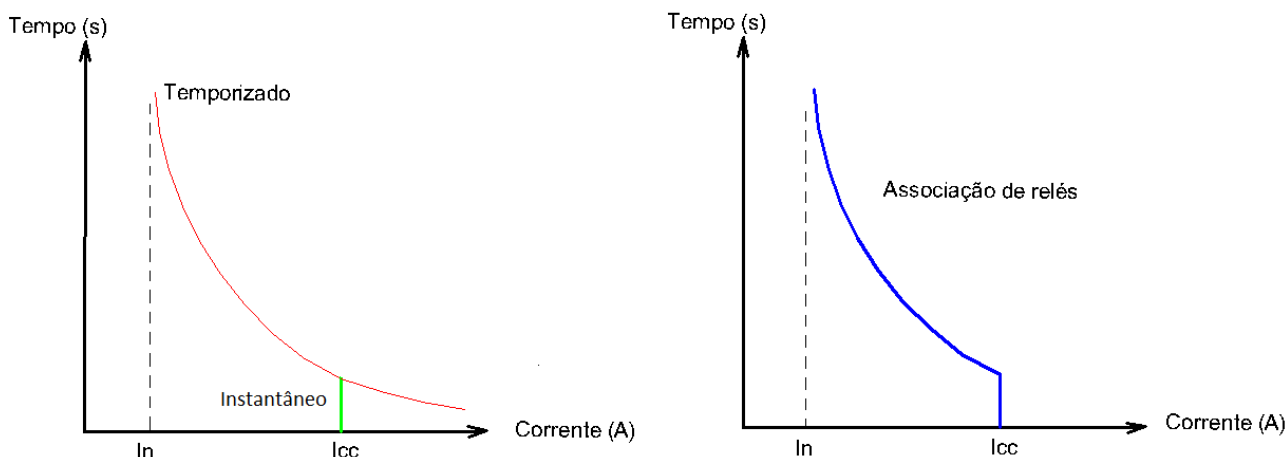
Existe um grande número de relés diferentes, cada um com uma finalidade específica. Os relés utilizados nesse trabalho serão os relés de sobrecorrente temporizado, 51, e instantâneo, 50, os relés de sobrecorrente de neutro temporizado, 51N, e instantâneo ,50N, e o relé de proteção diferencial, 87.

O relé de sobrecorrente temporizado tem a função de atuar abrindo o circuito, caso a corrente que circule por ele seja maior que a especificada. O relé é alimentado pelo TC, e quando essa corrente de alimentação ultrapassa o valor nominal estabelecido, o relé começa a contar tempo e então provoca a abertura do disjuntor.

Já o relé de sobrecorrente instantâneo, opera de forma semelhante ao temporizado, porém, quando a corrente que passa por ele ultrapassa a nominal, ele atua instantaneamente, sem a contagem de tempo.

A figura 6 a seguir, ilustra as curvas características dos relés citados acima:

Figura 6 - Curvas dos relés 51 (curva vermelha) e 50 (curva verde); e curva da associação desses dois relés (curva azul).



Os relés 51N e 50N, operam da mesma forma que os já citados, porém, atuam apenas para correntes que circulam no neutro do sistema.

Esses dois tipos de relés, temporizados e instantâneos, podem ser associados, como na figura 6 acima. Dessa forma, a partir de determinado valor de corrente ajustado, a unidade 51 ou 51N conta tempo para atuar, e para outro valor, maior que o anterior, a unidade 50 ou 50N atua instantaneamente. Essa associação, faz com que apenas uma curva de atuação exista, como será visto mais a frente.

6.1 PARAMETRIZAÇÃO DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE

Para a parametrização de um relé digital de sobrecorrente, é necessário o conhecimento do RTC (relação de transformação) do TC, o que já foi estabelecido, 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 tempo $[t]$ é dado por:

$$t = \frac{K * dt}{(M^\alpha - 1)} \quad (10)$$

Isolando DT:

$$DT = t * \frac{(M^\alpha - 1)}{K} \quad (11)$$

- *M: múltiplo de corrente equivalente;*
- *T: tempo de atuação do relé;*
- *K: constante característica do relé;*
- *α : constante característica da curva;*

Então, para calcular o DT, a corrente equivalente (M) será necessária. A mesma é dada pelas equações 12 e 13:

$$M = \frac{I_{cc\ relé}}{Tape} \quad (12)$$

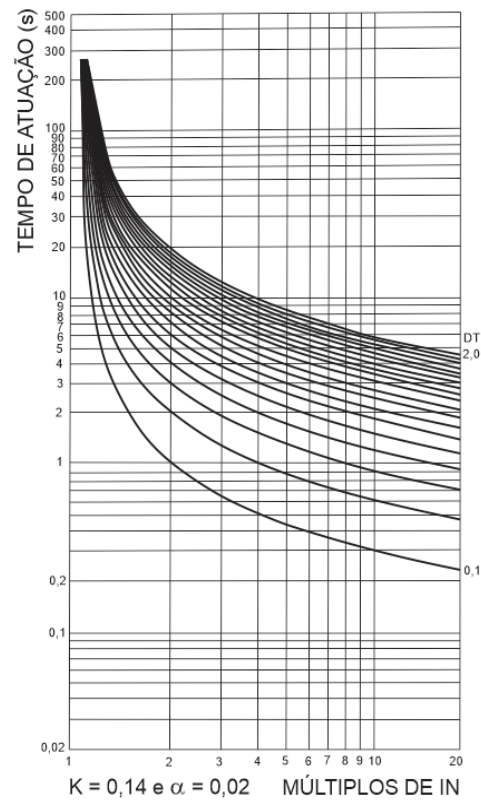
$$I_{cc\ relé} = \frac{I_{cc\ prim}}{RTC} \quad (13)$$

- *$I_{cc\ relé}$: corrente no secundário do TC;*
- *$I_{cc\ prim}$: corrente no primário do TC;*

6.2 CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE

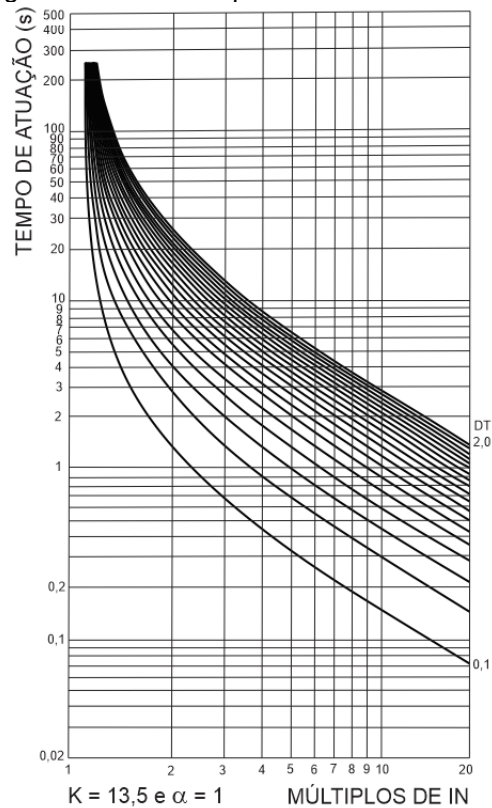
Os relés utilizados são os microprocessados, os quais apresentam curvas características. Essas curvas são determinadas pela equação 10, já apresentadas anteriormente, e são do tipo muito inversa, normalmente inversa, extremamente inversa e de tempo longo. As mesmas são apresentadas nas figuras 7,8 e 9:

Figura 7 - Curva do tipo normalmente inversa.



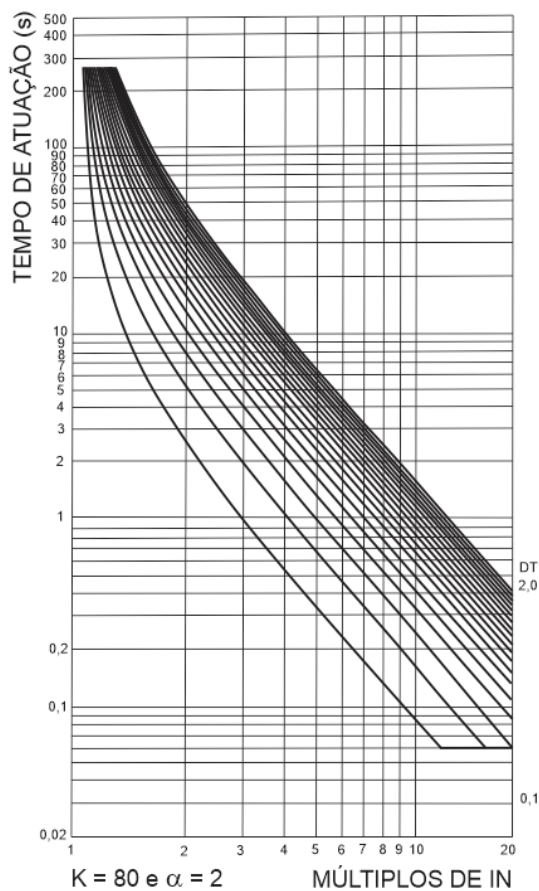
Fonte: Apostila de Introdução à proteção de sistemas elétricos de potência [1].

Figura 8 - Curva do tipo muito inversa.



Fonte: Apostila de Introdução à proteção de sistemas elétricos de potência [1].

Figura 9 - Curva do tipo extremamente inversa.



Fonte: Apostila de Introdução à proteção de sistemas elétricos de potência [1].

Essas curvas são padronizadas pela norma IEC 60255-3, que estabelece as constantes, que são apresentadas na tabela 14, para cada tipo de curva :

Tabela 14 - Constantes das curvas características dos relés.

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 [1].

Na tabela 15, têm-se as equações que determinam cada uma das curvas apresentadas nas figuras 8, 9 e 10:

Tabela 15 - Equações das curvas características dos relés.

<i>Normalmente Inversa (NI)</i>	<i>Muito Inversa (MI)</i>	<i>Extremamente Inversa (EI)</i>	<i>Tempo Longo</i>
$t = \frac{0,14 \cdot DT}{(M^{0,02} - 1)}$	$t = \frac{13,5 \cdot DT}{(M^1 - 1)}$	$t = \frac{80 \cdot DT}{(M^2 - 1)}$	$t = \frac{80 \cdot DT}{(M^1 - 1)}$

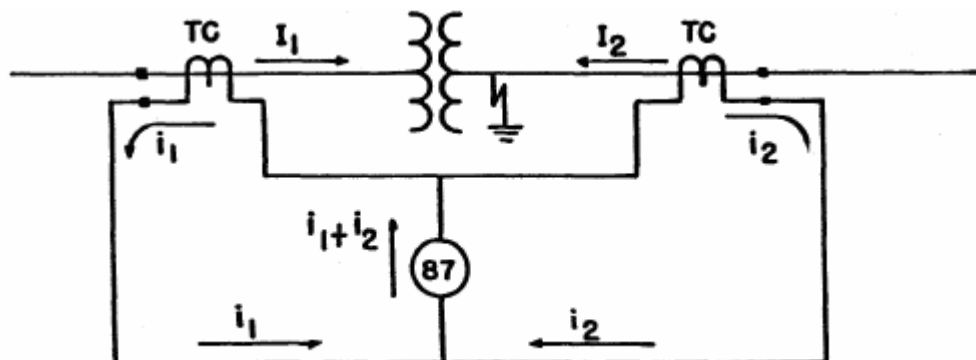
Fonte: Apostila de Introdução à proteção de sistemas elétricos de potência [1].

Depois de selecionar o tipo de curva e ter então as constantes definidas, calcula-se o dial de tempo, obtendo então a curva característica do relé. Para esse projeto, serão utilizadas as curvas do tipo muito inversa, já que elas não apresentam um tempo de atuação tão curto quanto as curvas do tipo extremamente inversa e nem tão longo, como as curvas do tipo normalmente inversa.

7 PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DOS RELÉS DIFERENCIAIS PERCENTUAIS

O principal método de proteção de transformadores é a proteção diferencial. Com esse método, o relé limita sua atuação ao trecho estabelecido pelos TCs, nesse caso, a entrada e a saída do transformador. Ele compara as correntes que entram e saem dele. Considerando-se a relação de transformação do transformador, em condições normais de operação, essas correntes serão iguais. Por outro lado, no caso de falta nesse trecho, haverá uma diferença entre essas correntes, o que sensibilizará o relé, que enviará um comando ao disjuntor. O disjuntor então, irá isolar o transformador do restante do sistema. A figura 10 ilustra a operação do relé diferencial:

Figura 10 - Circulação de correntes para falta interna.



Fonte: Apostila de Introdução à proteção de sistemas elétricos de potência [1].

Uma das formas usuais de utilização do relé diferencial, é na forma percentual, e é denominado por relé diferencial à porcentagem ou relé diferencial percentual. Nesse sistema, têm-se duas bobinas, a de restrição e a de operação. Na bobina de operação, a corrente diferencial (I_d) é proporcional a $(I_1 - I_2)$, e na bobina de restrição (I_r) a $(I_1 + I_2)/2$. No caso de uma falta externa, ou operação normal do transformador :

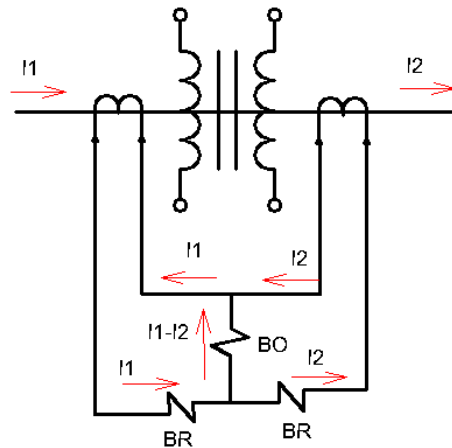
$$(I_1 - I_2) = 0 \quad (14)$$

e

$$\frac{I_1 + I_2}{2} = I_1 = I_2 \quad (15)$$

Dessa forma, há restrição, ou seja, conjugado de restrição supera o conjugado de operação, esse esquema é ilustrado pela figura 11:

Figura 11 - Esquema de funcionamento do relé diferencial do tipo percentual em uma falta externa.

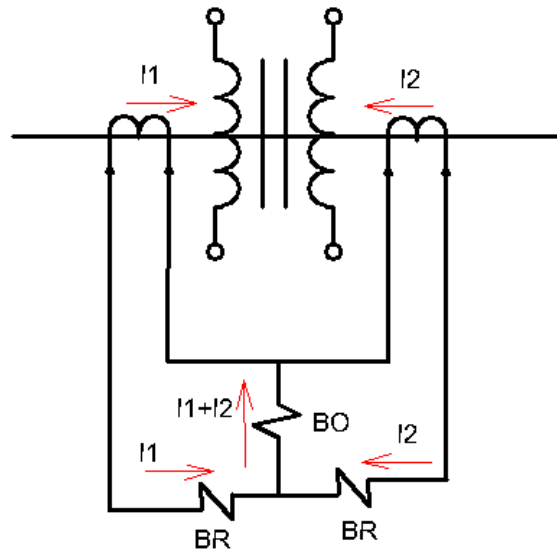


No entanto, para um falta interna, I_2 é negativo, e assim:

$$(I_1 - I_2) = I_1 - (-I_2) = I_1 + I_2 \quad (16)$$

Logo, o conjugado de operação será maior que o de restrição e isso fará com que o relé atue. A seguir, a ilustração da figura 12 representa o princípio de funcionamento do relé diferencial percentual para uma falta interna:

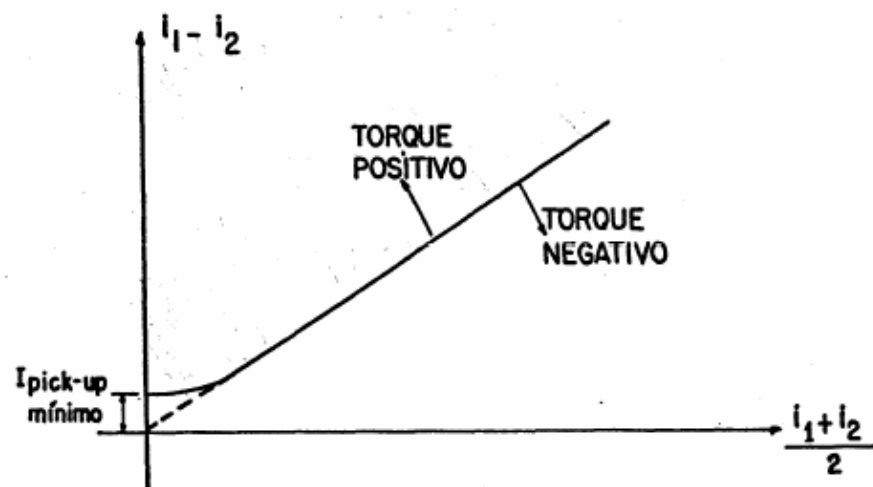
Figura 12 - Esquema de funcionamento do relé diferencial do tipo percentual em uma falta interna.



A seguir segue a figura 13 que representa a característica do relé diferencial percentual, mostrando sua região de operação e de não operação.

A figura 13 representa a característica de operação de um relé diferencial percentual:

Figura 13 - Característica de atuação da proteção diferencial percentual.



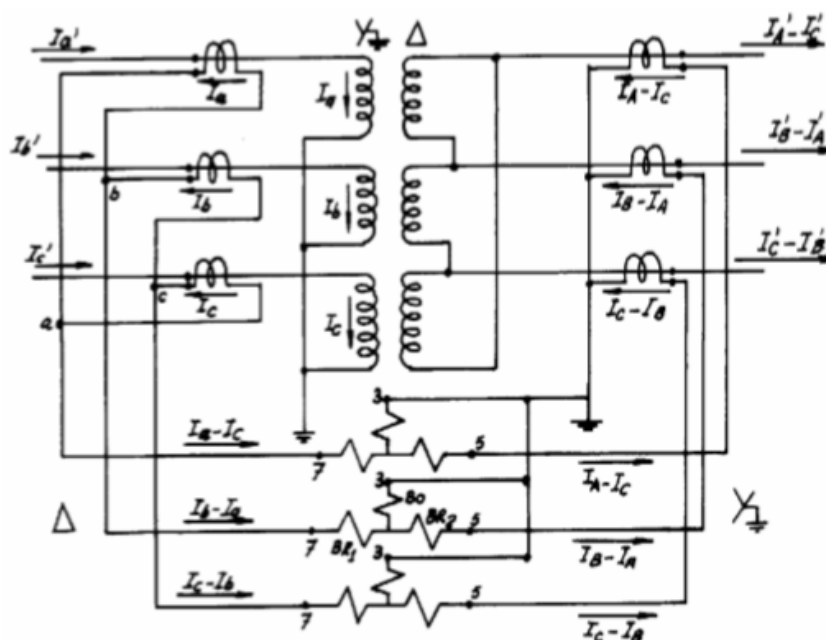
Fonte: Apostila de Introdução à proteção de sistemas elétricos de potência [1].

A inclinação da curva representa o ajuste percentual da atuação do relé, que determina o nível de corrente para o qual o relé irá atuar. Essa inclinação é definida por fatores como relação de transformação, erros dos TCs e mudanças nos *TAPs* do transformador.

O valor de corrente inicial mínima, também denominada como corrente pickup, é um ajuste inicial parametrizado no relé afim de evitar a operação deste à pequenas correntes diferenciais.

Os transformadores desse sistema têm a conexão das bobinas no enrolamento primário em delta e o secundário em estrela aterrado. Nesse caso, existe uma defasagem de 30° entre as correntes de primário e secundário. Logo, as correntes nos secundários dos TCs seriam nulas e então o relé atuaria indevidamente. Para compensar essa diferença, os TCs do lado em delta do transformador devem ser conectados em estrela, e os do lado em estrela, devem ser conectados em delta (caso o relé utilizado seja o eletromecânico). A figura 14 esquematiza essa ligação:

Figura 14 - Esquema de ligação dos TCs na proteção dos transformadores.



Fonte: Apostila de Introdução à proteção de sistemas elétricos de potência [1].

Como os relés utilizados hoje, são em sua maioria microprocessados, essa ligação não precisa ser realizada. A informação da ligação das bobinas do transformador é passada para o relé, que já faz essa compensação de correntes internamente.

No entanto, os relés a serem parametrizados aqui, serão os eletromecânicos. Então, essa conexão será necessária. Os valores de erro, ou mismatch, serão adequados abaixo de 15%. Para valores superiores a esse valor, outro valor de *TAP* será escolhido para o TC de alta tensão.

O erro é calculado pela equação 17:

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

Onde:

- *Isec*(BT): corrente secundária do TC na baixa tensão;
- *Isec*(AT): corrente secundária do TC na alta tensão;
- *TAP*(BT): *TAP* do TC da baixa tensão;
- *TAP*(AT): *TAP* do TC da alta tensão;
- *S*: menor dos termos do numerador.

8 PARAMETRIZAÇÃO DOS RELÉS E COORDENAÇÃO DA PROTEÇÃO

Neste capítulo será apresentada a parametrização dos relés, assim como os coordenogramas construídos.

8.1 PARAMETRIZAÇÃO DOS RELÉS DIFERENCIAIS PERCENTUAIS

A proteção com relés diferenciais percentuais será feita nos transformadores TC, TD e TE, que são os maiores do sistema. Já tendo calculado as relações de transformação dos TCs no capítulo 4, os *TAPs* dos relés eletromecânicos utilizados serão: 2,9; 3,5; 3,8; 4,2; 4,6; 5,0; 8,7.

8.1.1 RELÉS DIFERENCIAIS DOS TRANSFORMADORES TC E TD

As características desses transformadores, TD e TE, são:

Na Alta Tensão:

$$In_{prim_{AT}} = 101,41 \text{ A}$$

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

Na Baixa Tensão:

$$In_{prim_{BT}} = 2624,32 \text{ A}$$

$$RTC_{BT} = \frac{3000}{5}$$

Como os enrolamentos dos transformadores TC e TD estão conectados em Δ -Y, serão necessários ajustes na sua corrente do primário. Para corrigir a defasagem deste tipo de transformador, como já explicado em capítulos anteriores, os TCs do lado Y são conectados em Δ , e do lado Δ em Y, então a corrente que será vista pelo relé é diferente, como foi explicado no capítulo 7.

Na baixa tensão, com o transformador conectado em Y, os TCs deverão ser conectados em Δ , então:

$$In_{sec_{BT}} = \frac{In_{prim_{BT}}}{RTC_{BT}} = \frac{2624,32}{\frac{3000}{5}} = 4,37 \text{ [A]}$$

$$Ir_{BT} = \sqrt{3} * In_{sec_{BT}} * |30^\circ = \sqrt{3} * 4,37 * |30^\circ = 7,5|30^\circ \text{ [A]}$$

De posse da corrente do relé do lado de baixa tensão, deve-se escolher o *TAP* mais próximo superior a esse resultado. Dos valores já mencionados acima, o que melhor se adequa à essa situação é o *TAP* de 8,7.

Para o TC do lado da alta tensão, ligado em Y, tem-se:

$$In_{sec_{AT}} = \frac{In_{prim_{AT}}}{RTC_{AT}} = \frac{101,41}{\frac{150}{5}} = 3,38 \text{ [A]}$$

$$Ir_{AT} = In_{sec_{AT}} = 3,38 \text{ [A]}$$

Considerando a correção da corrente, devido a ligação dos TCs, o *TAP* do TC do lado de alta tensão, deverá ser calculado relativo a esse novo valor de corrente:

$$T_A = T_B * \frac{I_{rA}}{I_{rB}} 8,7 * \frac{3,38}{7,5} = 3,39$$

Escolhendo o valor maior mis próximo desse calculado, o *TAP* será 3,5.

Calcula-se então o erro de ajuste, dado pela equação a seguir:

$$\varepsilon[\%] = \frac{\frac{7,5}{3,38} - \frac{8,7}{3,5}}{S} * 100\% = \frac{2,21 - 2,48}{2,21} * 100\% = | - 12,47 | \%$$

Como o erro de ajuste é menor que 15%, o ajuste dos Relés Diferenciais dos transformadores TC e TD, estão adequados.

8.1.1 RELÉ DIFERENCIAL DO TRANSFORMADOR TE

As características do transformador TE são:

Na Alta Tensão:

$$In_{prim_{AT}} = 50,70 \text{ A}$$

$$RTC_{AT} = \frac{75}{5}$$

Na Baixa Tensão:

$$In_{prim_{BT}} = 1312,15 \text{ A}$$

$$RTC_{BT} = \frac{2000}{5}$$

Como os enrolamentos do transformador TE estão conectados em Δ -Y, serão necessários ajustes na sua corrente do primário. Para corrigir a defasagem deste tipo de transformador, os TCs do lado Y são conectados em Δ , e do lado Δ em Y, então a corrente que será vista pelo relé é diferente, como foi explicado no capítulo 7.

Na baixa tensão, com o transformador conectado em Y, os TCs deverão ser conectados em Δ , então:

$$Insec_{BT} = \frac{Inprim_{BT}}{RTC_{BT}} = \frac{1312,15}{\frac{2000}{5}} = 3,28 [A]$$

$$Ir_{BT} = \sqrt{3} * Insec_{BT} * |30^\circ = \sqrt{3} * 3,28 * |30^\circ = 5,68|30^\circ [A]$$

De posse da corrente do relé do lado de baixa tensão, deve-se escolher o *TAP* mais próximo superior a esse resultado. Dos valores já mencionados acima, o que melhor se adequa à essa situação é o *TAP* de 8,7.

Para o TC do lado da alta tensão, ligado em Y, tem-se:

$$Insec_{AT} = \frac{Inprim_{AT}}{RTC_{AT}} = \frac{50,70}{\frac{75}{5}} = 3,38 [A]$$

$$Ir_{AT} = Insec_{AT} = 3,38 [A]$$

Considerando a correção da corrente, devido a ligação dos TCs, o *TAP* do TC do lado de alta tensão, deverá ser calculado relativo a esse novo valor de corrente:

$$T_A = T_B * \frac{Ir_A}{Ir_B} = 8,7 * \frac{3,38}{5,68} = 5,17$$

Escolhendo o valor maior mis próximo desse calculado, o *TAP* será 5.

Calcula-se então o erro de ajuste, dado pela equação a seguir:

$$\varepsilon[\%] = \frac{\frac{5,68}{3,38} - \frac{8,7}{5}}{5} * 100\% = \frac{1,68 - 1,74}{1,74} * 100\% = | - 3,44 | \%$$

Como o erro de ajuste é menor que 15%, o ajuste do Relé Diferencial do transformador TE está adequado.

8.2 PARAMETRIZAÇÃO DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE E SEUS RESPECTIVOS COORDENOGRAMAS

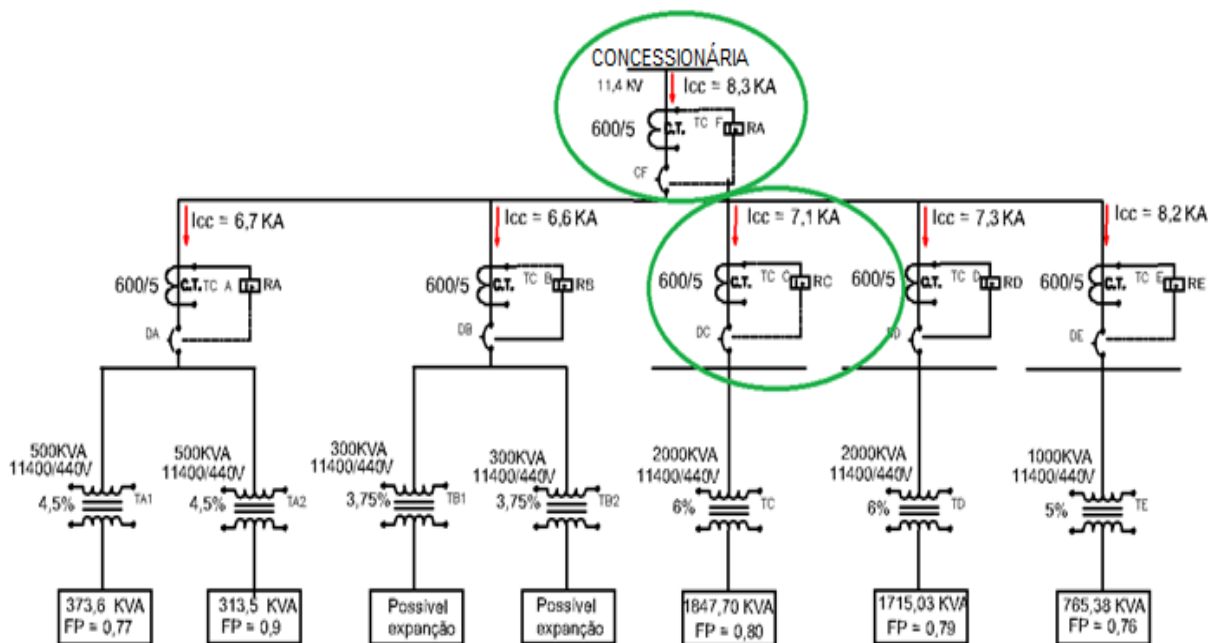
Um sistema de proteção deve ser feito priorizando sempre os ramais com as cargas mais importantes, ou ainda, os ramais com um carregamento maior.

Nesse projeto, o ramal de maior carga foi priorizado, ou seja, o ramal FC no barramento C. Dessa forma, os demais relés foram coordenados tendo o mesmo como parâmetro. A coordenação dos relés RF e RC será apresentada a seguir, as demais, dos outros relés, serão demonstradas no Apêndice C.

8.2.1 RELÉS DE SOBRECORRENTE DO RAMAL FC DO BARRAMENTO C

Na figura 15 é apresentado o sistema com a alocação dos TCs e relés dos barramentos F e C:

Figura 155 - Posicionamento dos relés RF e RC.



O dimensionamento da proteção é sempre iniciado a partir do relé mais próximo da carga em direção ao mais distante. Isso garante a seletividade da proteção. Dessa

forma, o primeiro relé a ser parametrizado será o relé RC, logo acima do transformador TC, como indicado na figura 15.

8.2.1.1 RELÉ 51 E 50 DO TRANSFORMADOR TC

Como foi apresentado no capítulo 3, as correntes desse barramento são as seguintes:

$$I_n = 93,57 \text{ [A]}$$

$$I_{CC_C} = 7083,21 \text{ [A]}$$

$$RTC = 600/5$$

Essas correntes já estão referidas à tensão de 11,4 [KV], onde os relés serão instalados. Dessa forma, a corrente que circulará no secundário do TC, considerando 20% de sobrecarga, será:

$$I_{sec} = TAP E = \frac{1,2 * I_{n_{prim}}}{RTC} = \frac{1,2 * 93,57}{\frac{600}{5}} = 0,93 \text{ [A]}$$

$$I_{CC_{sec}} = \frac{I_{CC_{prim}}}{RTC} = \frac{7083,21}{(\frac{600}{5})} = 59,02 \text{ [A]}$$

Então, o *TAP* desse relé será 0,93 [A].

O múltiplo da corrente:

$$M = \frac{I_{CC_{sec}}}{Tape} = \frac{59,02}{0,93} = 63,46$$

Finalmente, utilizando a equação genérica para os relés digitais, adotando a família de curvas do tipo muito inversa e o tempo de 0,3 [s], tem-se:

$$DT = \frac{t * (M^\alpha - 1)}{K} = \frac{0,3 * (63,086 - 1)}{13,5} = 1,38$$

Esse relé então, terá um TAP de 0,93 [A] e DT de 1,38. Com isso, finalizada a parametrização da unidade 50 desse relé, será feita a parametrização da unidade 50.

Tem-se que:

$$I < I_{cc_{prim}}$$

$$I < 7083,21$$

Ou seja, o relé deve proteger o barramento especificado de uma corrente de curto-circuito máxima de 7083,21 [A]. Aqui, esse relé será ajustado para atuar a partir de 5000 [A], logo:

$$I = \frac{I_{cc_{prim}}}{RTC} = \frac{5000}{\frac{600}{5}} = 41,66 \text{ [A]}$$

Sintetizando: $TAP = 0,93$ [A]; $DT = 1,38$ e $I = 41,66$ [A].

8.2.1.2 RELÉ 51 E 50 DA ENTRADA DA INDÚSTRIA, RF

Tem-se as seguintes correntes no barramento principal da instalação F:

$$I_n = 272,86 \text{ [A]}$$

$$I_{cc} = 8302,45 \text{ [A]}$$

$$RTC = 600/5$$

A corrente no secundário do TC, considerando também uma sobrecarga de 20% no sistema:

$$I_{sec} = TAPE = \frac{1,2 * I_{n_{prim}}}{RTC} = \frac{1,2 * 272,86}{\frac{600}{5}} = 2,72 \text{ A}$$

Dessa forma, o TAP desse relé será 2,72 [A].

Para que esse relé não atue ao mesmo tempo que o relé anterior, do barramento C, é necessário coordená-los. Isso deve ser feito de forma que, para um curto no barramento C, primeiro atue o relé RC, e no caso de o mesmo não atuar, aí

então, o relé RF deve entrar em operação. Para que isso aconteça, deve-se saber o tempo em que o relé RC leva para atuar para 5000 [A]:

$$M = \frac{I_{cc}}{RTC * Tape} = \frac{5000}{\left(\frac{600}{5}\right) * 0,93} = 44,64$$

$$t = \frac{K \cdot DT}{M^\alpha - 1} = \frac{13,5 \times 1,38}{44,64 - 1} = 0,42 \text{ [s]}$$

Logo, o relé RC leva 0,42 [s] para atuar para 5000 [A], RF deve levar então um tempo maior para atuar para essa mesma corrente. Considerando um intervalo de tempo de 0,3 [s], esse tempo é dado abaixo:

$$tf = tc + 0,3 = 0,42 + 0,30 = 0,72 \text{ [s]}$$

Logo, o relé RF leva 0,72 [s] para atuar para 5000 [A].

Com esse valor, pode-se calcular o DT do relé RF:

$$M = \frac{I_{cc}}{RTC * Tape} = \frac{5000}{\left(\frac{600}{5}\right) * 1,4} = 15,32$$

$$DT = \frac{t * (M^\alpha - 1)}{K} = \frac{0,72 * (15,32 - 1)}{13,5} = 0,76$$

A parametrização da unidade 50 será:

$$I < I_{cc_{prim}}$$

$$I < 8302,45 \text{ [A]}$$

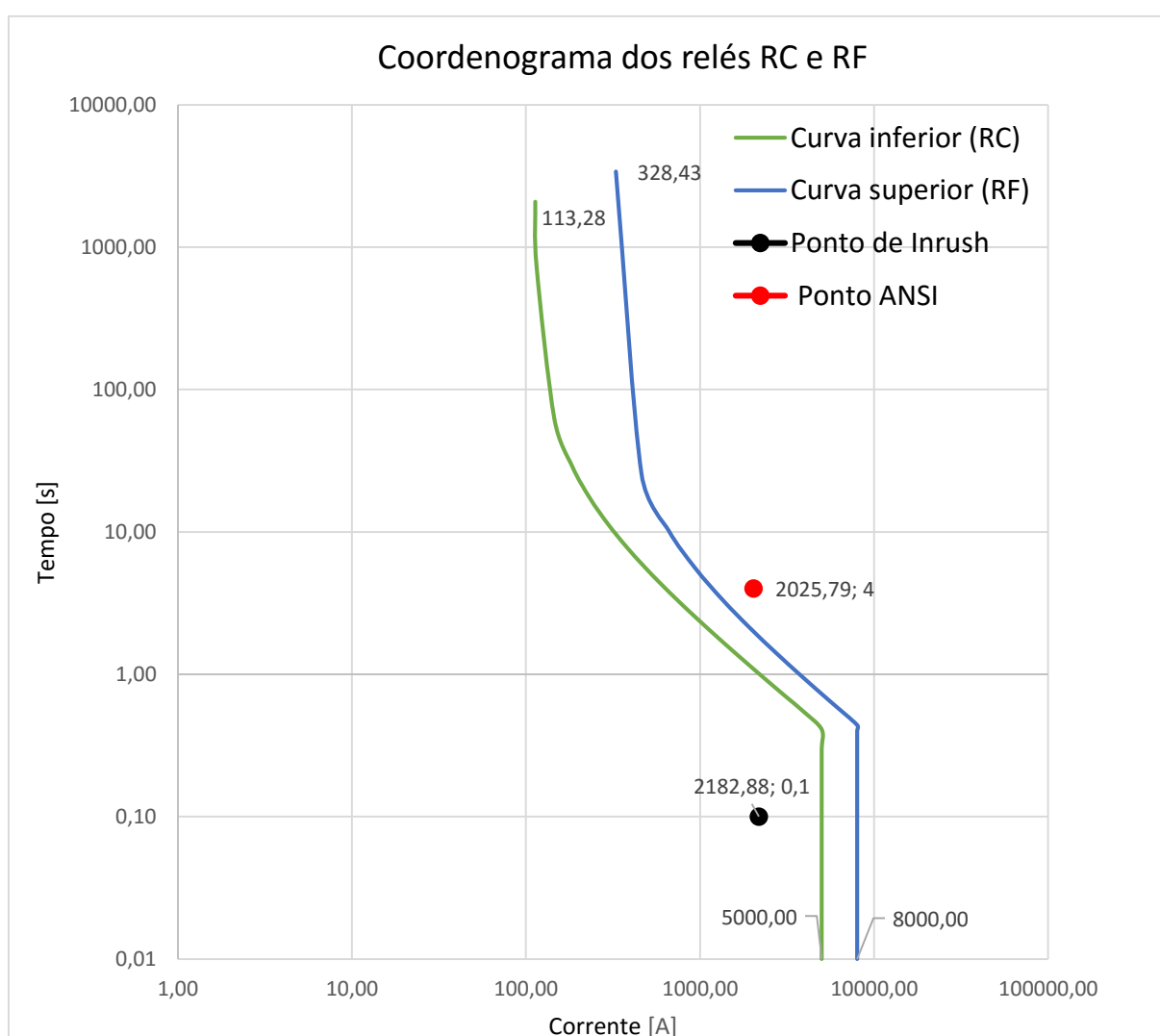
A corrente de curto-circuito máxima nesse barramento é 8302,45 [A]. Esse relé será ajustado para atuar a partir de 8000 [A], assim:

$$I = \frac{I_{cc_{prim}}}{RTC} = \frac{8000}{\frac{600}{5}} = 66,66 \text{ [A]}$$

Sintetizando: $TAP = 2,72 \text{ [A]}$; $DT = 0,76$ e $I = 66,66 \text{ [A]}$.

A figura 16 apresenta a ilustração do coordenograma dos relés 50 e 51 já especificados:

Figura 1620 - Coordenograma dos relés RC e RF.



Pela figura 16, nota-se que existe retaguarda entre os relés, ou seja, apenas se o relé RC não atuar, caso o transformador atinja, por exemplo seu limite térmico (ponto ANSI), o relé RF será sensibilizado. Isso porque o ponto ANSI está acima de ambas

as curvas. Na energização do transformador, nenhum dos relés atuará, já que o ponto de inrush está abaixo das duas curvas.

9 CONCLUSÃO

A proteção de um sistema elétrico deve sempre atuar, de forma rápida e seletiva, evitando danos às cargas, ou ao menos minimizando-os.

No sistema aqui estudado, isso foi garantido em todos os barramentos, exceto nos barramentos A e B. Neles, não foi possível garantir a retaguarda dos relés com o relé da entrada da indústria, pois os pontos ANSI dos transformadores estão abaixo das curvas dos relés. Logo, foram dimensionados disjuntores afim de proteger cada um dos transformadores e suas respectivas cargas, garantindo então, a retaguarda entre os disjuntores e os relés dos barramentos.

Quanto à proteção diferencial dos transformadores, não houve necessidade de alterar os *TAPs* calculados, já que os erros encontrados não ultrapassaram o limite de 15%, que é o adequado.

10 REFERÊNCIAS

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

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

APÊNDICE A – CONSTRUÇÃO DO DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS

No projeto, foi informado o comprimento e a seção mínima de cada cabo utilizado. Desse forma, com base na tabela A-1, de resistência e reatância de cabos elétricos de média e alta tensão do catálogo da General Cable, foi possível determinar a impedância dos cabos do sistema, mostradas na tabela A-3.

Tabela A 1 - Parâmetros elétricos dos Cabos de Média tensão.

Parâmetros elétricos dos Cabos de Média tensão - 12/20 KV			
		Tripolar	
	Seção mm ²	R ca (Ω /Km)	XL (Ω /Km)
Cobre	35	0,6684	0,1572
Alumínio	70	0,5683	0,1416

Fonte: Catálogo de Cabos de média e alta tensão [2].

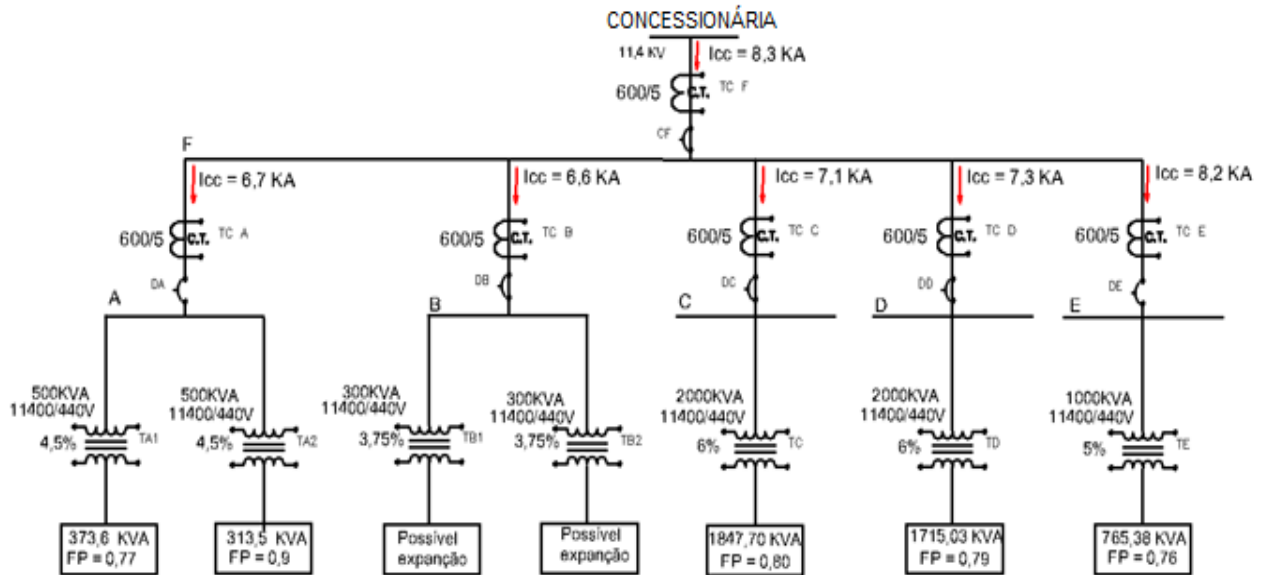
Tabela A 2 - Cálculo dos parâmetros elétricos dos cabos.

Cálculo dos parâmetros dos cabos (Ω)						
Ramal	Seção mm ²	R ca (Ω /Km)	XL (Ω /Km)	Comprimento	R ca (Ω)	XL (Ω)
F	70	0,5683	0,1416	0,465	0,2643	0,0658
FA	35	0,6684	0,1572	0,260	0,1738	0,0409
FB	35	0,6684	0,1572	0,280	0,1872	0,0440
FC	35	0,6684	0,1572	0,205	0,1370	0,0322
FD	35	0,6684	0,1572	0,150	0,1003	0,0236
FE	35	0,6684	0,1572	0,008	0,0053	0,0013

Pela figura A-1 percebe-se que, apenas as impedâncias dos cabos limitam as correntes de curto-circuito que chegam até os barramentos. Como toda alimentação é recebida de apenas uma entrada, e não há contribuição considerável por parte das cargas para os curtos circuitos, não foi preciso calcular a impedância de todos os cabos.

Devido a extensão do projeto elétrico desse sistema e o grande número de cargas, foi realizada a soma dessas cargas em todos os barramentos. Assim, foi possível elaborar um diagrama simplificado da indústria. Isso pode ser observado na figura A-1, a seguir:

Figura A 2- Diagrama unifilar da indústria



As impedâncias dos cabos devem ser convertidas para o sistema p.u. (por unidade). Para isso, é preciso calcular a impedância base do sistema:

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{11\,400^2 \text{ [V]}}{2\,000\,000 \text{ [MVA]}} = 64,98 \, \Omega \quad (18)$$

Logo, dividindo os valores já calculados das impedâncias dos cabos pela impedância base, tem-se seu valor em p.u., como mostra a fórmula 19:

$$Z_{(pu)} = \frac{Z_l}{Z_b} \quad (19)$$

A tabela 13 mostra esses valores:

Tabela A 3 - Cálculo de impedância dos cabos (P.U.) .

Cálculo de impedância dos cabos (P.U.)				
Ramal	R ca (Ω)	XL (Ω)	Z(Ω)	Z(p.u.)
F	0,2643	0,0658	0,2723	0,0042
FA	0,1738	0,0409	0,1785	0,0027
FB	0,1872	0,0440	0,1923	0,0030
FC	0,1370	0,0322	0,1408	0,0022
FD	0,1003	0,0236	0,1030	0,0016
FE	0,0053	0,0013	0,0055	0,0001

Por fim, a impedância do sistema, ou seja impedância que representa o sistema elétrico até à entrada da indústria, deve ser calculada. Pelo projeto, sabe-se que a corrente de curto-circuito na entrada da indústria é 12,7 [KA] em 11,4 [KV], então:

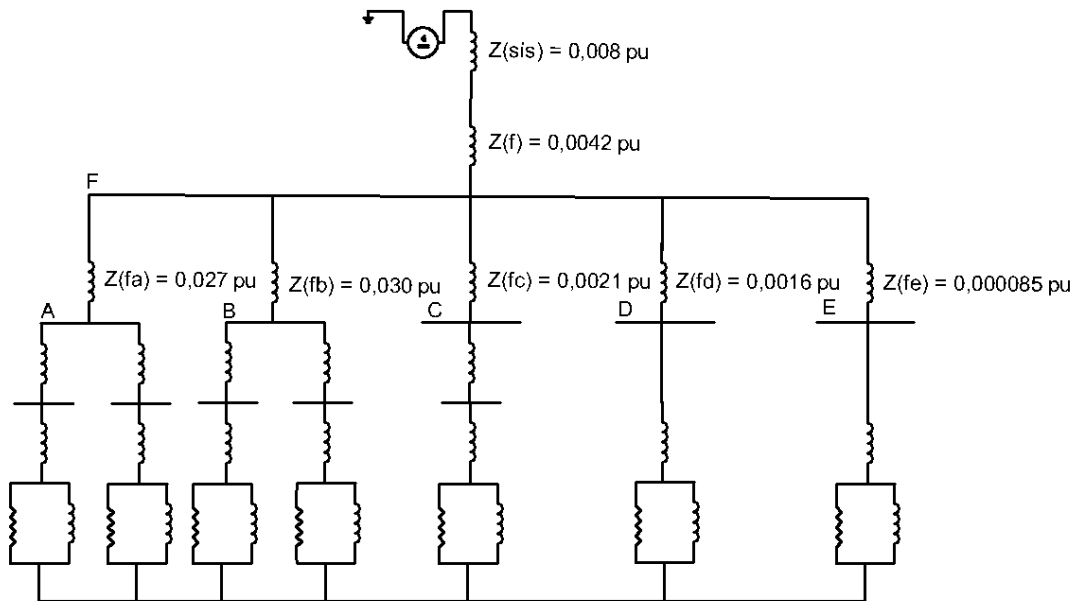
$$S_{cc} = \sqrt{3} * V * I_{cc} = \sqrt{3} * 11\,400 [V] * 12\,700 [A] = 250[MVA] \quad (20)$$

Dessa forma:

$$Z_{sis} = \frac{S_b}{S_{cc}} = \frac{2[MVA]}{250[MVA]} = 0,008 [p.u.] \quad (21)$$

A figura A-2 apresenta o diagrama unifilar da indústria, com todos os valores de impedâncias em p.u.:

Figura A 7 - Diagrama de impedâncias.



APÊNDICE B – CÁLCULO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

Para calcular as correntes de curto-circuito trifásicas, é necessário determinar o circuito equivalente de Thevenin, visto da falta. Logo, deve-se determinar a impedância total entre o ponto da falta, e o gerador, que será a impedância de Thevenin (Z_T). Em seguida, calcula-se a Tensão de Thevenin (E_T), que é a tensão na falta. [1]

Com esses dados, tem-se que a corrente de curto-circuito é dada por:

$$I_{cc} = \frac{E_{TH}}{Z_{TH}} = \frac{V_n * \sqrt{3}}{Z_{TH}} \quad (22)$$

Algumas simplificações que podem ser aplicadas para esse tipo de estudo de curto:

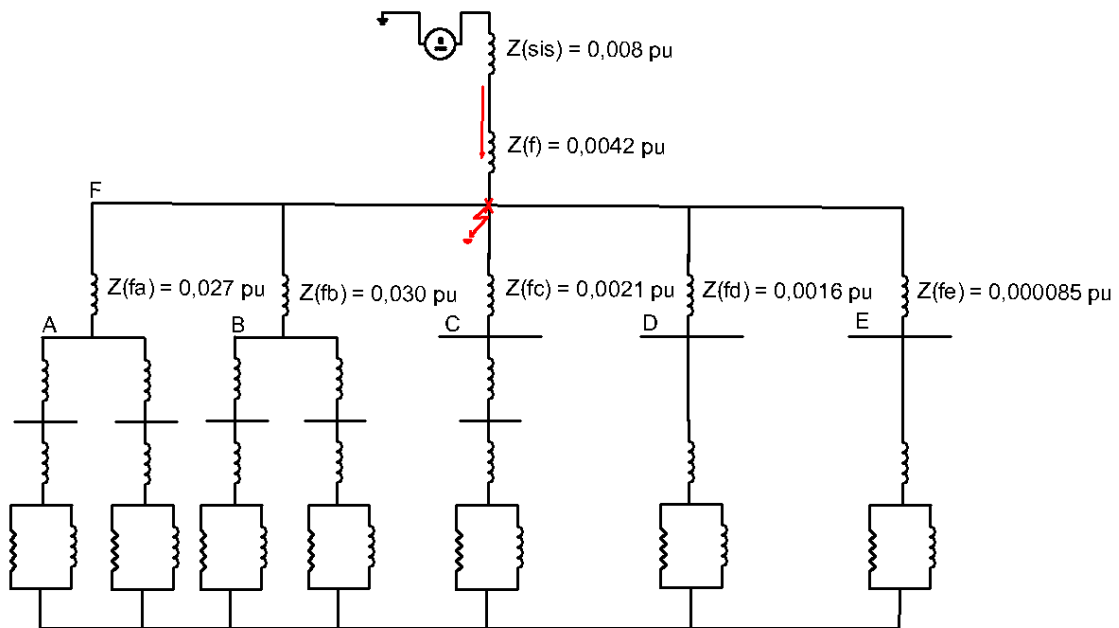
- 1) Considera-se que os geradores geram a mesma fem. Logo, em todas as barras, a tensão será sempre a mesma.
- 2) Considera-se o sistema sem cargas, logo, a impedância de Thevenin não considerará as impedâncias das cargas.

Já com o diagrama de impedâncias finalizado, com todas as impedâncias na mesma base e em p.u., o próximo passo, é reduzir toda a rede à uma impedância, entre a falta e o neutro do sistema. Com isso feito, pode-se realizar o cálculo da corrente de curto-circuito.

B.1 – CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA NO BARRAMENTO F:

Na figura B-1, tem-se o diagrama de impedâncias do sistema com um possível curto no barramento F:

Figura B 1 - Representação de um curto-circuito no barramento F.



As cargas não contribuem para o curto-circuito, e como existe apenas uma fonte de alimentação no sistema, apenas esta, alimenta esse curto.

Pela figura B2, percebe-se que as impedâncias que limitam essa corrente de curto são $Z(sis)$ e $Z(f)$. Logo, a impedância equivalente será apresentada pela equação 28:

$$Z_{eq} = Z_{sis} + Z_f = 0,008 + 0,0042 = 0,0122 \quad (23)$$

Figura B 2 - Representação das impedâncias que limitam um curto-circuito no barramento F.

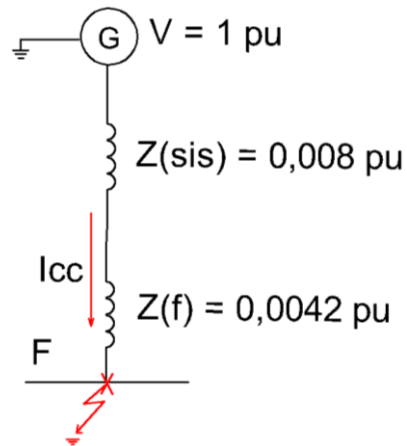
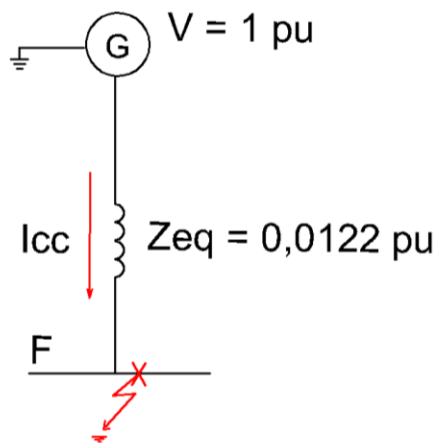


Figura B 3 - Impedância equivalente para um curto no barramento F.



Assim, tem-se que a corrente de curto será:

$$I_{cc} = \frac{V}{Z_{eq}} = \frac{1}{0,0122} = 81,86 \text{ [pu]}$$

A corrente base do sistema é dada por:

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} * V_b} = \frac{2\,000\,000 \text{ [VA]}}{\sqrt{3} * 11\,400 \text{ [V]}} = 101,29 \text{ [A]}$$

Então:

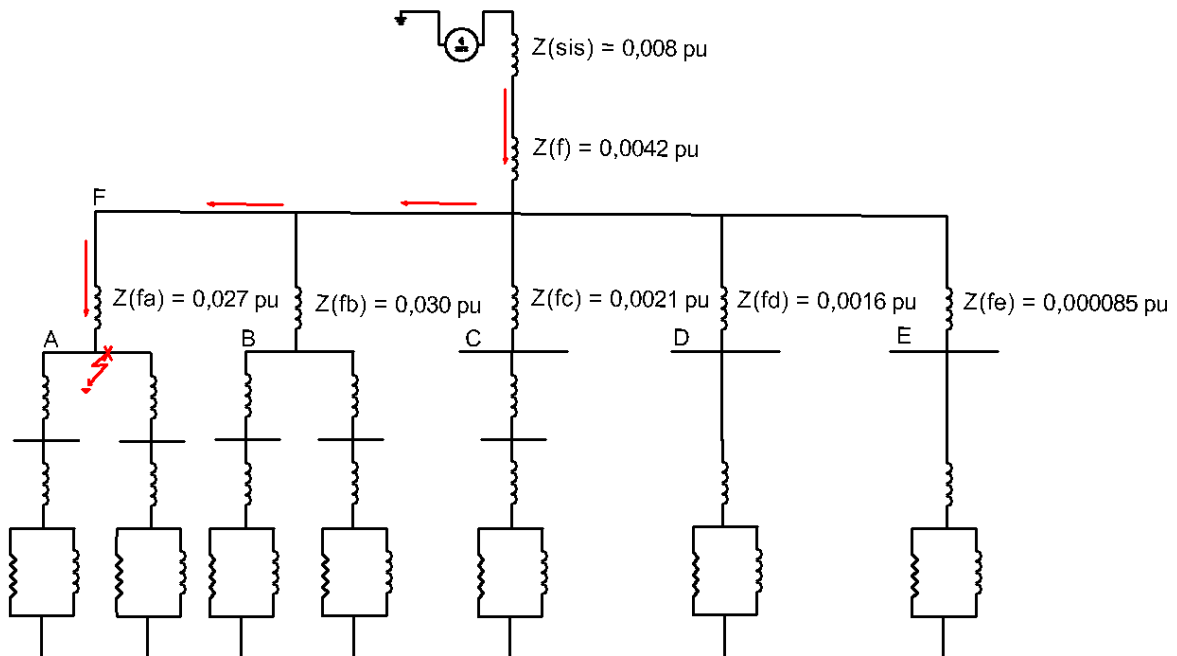
$$I_{cc} = 81,86 \text{ [pu]} * 101,29 \text{ [A]} = 8\,302,45 \text{ [A]}$$

Logo, um curto no barramento F teria o valor de 8,30 [kA].

B.2 CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA NO BARRAMENTO A:

O diagrama de impedâncias do sistema, com um possível curto no barramento A é representado pela figura B-4:

Figura B 4 - Representação de um curto-circuito no barramento A.



As impedâncias que limitam essa corrente de curto são $Z(sis)$, $Z(f)$ e $Z(fa)$, as mesmas são representadas na figura B5. Logo, a impedância equivalente, ilustrada na figura B6, será:

$$Z_{eq} = Z_{sis} + Z_f + Z_{fa} = 0,008 + 0,0042 + 0,0027 = 0,0149$$

Figura B 5 - Representação das impedâncias que limitam um curto-circuito no barramento A.

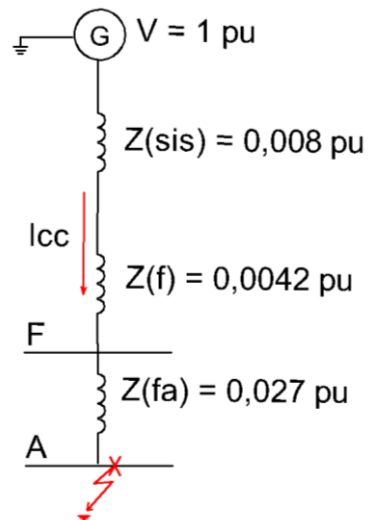
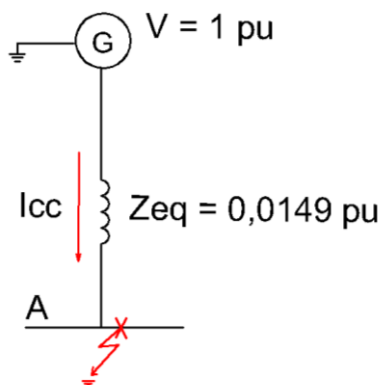


Figura B 6 - Impedância equivalente para um curto no barramento A.



A corrente de curto será:

$$I_{cc} = \frac{V}{Z_{eq}} = \frac{1}{0,0149} = 67,11 \text{ [pu]}$$

Já tendo calculado a corrente base do sistema:

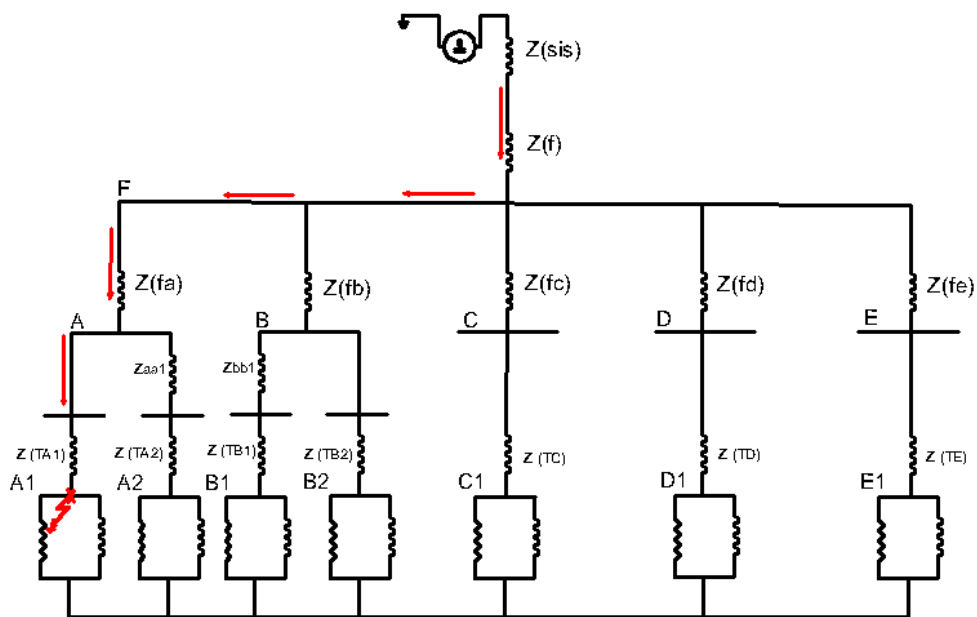
$$I_{cc} = 67,11 \text{ [pu]} * 101,29 \text{ [A]} = 6\,7979 \text{ [A]}$$

Logo, a corrente de curto no barramento A é 6,79 [KA].

B.2.1 – CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA NA SAÍDA DO TRANSFORMADOR A1:

Na figura B-7 tem-se a representação do diagrama de impedâncias do sistema, com um possível curto na saída do transformador A1:

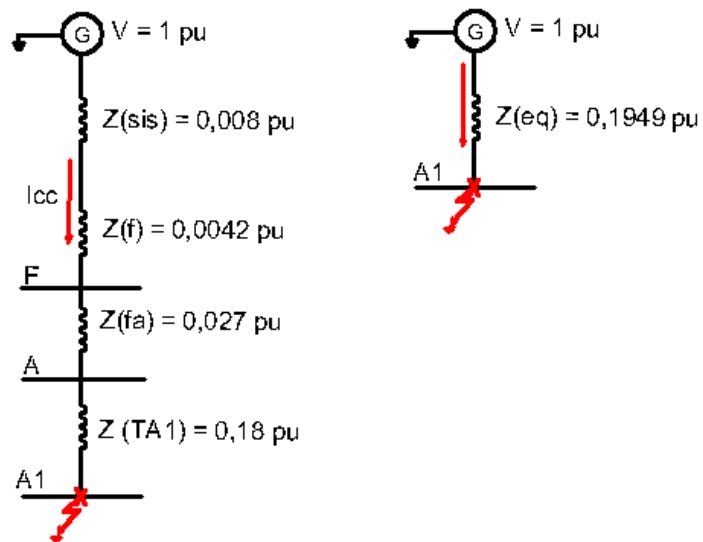
Figura B 7 - Representação de um curto-circuito no barramento A1.



As impedâncias que limitam a corrente de curto nesse barramento, ilustradas na figura B8, são $Z(sis)$, $Z(f)$, $Z(fa)$ e $Z(TA1)$. Logo, a impedância equivalente será:

$$Z_{eq} = Z_{sis} + Z_f + Z_{fa} + Z_{TA1} = 0,008 + 0,0042 + 0,0027 + 0,18 = 0,1949 [p.u.]$$

Figura B 8 - Representação das impedâncias que limitam um curto-circuito no barramento A1.



Logo, a corrente de curto será:

$$I_{cc} = \frac{V}{Z_{eq}} = \frac{1}{0,1949} = 5,13 \text{ [pu]}$$

Então:

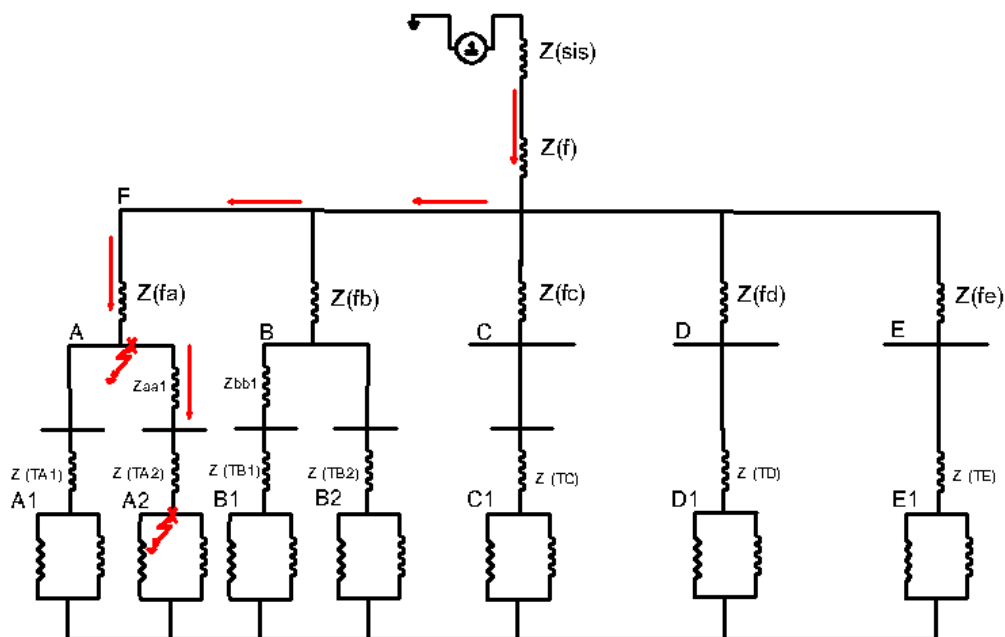
$$I_{cc} = 5,13 \text{ [pu]} * 101,29 \text{ [A]} = 519,7 \text{ [A]}$$

Logo, a corrente de curto no barramento BA1 é 0,519 [KA].

B.2.2 – CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA NA SAÍDA DO 2º TRANSFORMADOR A2:

O diagrama de impedâncias do sistema com um possível curto na saída do transformador A2 é representado a seguir pela figura B-9:

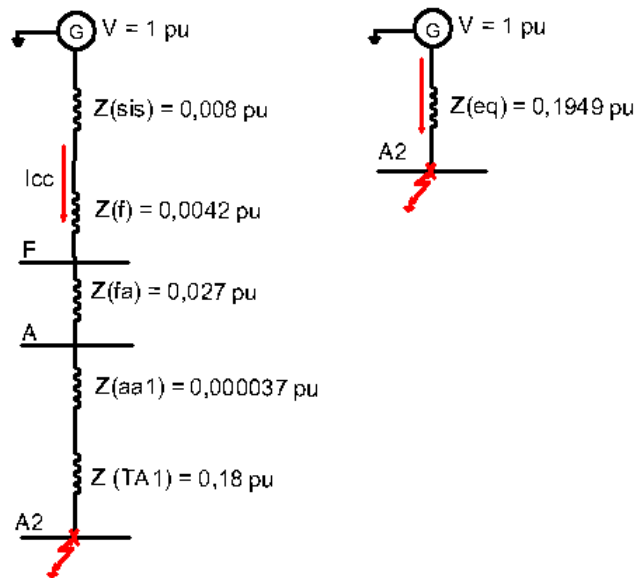
Figura B 9 - Representação de um curto-circuito no barramento A2.



As impedâncias que limitam a corrente de curto nesse barramento são $Z(sis)$, $Z(f)$, $Z(fa)$, $Z(aa1)$ e $Z(TA2)$, as mesmas são ilustradas a seguir. Logo, a impedância equivalente será:

$$Z_{eq} = Z_{sis} + Z_f + Z_{fa} + Z_{aa1} + Z_{TA2} = 0,008 + 0,0042 + 0,0027 + 0,000037 + 0,18 = 0,1949 [p.u.]$$

Figura B 10 - Representação das impedâncias que limitam um curto-circuito no barramento A2.



Logo, a corrente de curto será:

$$I_{cc} = \frac{V}{Z_{eq}} = \frac{1}{0,1949} = 5,13 \text{ [pu]}$$

Assim:

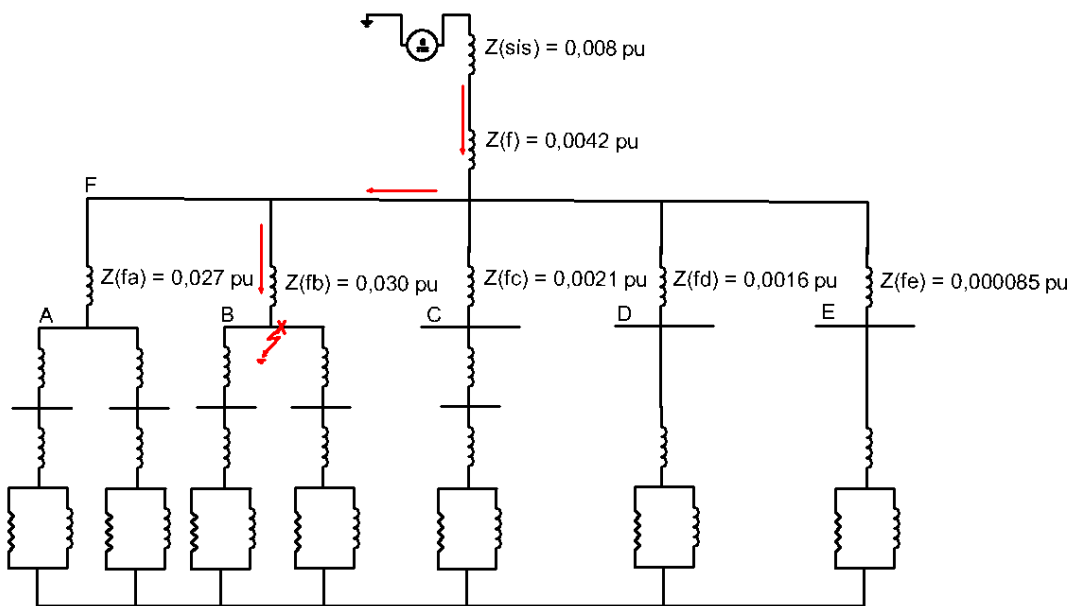
$$I_{cc} = 5,13 \text{ [pu]} * 101,29 \text{ [A]} = 519,7 \text{ [A]}$$

Então, a corrente de curto no barramento BA1 é 0,519 [KA].

B.3 – CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA NO BARRAMENTO B:

Na figura B-11 tem-se o diagrama de impedâncias do sistema com um possível curto no barramento B:

Figura B 11 - Representação de um curto-circuito no barramento B.



As impedâncias que limitam a corrente de curto nesse barramento são $Z(sis)$, $Z(f)$ e $Z(fb)$, representadas pela figura B12. Logo, a impedância equivalente, figura B13, será:

$$Z_{eq} = Z_{sis} + Z_f + Z_{fb} = 0,008 + 0,0042 + 0,0030 = 0,0152$$

Figura B 12 - Representação das impedâncias que limitam um curto-circuito no barramento B.

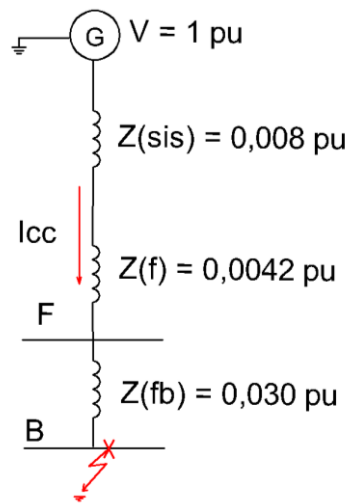
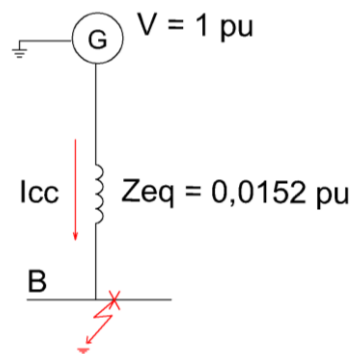


Figura B 13 - Impedância equivalente para um curto no barramento B.



Assim, tem-se que a corrente de curto será:

$$I_{cc} = \frac{V}{Z_{eq}} = \frac{1}{0,0152} = 65,78 \text{ [pu]}$$

Já tendo calculado a corrente base do sistema:

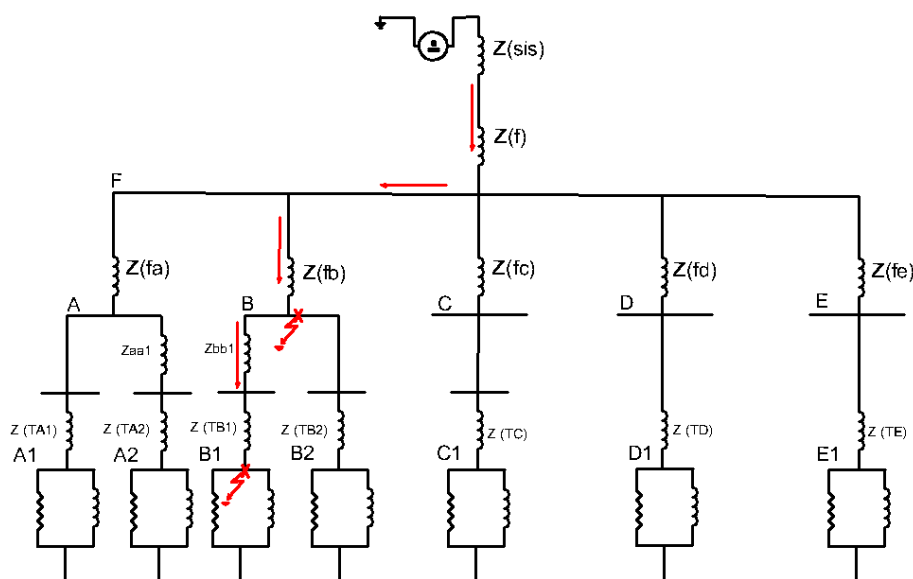
$$I_{cc} = 65,78 \text{ [pu]} * 101,29 \text{ [A]} = 6\,663,81 \text{ [A]}$$

Logo, a corrente de curto no barramento B é 6,66 [KA].

B.3.1 – CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA SAÍDA DO TRANSFORMADOR B1:

Abaixo tem-se na figura B-14 a representação do diagrama de impedâncias do sistema com um possível curto na saída do transformador B1:

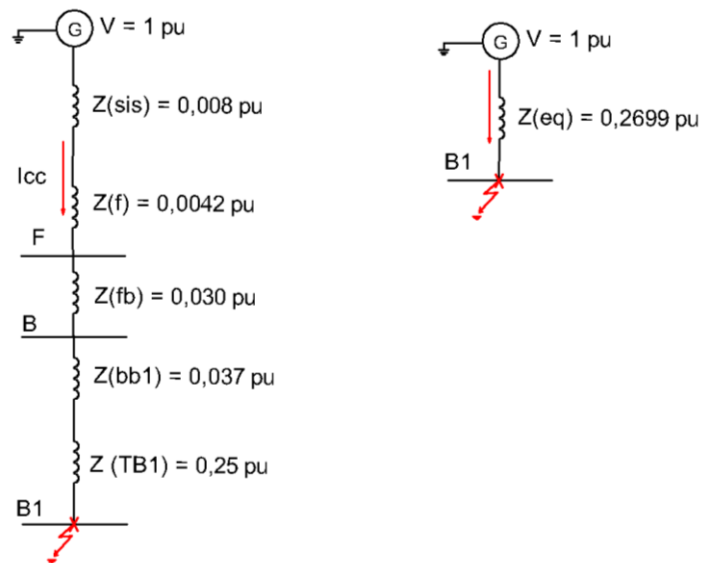
Figura B 14 - Representação de um curto-circuito no barramento B1.



As impedâncias que limitam a corrente de curto nesse barramento são $Z(sis)$, $Z(f)$ e $Z(fb)$, figura B15. Logo, a impedância equivalente será:

$$Z_{eq} = Z_{sis} + Z_f + Z_{fb} + Z_{bb1} + Z_{TB1} = 0,008 + 0,0042 + 0,0030 + 0,0037 + 0,25 \\ = 0,2699 [p.u]$$

Figura B 15 - Representação das impedâncias que limitam um curto-circuito no barramento B1.



Assim, tem-se que a corrente de curto será:

$$I_{cc} = \frac{V}{Z_{eq}} = \frac{1}{0,2699} = 3,71 \text{ [pu]}$$

Já tendo calculado a corrente base do sistema:

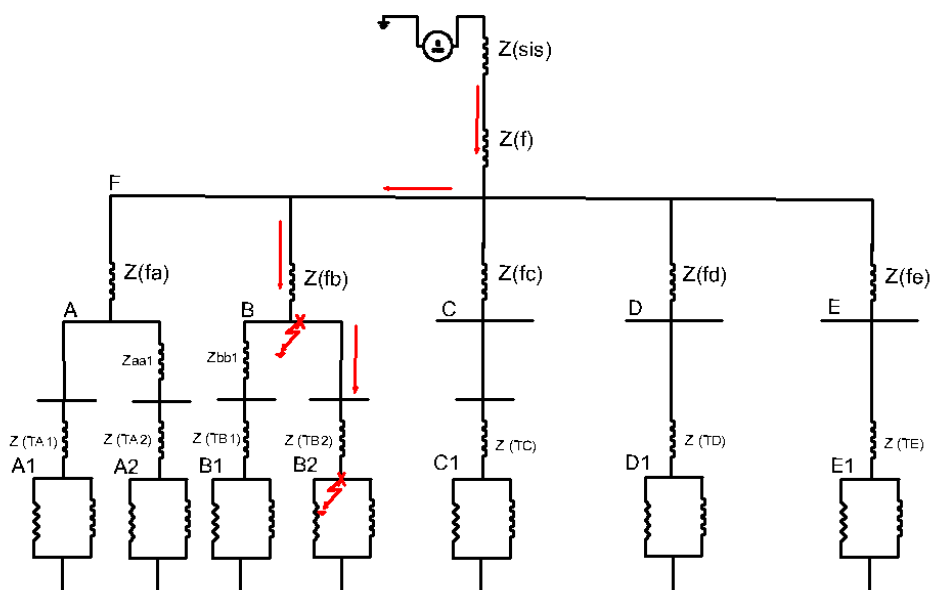
$$I_{cc} = 3,71 \text{ [pu]} * 101,29 \text{ [A]} = 376,68 \text{ [A]}$$

Logo, a corrente de curto no barramento B é 0,376 [KA].

B.3.2 – CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA NA SAÍDA DO TRANSFORMADOR B2:

Na figura B-16 tem-se o diagrama de impedâncias do sistema com um possível curto no barramento B2:

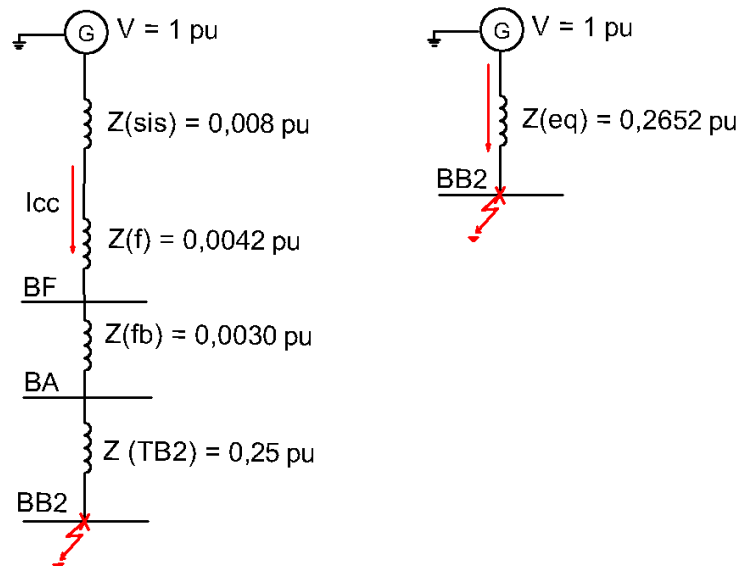
Figura B 16 - Representação de um curto-circuito no barramento B2.



As impedâncias que limitam a corrente de curto nesse barramento são $Z(sis)$, $Z(f)$, $Z(fb)$ e $Z(TB2)$, figura B17. Logo, a impedância equivalente será:

$$Z_{eq} = Z_{sis} + Z_f + Z_{fb} + Z_{TB2} = 0,008 + 0,0042 + 0,0030 + 0,21 = 0,2652 [p.u.]$$

Figura B 17 - Representação das impedâncias que limitam um curto-circuito no barramento B2.



Assim, tem-se que a corrente de curto será:

$$I_{cc} = \frac{V}{Z_{eq}} = \frac{1}{0,2652} = 3,77 [pu]$$

Já tendo calculado a corrente base do sistema:

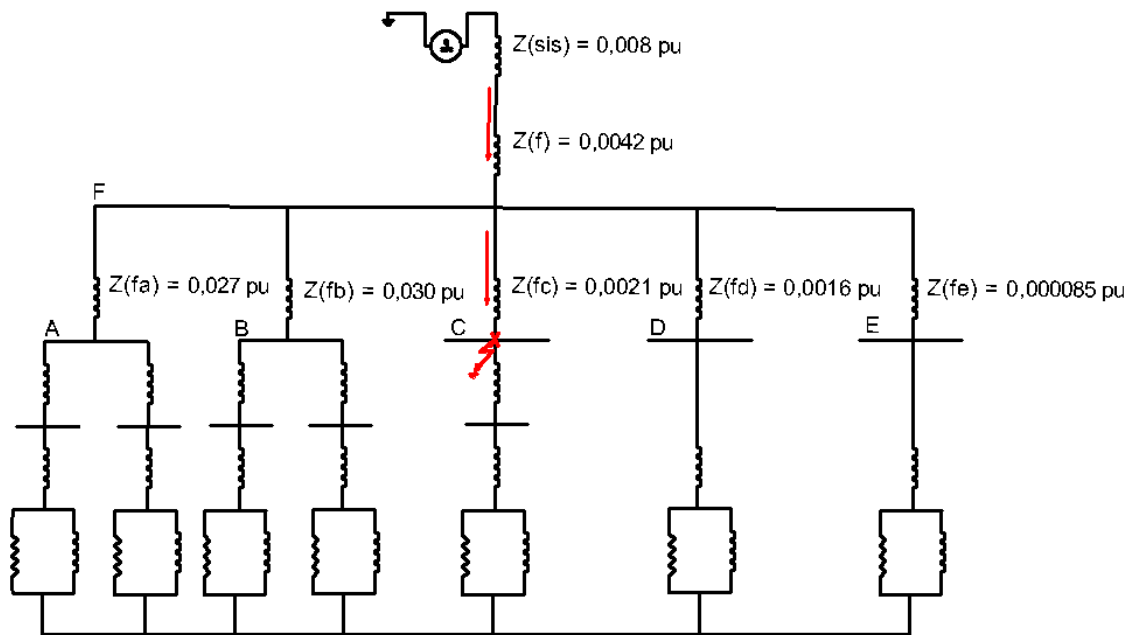
$$I_{cc} = 3,77 [pu] * 101,29 [A] = 381,93 [A]$$

Logo, a corrente de curto no barramento B é 0,381 [KA].

B.4 – CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA NO BARRAMENTO C:

A seguir, diagrama de impedâncias do sistema com um possível curto no barramento C, representado pela figura B-18:

Figura B 18 - Representação de um curto-circuito no barramento C.



As impedâncias que limitam a corrente de curto nesse barramento são $Z(sis)$, $Z(f)$ e $Z(fc)$, figura B19. Logo, a impedância equivalente, figura B 20, será:

$$Z_{eq} = Z_{sis} + Z_f + Z_{fc} = 0,008 + 0,0042 + 0,0021 = 0,0143$$

Figura B 19 - Representação das impedâncias que limitam um curto-circuito no barramento C.

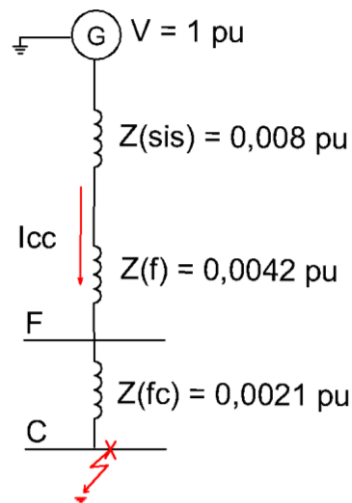
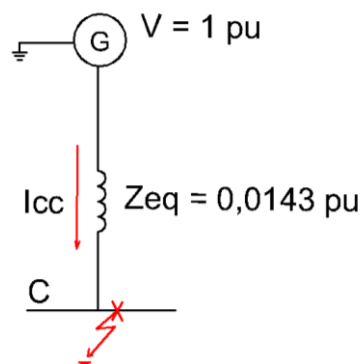


Figura B 20 - Impedância equivalente para um curto no barramento C.



Assim, tem-se que a corrente de curto será:

$$I_{cc} = \frac{V}{Z_{eq}} = \frac{1}{0,0143} = 69,93 \text{ [pu]}$$

Já tendo calculado a corrente base do sistema:

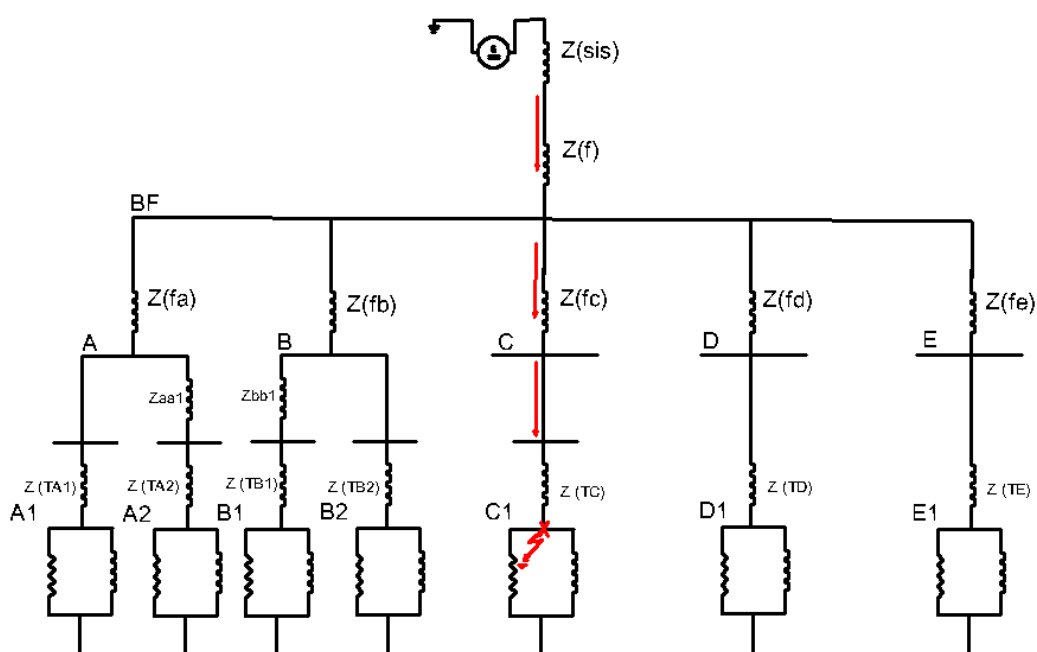
$$I_{cc} = 69,93 \text{ [pu]} * 101,29 \text{ [A]} = 7\,083,21 \text{ [A]}$$

Logo, a corrente de curto no barramento C é 7,08 [KA].

B.4.1 – CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA NA SAÍDA DO TRANSFORMADOR C:

O diagrama de impedâncias do sistema com um possível curto no barramento C1 é representado pela figura B-21:

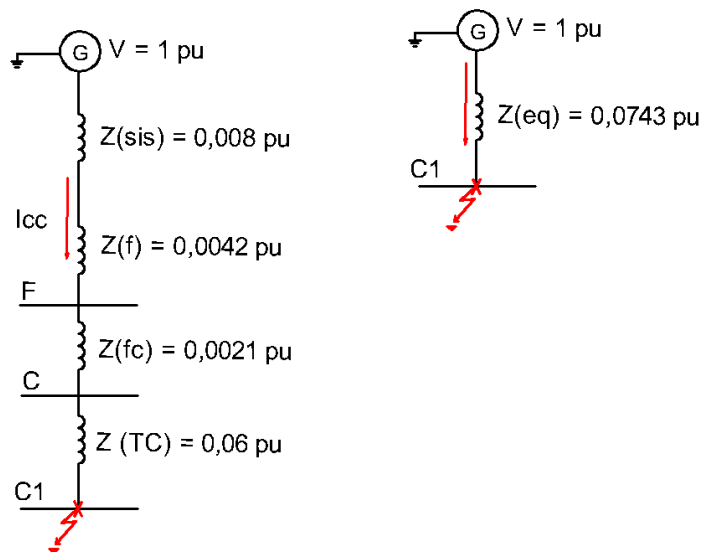
Figura B 21 - Representação de um curto-circuito no barramento C1.



As impedâncias que limitam a corrente de curto nesse barramento são $Z(sis)$, $Z(f)$, $Z(fc)$, $Z(cc1)$ e $Z(TC)$, figura B 22. Logo, a impedância equivalente será:

$$Z_{eq} = Z_{sis} + Z_{fc} + Z_{TC} = 0,008 + 0,0042 + 0,0021 + 0,06 = 0,0743 [p.u]$$

Figura B 22 - Representação das impedâncias que limitam um curto-circuito no barramento C1.



Assim, tem-se que a corrente de curto será:

$$I_{cc} = \frac{V}{Z_{eq}} = \frac{1}{0,0734} = 13,45 \text{ [pu]}$$

Já tendo calculado a corrente base do sistema:

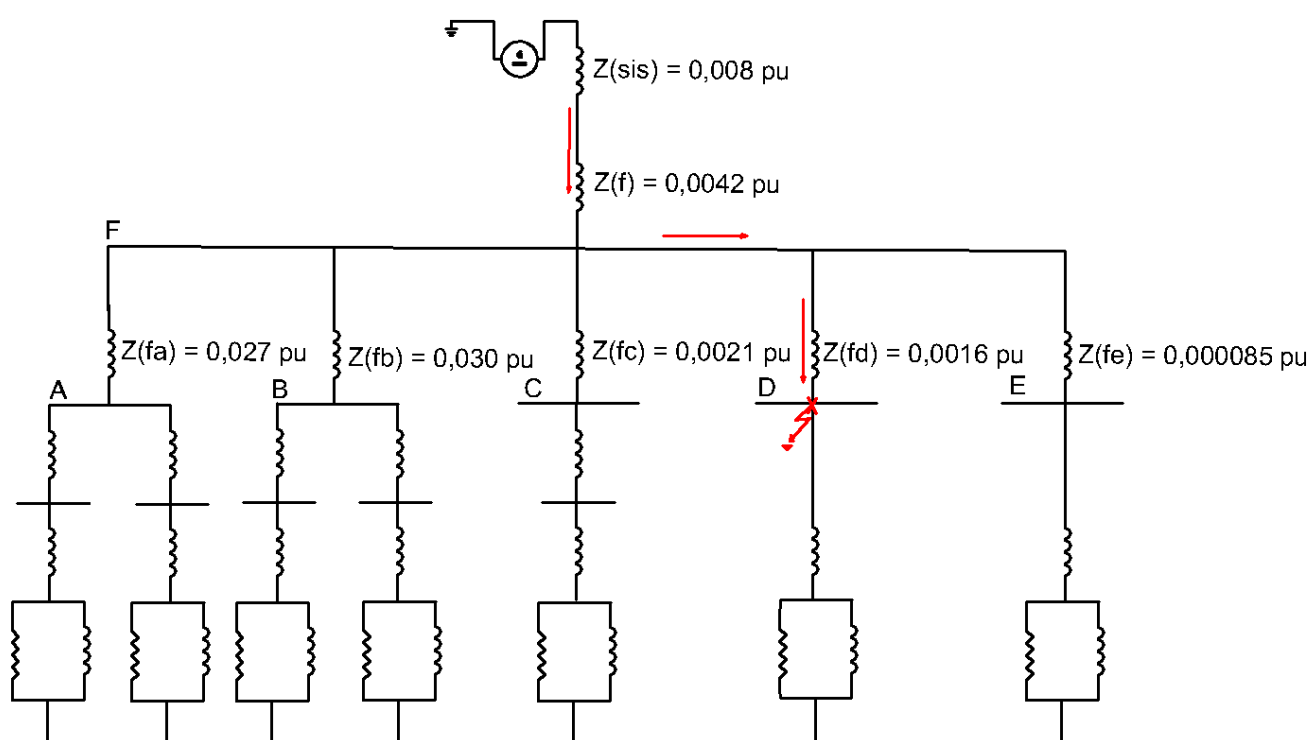
$$I_{cc} = 13,55 \text{ [pu]} * 101,29 \text{ [A]} = 1363,25 \text{ [A]}$$

Logo, a corrente de curto no barramento C é 1,36 [KA].

B.5 – CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA NO BARRAMENTO D:

Na figura B-23 tem-se o diagrama de impedâncias do sistema com um possível curto no barramento D:

Figura B 23 - Representação de um curto-circuito no barramento D.



As impedâncias que limitam a corrente de curto nesse barramento são $Z(sis)$, $Z(f)$ e $Z(fd)$, figura B 24. Logo, a impedância equivalente, figura B 25, será:

$$Z_{eq} = Z_{sis} + Z_f + Z_{fd} = 0,008 + 0,0042 + 0,0016 = 0,0138$$

Figura B 24 - Representação das impedâncias que limitam um curto-circuito no barramento D.

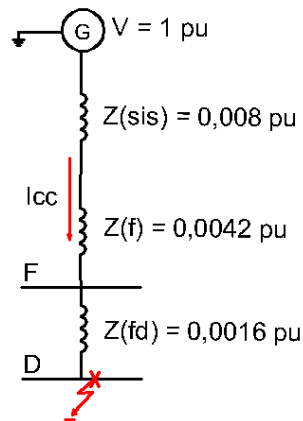
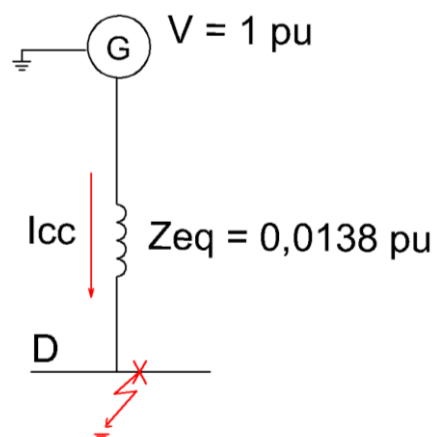


Figura B 25 - Impedância equivalente para um curto no barramento D.



Assim, a corrente de curto será:

$$I_{cc} = \frac{V}{Z_{eq}} = \frac{1}{0,0138} = 72,46 \text{ [pu]}$$

Já tendo calculado a corrente base do sistema:

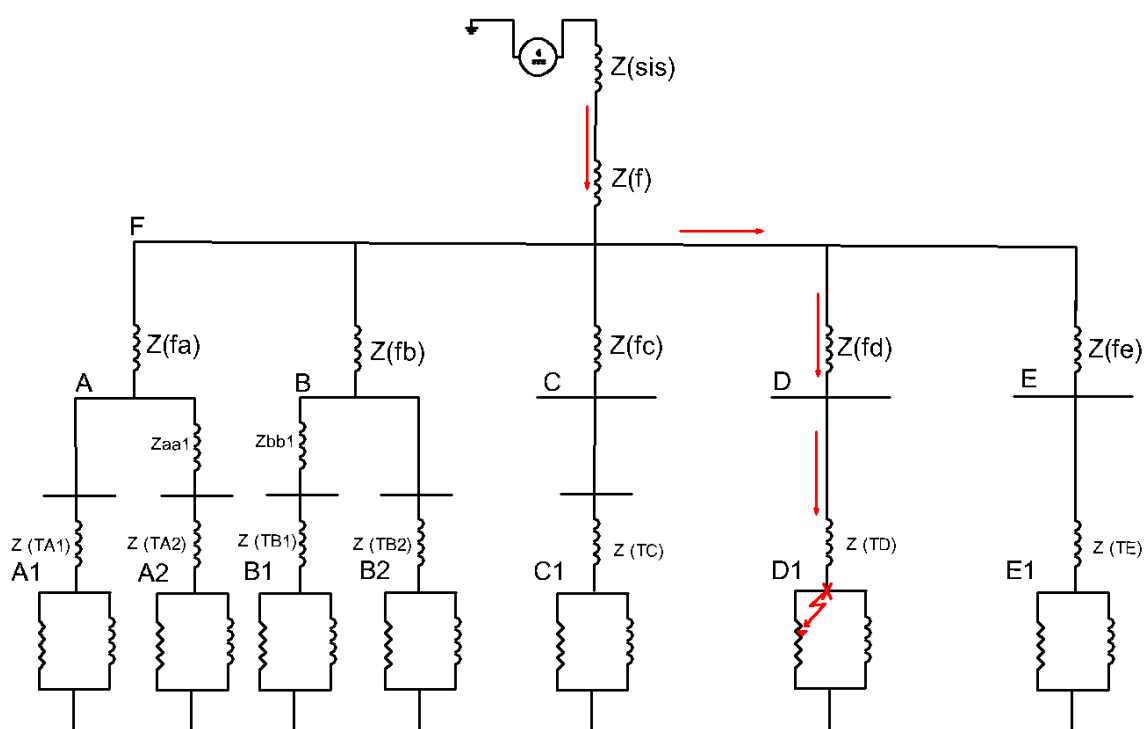
$$I_{cc} = 72,46 \text{ [pu]} * 101,29 \text{ [A]} = 7\,339,85 \text{ [A]}$$

Logo, a corrente de curto no barramento D é 7,33 [KA].

B.5.1 – CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA NA SAÍDA DO TRANSFORMADOR D:

A figura B-26 representa o diagrama de impedâncias do sistema com um possível curto no barramento D1:

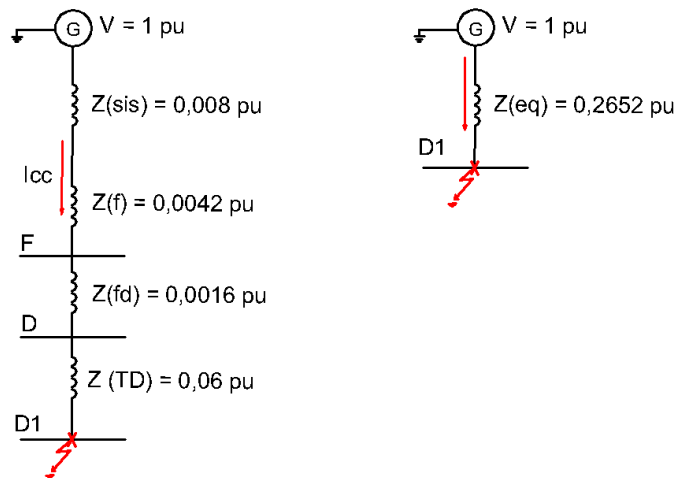
Figura B 26 - Representação de um curto-circuito no barramento D1.



As impedâncias que limitam a corrente de curto nesse barramento são $Z(sis)$, $Z(f)$, $Z(fd)$ e $Z(TD)$, figura B 27. Logo, a impedância equivalente será:

$$Z_{eq} = Z_{sis} + Z_f + Z_{fd} + Z_{TD} = 0,008 + 0,0042 + 0,0016 + 0,06 = 0,0738$$

Figura B 27 - Representação das impedâncias que limitam um curto-circuito no barramento D1.



Assim, a corrente de curto será:

$$I_{cc} = \frac{V}{Z_{eq}} = \frac{1}{0,0738} = 13,55 \text{ [pu]}$$

Já tendo calculado a corrente base do sistema:

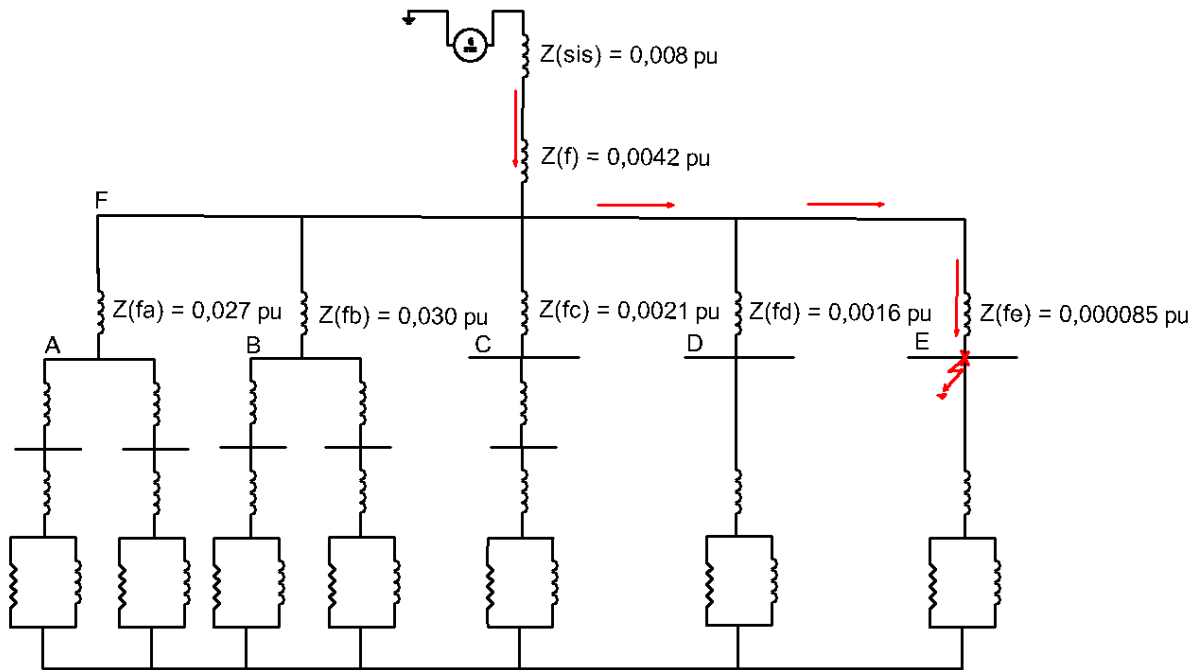
$$I_{cc} = 72,46 \text{ [pu]} * 101,29 \text{ [A]} = 1372,49 \text{ [A]}$$

Logo, a corrente de curto no barramento D é 1,37 [KA].

B.6 – CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA NO BARRAMENTO E:

Na figura B-28 tem-se o diagrama de impedâncias do sistema com um possível curto no barramento E:

Figura B 28 - Representação de um curto-circuito no barramento E.



As impedâncias que limitam a corrente de curto nesse barramento são $Z(sis)$, $Z(f)$ e $Z(fe)$, figura B 29. Logo, a impedância equivalente, figura B 30, será:

$$Z_{eq} = Z_{sis} + Z_f + Z_{fe} = 0,008 + 0,0042 + 0,0042 = 0,012285$$

Figura B 29 - Representação das impedâncias que limitam um curto-circuito no barramento E.

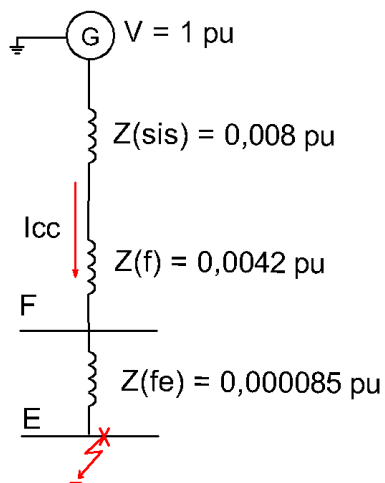
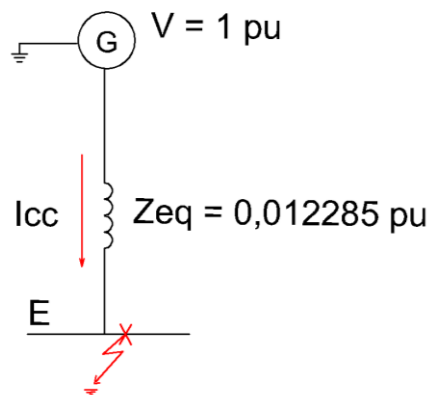


Figura B 30 - - Impedância equivalente para um curto no barramento E.



Assim, a corrente de curto será:

$$I_{cc} = \frac{V}{Z_{eq}} = \frac{1}{0,012285} = 81,4 \text{ [pu]}$$

Já tendo calculado a corrente base do sistema:

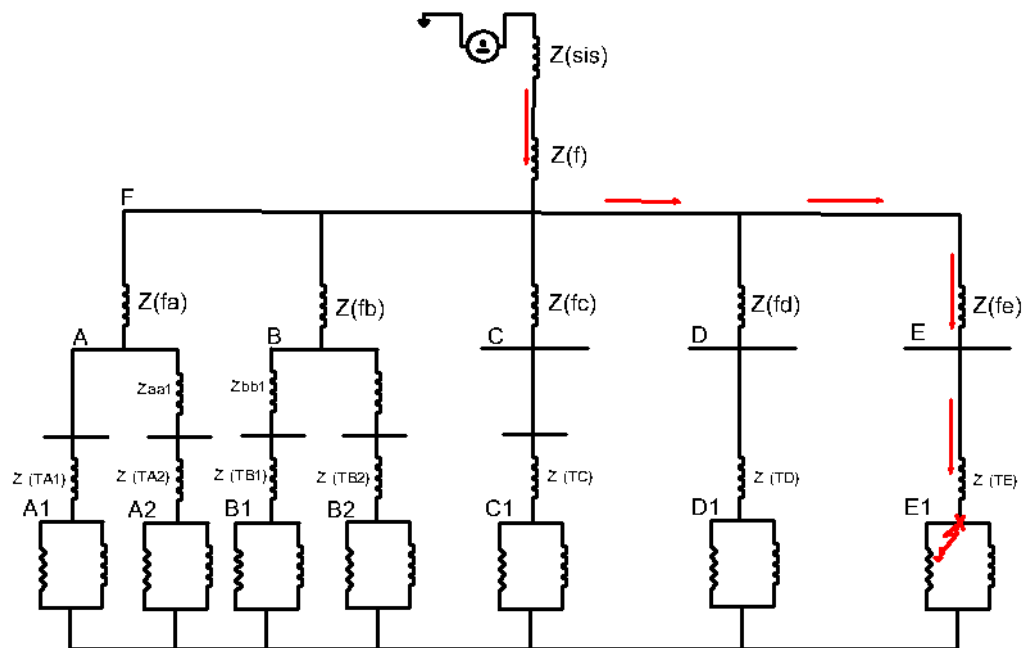
$$I_{cc} = 81,4 \text{ [pu]} * 101,29 \text{ [A]} = 8\,245,01 \text{ [A]}$$

Logo, a corrente de curto no barramento E é 8,24 [KA].

B.6.1 – CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICA NA SAÍDA DO TRANSFORMADOR E:

Na figura B-31 tem-se o diagrama de impedâncias do sistema com um possível curto no barramento E1:

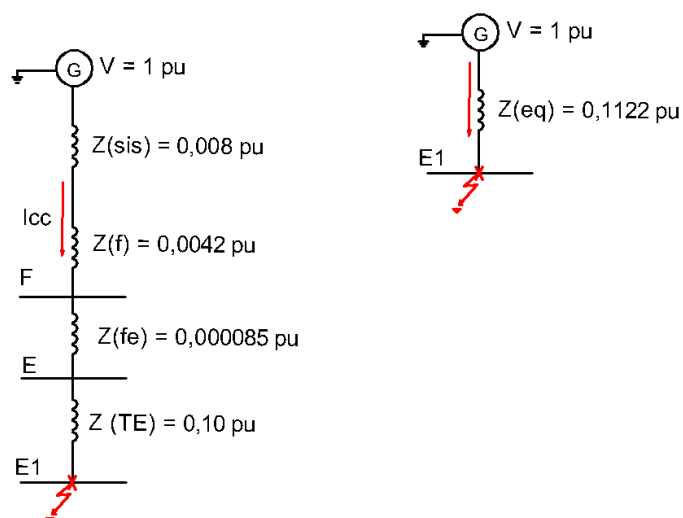
Figura B 31- Representação de um curto-circuito no barramento E1.



As impedâncias que limitam a corrente de curto nesse barramento são $Z(sis)$, $Z(f)$, $Z(fe)$ e $Z(TE)$, figura B 32. Logo, a impedância equivalente será:

$$Z_{eq} = Z_{sis} + Z_f + Z_{fe} + Z_{TE} = 0,008 + 0,0042 + 0,000085 + 0,10 = 0,112285$$

Figura B 32 - Representação das impedâncias que limitam um curto-circuito no barramento E1.



Assim, que a corrente de curto será:

$$I_{cc} = \frac{V}{Z_{eq}} = \frac{1}{0,1122} = 8,9 [pu]$$

Já tendo calculado a corrente base do sistema:

$$I_{cc} = 8,9 [pu] * 101,29 [A] = 902,07 [A]$$

Logo, a corrente de curto no barramento E é 0,9 [KA].

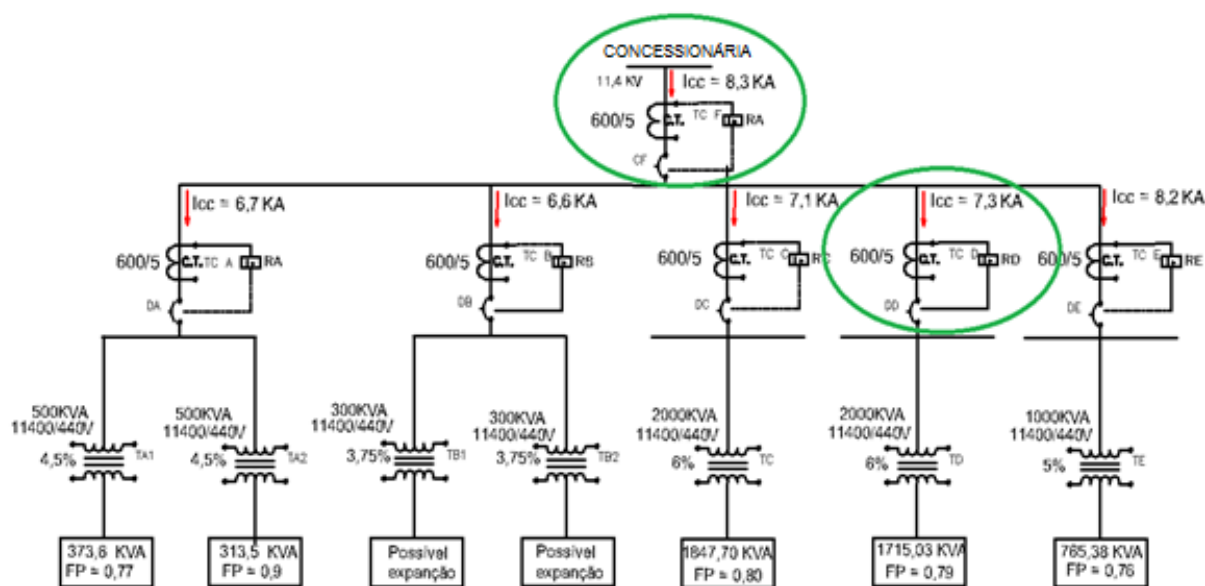
APÊNDICE C – PARAMETRIZAÇÃO DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE DOS RAMAIS FD, FE, FA E FB

Como o sistema estudado é um sistema radial, coordenando o ramal que possui maior carga, com o ramal de entrada, os demais relés já estarão coordenados. De forma que, todos eles atuarão antes que o relé de entrada atue, retirando toda indústria de operação. A seguir é demonstrado a construção do coordenograma dos demais relés.

C.1 RELÉ 51 E 50 DO TRANSFORMADOR TD

A figura C-1, representa o posicionamento dos relés a serem coordenados:

Figura C 1 - Posicionamento dos relés RF e RD.



As correntes desse barramento são:

$$I_n = 86,85 \text{ [A]}$$

$$I_{cc} = 7339,85 \text{ [A]}$$

$$RTC = 600/5$$

Então;

$$TAP = \frac{1,2 * I_{n_{prim}}}{RTC} = \frac{1,2 * 86,85}{\frac{600}{5}} = 0,86 [A]$$

O *TAP* do relé RD é 0,86 [A].

Sabe-se que o relé na entrada da indústria leva 0,72 [s] para atuar para uma corrente de curto de 5000 [A]. Assim, o relé do ramal D deve atuar antes, para essa mesma corrente. Então o tempo de atuação do relé RD será:

$$td = tf - 0,3 = 0,72 + 0,30 = 0,42 [s]$$

Em 0,42 [s], RD atuará para 5000 [A]. Com essa informação, pode-se calcular o DT desse relé:

$$M = \frac{I_{cc}}{RTC * Tape} = \frac{5000}{\left(\frac{600}{5}\right) * 0,86} = 48,44$$

$$DT = \frac{t * (M^{\alpha} - 1)}{K} = \frac{0,42 * (48,44 - 1)}{13,5} = 1,47$$

A parametrização da unidade 50 será:

$$I < I_{cc_{prim}}$$

$$I < 7339,85 [A]$$

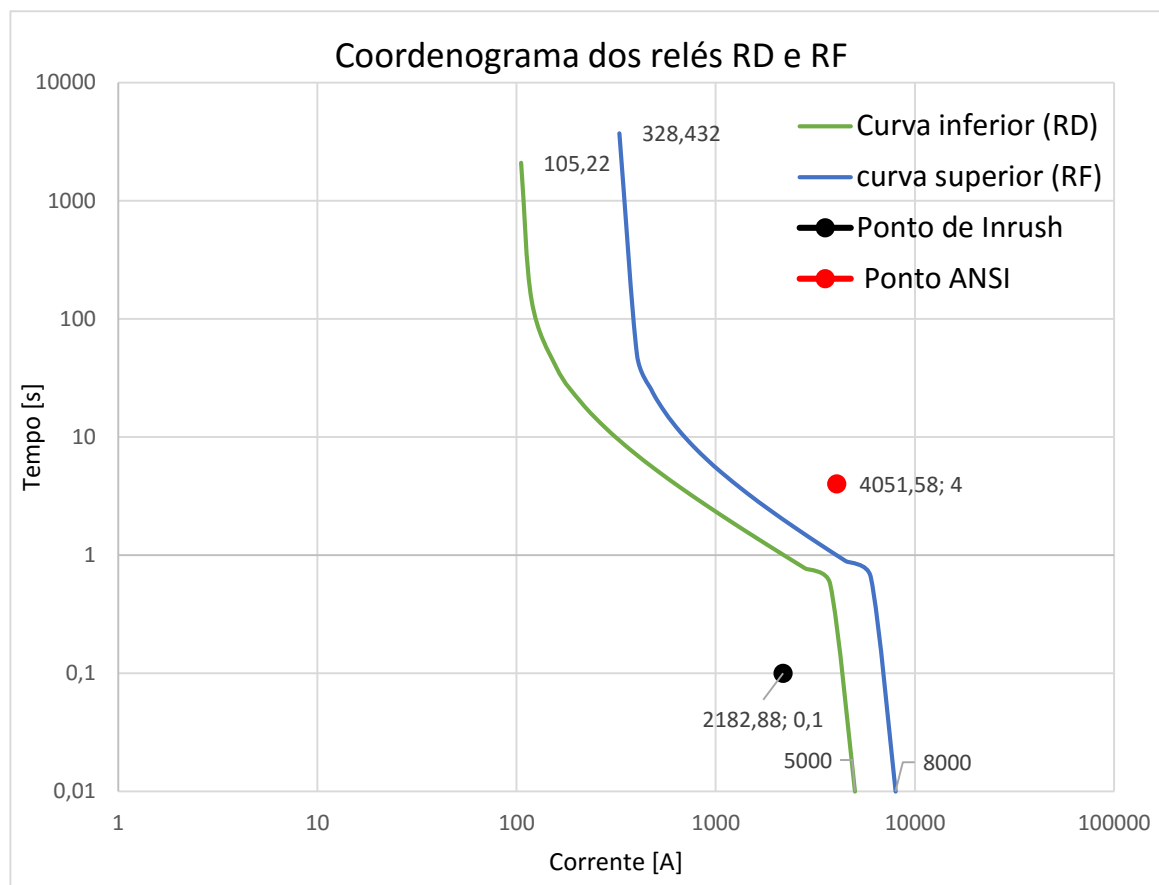
A corrente de curto-circuito máxima nesse barramento é 7339,85 [A]. Logo, esse relé será ajustado para atuar a partir de 6000 [A], assim:

$$I = \frac{I_{cc_{prim}}}{RTC} = \frac{6000}{\frac{600}{5}} = 75 [A]$$

Sintetizando: *TAP* = 0,86 [A]; DT = 1,47 e I = 50 [A].

Abaixo, tem-se as curvas desses relés, na figura C2:

Figura C 2 - Coordenograma dos relés RD e RF.

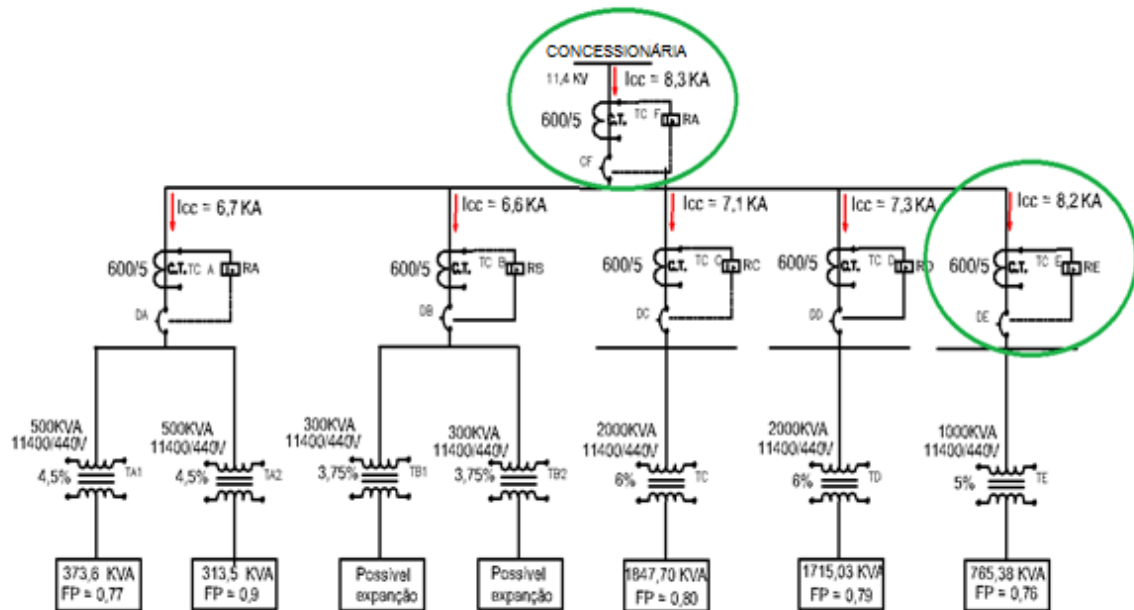


Esses relés, RD e RF, operam com retaguarda, então, caso RD não atue, RF entra em operação, do contrário será sempre RD que irá atuar. Vale ressaltar, que o ponto de inrush do transformador TD não ultrapassa as curvas, ou seja, os relés não atuarão na energização do transformador. O ponto ANSI está acima das mesmas, o que significa que caso a suportabilidade térmica do transformador seja atingida, os relés atuarão.

C.2 RELÉ 51 E 50 DO TRANSFORMADOR TE

A figura a seguir, representa o posicionamento dos relés a serem coordenados:

Figura C 3- Posicionamento dos relés RF e RE.



As correntes desse barramento são:

$$I_n = 38,76 \text{ [A]}$$

$$I_{CC} = 8245,01 \text{ [A]}$$

$$R_{TC} = 600/5$$

Então;

$$T_{APE} = \frac{1,2 * I_{n_{prim}}}{R_{TC}} = \frac{1,2 * 38,76}{\frac{600}{5}} = 0,38 \text{ [A]}$$

O TAP do relé RD é 0,38 [A].

Sabe-se que o relé da entrada da indústria leva 0,72 [s] para atuar para uma corrente de curto de 5000 [A]. Assim, o relé do ramal D deve atuar antes, para essa mesma corrente. Então o tempo de atuação do relé RD será:

$$te = tf - 0,3 = 0,72 + 0,30 = 0,42 [s]$$

Em 0,42 [s], RE atuará para 5000 [A]. Com essa informação, pode-se calcular o DT desse relé:

$$M = \frac{I_{cc}}{RTC * Tape} = \frac{5000}{\left(\frac{600}{5}\right) * 0,48} = 109,64$$

$$DT = \frac{t * (M^{\infty} - 1)}{K} = \frac{0,42 * (109,64 - 1)}{13,5} = 3,38$$

A parametrização da unidade 50 será:

$$I < I_{cc_{prim}}$$

$$I < 8245,01 [A]$$

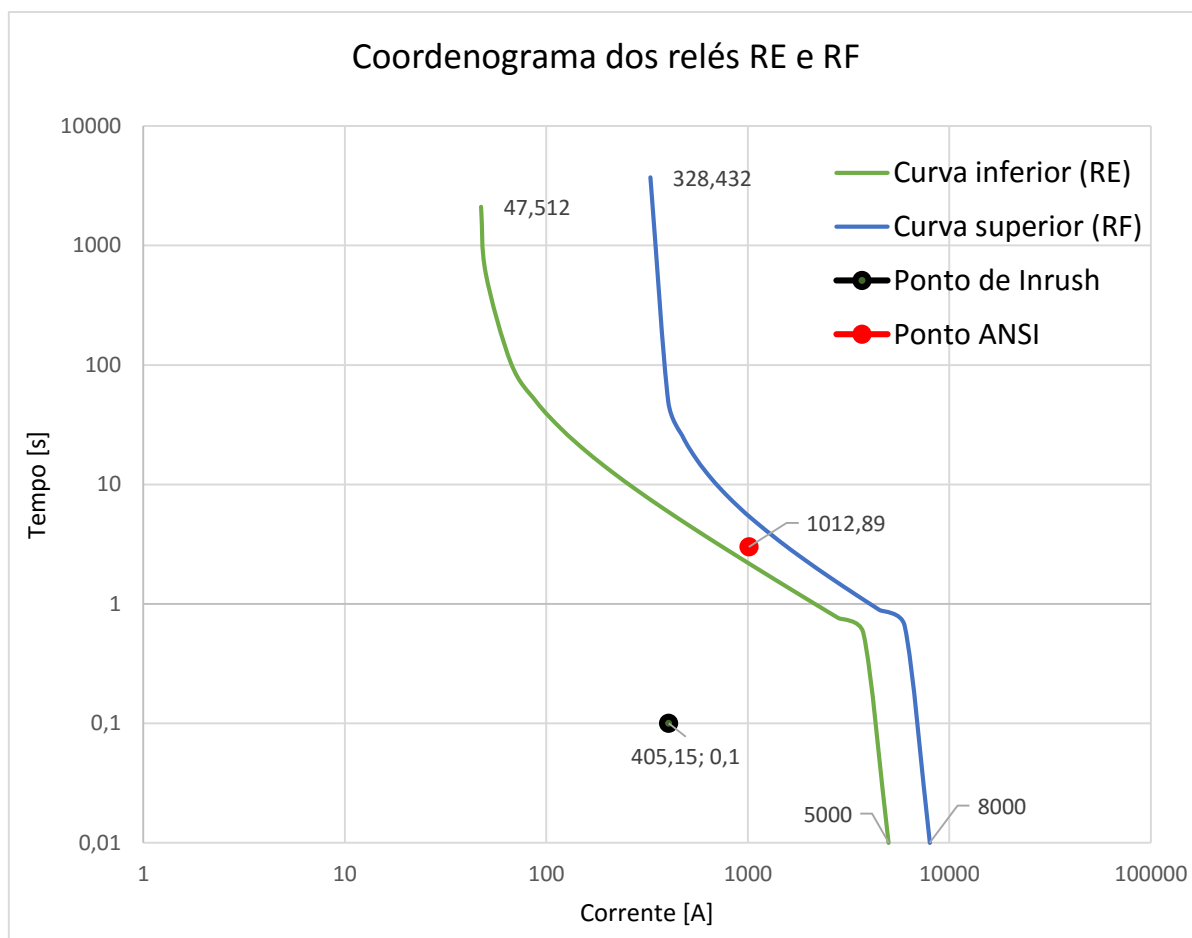
A corrente de curto-circuito máxima nesse barramento é 8245,01 [A]. Logo, esse relé será ajustado para atuar a partir de 6000 [A], assim:

$$I = \frac{I_{cc_{prim}}}{RTC} = \frac{6000}{\frac{600}{5}} = 50 [A]$$

Sintetizando: $TAP = 0,38 [A]$; $DT = 3,38$ e $I = 50 [A]$.

Por fim, na figura C-4, tem-se as curvas dos relés parametrizados acima:

Figura C 4 - Coordenograma dos relés RE e RF.



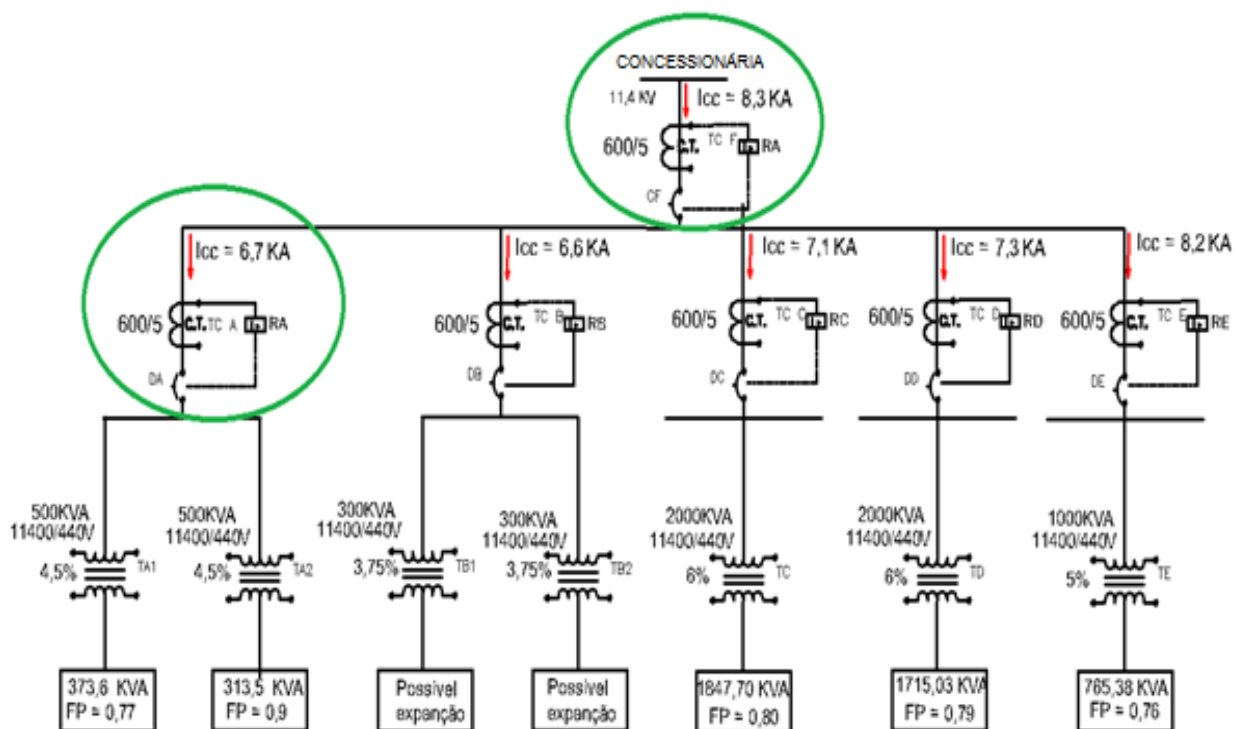
Diferentemente dos relés anteriores, esses não possuem retaguarda em relação ao ponto ANSI. Esse ponto está entre as duas curvas, o que significa que, caso o limite térmico do transformador do barramento E seja atingido, o relé RF irá atuar, ao invés do relé RE, tirando todo o sistema de operação.

No entanto, nenhum dos relés será sensibilizado pela corrente de inrush.

C.3 RELÉ 51 E 50 DOS TRANSFORMADORES TA1 E TA2

A figura C-5, representa o posicionamento dos relés a serem coordenados:

Figura C 5 - Posicionamento dos relés RF e RA.



As correntes desse barramento são:

$$I_n = 34,57 \text{ [A]}$$

$$I_{CC} = 6797,98 \text{ [A]}$$

$$R_{TC} = 600/5$$

Então;

$$T_{APE} = \frac{1,2 * I_{n_{prim}}}{R_{TC}} = \frac{1,2 * 34,57}{\frac{600}{5}} = 0,34 \text{ [A]}$$

O TAP do relé RA é 0,34 [A].

Sabe-se que o relé da entrada da indústria leva 0,72 [s] para atuar para uma corrente de curto de 5000 [A]. Assim, o relé do ramal D deve atuar antes, para essa mesma corrente. Então o tempo de atuação do relé RD será:

$$ta = tf - 0,3 = 0,72 + 0,30 = 0,42 [s]$$

Em 0,42 [s], RA atuará para 5000 [A]. Com essa informação, pode-se calcular o DT desse relé:

$$M = \frac{I_{cc}}{RTC * Tape} = \frac{5000}{\left(\frac{600}{5}\right) * 0,34} = 122,54$$

$$DT = \frac{t * (M^{\alpha} - 1)}{K} = \frac{0,42 * (122,54 - 1)}{13,5} = 3,78$$

A parametrização da unidade 50 será:

$$I < I_{cc_{prim}}$$

$$I < 6797,98 [A]$$

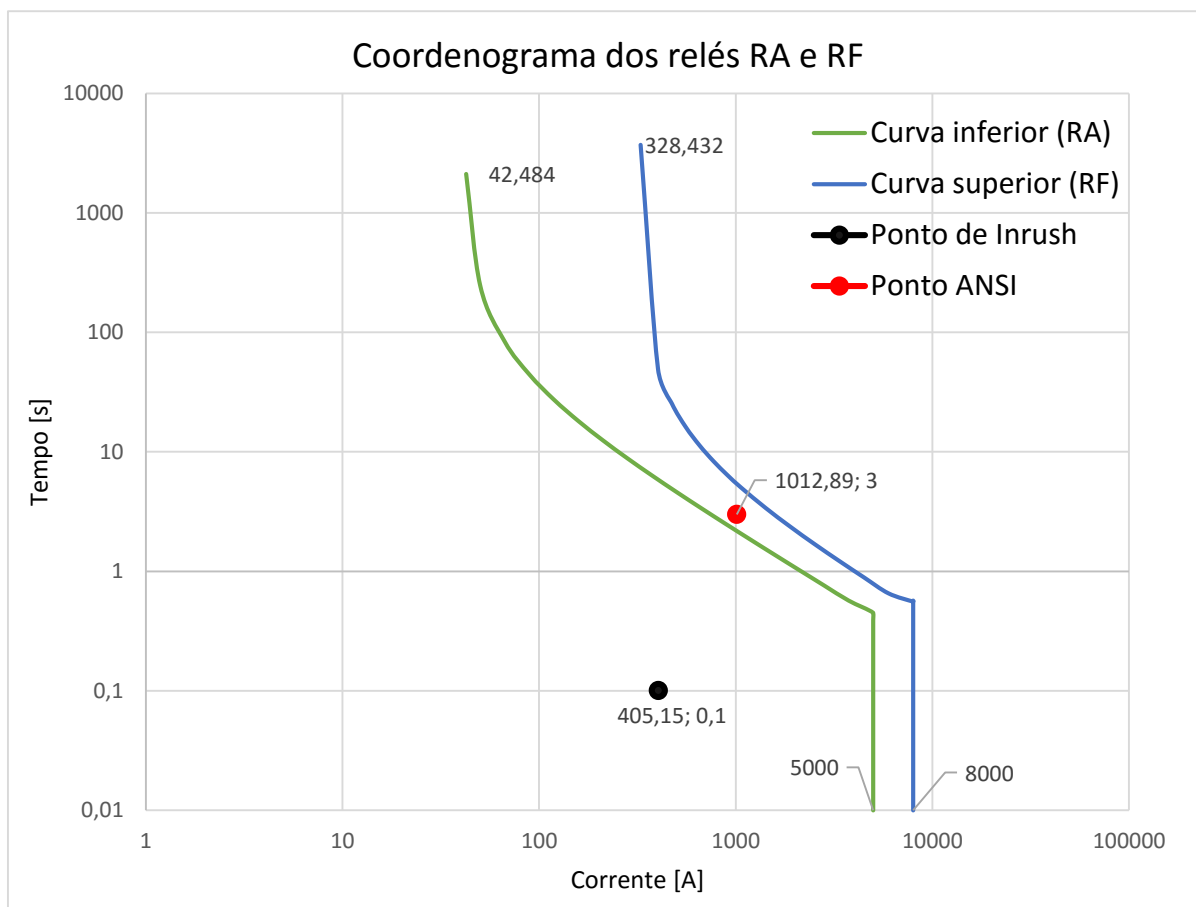
A corrente de curto-circuito máxima nesse barramento é 6797,98 [A]. Logo, esse relé será ajustado para atuar a partir de 6000 [A], assim:

$$I = \frac{I_{cc_{prim}}}{RTC} = \frac{6000}{\frac{600}{5}} = 50 [A]$$

Sintetizando: $TAP = 0,34 [A]$; $DT = 3,78$ e $I = 50 [A]$.

Segue abaixo as curvas dos relés:

Figura C 6 - Coordenograma dos relés RA e RF.



As correntes dos pontos de inrush e ANSI nesse barramento, são a soma das correntes de inrush e ANSI dos transformadores em paralelo.

Como os relés anteriores, RE e RF, a coordenação do relé RA com o RF, não garante a retaguarda do mesmo. Ou seja, no limite térmico dos transformadores do barramento A, o relé RF será sensibilizado, retirando toda a carga do sistema.

No entanto, assim como os outros, a corrente de inrush não irá sensibilizar nenhum dos dois relés.

C.4 Relé 51 e 50 dos Transformadores TB1 e TB2

As correntes desse barramento são:

$$I_n = 30,38 \text{ [A]}$$

$$I_{CC} = 6663,81 \text{ [A]}$$

$$RTC = 600/5$$

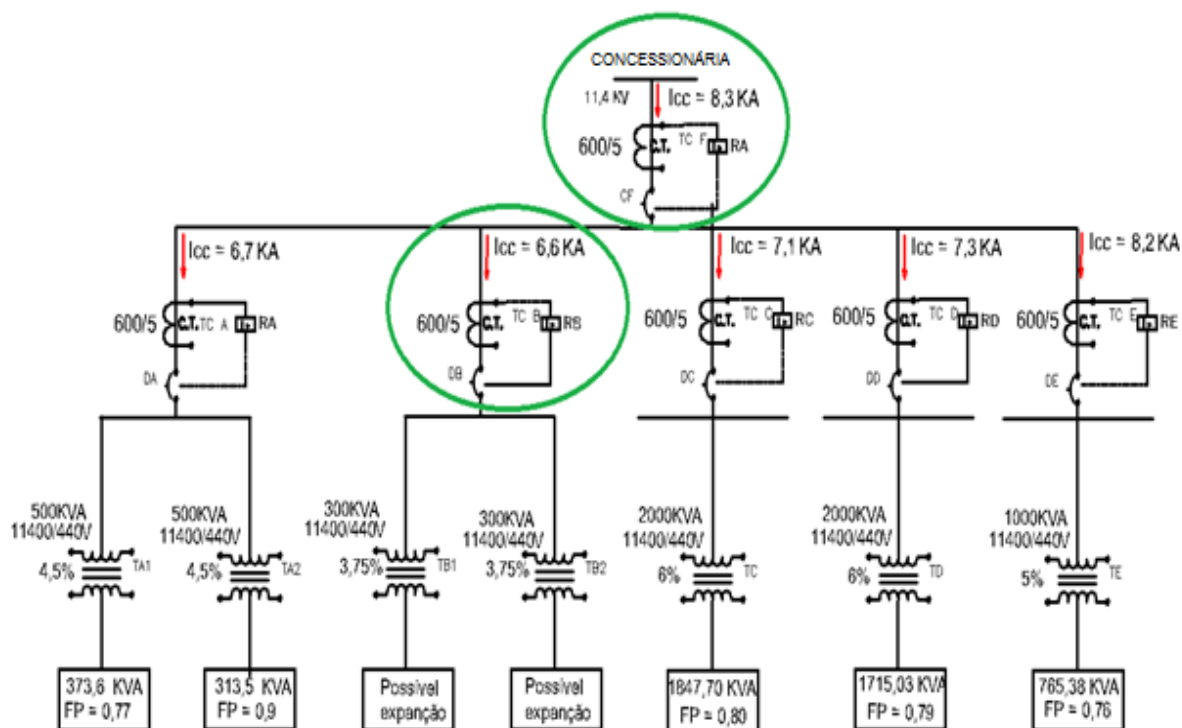
Então:

$$TAP_E = \frac{1,2 * I_{n_{prim}}}{RTC} = \frac{1,2 * 30,38}{\frac{600}{5}} = 0,30 \text{ [A]}$$

O TAP do relé RB é 0,30 [A].

A figura C-7, representa o posicionamento dos relés a serem coordenados:

Figura C 7 - Posicionamento dos relés RF e RB.



Sabe-se que o relé da entrada da indústria leva 0,72 [s] para atuar para uma corrente de curto de 5000 [A]. Assim, o relé do ramal B deve atuar antes, para essa mesma corrente. Então o tempo de atuação do relé RB será:

$$tb = tf - 0,3 = 0,72 + 0,30 = 0,42 \text{ [s]}$$

Em 0,42 [s], RB atuará para 5000 [A]. Com essa informação, pode-se calcular o DT desse relé:

$$M = \frac{I_{cc}}{RTC * Tape} = \frac{5000}{\left(\frac{600}{5}\right) * 0,30} = 138,88$$

$$DT = \frac{t * (M^{\alpha} - 1)}{K} = \frac{0,42 * (138,88 - 1)}{13,5} = 4,28$$

A parametrização da unidade 50 será:

$$I < I_{cc_{prim}}$$

$$I < 6663,81 \text{ [A]}$$

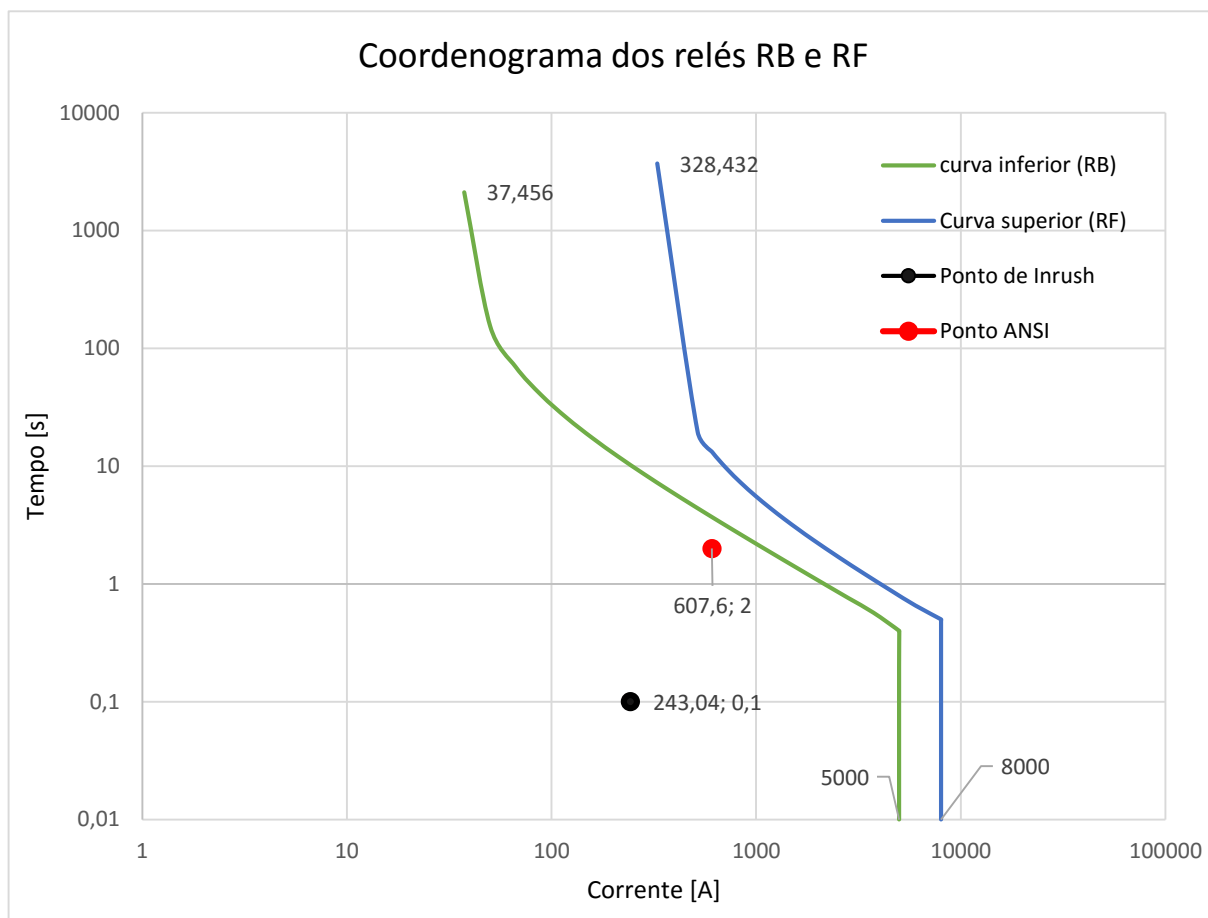
A corrente de curto-circuito máxima nesse barramento é 6663,81 [A]. Logo, esse relé será ajustado para atuar a partir de 5000 [A], assim:

$$I = \frac{I_{cc_{prim}}}{RTC} = \frac{5000}{\frac{600}{5}} = 50 \text{ [A]}$$

Sintetizando: $TAP = 0,30 \text{ [A]}$; $DT = 4,28$ e $I = 62,5 \text{ [A]}$.

Logo, tem-se o coordenograma desses relés na figura C-8:

Figura C 8 - Coordenograma dos relés RB e RF.



As correntes dos pontos de inrush e ANSI nesse barramento, são a somas das correntes de inrush e ANSI dos trafos em paralelo.

Como na coordenação anterior, os pontos de inrush e ANSI estão também abaixo das curvas dos dois relés. Isso que mostra que o relé RF não operará como retaguarda do relé RB.

C.5 ESPECIFICAÇÃO DE DISJUNTORES

Para garantir a proteção das cargas, já que alguns relés não operam com retaguarda, serão especificados disjuntores, que serão alocados nas entradas dos transformadores.

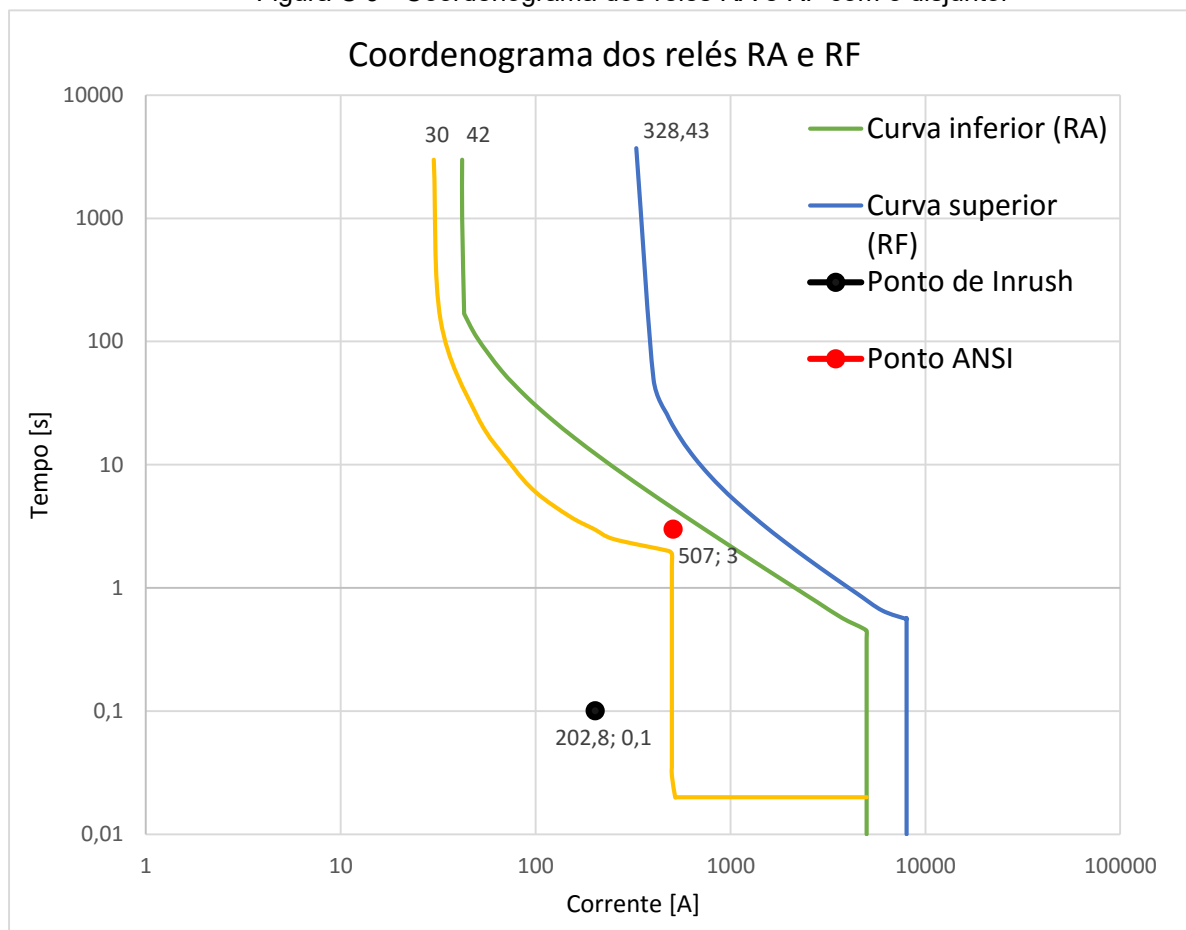
C.5.1 ESPECIFICAÇÃO DE DISJUNTORES PARA TRANSFORMADOR A1 E A2

De acordo com a tabela 4, do capítulo 4, e com a tabela 8 do capítulo 5 têm-se que as correntes que chegam no barramento do transformador A1 e A2 (que são iguais) são:

- $I_{cc} = 8\,302,45 \text{ [A]}$
- $I_n = 25,35 \text{ [A]}$

Consultando o catálogo de disjuntores de caixa moldada da WEG, o disjuntor escolhido foi o DWB 160 D de 30 [A], 17 I_n (proteção térmica ajustável e magnética fixa). A curva foi traçada considerando 20% de sobrecarga. O catálogo também informa a curva desse disjuntor, que foi colocada junto com a dos relés como pode ser visto na figura C9:

Figura C 9 - Coordenograma dos relés RA e RF com o disjuntor



Percebe-se então que, entre o disjuntor e o relé RA, existe retaguarda.

Aqui, as correntes dos pontos de inrush e ANSI são as do próprio do transformador, logo são iguais para os dois transformadores TA1 e TA2, que estão em paralelo. Esse disjuntor então será o mesmo para ambos transformadores, assim como esse coordenograma.

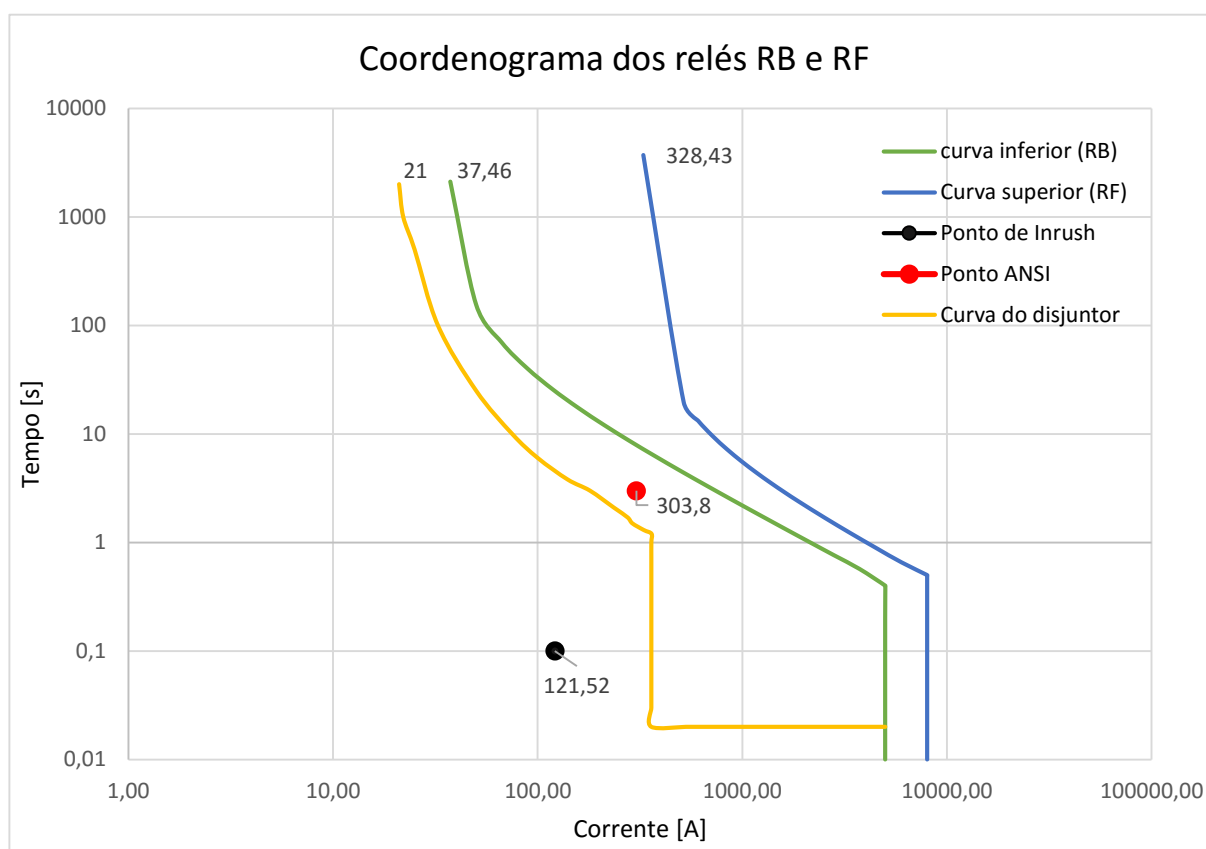
C.5.2 ESPECIFICAÇÃO DE DISJUNTORES PARA TRANSFORMADOR TB1 E TB2

De acordo com a tabela 4, do capítulo 4, e com a tabela 8 do capítulo 5 têm-se que as correntes que chegam no barramento do transformador B1 e B2 (que são iguais) são:

- $I_{cc} = 8\,302,45 \text{ [A]}$
- $I_n = 15,21 \text{ [A]}$

Assim, consultando o catálogo de disjuntores de caixa moldada da WEG, o disjuntor escolhido foi o DWB 160 D de 20 [A], (proteção térmica ajustável e magnética fixa em $17I_n$). A curva foi traçada considerando 20% de sobrecarga. O catálogo também informa a curva desse disjuntor, que foi colocada junto com a dos relés:

Figura C 10 - Coordenograma dos relés RB e RF com o disjuntor.



Aqui também, como no caso anterior, tem-se retaguarda entre o disjuntor e o relé.

As correntes dos pontos de inrush e ANSI são iguais para os dois transformadores TA1 e TA2, que estão em paralelo. Esse disjuntor então será o mesmo para ambos transformadores, assim como esse coordenograma. Na figura a seguir, tem-se a representação do sistema, com todos os relés e disjuntores especificados:

Figura C 1141 - Representação do sistema com os relés.

