



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica

LANA GABRIELLA SOUZA LOPES

**ELABORAÇÃO DE UM PROJETO DE PROTEÇÃO DE UMA
INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE**

Uberlândia
2017

LANA GABRIELLA SOUZA LOPES

**ELABORAÇÃO DE UM PROJETO DE PROTEÇÃO DE UMA
INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE**

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

Orientador: Ph.D. José Wilson Resende

**Uberlândia
2017**

LANA GABRIELLA SOUZA LOPES

**ELABORAÇÃO DE UM PROJETO DE PROTEÇÃO DE UMA
INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE**

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, 13 de dezembro de 2017.

Ph.D. José Wilson Resende
(Orientador)

Dr. José Rubens Macedo Jr
(Convidado 1)

Dr. Antônio Carlos Delaiba
(Convidado 2)

Uberlândia
2017

Este trabalho é dedicado àqueles que estiveram comigo percorrendo esse caminho, em especial à minha mãe Sílvia, ao meu pai Nivaldo, ao meu pai de coração Wellington, por terem me dado apoio e o melhor exemplo que eu poderia ter tido. Ao meu avô Waldivino (in memoriam), que infelizmente não pôde estar comigo até o final dessa trajetória. Ao meu irmão Pedro Augusto, o príncipe da minha vida, que foi por ele que tive força para conquistar os meus objetivos. A minha irmã, Laila Marianne, por sempre ter acreditado em mim.
Meu muito obrigada a vocês.

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. José Wilson Resende, pelo incentivo e orientação deste trabalho. Agradeço a todos que estiverem presentes nesses anos de faculdade, aos colegas que iniciaram essa jornada comigo na Universidade de Uberaba e aos que colegas estão terminando à mesma comigo na Universidade Federal de Uberlândia. Agradeço aos meus pais por todo amor e compreensão, permitindo que eu me dedicasse exclusivamente aos estudos.

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei
para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria
ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.
(Marthin Luther King)*

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de proteção contra sobrecorrente devido às faltas trifásicas para os alimentadores de uma indústria de papel e celulose. O estudo consiste em realizar a proteção, uma vez que sua função é a de causar rápida retirada de operação de qualquer elemento de um sistema, quando o mesmo sofre um curto-circuito, ou quando operar sob condição anormal que cause danos e/ou interfira, na operação do sistema, utilizando as funções instantânea (50) e temporizada (51).

Palavras-chave: Proteção. Alimentador. Curto-Circuito. Relé.

ABSTRACT

This work presents a study of protection against overcurrent due to three-phase faults for the feeders of a pulp and paper industry. The study consists of carrying out the protection, since its function is to cause rapid withdrawal of operation of any element of a system, when it is short-circuited, or when operating under an abnormal condition that causes damage and / or interferes, in the operation of the system, using the instantaneous (50) and timed (51) functions.

Keywords: Protection. Feeder. Short circuit. Relay.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama Unifilar do Alimentador 1	15
Figura 2 - Diagrama Unifilar do Alimentador 2	16
Figura 3 - Diagrama Unifilar do Alimentador 3	16
Figura 4 - Circuito apresentado para cálculo de curto do alimentador 1	18
Figura 5 - Curto na Barra 3 do alimentador 1, pelo PSP	19
Figura 6 - Curto na Barra 4 do alimentador 1, pelo PSP	19
Figura 7 - Circuito apresentado para cálculo de curto do alimentador 2	20
Figura 8 - Curto na Barra 7 do alimentador 2.....	21
Figura 9 - Circuito apresentado para cálculo de curto do alimentador 3	22
Figura 10 -Circuito para ajuste e coordenação dos relés.....	26
Figura 11 - Coordenograma dos Relés 50 e 51 - C/B/A – Ramal 1	33
Figura 12 - Coordenograma dos Relés 50 e 51 - E/D/A - Ramal 2	34
Figura 13 - Coordenograma dos Relés 50 e 51 - G/F/A - Ramal 3	35
Figura 14 - Coordenograma dos Relés 50 e 51 - I/H/A – Ramal 4.....	36
Figura 15 - Coordenograma dos Relés 50 e 51 - L/J/A - Ramal 5	37
Figura 16 - Coordenograma dos Relés 50 e 51 - N/M/A – Ramal 6.....	38
Figura 17 - Circuito de Entrada da Indústria	43
Figura 18 - Diagrama Unifilar do Alimentador 1	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados de curto circuito no alimentador 1.....	20
Tabela 2 - Resultados do curto circuito no alimentador 2.....	21
Tabela 3 - Resultados do curto circuito no alimentador 3.....	22
Tabela 4 - Resultado do Fluxo de Potência.....	23
Tabela 5 - Resultados obtidos em cada barra.....	24
Tabela 6 - Correntes obtidas nos ramos pelo Fluxo de Potência	24
Tabela 7 - Valores de RTC.....	28
Tabela 8 - Resultados de ajuste e coordenação do Ramal 1	32
Tabela 9 - Resultados de ajuste e coordenação do Ramal 2	34
Tabela 10 - Resultados de ajuste e coordenação do Ramal 3	35
Tabela 11 - Resultados de ajuste e coordenação do Ramal 4	36
Tabela 12 - Resultados de ajuste e coordenação do Ramal 5	37
Tabela 13 - Resultados de ajuste e coordenação do Ramal 6	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PSP-UFU – Plataforma de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Uberlândia

ANSI – American National Standards Institute

AT – Alta Tensão

BT – Baixa Tensão

RTC – Relação de Transformação de Transformador de Corrente

Sumário

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Justificativa	13
1.2 Objetivo	14
2 DIAGRAMA UNIFILAR	15
3 CURTO-CIRCUITO.....	18
3.1 Alimentador 1	18
3.2 Alimentador 2	20
3.3 Alimentador 3	21
4 FLUXO DE POTÊNCIA.....	23
5 AJUSTE E COORDENAÇÃO DOS RELÉS	25
5.1 Ajuste e Coordenação do Ramal 1	28
5.2 Ajuste e Coordenação do Ramal 2	34
5.3 Ajuste e Coordenação do Ramal 3	35
5.4 Ajuste e Coordenação do Ramal 4	36
5.5 Ajuste e Coordenação do Ramal 5	37
5.6 Ajuste e Coordenação do Ramal 6	38
6 CONCLUSÃO	39
REFERÊNCIAS	40
ANEXO 1	41
ANEXO 2	43

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência são planejados para disponibilizar energia com qualidade, confiabilidade e continuidade, porém, estão constantemente expostos a circunstâncias como: descargas atmosféricas, falhas na operação, dentre outros. Assim, torna-se necessário um sistema de proteção seletivo e eficaz para assegurar a confiabilidade e a continuidade no suprimento de energia.

A proteção dos sistemas elétricos de potência é fundamental para a manutenção do fornecimento da energia elétrica aos consumidores e para a segurança dos equipamentos altamente dispendiosos que compõem o sistema elétrico.

A utilização de relés de proteção, possibilita controlar e minimizar os efeitos de quaisquer falhas que possam ocorrer. O relé sente a anormalidade no sistema, e o mesmo comanda a retirada do elemento defeituoso.

A proteção de sistemas elétricos busca então oferecer ao mercado um serviço cada vez mais estável, confiável e seguro.

1.1 Justificativa

O sistema elétrico está sujeito a falhas, sejam provenientes de circunstâncias ambientais, de manejo de equipamentos ou de instabilidade no sistema. Essas falhas, por sua vez, podem promover na rede um curto-circuito que deve ser extinto de tal forma que se garanta a proteção das fontes de energia e demais equipamentos instalados no sistema elétrico, visando eliminar possíveis danos aos mesmos e garantindo a integridade das pessoas que trabalham e/ou usufruem do sistema (Hewitson et al., 2004).

Para que sejam minimizados os efeitos que os curtos-circuitos podem causar no sistema elétrico é realizado o estudo de coordenação de proteção de sobrecorrente, pelo fato de as indústrias terem a necessidade de ter o projeto de proteção de seu sistema elétrico que aborda os principais aspectos de um sistema de proteção, da estrutura básica a aplicações específicas, detalhando um conjunto de

dispositivos responsáveis por garantir a desconexão diante de operacionalidade fora dos limites e por fornecer informações para recuperação do sistema elétrico.

1.2 Objetivo

O objetivo deste é garantir que elevadas correntes de curto-circuito não permaneçam circulando por um longo período, o que poderia provocar inúmeros danos aos equipamentos elétricos.

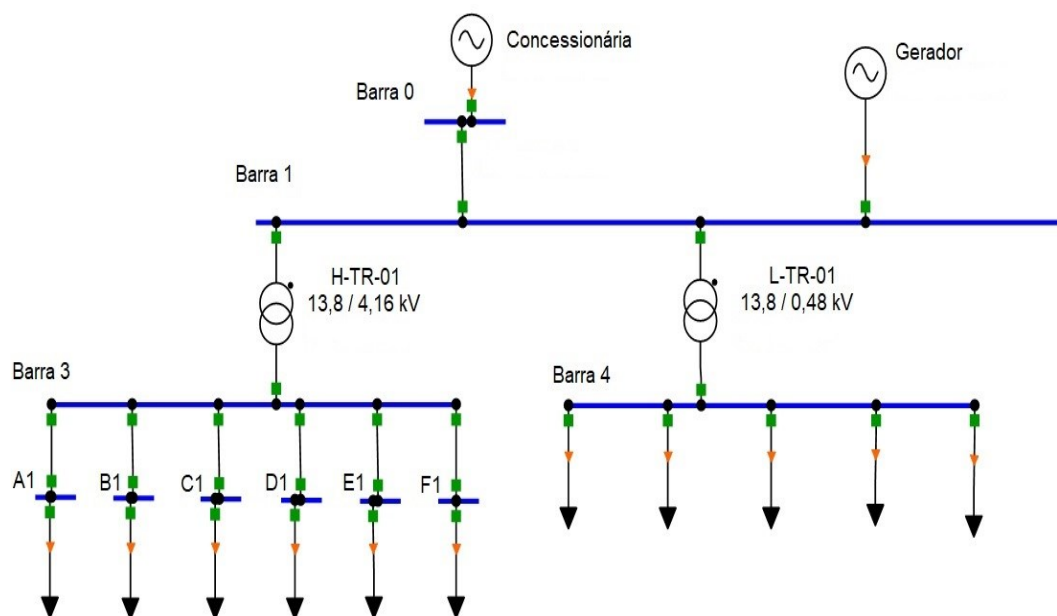
Os cálculos serão realizados com ajuda de softwares, assim como o ajuste e coordenação dos relés, os quais serão detalhados nos capítulos a seguir.

2 DIAGRAMA UNIFILAR

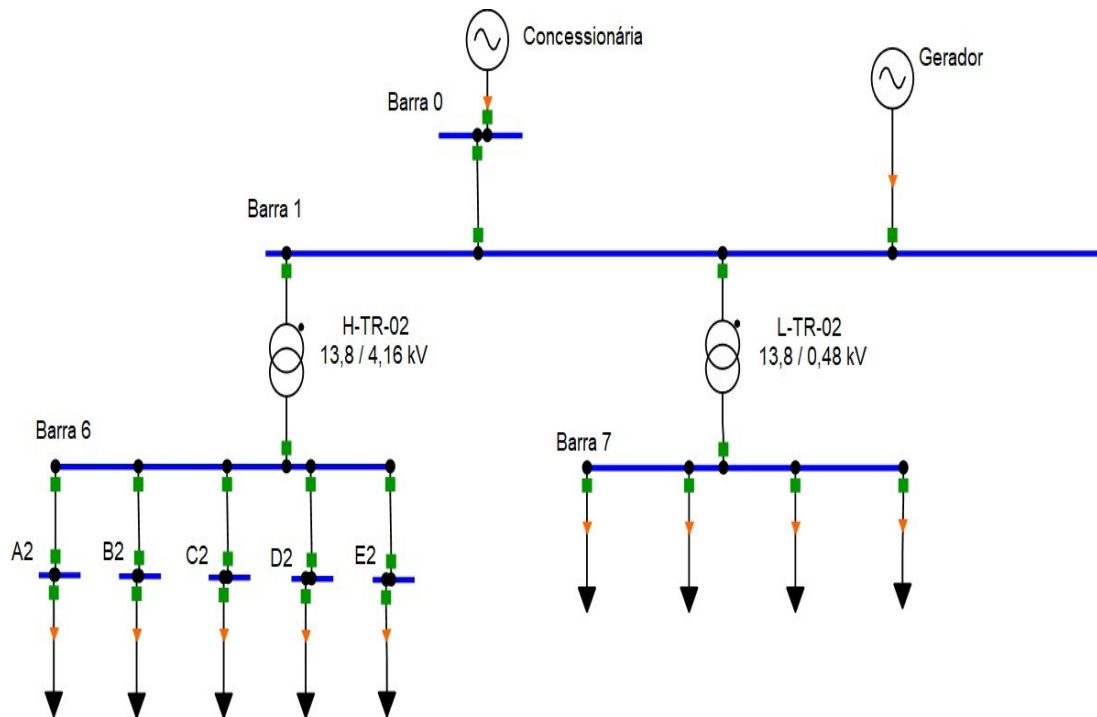
Com a ajuda do software PSP-UFG – Plataforma de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Uberlândia, é inserido o Diagrama Unifilar de uma indústria de papel e celulose, o mesmo encontra-se no final deste (Anexo 1) em folha A3.

Este diagrama, permite com que seja dividido em três alimentadores, como forma de facilitar os cálculos. Os três são vistos a seguir:

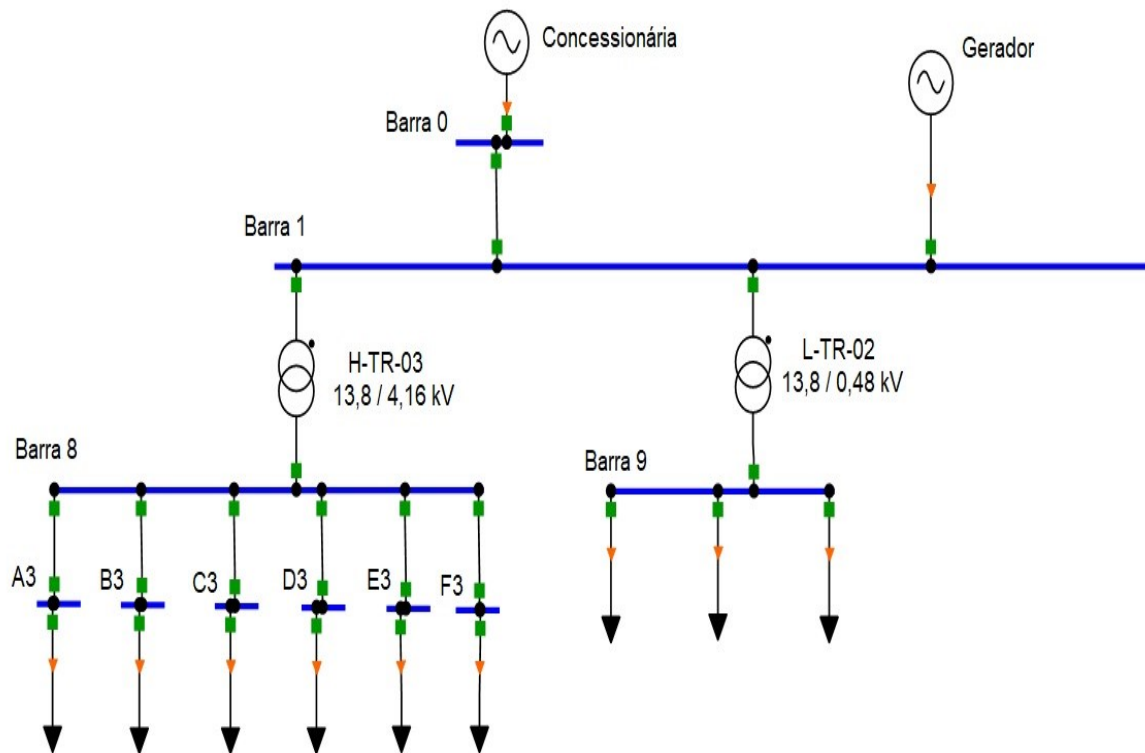
Figura 1 - Diagrama Unifilar do Alimentador 1



Fonte – Do autor

Figura 2 - Diagrama Unifilar do Alimentador 2

Fonte – Do autor

Figura 3 - Diagrama Unifilar do Alimentador 3

Fonte – Do autor

Será realizado o estudo destes onde será detalhado:

- Cálculo de curto circuito;
- Cálculo dos fluxos de potência;
- Dimensionamento dos TC's;
- Ajuste e coordenação de relés (50/51).

3 CURTO-CIRCUITO

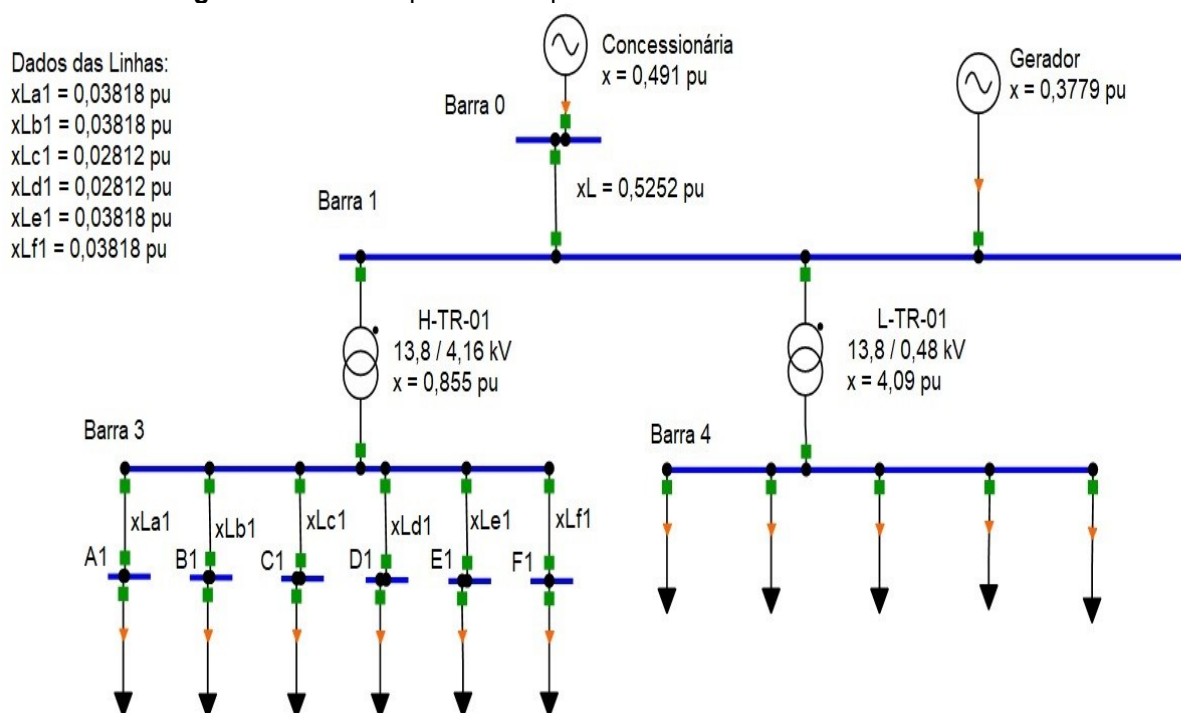
Um curto-circuito é um fenômeno produzido no momento em que uma corrente elétrica mais forte passa por um circuito e o mesmo, sofre uma queda e cria uma descarga elétrica que pode danificar o mesmo circuito elétrico.

Para evitar um curto-circuito, faz-se necessário que toda instalação elétrica seja executada por profissionais experientes e gabaritados. Além disso, algumas medidas de segurança como a instalação de disjuntores ou fusíveis são imprescindíveis para se garantir uma instalação elétrica segura e livre de curtos-circuitos.

3.1 Alimentador 1

Como pode ser visto na Figura 4, é inserido o circuito do Alimentador 1 no software PSP - UFU e, através dele, é realizado os cálculos, observando-se todos os dados necessários.

Figura 4 - Circuito apresentado para cálculo de curto do alimentador 1

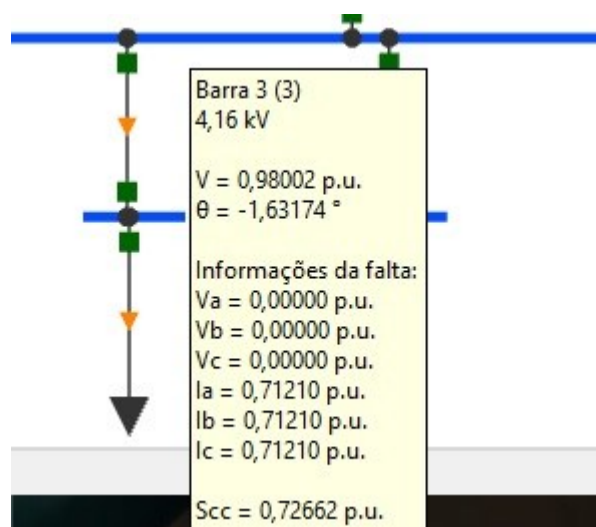


Fonte – Do autor

Com base nos dados da Figura acima é realizado o cálculo de curto, para cada uma das barras e, no final deste, é visto o detalhamento na Memória de Cálculo (Anexo 2).

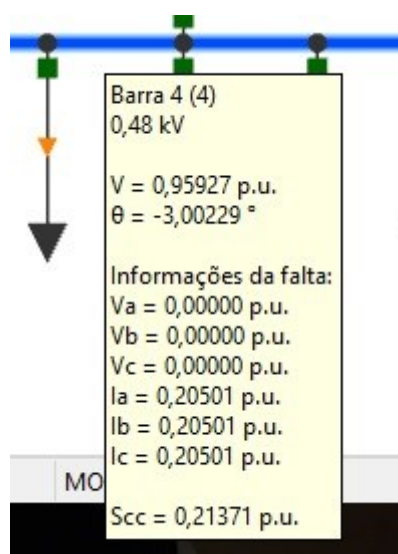
Nas Figuras 5 e 6, estão sendo mostrados os resultados obtidos pelo software para que se compare, através da Tabela 1, com os cálculos realizados de forma manuscrita, uma vez que, foi feito dessa forma para que se tenha a relação entre o cálculo teórico com o cálculo realizado no software.

Figura 5 - Curto na Barra 3 do alimentador 1, pelo PSP



Fonte – Do autor

Figura 6 - Curto na Barra 4 do alimentador 1, pelo PSP



Fonte – Do autor

Tabela 1 - Resultados de curto circuito no alimentador 1

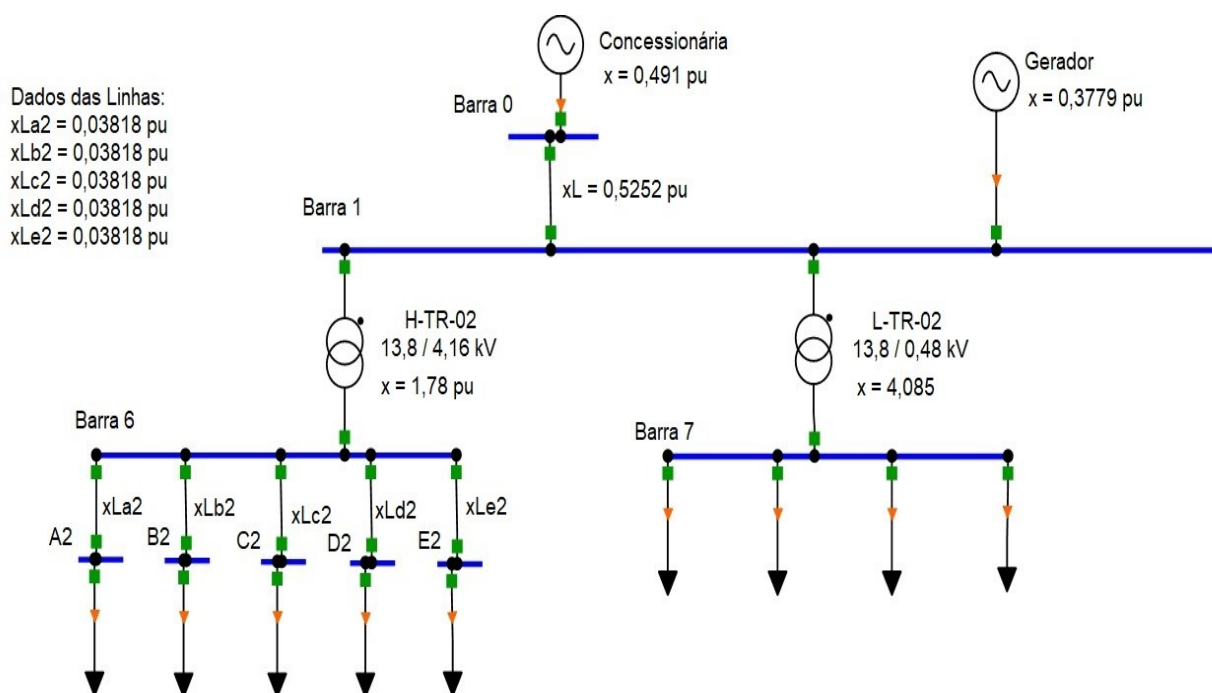
Local do Curto	Scc (pu)	Icc (A)	Icc (conc) A	Icc (ger) A
Barra 0	3,144	13153,54	8520,52	4633,02
Barra 1	3,631	15191,006	4116,76	11074,246
Barra 3	0,8846	12277,02	3328,09	8948,93
Barra 4	0,229	27544,41	7565,7	19978,71
Barra A1	0,856	11880,09	4202,44	7677,65
Barra C1	0,8631	11978,63	3247,6	8731,03

Fonte – Do autor

Através do circuito da Figura 4, observa-se que a reatância de linha nos ramos A1, B1, E1 e F1 são iguais, assim como C1 é igual a D1.

3.2 Alimentador 2

Na Figura 7, a seguir, é mostrado o diagrama referente ao Alimentador 2, desenhado no software PSP-UFU.

Figura 7 - Circuito apresentado para cálculo de curto do alimentador 2

Fonte – Do autor

Com a ajuda do software, foram calculados os curtos, os quais vê-se na Tabela 2 abaixo, os resultados em A2, B2, C2, D2 e E2 são os mesmos por possuírem mesma reatância de linha, visto na Figura 7.

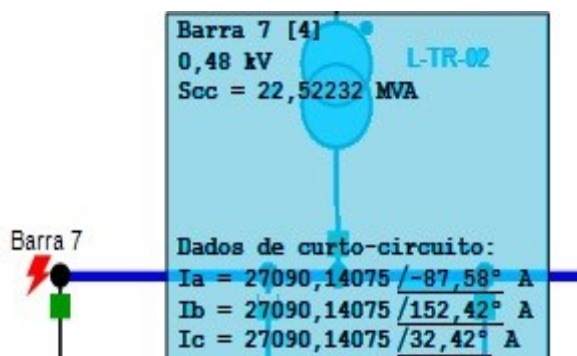
Tabela 2 - Resultados do curto circuito no alimentador 2

Local do Curto	Sc (pu)	Icc (A)	Icc (conc) A	Icc (ger) A
Barra 0	3,144	13153,54	8520,52	4633,02
Barra 1	3,631	15191,006	4116,76	11074,246
Barra 6	0,4865	6751,94	1830,58	4921,36
Barra 7	0,2252	27090,14	7493,52	20086,98
Barra A2	0,4791	6649,24	1804,21	4845,03

Fonte – Do autor

Na Figura 8, vê-se no software o curto na Barra 7, valor já incluso na Tabela acima.

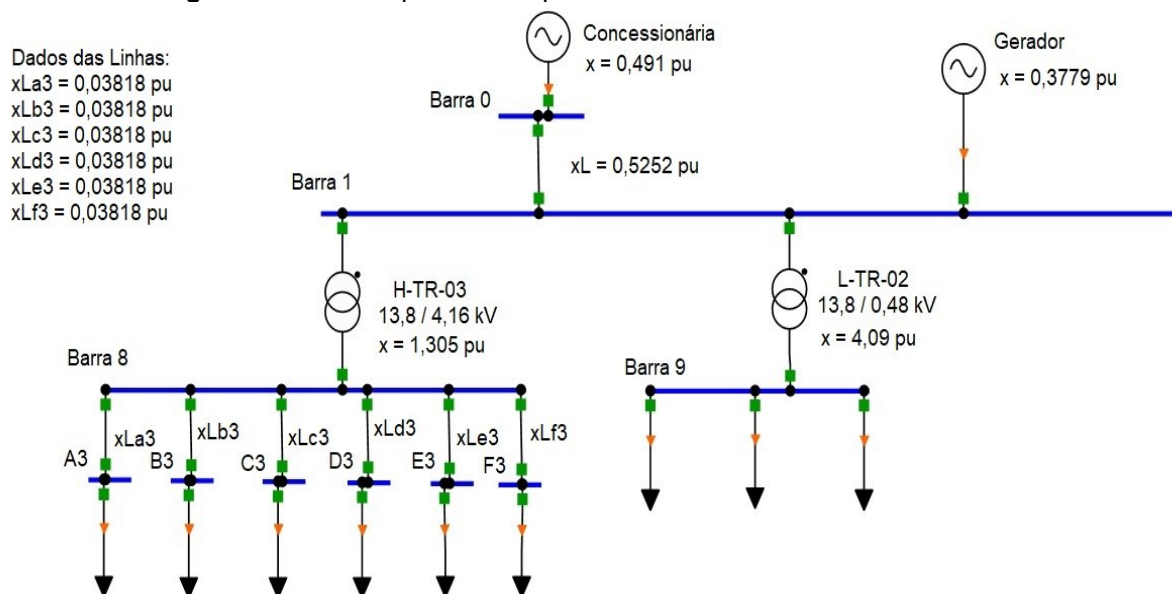
Figura 8 - Curto na Barra 7 do alimentador 2



Fonte – Do autor

3.3 Alimentador 3

Na Figura 9, a seguir, é mostrado o diagrama referente ao Alimentador 3, desenhado no software PSP-UFU.

Figura 9 - Circuito apresentado para cálculo de curto do alimentador 3

Fonte – Do autor

Com a ajuda do PSP - UFU, foram calculados os curtos, os quais vê-se na Tabela 3 abaixo e, pela Figura acima, vê-se que os curtos em A3, B3, C3, D3, E3 e F3 são iguais por possuírem mesma reatância de linha.

Tabela 3 - Resultados do curto circuito no alimentador 3

Local do Curto	S_{cc} (pu)	I_{cc} (A)	I_{cc} (conc) A	I_{cc} (ger) A
Barra 0	3,144	13153,54	8520,52	4633,02
Barra 1	3,631	15191,006	4116,76	11074,246
Barra 8	0,6327	8781	2381,56	6399,44
Barra 9	0,229	27544,41	7565,7	19978,71
Barra A3	0,6202	8607,51	2320,5	6287,01

Fonte – Do autor

4 FLUXO DE POTÊNCIA

Fluxo de Potência ou Fluxo de Carga consiste na determinação do estado da rede, da distribuição dos fluxos e das injeções de potências ativa e reativa nas barras (Maxuell, 2010).

As informações obtidas com o Fluxo de Potência devem: permitir a determinação do estado operativo do sistema elétrico, verificar se o sistema em análise está ou não operando adequadamente e indicar o que deve ser feito para corrigir ou prevenir situações inadequadas de operação (Benedito, 2009). No presente trabalho, o estudo de fluxo de potência foi realizado para se conhecer as correntes nominais em cada ramal e, com estas informações, ajustar os tapes dos relés de sobrecorrente.

Com a utilização do software PSP-UFU, são calculados os dados de fluxo de potência de acordo com o Diagrama Unifilar contido no Anexo 1.

Tabela 4 - Resultado do Fluxo de Potência

Tipo	Nome	De	Para	P [MW]	Q [MVar]
Linha	Linha 1	Barra 0	Barra 1	4,605987	4,822545
Linha	Linha 1	Barra 1	Barra 0	-4,605987	-4,588978
Linha	Linha 2	Barra 1	Barra 5	3,601998	2,850151
Linha	Linha 2	Barra 5	Barra 1	-3,601998	-2,628202
Linha	Linha 3	Barra 1	Barra X	3,953998	3,108202
Linha	Linha 3	Barra X	Barra 1	-3,953998	-2,842175
Linha	Linha 3	Barra 1	Barra 2	7,057996	6,930558
Linha	Linha 3	Barra 2	Barra 1	-7,057996	-5,901198
Transformador	H-TR-01	Barra 2	Barra 3	5,421997	4,43633
Transformador	H-TR-01	Barra 3	Barra 2	-5,421997	-3,925993
Transformador	L-TR-01	Barra 2	Barra 4	1,635999	1,464868
Transformador	L-TR-01	Barra 4	Barra 2	-1,635999	-1,224999
Transformador	H-TR-02	Barra 5	Barra 6	2,679999	1,873461
Transformador	H-TR-02	Barra 6	Barra 5	-2,679999	-1,660998
Transformador	L-TR-02	Barra 5	Barra 7	0,922	0,754743
Transformador	L-TR-02	Barra 7	Barra 5	-0,922	-0,69
Transformador	H-TR-03	Barra X	Barra 8	2,975	2,034224
Transformador	H-TR-03	Barra 8	Barra X	-2,975	-1,844
Transformador	L-TR-03	Barra X	Barra 9	0,979	0,807956
Transformador	L-TR-03	Barra 9	Barra X	-0,979	-0,734

Fonte – Do autor

Tabela 5 - Resultados obtidos em cada barra

Nome	Tipo	Tensão [pu]	Ângulo	P [MW]	Q [MVar]
Barra 0	REF	1	0	4,605987	4,822545
Barra 1	PQ	0,974972	-1,421747	10,008	8,3
Barra 2	PQ	0,906782	-6,000756	0	0
Barra 3	PQ	0,866461	-39,383332	5,422	3,926
Barra 4	PQ	0,843942	-41,016879	1,636	1,225
Barra 5	PQ	0,912619	-3,658829	0	0
Barra 6	PQ	0,912619	-36,824789	2,68	1,661
Barra 7	PQ	0,914751	-36,152139	0,922	0,69
Barra 8	PQ	0,916763	-36,455372	2,975	1,844
Barra 9	PQ	0,909945	-36,555594	0,979	0,734
Barra X	PQ	0,943963	-3,884074	0	0

Fonte – Do autor

Pelos resultados obtidos nas barras e, analisando suas respectivas potências, tem-se as correntes nos diversos ramos:

Tabela 6 - Correntes obtidas nos ramos pelo Fluxo de Potência

Ramo	I [A]
Barra 0 p/ Barra 1	278,95
Barra 1 p/ Barra 5	192,09
Barra 1 p/ Barra X	210,27
Barra 1 p/ Barra 2	413,58
Barra 2 p/ Barra 3 (lado AT)	292,86
Barra 2 p/ Barra 4 (lado AT)	91,55
Barra 5 p/ Barra 6 (lado AT)	136,37
Barra 5 p/ Barra 7 (lado AT)	82,75
Barra X p/ Barra 8 (lado AT)	150,5
Barra X p/ Barra 9 (lado AT)	53,08
Barra 2 p/ Barra 3 (lado BT)	971,51
Barra 2 p/ Barra 4 (lado BT)	2632,07
Barra 5 p/ Barra 6 (lado BT)	452,4
Barra 5 p/ Barra 7 (lado BT)	1432,61
Barra X p/ Barra 8 (lado BT)	499,85
Barra X p/ Barra 9 (lado BT)	1526,05

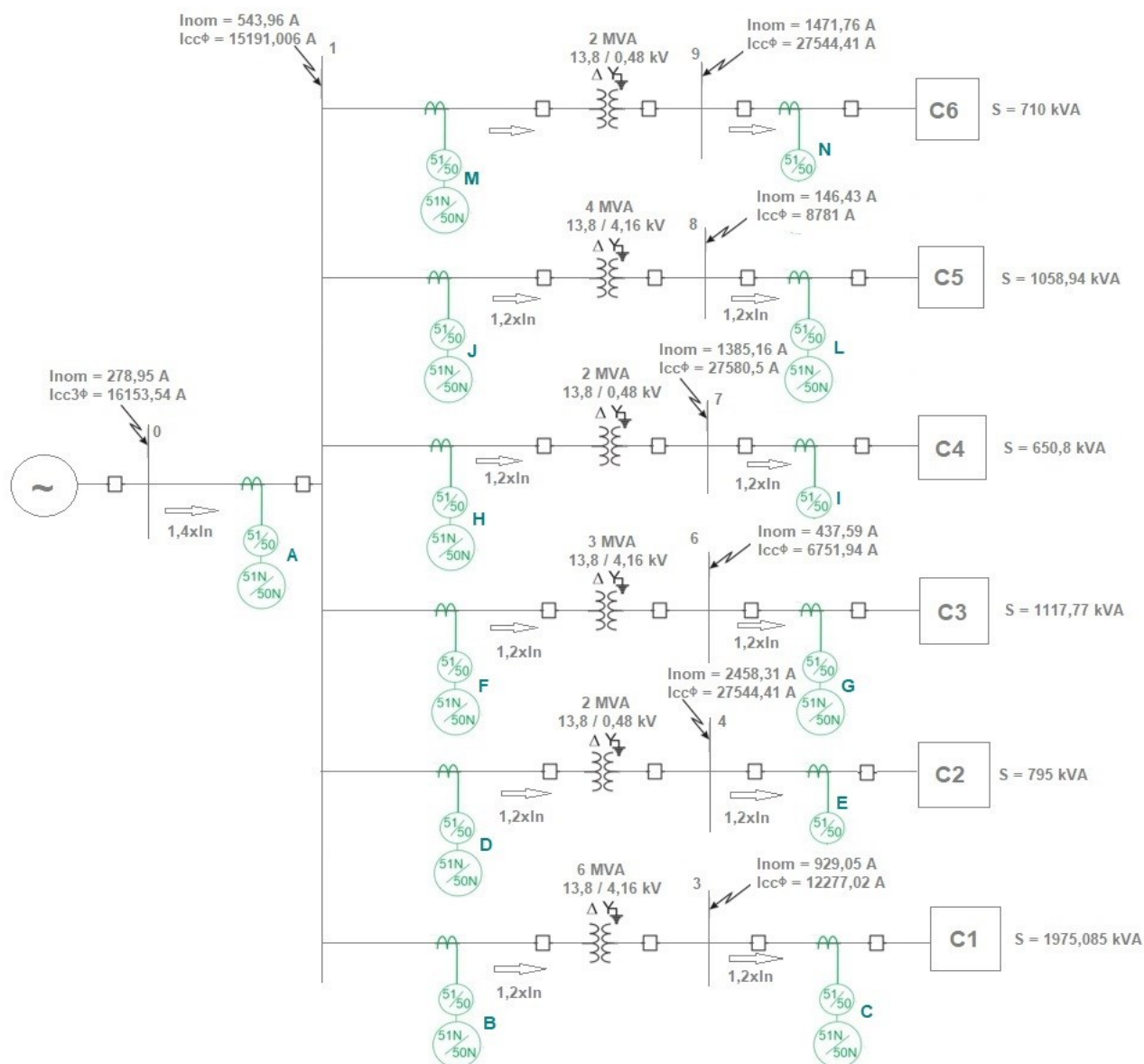
Fonte – Do autor

5 AJUSTE E COORDENAÇÃO DOS RELÉS

Neste capítulo serão apresentados os ajustes dos relés do sistema, bem como os respectivos coordenogramas de cada ramal.

Para coordenar a proteção do sistema, todos os elementos devem estar referidos à mesma tensão. Então, para fins de coordenogramas, todas as correntes do sistema, bem como todos os ajustes serão referidas a tensão de 13,8kV, pelo fato de que a maioria dos relés contidos no sistema já estão na mesma.

Na Figura 10, está o circuito da indústria em representação com relés diferenciais, a partir do mesmo, será realizado o ajuste e coordenação para cada ramal, os quais serão separados por tópicos a seguir.

Figura 10 -Circuito para ajuste e coordenação dos relés

Fonte – Do autor

De acordo com a Figura, serão especificadas a relação de transformação dos transformadores de corrente, que será citada neste como RTC, referentes a cada relé. Adiante, será mostrado como foi o cálculo do RTC do relé 51-B, como exemplo.

- Cálculo do RTC do relé 51-B

Será considerado a corrente do lado de Alta Tensão (AT) do transformador.

$$I_{\text{nominal}} = \frac{6 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 13,8} = 251,02 \text{ A}$$

Para praticamente todos os ramos, os relés serão ajustados para iniciarem a contagem de tempo a partir de 20% de sobrecarga. Assim, para a corrente acima, o correspondente relé será ajustado para a seguinte sobrecarga:

$$I_{\text{ajuste}} = 1,2 \times 251,02 = 301,224 \text{ [A]}$$

Em seguida, a RTC do transformador de corrente que alimenta este relé deverá ser escolhida. Ao analisar a tabela da ANSI, tem-se os seguintes valores de RTC's disponíveis:

Para I_{nominal} secundária de 5 A, tem como I_{nominal} primária: 10, 15, 25, 40, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800, 1200, 3000, 4000.

Para definir a RTC adequada, é necessário atentar-se-á as seguintes hipóteses:

A) Pela corrente nominal:

$$RTC = 300/5$$

B) Pelo Fator de Sobrecarga (FS), aqui adotado FS = 20:

$$\frac{\text{Corrente de curto trifásica da Barra 3}}{FS} = \frac{3700,89}{20} = 185,04 \text{ [A]}$$

$$RTC = 200/5$$

Assim, o RTC a ser adotado é 300/5 para o relé 51-B.

Na Tabela 7, tem-se os valores de RTC para cara relé apresentado acima, os quais foram definidos como o relé mostrado (51-B).

Tabela 7 - Valores de RTC

Relé	RTC
A	400/5
B	300/5
C	400/5
D	150/5
E	1200/5
F	200/5
G	200/5
H	150/5
I	1200/5
J	300/5
L	200/5
M	150/5
N	1200/5

Fonte – Do autor

5.1 Ajuste e Coordenação do Ramal 1

Com os valores dos RTC's, é possível fazer os ajustes dos tapes de cada relé. Assim como foi feito acima, será mostrado o cálculo de ajuste e coordenação do ramo principal do circuito, no caso dos relés 51-A/50-A, 51-B/50-B e 51-C/50-C.

- Ajuste do Relé 51-C

Para o cálculo do Tape, será considerado I_{nominal} de C1.

$$Inc1 = \frac{1975,085 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 4,16 \times 10^3} = 274,14 [A]$$

Pelo circuito, vê-se que a I_{nominal} será de 274,14 [A]. E, para a determinação do Tape será considerada uma sobrecarga de 20%. Logo:

$$Tape = \frac{1,2 \times I_{\text{nominal}}}{RTC} = \frac{1,2 \times 274,14}{\left(400/5\right)} = 4,11[A]$$

Este relé, para o coordenograma, tem que ajustar o valor de 328,96 [A] para a referência, que será no lado de 13,8 kV, como explicado no início deste capítulo. Logo essa corrente será:

$$I = 328,96 \times \frac{4,16}{13,8} = 99,16 \text{ [A]}$$

É necessário achar a curva DT, definida como o ajuste do multiplicador de tempo, representada pela seguinte equação:

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

Onde:

t: tempo de atuação do relé em segundos;

K: constante que caracteriza o relé;

DT: ajuste do multiplicador de tempo (dial time);

M: múltiplo da corrente de atuação (*) [corrente de entrada/corrente ajustada para o relé iniciar a contagem de tempo];

α : constante que caracteriza a curva;

(*): também conhecida por “Corrente de pick-up” ou “Corrente de partida”.

Calculando o valor do múltiplo da corrente de atuação:

$$M = \frac{\text{Corrente de curto no primário}}{(\text{RTC}) \cdot \text{Tape}} = \frac{7,5 \times 274,14}{\left(\frac{400}{5}\right) \cdot 4,11} = 6,25$$

Tendo como tempo de atuação igual a 0,3 s, $k = 13,5$ e $\alpha = 1$:

$$DT = \frac{t(M^\alpha - 1)}{K} = \frac{0,3(6,25^1 - 1)}{13,5} = 0,11$$

- Ajuste do Relé 50-C

Este relé não deve atuar para o curto de 12277,02 [A] (na Barra 3), porque, se assim fosse, algum relé 51, seja retaguarda ou não, localizado na Barra 3 jamais atuaria.

Logo, por opção do projetista, ele será ajustado para atuar a partir de um curto de 0,9 da corrente de curto circuito desta barra.

$$I_{\text{ajuste}} = 0,9 \times I_{cc}$$

$$I_{\text{ajuste}} = 0,9 \times 12277,02$$

$$I_{\text{ajuste}} = 11049,31 \text{ [A]}$$

O valor da corrente a ser ajustada no secundário será:

$$I_{\text{ajuste}} = \frac{I_{\text{ajuste}}}{\text{RTC}} = \frac{11049,31}{400/5} = 138,11 \text{ [A]}$$

- Ajuste do Relé 51-B

Para o cálculo do Tape, será considerado I_{nominal} do transformador.

$$Int = \frac{6 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 13,8} = 251,02 \text{ [A]}$$

Nesse caso, também será considerado uma sobrecarga de 20% para o Tape.

$$\text{Tape} = \frac{1,2 \times I_{\text{nominal}}}{\text{RTC}} = \frac{1,2 \times 251,02}{(300/5)} = 5,02 \text{ [A]}$$

Agora, vai ser definido o valor do múltiplo M. Porém, o valor ajustado no relé 50-C, deve ser referido ao lado de 13,8 kV.

$$I = 11049,31 \times \frac{4,16}{13,8} = 3330,8 \text{ [A]}$$

Assim:

$$M = \frac{\text{Corrente de curto no primário}}{\text{Tape}} = \frac{3330,8}{(300/5) \cdot 5,02} = 11,05$$

Como houve ajuste do relé 50 anteriormente, é necessário achar o tempo que o relé 51-C leva para atuar na I_{ajuste} do relé 50-C.

$$M = \frac{I_s}{\text{Tape}} = \frac{138,11}{4,11} = 33,6$$

$$t = \frac{K \cdot DT}{M^\alpha - 1} = \frac{13,5 \times 0,11}{33,6 - 1} = 0,045 \text{ s}$$

Tendo como tempo de coordenação entre os relés igual a 0,3 segundos:

$$DT = \frac{t(M - 1)}{K} = \frac{(0,3 + 0,045) \times (11,05 - 1)}{13,5} = 0,25$$

- Ajuste do Relé 50-B

Para este relé, a I_{ajuste} é analisada por duas hipóteses. A primeira pela corrente de Inrush do transformador e, a segunda, pela corrente de curto circuito da barra onde está instalado o relé. Deverá ser aplicada a I_{ajuste} que possuir maior valor.

Pela Corrente de Inrush:

$$I_{inrush(AT)} = 8 \times I_n = 8 \times 251,02 = 2008,16 [A] = I_{ajuste}$$

Pela Corrente de curto circuito:

$$\begin{aligned} I_{ajuste} &= 0,9 \times I_{cc} \\ I_{ajuste} &= 0,9 \times 15191,006 \\ I_{ajuste} &= 13671,9 [A] \end{aligned}$$

Logo, é considerada a segunda, uma vez que a mesma é a maior corrente.

Com isso, o valor da corrente a ser ajustada no secundário será:

$$I_s = \frac{I_{aj}}{RTC} = \frac{13671,9}{300/5} = 227,86 [A]$$

- Ajuste do Relé 51-A

Para o cálculo do Tape, será considerada a corrente nominal do transformador.

$$I_n = \frac{6 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 13,8} = 251,02 [A]$$

Para este relé, será considerada uma sobrecarga de 40% para o Tape, pois está sendo usada a corrente nominal do transformador, a qual foi usada para o relé anterior, e caso a sobrecarga de ambos os Tapes forem a mesma, os dois relés irão iniciar de um mesmo ponto, fato que não pode acontecer. Logo:

$$Tape = \frac{1,4 \times I_n}{RTC} = \frac{1,4 \times 251,02}{(400/5)} = 4,39 [A]$$

Definindo o valor múltiplo M:

$$M = \frac{\text{Corrente de curto no primário}}{Tape} = \frac{13671,9}{(400/5) \cdot 4,39} = 38,92$$

Agora, será calculado o tempo necessário para que o relé 51-A leve para atuar na laj do relé 50-B, para que seja possível a coordenação.

$$M = \frac{I_s}{Tape} = \frac{227,869}{5,02} = 45,39 [A]$$

$$t = \frac{K \cdot DT}{M^\alpha - 1} = \frac{13,5 \times 0,25}{45,39 - 1} = 0,076 s$$

Tendo o tempo de coordenação entre os relés igual a 0,3 segundos:

$$DT = \frac{t(M - 1)}{K} = \frac{(0,3 + 0,076) \times (38,92 - 1)}{13,5} = 1,05$$

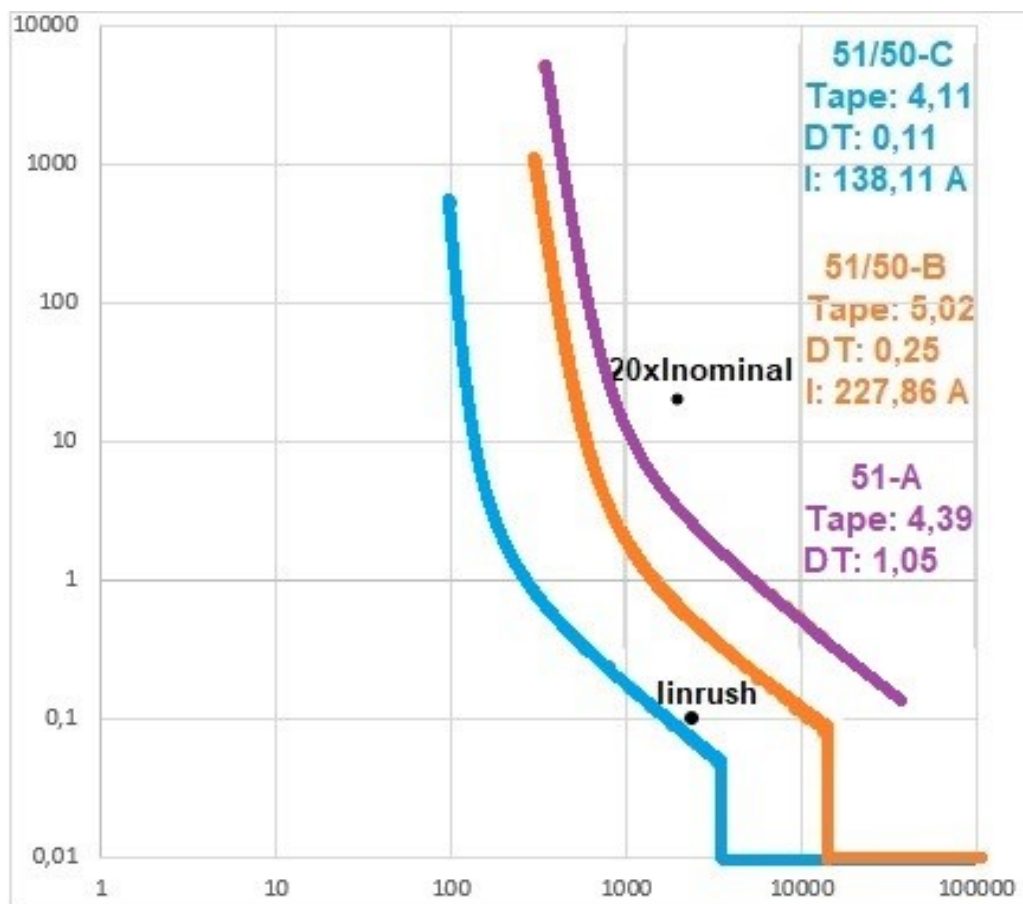
Não será realizado o ajuste do relé 50-A, pois o ajuste do relé 50-B serve para este caso, pelo fato de ambos estarem instalados na mesma barra (Barra 1).

Tabela 8 - Resultados de ajuste e coordenação do Ramal 1

Relé	Corrente Nominal com Sobrecarga [A]	Tape	DT	Corrente no Secundário do Relé 50 [A]	Corrente de Interrupção do Relé 50 [A]
51 - A	351,42	4,39	1,05	-	-
51 - B	301,22	5,02	0,25	227,86	13671,9
51 - C	99,16	4,11	0,11	138,11	3330,8

Fonte – Do autor

Com base nos cálculos realizados, na Figura 11, é mostrado o coordenograma desses relés.

Figura 11 - Coordenograma dos Relés 50 e 51 - C/B/A – Ramal 1

Fonte – Do autor

Da mesma forma em que foram realizados os cálculos dos relés acima, foi feito no Excel, uma função que realiza os mesmos para que não se perca muito tempo, uma vez que ao realizar o projeto de proteção de uma indústria, ter agilidade na execução do mesmo é crucial e, através desta ferramenta, foi possível obter os respectivos coordenogramas que serão apresentados a seguir. Logo, nos próximos tópicos só serão apresentados os resultados obtidos pelos cálculos no Excel, em tabelas, e seus respectivos coordenogramas, em figuras.

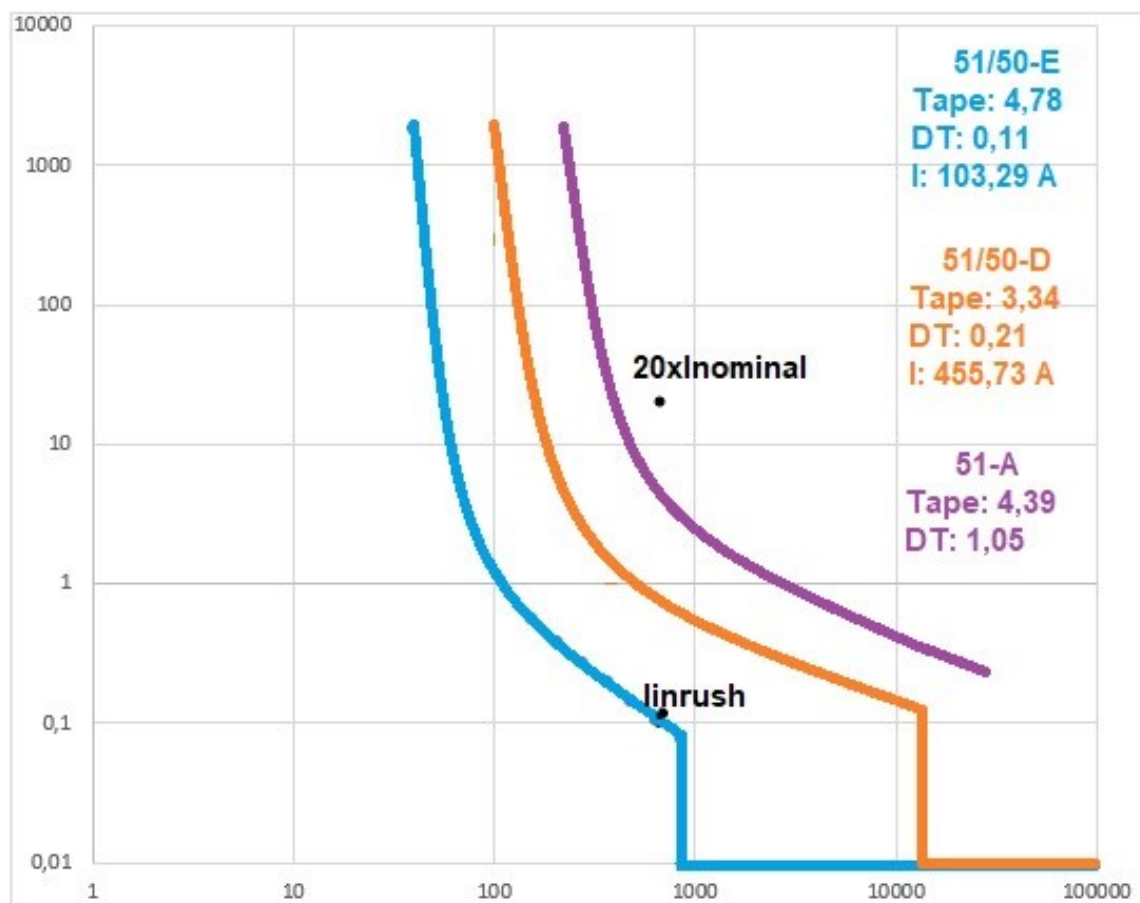
5.2 Ajuste e Coordenação do Ramal 2

Tabela 9 - Resultados de ajuste e coordenação do Ramal 2

Relé	Corrente Nominal com Sobrecarga [A]	Tape	DT	Corrente no Secundário do Relé 50 [A]	Corrente de Interrupção do Relé 50 [A]
51 - A	351,42	4,39	1,05	-	-
51 - D	100,4	3,34	0,21	455,73	13671,9
51 - E	39,91	4,78	0,11	103,29	862,25

Fonte – Do autor

Figura 12 - Coordenograma dos Relés 50 e 51 - E/D/A - Ramal 2



Fonte – Do autor

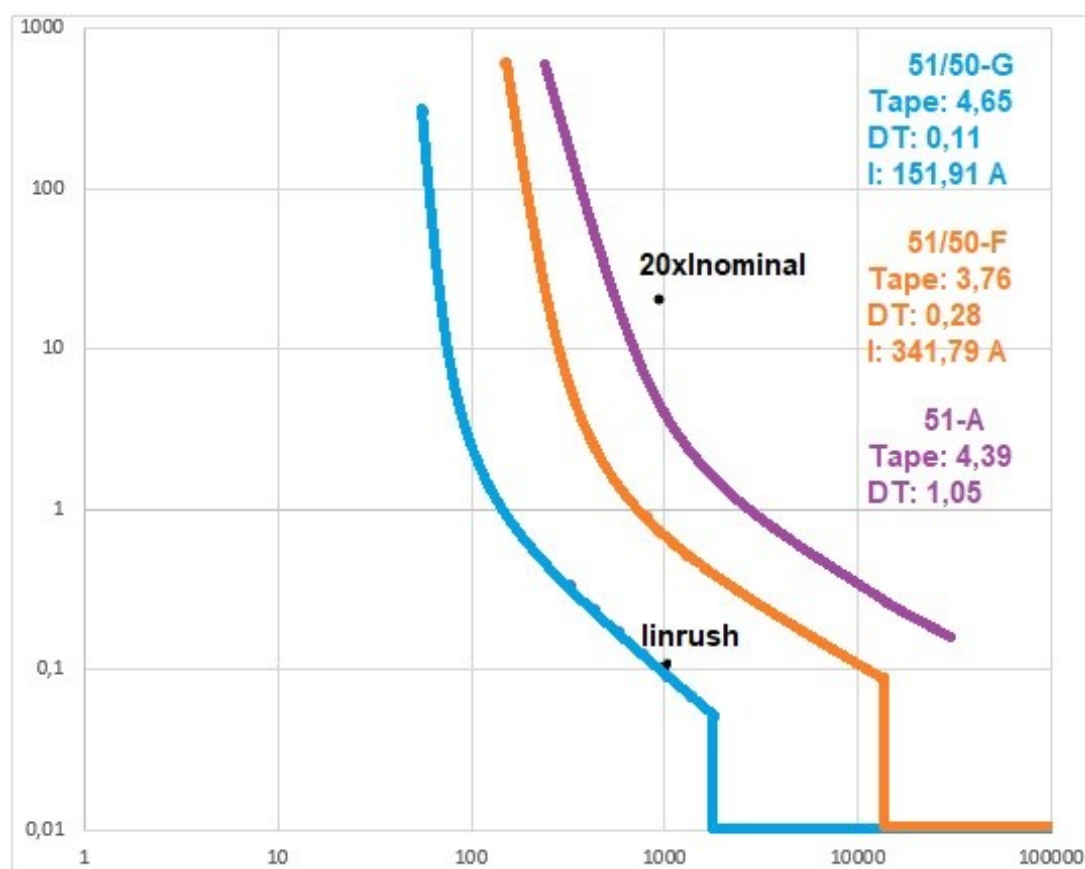
5.3 Ajuste e Coordenação do Ramal 3

Tabela 10 - Resultados de ajuste e coordenação do Ramal 3

Relé	Corrente Nominal com Sobrecarga [A]	Tape	DT	Corrente no Secundário do Relé 50 [A]	Corrente de Interrupção do Relé 50 [A]
51 - A	351,42	4,39	1,05	-	-
51 - F	150,61	3,76	0,28	341,79	13671,9
51 - G	56,11	4,65	0,11	151,91	1831,82

Fonte – Do autor

Figura 13 - Coordenograma dos Relés 50 e 51 - G/F/A - Ramal 3



Fonte – Do autor

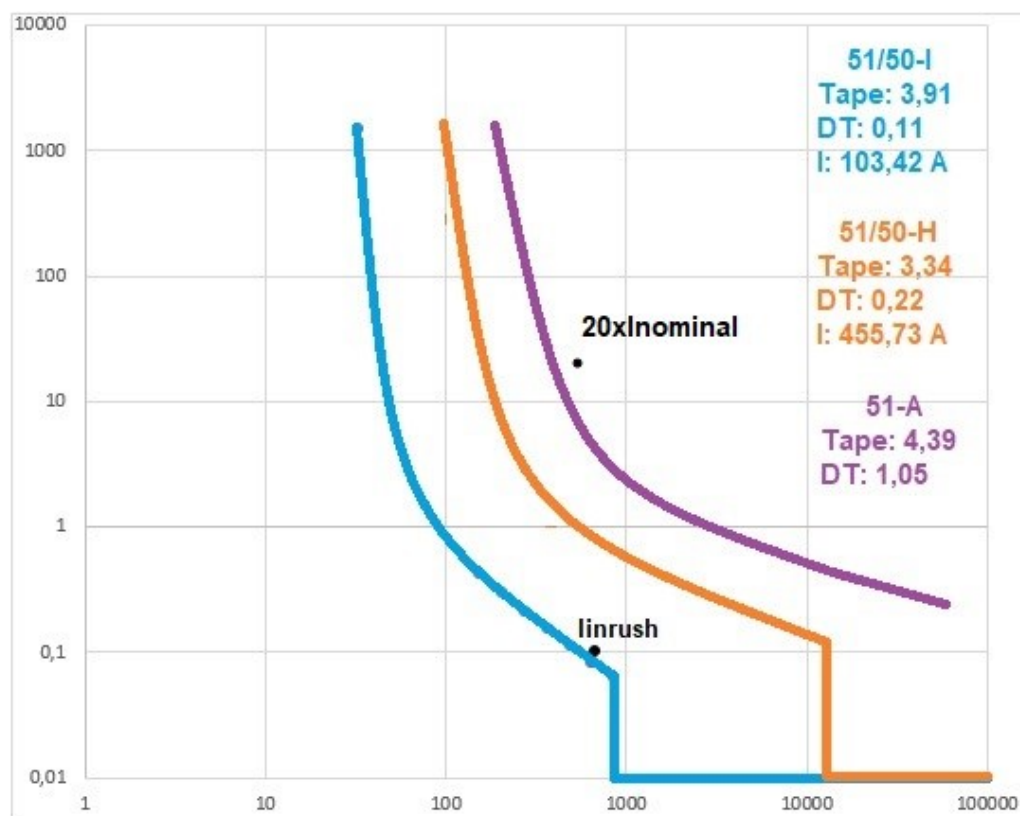
5.4 Ajuste e Coordenação do Ramal 4

Tabela 11 - Resultados de ajuste e coordenação do Ramal 4

Relé	Corrente Nominal com Sobrecarga [A]	Tape	DT	Corrente no Secundário do Relé 50 [A]	Corrente de Interrupção do Relé 50 [A]
51 - A	351,42	4,39	1,05	-	-
51 - H	100,4	3,34	0,22	455,73	13671,9
51 - I	32,67	3,91	0,11	103,42	863,38

Fonte – Do autor

Figura 14 - Coordenograma dos Relés 50 e 51 - I/H/A – Ramal 4



Fonte – Do autor

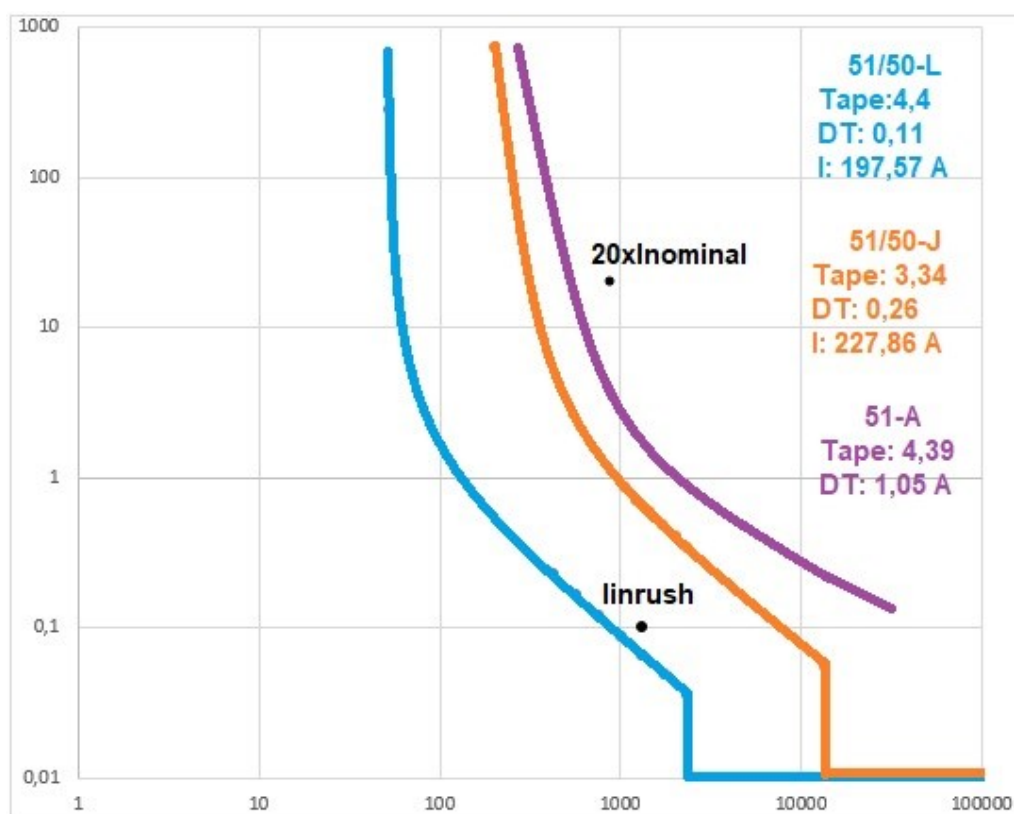
5.5 Ajuste e Coordenação do Ramal 5

Tabela 12 - Resultados de ajuste e coordenação do Ramal 5

Relé	Corrente Nominal com Sobrecarga [A]	Tape	DT	Corrente no Secundário do Relé 50 [A]	Corrente de Interrupção do Relé 50 [A]
51 - A	351,42	4,39	1,05	-	-
51 - J	200,8	3,34	0,26	227,86	13671,9
51 - L	53,11	4,4	0,11	197,57	2382,32

Fonte – Do autor

Figura 15 - Coordenograma dos Relés 50 e 51 - L/J/A - Ramal 5



Fonte – Do autor

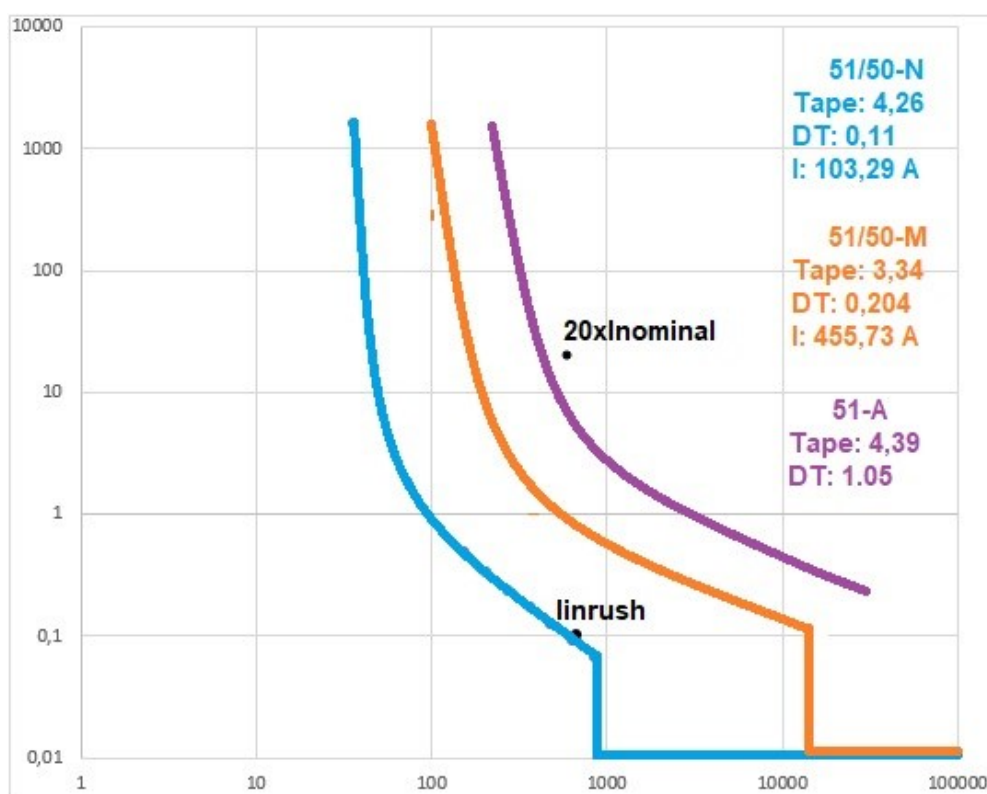
5.6 Ajuste e Coordenação do Ramal 6

Tabela 13 - Resultados de ajuste e coordenação do Ramal 6

Relé	Corrente Nominal com Sobrecarga [A]	Tape	DT	Corrente no Secundário do Relé 50 [A]	Corrente de Interrupção do Relé 50 [A]
51 - A	351,42	4,39	1,05	-	-
51 - M	100,4	3,34	0,204	455,73	13671,9
51 - N	35,64	4,26	0,11	103,29	862,25

Fonte – Do autor

Figura 16 - Coordenograma dos Relés 50 e 51 - N/M/A – Ramal 6



Fonte – Do autor

6 CONCLUSÃO

Um bom sistema de proteção deve atuar de maneira rápida e coordenada, de forma que o elemento defeituoso seja retirado da rede restringindo a interrupção do fornecimento ao mínimo de cargas possíveis.

A utilização de softwares de simulação de curtos-circuitos e de fluxo de potência foi essencial para o desenvolvimento deste estudo, garantindo a precisão dos cálculos e uma apresentação de resultados bastante coerente.

Para os ajustes e outros cálculos, utilizou-se o Excel que otimiza e torna mais rápidos os cálculos necessários.

Por fim, este trabalho teve grande importância, pois foi possível colocar em prática o que foi visto durante a graduação nas matérias: Análise de Sistemas Elétricos e Proteção de Sistemas Elétricos. E com isso, conclui-se a importância de se ter um bom projeto de proteção do sistema, assegurando energia elétrica com qualidade, confiabilidade e continuidade.

REFERÊNCIAS

COTOSCK, Kelly Regina. *Proteção de Sistemas Elétricos: Uma Abordagem Técnico-Pedagógica*. Disponível em: <<https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/381M.PDF>>. Acesso em: out. 2017.

HENRIQUES, Rafael. *Proteção do Sistema Elétrico de Potência*. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgEDoAF/protecao-sistema-eletrico-potencia>>. Acesso em: out. 2017.

MAXWELL. *Fluxo de Potência e Fluxo de Potência Continuado*. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/26243/26243_4.PDF>. Acesso em: out. 2017.

HEWITSON, L. G.; BROWN, M.; BALAKRISHNAN, R. *Practical Power System Protection*. Oxford: Newnes, 2004.

MOLINARI, Mattos Felipe. *Estudo de Caso de Coordenação e Seletividade da Proteção Contra Sobrecorrente em um Sistema Elétrico Industrial*. Disponível em: <file:///C:/Users/lanag/Documents/Mattos_Felipe_Molinari_de.pdf>. Acesso em: out. 2017.

RESENDE, José Wilson. *Apostila Introdução à Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2009.

ANEXO 1

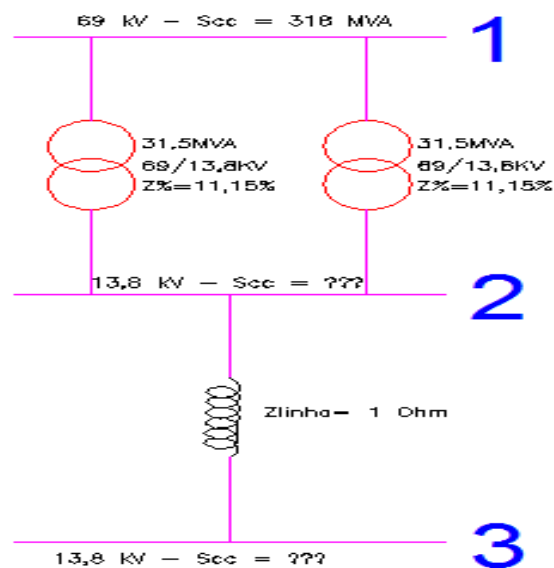
DIAGRAMA EM A3****

ANEXO 2

MEMÓRIA DE CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO DO ALIMENTADOR 1

- Circuito de Entrada

Figura 17 - Circuito de Entrada da Indústria



Fonte – Do autor

Para que os cálculos sejam realizados, são considerados como base: $U_{base} = 69/13,8/4,16/0,48$ KV, $M_{base} = 100$ MVA.

Fazendo a impedância base para cada tensão base:

Para 69 KV:

$$Z_{base} = \frac{69^2}{100} = 47,61 \, \Omega$$

Para 13,8 KV:

$$Z_{base} = \frac{13,8^2}{100} = 1,904 \, \Omega$$

Para 4,16 KV:

$$Z_{base} = \frac{4,16^2}{100} = 0,173 \, \Omega$$

Para 480 V:

$$Z_{base} = \frac{0,48^2}{100} = 0,0023 \, \Omega$$

Calculando a reatância (x) do sistema:

$$X_s = \frac{69^2}{318} = 14,9716 \, \Omega$$

$$X_s \text{ (pu)} = \frac{14,9716^2}{47,61} = 0,03144 \text{ pu}$$

Calculando a impedância dos transformadores e da linha em pu:

$$X_{trafo} = 0,1115 \times \frac{100}{31,5} = 0,0354 \text{ pu}$$

$$X_{linha} = \frac{1}{1,904} = 0,5252 \text{ pu}$$

Com a substituição dos valores no circuito de entrada apresentado no início deste, é possível que seja realizado o cálculo de curto-circuito das barras contidas no mesmo.

Para um curto-circuito na barra 3:

$$X_{total} = 0,3144 + (0,354 // 0,354) + 0,5252 = 1,0166 \text{ pu}$$

$$S_{cc} (3) = \frac{1^2}{X_{total}} = \frac{1^2}{1,0166} = 0,9836 \text{ pu}$$

Para um curto-circuito na barra 2:

$$X_{total} = 0,3144 + (0,354 // 0,354) = 0,4914 \text{ pu}$$

$$S_{cc} (2) = \frac{1^2}{X_{total}} = \frac{1^2}{0,4914} = 2,03 \text{ pu}$$

Para que seja possível continuar com os cálculos, o sistema será representado por uma impedância de 0,4914 pu.

Agora, será analisado o circuito de entrada com um gerador, onde será utilizada a impedância transitória do gerador igual a 0,2445 pu (obtida por ensaios).

$$X_g = 0,2445 \times \frac{100}{55} \times 0,85 = 0,3779 \text{ pu}$$

- **Alimentador 1**

Será mostrado o detalhamento do cálculo de curto-circuito para o primeiro alimentador.

Primeiro, é necessário calcular as correntes base.

Para 13,8 KV:

$$I_{base} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 13,8} = 4183,7 \text{ A}$$

Para 4,16 KV:

$$I_{base} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 4,16} = 13878,61 \text{ A}$$

Para 480 V:

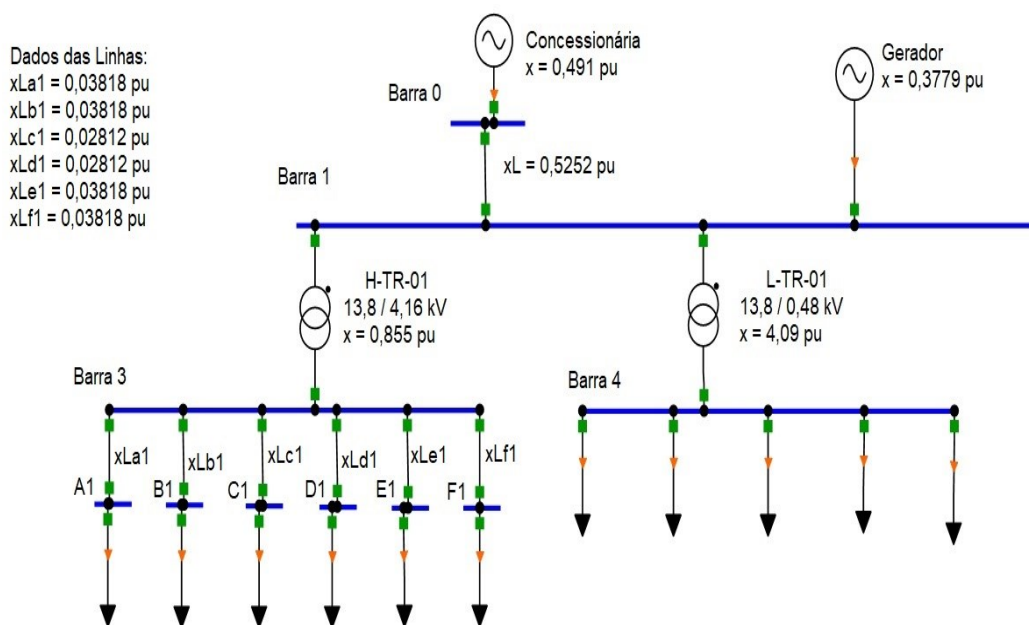
$$I_{base} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 0,48} = 120281,3 \text{ A}$$

O próximo passo é calcular as impedâncias dos transformadores em pu:

$$X_{h-tr-01} = 0,0513 \times \frac{100}{6} = 0,855 \text{ pu}$$

$$X_{l-tr-01} = 0,0818 \times \frac{100}{2} = 4,09 \text{ pu}$$

Figura 18 - Diagrama Unifilar do Alimentador 1



Fonte – Do autor

Através do diagrama mostrado na Figura 18, calcula-se os curtos:

Para curto-circuito na barra 0:

$$X_{total} = 0,491 // (0,5252 + 0,3779) = 0,318 \text{ pu}$$

$$S_{cc}(0) = \frac{1^2}{X_{total}} = \frac{1^2}{0,318} = 3,144 \text{ pu}$$

Valor total do curto:

$$I_{cc}(0) = \frac{S_{cc}(0)}{\sqrt{3} \times U} = \frac{314,4 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 13,8} = 13153,54 \text{ A}$$

$$V_0 = 0 \text{ pu}$$

Contribuições de cada fonte para o curto:

$$I_{cc}(\text{conc}) = \frac{1-0}{0,491} = 2,0366 \text{ pu}$$

$$2,0366 \times I_{base} = 2,0366 \times 4183,7 = 8520,52 \text{ A}$$

$$I_{cc}(\text{ger}) = I_{cc}(0) - I_{cc}(\text{conc})$$

$$I_{cc}(\text{ger}) = 13153,54 - 8520,52 = 4633,02 \text{ A}$$

Para um curto-circuito na barra 1:

$$X_{total} = (0,491 + 0,5252) // 0,3779 = 0,2754 \text{ pu}$$

$$S_{cc}(1) = \frac{1^2}{X_{total}} = \frac{1^2}{0,2754} = 3,631 \text{ pu}$$

Valor total do curto:

$$I_{cc}(1) = \frac{S_{cc}(1)}{\sqrt{3} \times U} = \frac{363,1 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 13,8} = 15191,006 \text{ A}$$

$$V_1 = 0 \text{ pu}$$

Contribuições de cada fonte para o curto:

$$I_{cc}(\text{conc}) = \frac{1-0}{(0,491+0,5252)} = 0,984 \text{ pu}$$

$$0,984 \times I_{base} = 0,984 \times 4183,7 = 4116,76 \text{ A}$$

$$I_{cc}(\text{ger}) = I_{cc}(1) - I_{cc}(\text{conc})$$

$$I_{cc}(\text{ger}) = 15191,006 - 4116,76 = 11074,246 \text{ A}$$

Para um curto-circuito na barra 3:

$$X_{total} = [(0,491 + 0,5252) // 0,3779] + 0,855 = 1,1304 \text{ pu}$$

$$S_{cc}(3) = \frac{1^2}{X_{total}} = \frac{1^2}{1,1304} = 0,8846 \text{ pu}$$

Valor total do curto:

$$I_{cc}(3) = \frac{S_{cc}(3)}{\sqrt{3} \times U} = \frac{88,46 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 4,16} = 12277,02 \text{ A}$$

$$V_3 = X_t \times S_{cc}(3) = 0,855 \times 0,8846 = 0,7563 \text{ pu}$$

Contribuições de cada fonte para o curto:

$$I_{cc}(\text{conc}) = \frac{1 - 0,7563}{(0,491 + 0,5252)} = 0,2398 \text{ pu}$$

$$0,2398 \times I_{base} = 0,2398 \times 13878,61 = 3328,09 \text{ A}$$

$$I_{cc}(\text{ger}) = I_{cc}(3) - I_{cc}(\text{conc})$$

$$I_{cc}(\text{ger}) = 12277,02 - 3328,09 = 8948,93 \text{ A}$$

Para um curto-circuito na barra 4:

$$X_{total} = [(0,491 + 0,5252) // 0,3779] + 4,09 = 4,3654 \text{ pu}$$

$$S_{cc}(4) = \frac{1^2}{X_{total}} = \frac{1^2}{4,3654} = 0,229 \text{ pu}$$

Valor total do curto:

$$I_{cc}(4) = \frac{S_{cc}(4)}{\sqrt{3} \times U} = \frac{22,9 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 4,16} = 27544,41 \text{ A}$$

$$V_4 = X_t \times S_{cc}(4) = 4,09 \times 0,229 = 0,936 \text{ pu}$$

Contribuições de cada fonte para o curto:

$$I_{cc}(\text{conc}) = \frac{1 - 0,936}{(0,491 + 0,5252)} = 0,0629 \text{ pu}$$

$$0,0629 \times I_{base} = 0,0629 \times 13878,61 = 7565,7 \text{ A}$$

$$I_{cc}(\text{ger}) = I_{cc}(4) - I_{cc}(\text{conc})$$

$$I_{cc}(\text{ger}) = 27544,41 - 7565,7 = 19978,71 \text{ A}$$

Para um curto-circuito na barra A1:

$$X_{total} = [(0,491 + 0,5252) // 0,3779] + 0,855 + 0,03818 = 1,168 \text{ pu}$$

$$S_{cc}(a1) = \frac{1^2}{X_{total}} = \frac{1^2}{1,168} = 0,856 \text{ pu}$$

Valor total do curto:

$$I_{cc}(a1) = \frac{S_{cc}(a1)}{\sqrt{3} \times U} = \frac{85,6 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 4,16} = 11880,09 \text{ A}$$

$$V_{a1} = X_l \times S_{cc}(a1) = 0,8928 \times 0,7755 = 0,6923 \text{ pu}$$

Contribuições de cada fonte para o curto:

$$I_{cc}(\text{conc}) = \frac{1 - 0,6923}{(0,491 + 0,5252)} = 0,3028 \text{ pu}$$

$$0,3028 \times I_{base} = 0,3028 \times 13878,61 = 4202,44 \text{ A}$$

$$I_{cc}(\text{ger}) = I_{cc}(a1) - I_{cc}(\text{conc})$$

$$I_{cc}(\text{ger}) = 11880,09 - 4202,44 = 7677,65 \text{ A}$$

Para um curto-circuito na barra C1:

$$X_{total} = [(0,491 + 0,5252) // 0,3779] + 0,855 + 0,0281 = 1,1585 \text{ pu}$$

$$S_{cc}(c1) = \frac{1^2}{X_{total}} = \frac{1^2}{1,1585} = 0,8631 \text{ pu}$$

Valor total do curto:

$$I_{cc}(c1) = \frac{S_{cc}(c1)}{\sqrt{3} \times U} = \frac{86,31 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 4,16} = 11978,63 \text{ A}$$

$$V_{c1} = X_t \times S_{cc}(c1) = 0,8831 \times 0,8631 = 0,7622 \text{ pu}$$

Contribuições de cada fonte para o curto:

$$I_{cc}(\text{conc}) = \frac{1 - 0,7622}{(0,491 + 0,5252)} = 0,234 \text{ pu}$$

$$0,234 \times I_{base} = 0,234 \times 13878,61 = 3247,6 \text{ A}$$

$$I_{cc}(\text{ger}) = I_{cc}(c1) - I_{cc}(\text{conc})$$

$$I_{cc}(\text{ger}) = 11978,63 - 3247,6 = 8731,03 \text{ A}$$