



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica

LUIZ HENRIQUE ARANTES BARBOSA

**AJUSTE E COORDENAÇÃO DOS RELÉS DE PROTEÇÃO
PARA CURTOS-CIRCUITOS TRIFÁSICOS DE UM SISTEMA
ELÉTRICO INDUSTRIAL**

Uberlândia
2018

LUIZ HENRIQUE ARANTES BARBOSA

**AJUSTE E COORDENAÇÃO DOS RELÉS DE PROTEÇÃO
PARA CURTOS-CIRCUITOS TRIFÁSICOS DE UM SISTEMA
ELÉTRICO INDUSTRIAL**

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

Orientador: Ph.D. José Wilson Resende

**Uberlândia
2018**

LUIZ HENRIQUE ARANTES BARBOSA

**AJUSTE E COORDENAÇÃO DOS RELÉS DE PROTEÇÃO
PARA CURTOS-CIRCUITOS TRIFÁSICOS DE UM SISTEMA
ELÉTRICO INDUSTRIAL**

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

Uberlândia, 13 de dezembro de 2018.

Ph.D. José Wilson Resende
(Orientador)

Dr. Luciano Coutinho Gomes

Pós-Dr. Isaque Nogueira Gondim

Uberlândia
2018

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus por ter me proporcionado essa conquista. Ao Professor José Wilson Resende pela orientação, compreensão e todo conhecimento transmitido durante a realização desse trabalho. Aos meus familiares, especialmente, meus pais, por todo carinho, incentivo e apoio que me deram durante os momentos de dificuldades.

RESUMO

Este trabalho consiste no dimensionamento da proteção do sistema elétrico de uma usina sucroalcooleira (Usina Coruripe) para eventuais sobrecorrentes que possam surgir devido a curtos-circuitos trifásicos. Com isso, foram realizados ajustes dos relés digitais de sobrecorrente 51 e 67, unidades temporizada e direcional respectivamente, de forma a garantir um sistema coordenado e seletivo, que será apresentado por meio de coordenogramas.

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

ABSTRACT

This work consists in the design of the protection of the electrical system of a sugar-alcohol plant (Coruripe Plant) for eventual overcurrents that may arise due to three-phase short circuits. Thus, adjustments of the digital overcurrent relays 51 and 67, timed and directional units respectively, were made in order to guarantee a coordinated and selective system that will be presented by coordinograms.

Keywords: Protection. Relay. Selectivity. Short circuit.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama Unifilar	12
Figura 2 - Curto-circuito trifásico na Barra 1.....	15
Figura 3 - Curto-circuito trifásico na Barra 2.....	16
Figura 4 - Curto-circuito trifásico na Barra 3.....	16
Figura 5 - Curto-circuito trifásico na Barra 4.....	17
Figura 6 - Localização dos TCs.....	21
Figura 7 - Notação relativa à classe de exatidão.....	24
Figura 9 - Localização dos relés.....	28
Figura 10 - Circuito de coordenação dos relés 51-10,1,11.....	29
Figura 11 - Coordenograma dos Relés 51-10, 51-1 e 51-11.....	32
Figura 12 - Circuito de coordenação dos relés 51-3,7,9.....	33
Figura 13 - Coordenograma dos relés 51-3, 51-7 e 51-9.....	35
Figura 14 - Circuito de coordenação dos relés 51-4,8.....	36
Figura 15 - Coordenograma dos relés 51-4 e 51-8.....	38
Figura 16 - Curva característica do relé 51-2.....	39
Figura 17 - Curva característica do relé 51-12.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Correção de impedâncias	15
Tabela 2 - Dados de curto-circuito	17
Tabela 3 - Dados do Fluxo de Potência	18
Tabela 4 - Dados em cada barra	18
Tabela 5 - Correntes que circulam no sistema.....	19
Tabela 6 - Dados em cada TC	22
Tabela 7 - Determinação das RTCs.....	23
Tabela 8 - Classe de exatidão dos TCs.....	25
Tabela 9 - Dados da coordenação dos relés, 51-10, 51-1 e 51-3.....	32
Tabela 10 - Dados da coordenação dos relés, 51-3, 51-7 e 51-9.....	35
Tabela 11 - Dados da coordenação dos relés, 51-4 e 51-8.....	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

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

ANSI – American National Standards Institute

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

RTC – Relação de Transformação de Transformador de Corrente

TC – Transformador de Corrente

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivo.....	11
2 SISTEMA ELÉTRICO.....	12
3 CURTO-CIRCUITO	12
3.1 Correção das impedâncias do sistema	13
3.2 Correntes de curto-circuito trifásico	15
4 SIMULAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA.....	17
5 ESPECIFICAÇÃO DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE	19
5.1 Determinação das RTCs.....	21
5.2 Determinação da classe de exatidão	23
6 RELÉS.....	25
6.1 Relé de sobrecorrente temporizado, unidade 51	26
6.2 Relé direcional de sobrecorrente, unidade 67	27
7 AJUSTE E COORDENAÇÃO DOS RELÉS	27
7.1 Ajuste e coordenação dos relés 51-10, 51-1 e 51-11	29
7.2 Ajuste e coordenação dos relés 51-3, 51-7 e 51-9	33
7.3 Ajuste e coordenação dos relés 51- 4 e 51-8	36
7.4 Ajuste relé 51-2.....	38
7.5 Ajuste do relé 51-12.....	39
8 CONCLUSÕES	41
REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

Em um projeto de uma instalação elétrica, um dos principais fatores levados em consideração é a proteção do sistema elétrico. Isso ocorre, pois eventuais falhas que aconteçam no circuito elétrico, devido a descargas atmosféricas, manobras de equipamentos, acidentes e, até mesmo, instabilidade da rede, podem ocasionar curtos-circuitos, que, se não forem extintos rapidamente, poderão danificar componentes da instalação.

Diante disso, se faz necessário um sistema de proteção eficiente para, não só minimizar os riscos aos equipamentos instalados, mas também para garantir a segurança dos trabalhadores em questão e para assegurar a qualidade e a confiabilidade no fornecimento de energia.

Assim, a proteção contra sobrecorrentes, originadas a partir de um curto-circuito, deve ser projetada para atuar de forma rápida, coordenada e seletiva, interrompendo a menor parcela possível do circuito que contém a fonte do problema, reduzindo, consequentemente, os danos que seriam causados no sistema.

Para isso, são utilizados relés de proteção. Esses dispositivos têm a função de identificar as instabilidades e em seguida enviar um comando de abertura para determinado disjuntor que, por sua vez, irá retirar de funcionamento parte da rede onde se encontra o curto-circuito.

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

1.1 Objetivo

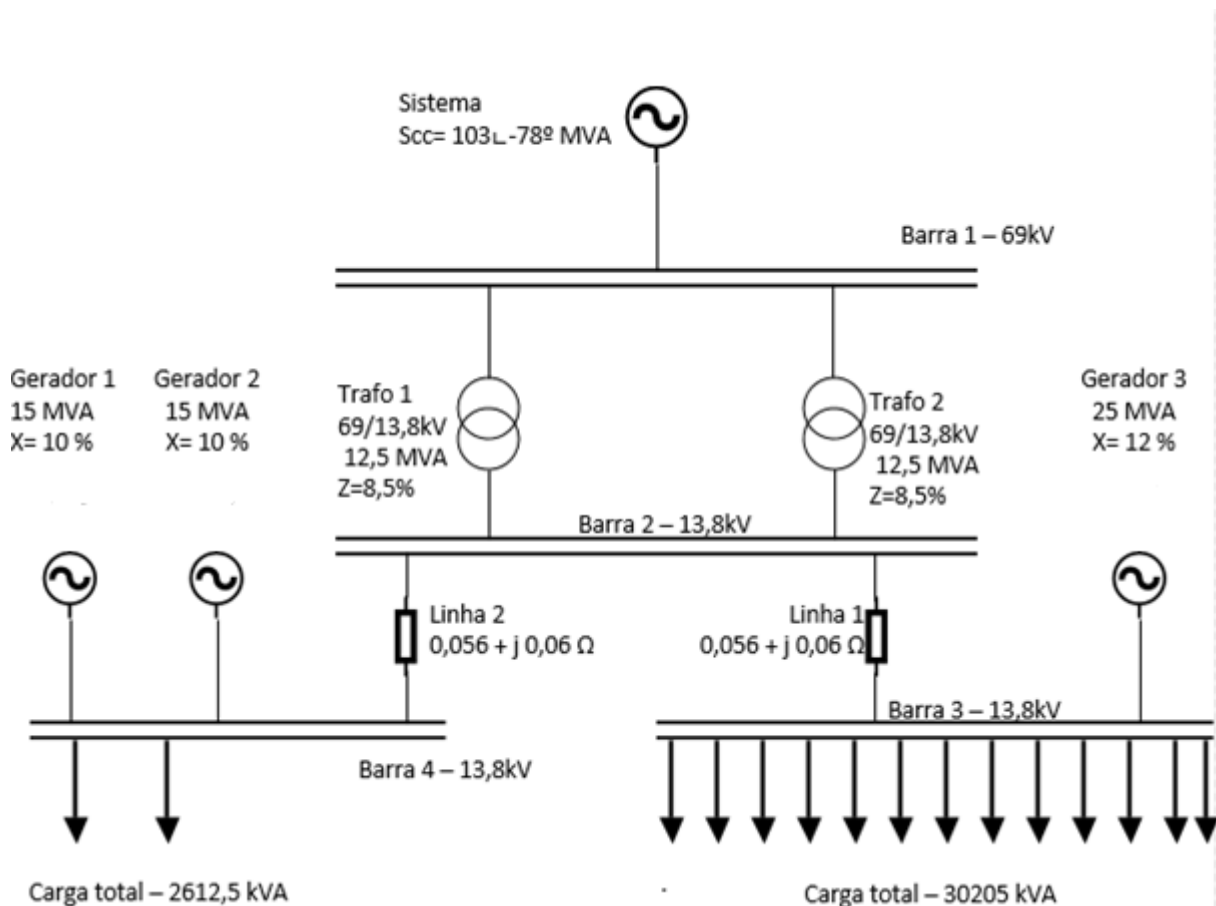
O objetivo do trabalho é desenvolver um sistema de proteção que impeça elevadas correntes de curto-circuito de circularem por um longo período, fato esse que poderia ocasionar inúmeros danos aos equipamentos elétricos.

Neste projeto, os cálculos dos valores de curto-circuito serão realizados com a ajuda do software PSP-UFU – Plataforma de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Uberlândia, e o ajuste e coordenação dos relés por meio do Excel da Microsoft Office.

2 SISTEMA ELÉTRICO

O diagrama unifilar da usina foi representado utilizando o software Microsoft Visio, como pode ser visto na figura a seguir.

Figura 1 - Diagrama Unifilar



Fonte – Autor

3 CURTO-CIRCUITO

Curto-circuitos são fenômenos que podem ocorrer em um sistema elétrico provocando o surgimento de elevadas correntes elétricas e de quedas de tensões. Diante disso, se essa anomalia se perdurar por muito tempo, causará danos aos equipamentos e componentes que fazem parte da instalação.

Assim, se faz necessário um projeto de proteção que consiga extinguir no menor tempo possível o problema, de forma a minimizar as avarias e garantir o funcionamento da indústria.

Para isso, como o objeto de estudo desse trabalho são as faltas trifásicas, precisa-se calcular o valor destas correntes para que os ajustes dos relés possam ser realizados.

3.1 Correção das impedâncias do sistema

Para que as correntes de curto circuito possam ser calculadas é preciso que as impedâncias de todos os componentes do sistema estejam na mesma base. Dessa forma, a potência base (S_{base}) e a tensão base (V_{base}) escolhidas serão, 25 MVA e 13,8kV respectivamente.

Assim, o valor da impedância base do lado de alta tensão (69kV) será:

$$Z_{base}(\Omega) = \frac{V_{base}^2}{S_{base}}$$

$$Z_{base}(\Omega) = \frac{(69kV)^2}{25 MVA} = 190,44\Omega$$

Tem-se que o nível de curto circuito de entrada da concessionária (sistema) para a subestação da indústria (Barra 1) é, $103\angle -78^\circ$ MVA. Assim o valor da impedância de entrada é dado por:

$$Z_{entrada}(\Omega) = \frac{(69kV)^2}{103\angle -78^\circ MVA} = 46,22\angle 78^\circ = 9,61 + j45,21 \Omega$$

Passando esse valor para Pu:

$$Z_{entrada} (pu) = \frac{Z_{entrada}}{Z_{base}} = \frac{9,61 + j45,21}{190,44} = 0,05 + j0,237pu$$

Os dois transformadores possuem uma potência de 12,5 MVA cada e uma reatância percentual (X%) no valor de 8,5%.

Assim, devemos corrigir a impedância para a potência de 25 MVA utilizando a seguinte equação:

$$Z_{novo} = Z_{antigo} * \left(\frac{V_{antigo}}{V_{novo}} \right)^2 * \left(\frac{S_{novo}}{S_{antigo}} \right)$$

Onde:

Z_{novo} é a impedância corrigida;

Z_{antigo} é a impedância anterior à correção;

V_{antigo} é a tensão do sistema;

V_{novo} é a tensão base;

S_{novo} é a potência aparente base;

S_{antigo} é a potência aparente do sistema;

Portanto, as impedâncias corrigidas em Pu dos transformadores serão:

$$Z_{trafo1} = Z_{trafo2} = 0,085 * \left(\frac{13,8kV}{13,8kV} \right)^2 * \left(\frac{25MVA}{12,5MVA} \right) = j0,17pu$$

Da mesma forma, os geradores precisam ter suas impedâncias corrigidas.

Gerador 1 → $S=15$ MVA e $X\%=10\%$

Gerador 2 → $S=15$ MVA e $X\%=10\%$

Gerador 3 → $S= 25$ MVA e $X\%=12\%$

Assim, os novos valores de impedância em Pu serão:

$$Z_{gerador1} = Z_{gerador2} = 0,1 * \left(\frac{13,8kV}{13,8kV} \right)^2 * \left(\frac{25MVA}{15MVA} \right) = j0,167 pu$$

$$Z_{gerador3} = 0,12 * \left(\frac{13,8kV}{13,8kV} \right)^2 * \left(\frac{25MVA}{25MVA} \right) = j0,12 pu$$

As impedâncias dos cabos (Linha 1 e Linha 2) também serão corrigidas.

Ambos possuem uma impedância $Z = 0,056 + j 0,06 \Omega$.

Como o valor da impedância base do lado de baixa tensão é:

$$Z_{baseb} = \left(\frac{V_{base}}{S_{base}} \right)^2 = \left(\frac{13,8kV}{25MVA} \right)^2 = 7,618\Omega$$

Tem-se que os novos valores da impedância em Pu dos cabos serão:

$$Z_{linha1} = Z_{linha2} = \frac{Z}{Z_{baseb}} = \left(\frac{0,056 + j 0,06}{7,618} \right) = 0,007 + j0,008 pu$$

Assim, os novos valores de impedância serão apresentados na tabela a seguir.

Tabela 1 – Correção de impedâncias

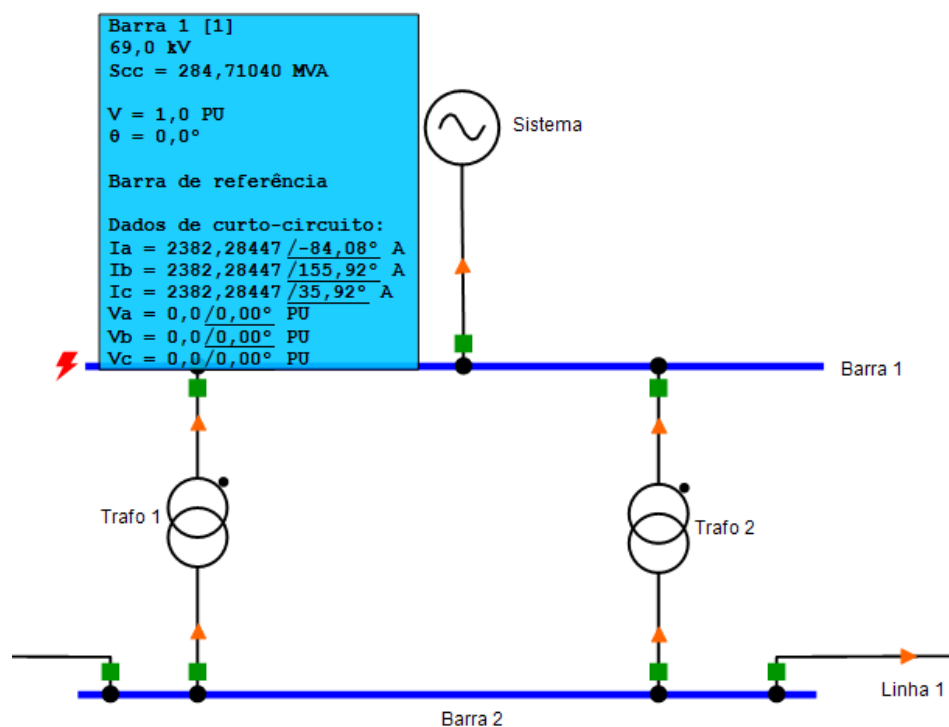
Elementos	Impedância (p.u)
Gerador 1	j 0,167
Gerador 2	j 0,167
Gerador 3	j 0,12
Transformador 1	j 0,17
Transformador 2	j 0,17
Linha 1	0,007 + j 0,008
Linha 2	0,007 + j 0,008
Entrada do Sist.	0,05 + j 0,237

Fonte - Autor

3.2 Correntes de curto-circuito trifásico

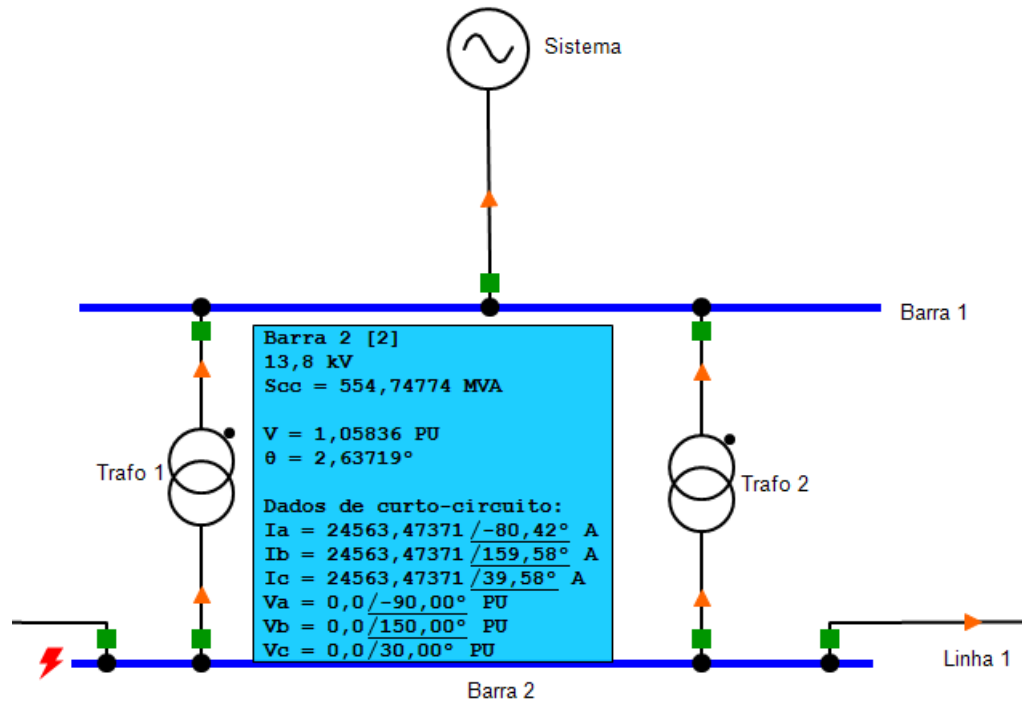
Depois de realizadas as correções das impedâncias do sistema, foram feitas simulações no software PSP-UFU para determinar as correntes de curto em cada barramento. Os valores dessas são necessários para especificar os TCs e ajustar os relés que serão utilizados.

Os resultados das simulações serão apresentados nas figuras a seguir.

Figura 2 - Curto-circuito trifásico na Barra 1

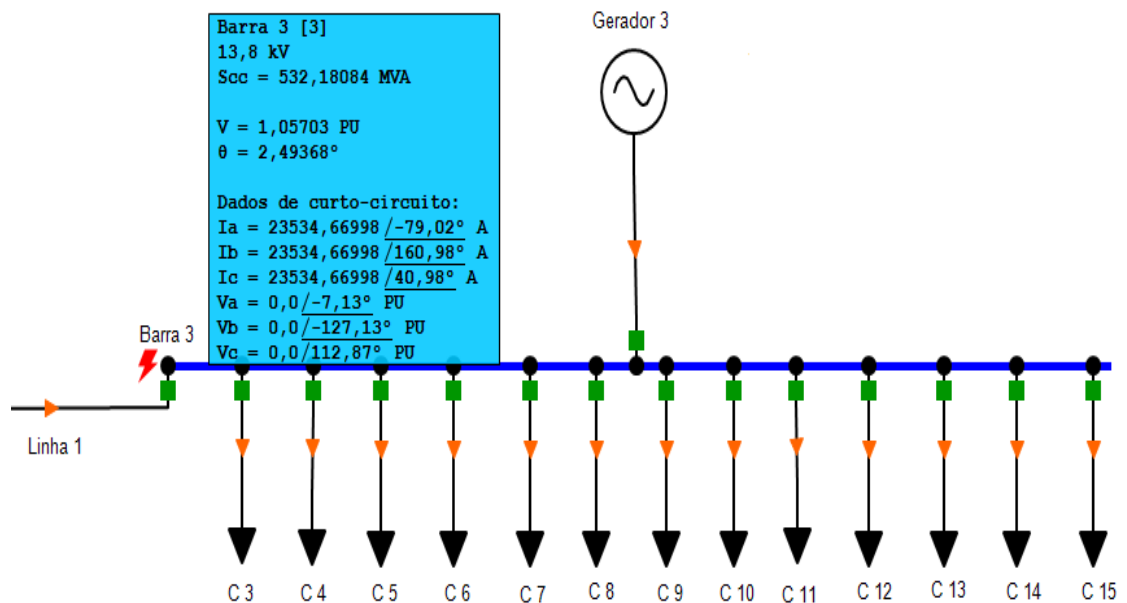
Fonte – Autor

Figura 3 – Curto-circuito trifásico na Barra 2

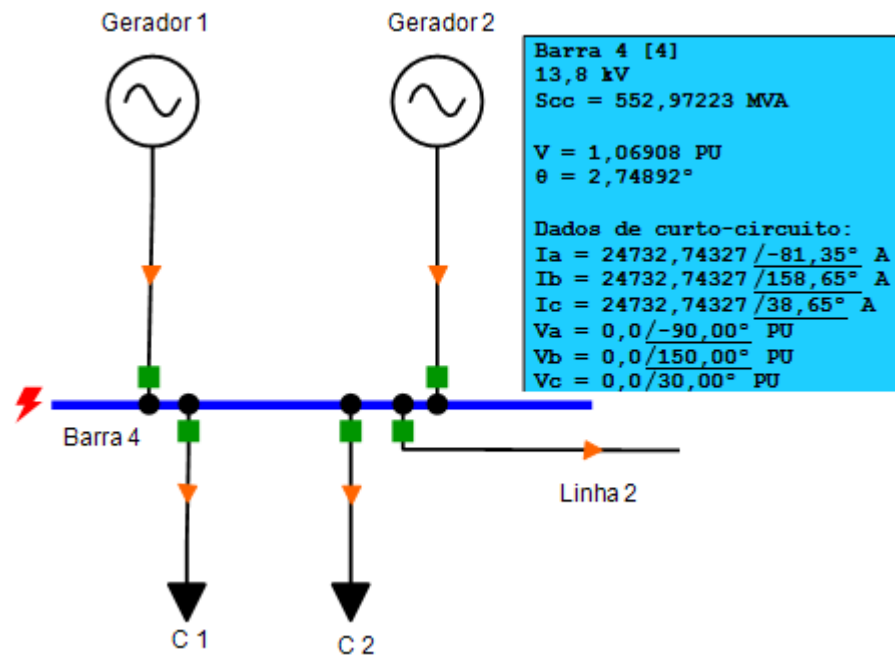


Fonte – Autor

Figura 4 - Curto-circuito trifásico na Barra 3



Fonte – Autor

Figura 5 - Curto-circuito trifásico na Barra 4

Fonte – Autor

A tabela a seguir contém os valores das correntes de curto-circuito em cada barramento e as respectivas contribuições de cada gerador para esse curto.

Tabela 2 - Dados de curto-circuito

		69 kV	13,8 kV		
Local	I _{cc} (A)	I Sist. (A)	I Gerador 1 (A)	I Gerador 2 (A)	I Gerador 3 (A)
Barra 1	2382,28	706,57	2550,1	2550,1	3717,15
Barra 2	24563,47	525,21	6427,83	6427,83	9218,41
Barra 3	23534,67	442,24	5786,07	5786,07	9838,73
Barra 4	24732,74	461,96	7063,48	7063,48	8538,69

Fonte - Autor

4 SIMULAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA

O estudo do Fluxo de Potência é fundamental em um projeto de uma rede elétrica. A partir dele pode se conhecer a distribuição dos fluxos de potências ativas e reativas no sistema, magnitude e ângulo das tensões em cada barramento, perdas na transmissão, além de outras grandezas.

Em outras palavras, esses dados permitem determinar o estado de operação do sistema e, assim, antecipar e prevenir possíveis problemas e situações que possam desestabilizar a rede.

Diante disso, por meio do software PSP-UFU, foi realizado a simulação do fluxo de potência do diagrama unifilar contido no anexo 1.

Os resultados obtidos encontram-se nas tabelas a seguir.

Tabela 3 - Dados do Fluxo de Potência

Tipo	Nome	De	Para	P [MW]	Q [MVar]
Linha	Linha 1	Barra 2	Barra 3	7,14185	-1,845615
Linha	Linha 1	Barra 3	Barra 2	-7,12825	1,861159
Linha	Linha 2	Barra 2	Barra 4	-21,4643	-16,650411
Linha	Linha 2	Barra 4	Barra 2	21,6487	16,86123
Transformador	Trafo 1	Barra 1	Barra 2	-7,16127	-8,417722
Transformador	Trafo 1	Barra 2	Barra 1	7,16127	9,248286
Transformador	Trafo 2	Barra 1	Barra 2	-7,16127	-8,417722
Transformador	Trafo 2	Barra 2	Barra 1	7,16127	9,248286

Fonte – Autor

Tabela 4 - Dados em cada barra

Nome	Tipo	Tensão [PU]	Ângulo	PG [MW]	QG [MVar]	PD [MW]	QD [MVar]
Barra 1	REF	1	0,000000°	-14,322538	-16,83544	0	0
Barra 2	PQ	1,058361	2,637187°	0	0	0	0
Barra 3	PQ	1,057033	2,493673°	20	14,999998	27,12825	13,138839
Barra 4	PQ	1,069076	2,748918°	24	17,999995	2,35125	1,138765

Fonte – Autor

Onde:

PG é a potência ativa gerada em cada barra;

QG é a potência reativa gerada em cada barra;

PD é a potência ativa consumida em cada barra;

QD é a potência reativa consumida em cada barra.

Com os dados anteriores, pode-se determinar os valores das correntes, como pode ser visto na tabela a seguir, que circulam pelo sistema enquanto este está em condições normais de operação.

Tabela 5 - Correntes que circulam no sistema

De	Para	Por meio	I [A]
Barra 2	Barra 1	Trafo 1	462,37
Barra 2	Barra 1	Trafo 2	462,37
Barra 2	Barra 3	Linha 1	291,59
Barra 4	Barra 2	Linha 2	1073,84
Gerador 1	Barra 4	Diretamente	627,55
Gerador 2	Barra 4	Diretamente	627,55
Gerador 3	Barra 3	Diretamente	1045,92

Fonte – Autor

Os valores obtidos na tabela 4 serão utilizados para especificar os TCs e ajustar os tapes de cada relé.

5 ESPECIFICAÇÃO DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE

O transformador de corrente (TC) é um equipamento que possibilita a redução de correntes muito elevadas para níveis compatíveis com os valores exigidos pelos instrumentos de medição e proteção a ele ligados.

Isso se faz necessário, pois instalações elétricas de média e alta tensão possuem correntes altíssimas, o que torna irrealizável a conexão direta de medidores e relés à rede. Assim, esses devem ser auxiliados pelos TCs para que possam operar de forma adequada e segura.

O princípio do funcionamento do TC se dá por meio do acoplamento magnético entre duas bobinas, primária e secundária. Enquanto que a primeira (poucas espiras) é ligada em série com a linha ou equipamento cuja corrente deseja-se medir, a segunda (muitas espiras) é ligada em série com as bobinas dos relés de forma a serem percorridas pela corrente transformada.

Cada enrolamento possui “N” espiras, sendo N_p o número de espiras do primário e N_s o número de espiras do secundário. Diante disso, denomina-se RTC, relação de transformação do transformador de corrente, o quociente N_s/N_p .

Segue o exemplo:

Para $N_p = 3$ e $N_s = 300$, tem-se que:

$$RTC = 300/3 = 100 \rightarrow RTC = 100:1$$

Contudo, devido no Brasil a corrente no secundário do TC ser padronizada em 5 Ampéres, se torna usual representar RTC usando as correntes nominais.

Assim, $RTC = I_{nom_{primária}} - 5 \text{ A}$.

Apesar de conseguirem reduzir com exatidão correntes muito elevadas, os TCs possuem um valor máximo para essas grandezas. Esse limite é chamado de Fator de Sobrecorrente Nominal, FS, e que segundo a norma ANSI, deve ser na ordem de 20 vezes a corrente nominal.

Dessa forma, se a corrente de curto ultrapassar esse valor, o TC irá operar na região de saturação e perderá sua exatidão.

Assim, expressa-se:

$$FS = \frac{I_{ccm\acute{a}x}}{I_{prim}(TC)} = 20$$

Onde:

$I_{ccm\acute{a}x}$ é a máxima corrente com a qual o TC mantém a sua classe de exatidão;

$I_{prim}(TC)$ é a corrente do lado primário do TC em condição nominais.

Para se determinar qual a RTC deve ser usada, três critérios precisam ser seguidos:

- a) Não é permitido que a corrente de carga exceda a capacidade continua do TC e do relé.
- b) A corrente secundária mínima em um curto deve ser superior às demandas de sensibilidade dos TCs. Assim, esse valor é de 10% da corrente secundária nominal, ou seja, $0,1 \times I_{sn} (5A) = 0,5A$.
- c) A corrente secundária máxima em um curto não pode ser superior ao limite de suportabilidade dos relés. Assim, por norma, esse valor (FS)

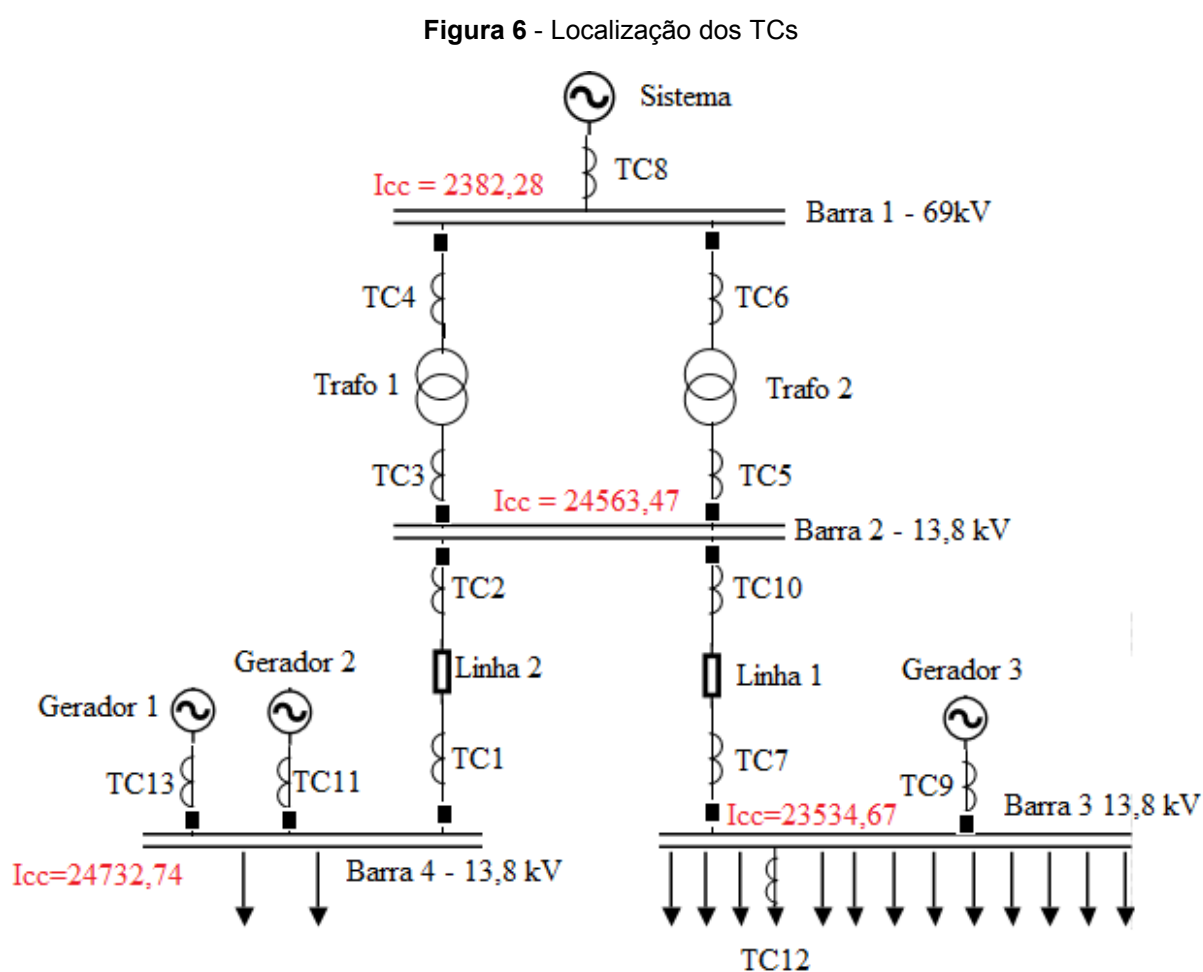
deve ser, 20 vezes a corrente secundária nominal, ou seja, $FS = 20 \times I_{sn} = 100 \text{ A}$.

De acordo com a norma ANSI, a qual será utilizada como base nesse trabalho, os valores disponíveis para RTC são:

$I_{nom_{primária}}$: 10, 15, 25, 40, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800, 1200, 3000 e 4000 A.

5.1 Determinação das RTCs

A figura a seguir mostra onde cada TC está localizado no sistema.



Fonte – Autor

Por meio a simulação realizada no PSP, foram registradas as maiores correntes de curto-circuito trifásico e as correntes nominais que passam em cada TC.

A tabela a seguir apresenta esses dados.

Tabela 6 - Dados em cada TC

TC	Corrente Nominal (A)	Maior Corrente de Curto (A)	Local do Curto	Tensão (kV)
1	1.073,84	14.126,9	Entre Barras 2 e 4	13,8
2	1.073,84	12.844,19	Barra 2	13,8
3	522,96	4.189,79	Barra 1	13,8
4	104,59	837,96	Barra 1	69
5	522,96	4.189,79	Barra 1	13,8
6	104,59	837,96	Barra 1	69
7	291,6	13.734,50	Barra 3	13,8
8	209,18	706,58	Barra 1	69
9	1.045,92	9.838,73	Barra 3	13,8
10	291,6	15.470,8	Entre Barras 2 e 3	13,8
11	627,55	7.063,47	Barra 4	13,8
12	209,18	23.534,70	Entre Barra 3 e carga	13,8
13	627,55	7.063,47	Barra 4	13,8

Fonte – Autor

A partir dos dados contidos na Tabela 5 e utilizando os três critérios apresentados anteriormente, foram determinadas as RTC's dos TC's de acordo com a norma ANSI.

Vale ressaltar que, a máxima corrente de curto-circuito que pode aparecer no secundário ($I_{sc_{máx}}$), deve ser até 100 A, ou seja, $FS \leq 20$.

Assim:

$$I_{sc_{máx}} = \frac{I_{primário}}{RTC} \leq 100 A$$

Tabela 7 - Determinação das RTCs

TC	Corrente Nominal (A)	Maior Corrente de Curto (A)	RTC	Isc (A)
1	1.073,84	14.126,9	1200/5	58,86
2	1.073,84	12.844,19	1200/5	53,51
3	522,96	4.189,79	600/5	34,91
4	104,59	837,96	150/5	27,93
5	522,96	4.189,79	1200/5	34,91
6	104,59	837,96	150/5	27,93
7	291,6	13.734,50	800/5	85,84
8	209,18	706,58	300/5	11,78
9	1.045,92	9.838,73	1200/5	40,99
10	291,6	15.470,8	800/5	96,69
11	627,55	7.063,47	800/5	44,15
12	209,18	23.534,70	1200/5	98,06
13	627,55	7.063,47	800/5	44,15

Fonte- Autor

Destaca-se que o restante dos TCs localizados nas outras cargas ligadas à barra 3 possuem a mesma RTC que o TC12, visto que, apesar das correntes nominais serem menores, as correntes de curto são iguais.

5.2 Determinação da classe de exatidão

A classe de exatidão de um TC corresponde ao erro máximo que é esperado durante a transformação.

Os TCs de proteção, que são os que estão sendo utilizados nesse trabalho, não devem sofrer os efeitos de saturação.

Para a determinação da exatidão, as cargas ligadas ao TC são de extrema importância. Estas correspondem às impedâncias que os relés, medidores e cabos representam para os TCs.

Assim tem-se que:

$$Z = Z_c + Z_l$$

Onde:

Z é a carga ligada ao TC;

Z_c é a carga dos relés e medidores;

Z_I é a carga da fiação;

De acordo com a ANSI, a classe de exatidão é composta da seguinte forma:

Figura 7 - Notação relativa à classe de exatidão

$$\left\{ \begin{matrix} 2,5 \\ 5 \\ 10 \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} L \\ H \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} 10 \\ 20 \\ 50 \\ 100 \\ 200 \\ 400 \\ 800 \end{matrix} \right\}$$

Fonte – ANSI

O primeiro número, corresponde ao erro desejado, 2,5 – 5 ou 10 %. A letra utilizada (L ou H) determina se o TC é de baixa impedância (L) ou de alta impedância (H). Por fim, o último número corresponde à tensão que irá surgir no secundário quando por ele circular uma corrente.

Por exemplo:

10H50 - Corresponde a um TC de alta impedância, que tem a capacidade de manter uma tensão de 50 V no seu secundário, tendo um erro de até 10%.

2,5L100 - TC de baixa impedância que tem a capacidade de manter uma tensão de 100V no seu secundário, tendo um erro de até 2,5%.

Sendo que:

$$I_{sc_{máx}} = \frac{I_{pc_{máx}}}{RTC}$$

$$E_{m\acute{a}x} = I_{scm\acute{a}x} \cdot Z$$

Onde:

$E_{m\acute{a}x}$ é a tensão máxima no secundário do TC;

$I_{scm\acute{a}x}$ é a corrente máxima de curto no secundário;

$I_{pcm\acute{a}x}$ é a corrente máxima de curto que circula no primário;

Z é a carga ligada ao TC;

Com isso, levando-se em consideração que os TC's do sistema em questão são todos de alta impedância e possuem uma carga $Z = 0,5\Omega$, foram especificadas a classe de exatidão de cada um na tabela a seguir.

Tabela 8 - Classe de exatidão dos TCs

TC	$I_{scm\acute{a}x}$ (A)	$E_{m\acute{a}x}$ (V)	Classe de exatidão
1	58,86	29,43	10H50
2	53,51	26,755	10H50
3	34,91	17,46	10H20
4	27,93	13,965	10H20
5	34,91	17,46	10H20
6	27,93	13,965	10H20
7	85,84	42,92	10H50
8	11,78	5,89	10H10
9	40,99	20,495	10H50
10	96,69	48,34	10H50
11	44,15	22,075	10H50
12	98,06	49,03	10H50
13	44,15	22,075	10H50

Fonte – Autor

6 RELÉS

Segundo a ABNT, relé é um dispositivo por meio do qual um equipamento elétrico é operado quando se produzem variações nas condições deste equipamento ou no circuito a ele associado.

Existem vários modelos de relés, sendo que eles são classificados de acordo com:

- a) Grandeza física de atuação: Mecânica, térmica, etc;

- b) Natureza da grandeza a que são sensibilizados: corrente, tensão, frequência, potência, etc;
- c) Construção: eletromecânica, eletrônica, estática;
- d) Função: sobrecorrente, direcional de corrente ou potência, diferencial, distânica, etc;
- e) Conexão do sensor: diretamente no circuito principal ou fazendo o uso de redutores de medida;
- f) Tipo de fonte para atuação: Corrente alternada ou corrente contínua
- g) Nível de importância: principal ou intermediário
- h) Aplicação: transformadores, geradores, linhas de transmissão, motores, etc;
- i) Tempo de atuação: instantâneo ou temporizado

6.1 Relé de sobrecorrente temporizado, unidade 51

Um dos relés que serão utilizados nesse trabalho, é o relé de sobrecorrente temporizado, unidade 51. Esse dispositivo comanda a abertura de um disjuntor, a ele relacionado, quando a corrente no circuito ultrapassa um valor por determinado tempo. Esse limiar de corrente, bem como, a temporização, são ajustados previamente.

Para realizar essa parametrização é necessário se conhecer a RTC do TC ao qual o relé está ligado (valores apresentados anteriormente no capítulo 5), o tape de corrente do relé e o dial de tempo (dt).

Para se calcular o tape, é utilizado a seguinte equação:

$$tape = \frac{Inom_{prim}}{RTC}$$

O dial de tempo (dt) é um valor utilizado para determinar a curva de temporização do relé. Ele é calculado por meio da equação:

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

Onde:

t é o tempo de atuação do relé

M é o múltiplo do tape (função da corrente de atuação)

K é a constante do relé

α é a constante da curva do relé

Diante disso, é necessário se conhecer o tipo de curva escolhida para determinar os valores das constantes K e α .

Segundo a norma IEC 60255-3, existem quatro tipos de curvas que caracterizam os relés microprocessados, são elas: Curva normalmente inversa, muito inversa, extremamente inversa e longo tempo.

Nesse trabalho será adotada a curva do tipo muito inversa, logo os valores das constantes serão: $K = 13,5$ e $\alpha = 1$.

6.2 Relé direcional de sobrecorrente, unidade 67

Em sistemas conectados em anel ou com alimentações em locais diferentes, como é o caso desse trabalho, se torna complicado a coordenação de forma seletiva dos relés das unidades 51. Portanto, juntamente a unidade temporizada de sobrecorrente (51) é adicionado a unidade direcional (67). Esta é responsável em reconhecer a direção do fluxo de potência durante uma falta. Dessa forma, o relé 67 habilita o relé 51 para atuar se a direção da corrente estiver em um sentido e o impede de operar se a corrente estiver no sentido oposto.

Para isso, esse dispositivo direcional atua por meio da comparação fasorial das posições relativas entre duas grandezas, uma de polarização, usualmente a tensão, e outra de atuação, corrente elétrica. Assim, baseado nessa defasagem, ele verifica o sentido do fluxo de potência.

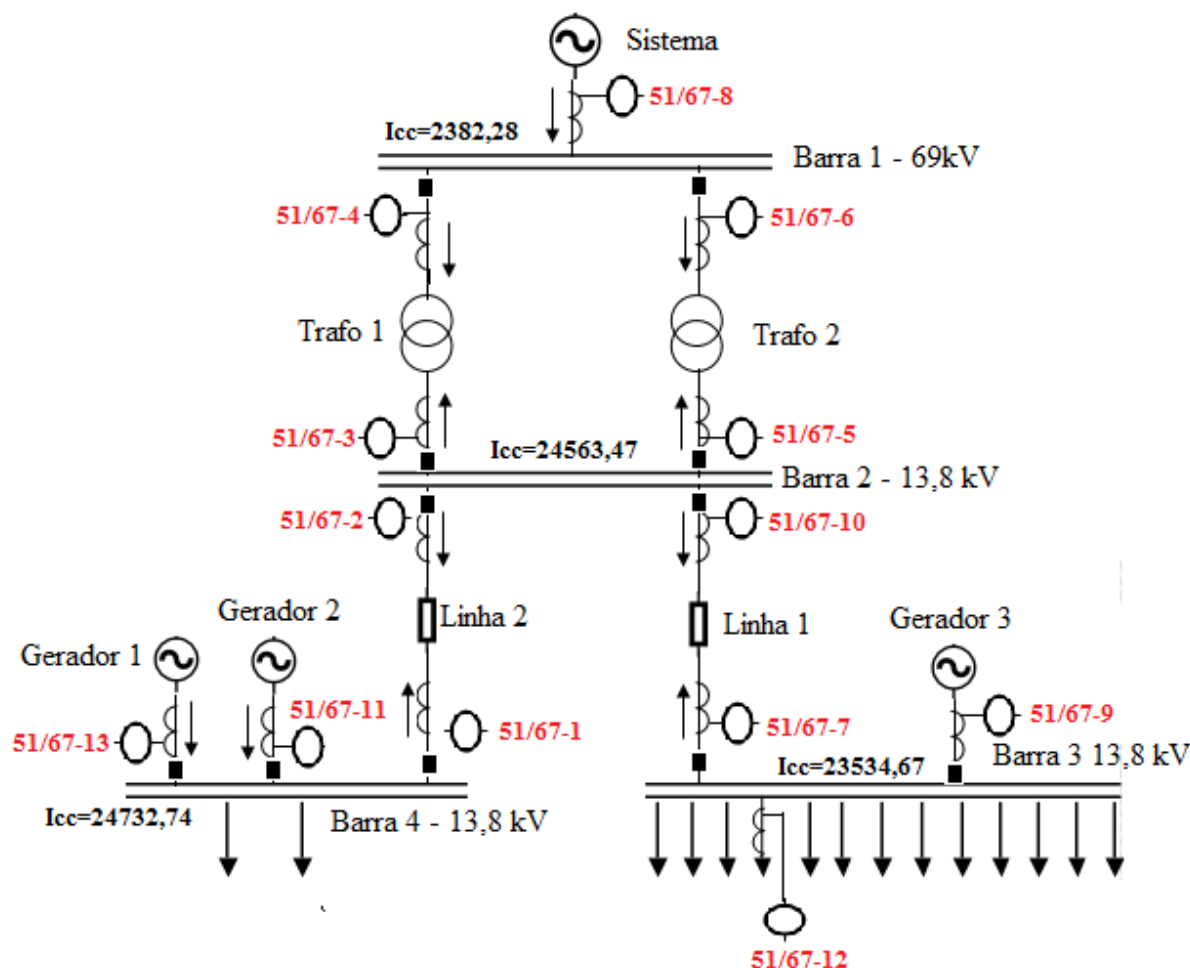
Como esses relés fazem a leitura de tensão, é necessário que eles, além de estarem ligados a TCs, estejam ligados em Transformadores de Potencial (TP).

7 AJUSTE E COORDENAÇÃO DOS RELÉS

Neste capítulo serão realizadas a parametrização e a coordenação dos relés, para que esse possam proteger de forma eficiente e seletiva o sistema em questão. Os resultados serão apresentados por meio de coordenogramas.

A figura na sequência mostra a disposição dos relés no circuito e o sentido da corrente elétrica para a qual cada um deve atuar.

Figura 8 - Localização dos relés



Fonte – Autor

Primeiramente serão realizados os ajustes e a coordenação dos relés, 51/67-10, 51/67-1 e 51/67-11, devido aos geradores 1 e 2 serem os principais contribuintes com as correntes de curto-circuito nessa indústria.

Condição de contorno do Transformador:

Segundo as normas ANSI e ABNT, um transformador deve ser fabricado obedecendo um limite térmico. Nesse caso, essa suportabilidade será de $20 \times I_n$ em 3s. Diante disso, os relés ajustados deverão atuar antes que esse limite seja atingido.

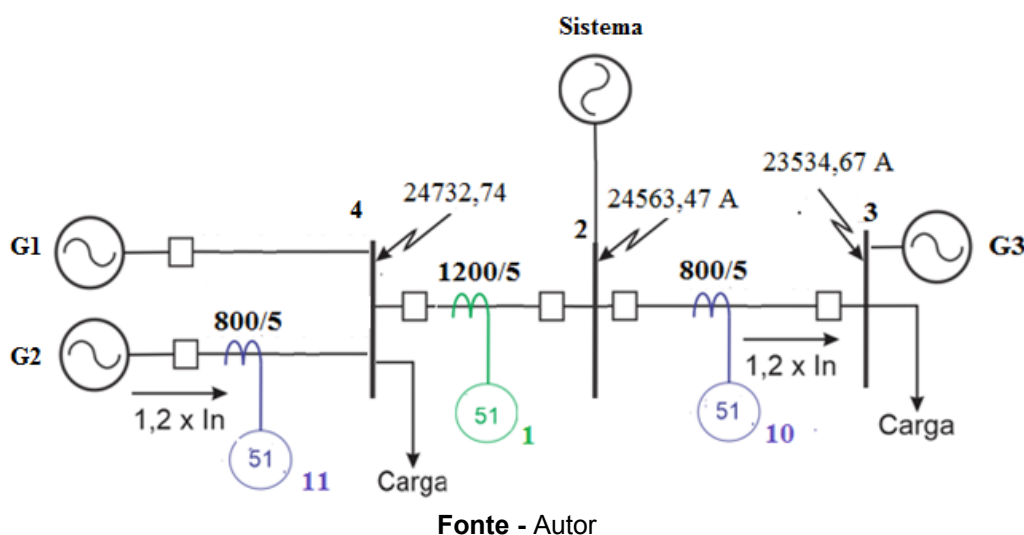
Logo, para os transformadores em questão esse valor será:

$$I = 20 \times 522,96 = 10\,459,20 \text{ A em } 3s$$

A corrente de Inrush seria a segunda condição de contorno, contudo como esses transformadores são energizados sempre com os geradores 1,2 e 3 desligados, os relés em questão não irão perceber essa corrente.

7.1 Ajuste e coordenação dos relés 51-10, 51-1 e 51-11

Figura 9 - Circuito de coordenação dos relés 51-10,1,11



- Ajuste do relé 51-10

Para o cálculo do valor do tape, será considerado uma sobrecarga de 20% da corrente nominal.

Assim:

$$I_{ajuste} = 1,2 \cdot I_n = 1,2 \cdot 291,6 = 349,92 \text{ A}$$

$$Tape = \frac{I_{ajuste}}{RTC} = \frac{349,92}{800/5} = 2,19$$

Para a determinação da curva característica, se faz necessário o cálculo do Dial de tempo (dt).

Sabe-se que:

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

Onde:

$$\alpha = 1;$$

$$K=13,5;$$

t será adotado um tempo de 0,4 s para que esse relé atue para um curto na barra

3.

Tem-se que:

$$M = \frac{\text{Corrente de curto no primário}}{\text{tape} \cdot RTC}$$

A corrente curto-circuito que esse relé percebe é de 13.734,5 A.

Logo:

$$M = \frac{13734,5}{2,19 \cdot 800/5} = 39,1966$$

$$dt10 = \frac{0,4 \cdot (39,1966 - 1)}{13,5} = 1,13$$

- Ajuste do relé 51-1

$$I_{ajuste} = 1,2 \cdot In = 1,2 \cdot 1073,84 = 1288,61 \text{ A}$$

$$Tape = \frac{I_{ajuste}}{RTC} = \frac{1288,61}{1200/5} = 5,37$$

Para se coordenar o relé 51-1 com o relé 51-10, precisa-se calcular o tempo que o relé 51-10 atua para a maior corrente de curto-circuito no trecho (Barra 2 – Barra 3). No caso, essa corrente (Icc) é igual a 15470,8 A.

Assim, tem-se que o tempo de atuação (tp) do relé 51-10 para essa Icc é de:

$$tp = \frac{K \cdot dt}{(M - 1)}$$

$$M = \frac{15470,8}{2,19 \cdot 800/5} = 44,152$$

$$tp10 = \frac{13,5 \cdot 1,13}{(44,152 - 1)} = 0,354 \text{ s}$$

Será utilizado um tempo de atuação para o relé 51-1 com um atraso de 0,3s em relação ao primeiro.

Logo:

$$tp1 = tp10 + 0,3 \text{ s} = 0,354 + 0,3 = 0,654 \text{ s}$$

Porém, quando estiver passando pelo relé 51-10 uma corrente de 15470,8 A, no relé 51-1 estará passando apenas 12844,2 A. Sendo que o restante é contribuição da concessionária (Sistema).

Dessa forma, para se calcular o dt, será usada a corrente de 12844,2 A.

$$M = \frac{12844,2}{5,37 \cdot 1200/5} = 9,966$$

$$dt1 = \frac{0,654 \cdot (9,966 - 1)}{13,5} = 0,434$$

- Ajuste do relé 51-11

$$I_{ajuste} = 1,2 \cdot I_n = 1,2 \cdot 627,55 = 753,06 \text{ A}$$

$$Tape = \frac{I_{ajuste}}{RTC} = \frac{753,06}{800/5} = 4,71$$

De acordo como foi feito anteriormente, para a coordenação o relé 51-11 com o relé 51-1, necessita-se calcular o tempo que o relé 51-1 atua para a maior corrente de curto-circuito no trecho (Barra 4 – Barra 2). No caso, essa corrente (I_{cc}) é igual a 14126,9 A.

Assim, tem-se que o tempo de atuação (tp) do relé 51-1 para essa I_{cc} é de:

$$M = \frac{14126,9}{5,37 \cdot 1200/5} = 10,96$$

$$tp1 = \frac{13,5 \cdot 0,434}{(10,96 - 1)} = 0,588 \text{ s}$$

Assim:

$$tp11 = tp1 + 0,3 \text{ s} = 0,588 + 0,3 = 0,888 \text{ s}$$

No entanto, quando estiver passando pelo relé 51-1 uma corrente de 14126,9 A, no relé 51-11 estará passando apenas a metade, 7063,45 A.

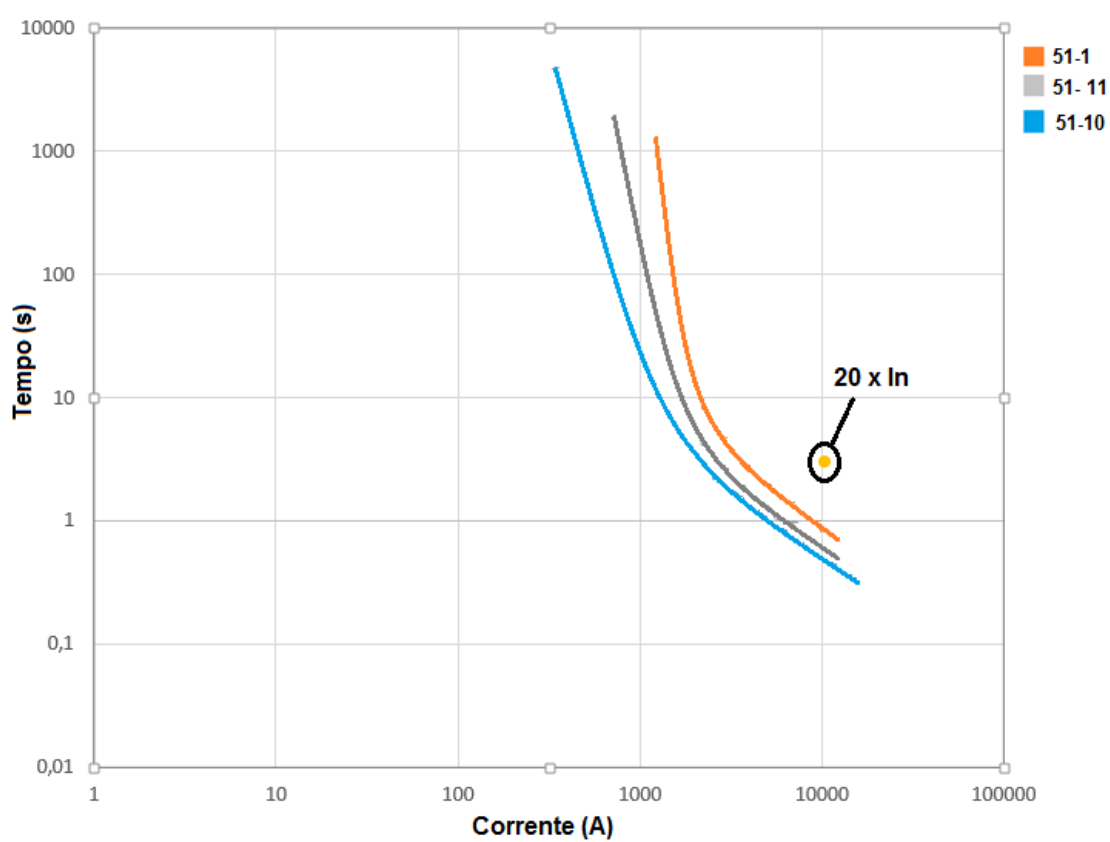
Portanto, para o cálculo o dt, será usada a corrente de 7063,45 A.

$$M = \frac{7063,45}{4,71 \cdot 800/5} = 9,37$$

$$dt_{11} = \frac{0,888 \cdot (9,37 - 1)}{13,5} = 0,55$$

Com isso, foram encontradas as curvas de cada relé.

Figura 10 - Coordenograma dos Relés 51-10, 51-1 e 51-11



Fonte – Autor

Tabela 9 - Dados da coordenação dos relés, 51-10, 51-1 e 51-3

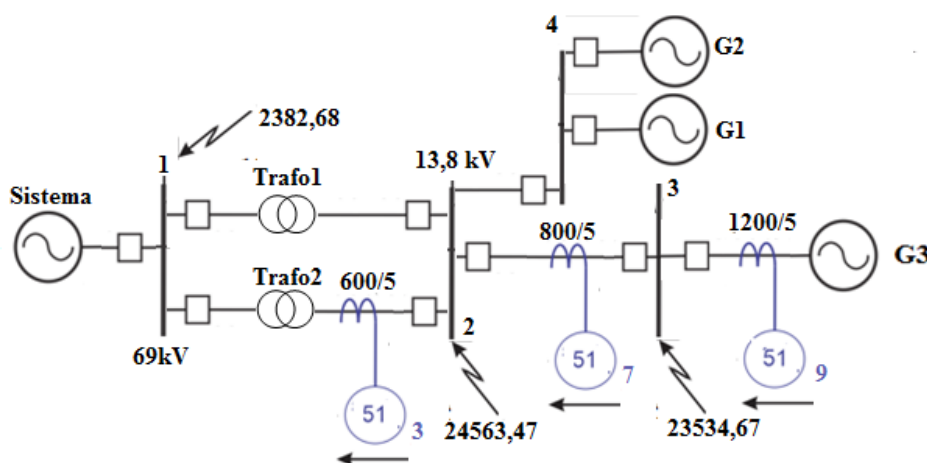
Relé	1,2 x In (A)	Tape (A)	dt
51-10	349,92	2,19	1,13
51-1	1288,61	5,37	0,434
51-11	753,06	4,71	0,55

Fonte- Autor

Como pode-se notar, no coordenograma, mesmo sendo de retaguarda, a curva característica do relé 51-11 ficou atrás da curva do relé 51-1. Isso ocorre, devido a corrente de curto percebida pelo relé 51-11 ser sempre metade da corrente lida pelo relé 51-1.

7.2 Ajuste e coordenação dos relés 51-3, 51-7 e 51-9

Figura 11 - Circuito de coordenação dos relés 51-3,7,9



Fonte- Autor

- Ajuste do relé 51-3

$$I_{ajuste} = 1,2 \cdot I_n = 1,2 \cdot 522,95 = 627,55 \text{ A}$$

$$Tape = \frac{I_{ajuste}}{RTC} = \frac{627,55}{600/5} = 5,23 \text{ A}$$

Para uma corrente curto-circuito de 4189,79 A (curto na Barra 1), esse relé deverá atuar em 0,4s.

Logo:

$$M = \frac{4189,79}{5,23 \cdot 600/5} = 6,68$$

$$dt3 = \frac{0,4 \cdot (6,68 - 1)}{13,5} = 0,168$$

- Ajuste do relé 51-7

$$I_{ajuste} = 1,2 . I_n = 1,2 . 291,6 = 349,92 \text{ A}$$

$$Tape = \frac{I_{ajuste}}{RTC} = \frac{349,92}{800/5} = 2,19 \text{ A}$$

O relé 51-7 deverá atuar com um tempo de atraso de 0,3 em relação ao relé 51-3. Contudo, quando estiver passando uma corrente de 4189,79 A no relé 51-3, o relé 51-7 estará lendo uma corrente de 3349,79 A.

Assim:

$$M = \frac{3349,79}{2,19 . 800/5} = 9,56$$

$$dt7 = \frac{0,7 . (9,56 - 1)}{13,5} = 0,444$$

- Ajuste do relé 51-9

$$I_{ajuste} = 1,2 . I_n = 1,2 . 1045,92 = 1255,1 \text{ A}$$

$$Tape = \frac{I_{ajuste}}{RTC} = \frac{1255,1}{1200/5} = 5,23 \text{ A}$$

Precisa-se calcular o tempo de atuação do relé 51-7 para a maior corrente de curto, $I_{cc} = 9838,72 \text{ A}$, no trecho entre Barra 2 e Barra 3.

$$M = \frac{9838,72}{2,19 . 800/5} = 28,078$$

$$tp7 = \frac{13,5 . 0,444}{(28,078 - 1)} = 0,221 \text{ s}$$

$$tp9 = tp7 + 0,3 = 0,221 + 0,3 = 0,521 \text{ s}$$

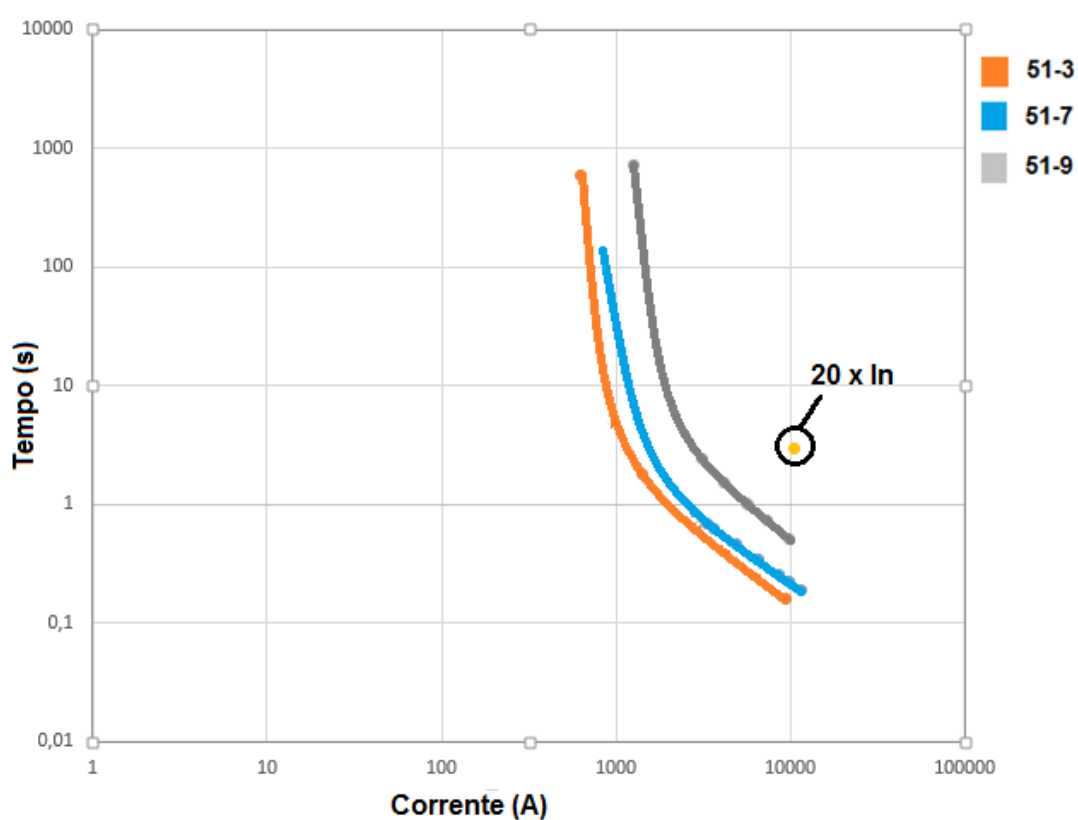
Logo:

$$M = \frac{9838,72}{5,23 . 1200/5} = 7,84$$

$$dt_9 = \frac{0,521 \cdot (7,84 - 1)}{13,5} = 0,264$$

A partir dos dt's encontrados, foram representadas as curvas característica de cada relé na figura a seguir.

Figura 12 - Coordenograma dos relés 51-3, 51-7 e 51-9



Fonte – Autor

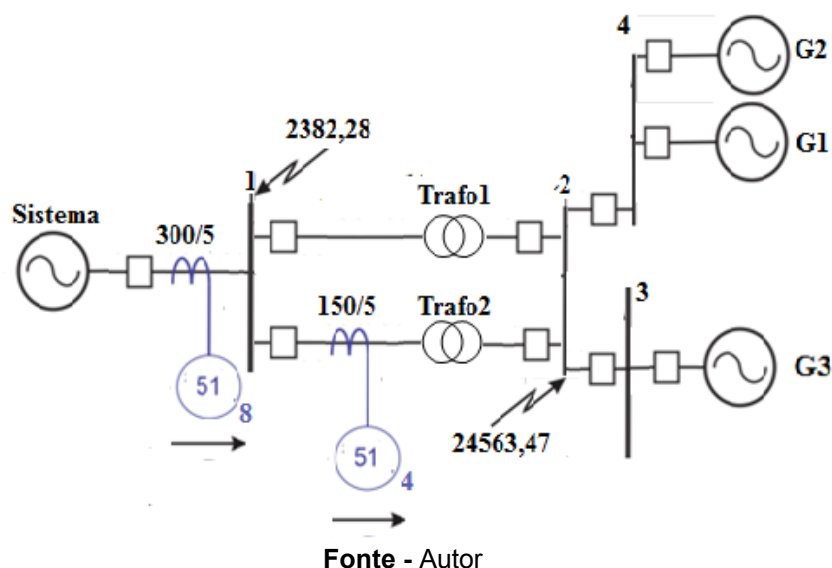
Tabela 10 - Dados da coordenação dos relés, 51-3, 51-7 e 51-9

Relé	1,2 x In (A)	Tape (A)	dt
51-3	627,55	5,23	0,168
51-7	349,92	2,19	0,444
51-9	1255,1	5,23	0,264

Fonte – Autor

7.3 Ajuste e coordenação dos relés 51- 4 e 51-8

Figura 13 - Circuito de coordenação dos relés 51-4,8



- Ajuste do relé 51-4

$$I_{ajuste} = 1,2 \cdot I_n = 1,2 \cdot 104,59 = 125,51 \text{ A}$$

$$Tape = \frac{I_{ajuste}}{RTC} = \frac{125,51}{150/5} = 4,18 \text{ A}$$

Para este relé, também deverá ser considerada a condição de contorno da corrente de Inrush. Assim, o relé não poderá atuar para a corrente de inrush do transformador, sendo essa igual $8 \times I_n$ em 0,1 s.

$$I_{inrush} = 8 \cdot 522,96 = 4183,68 \text{ A (13,8kV)}$$

Diante disso, se este relé fosse ajustado para atuar em 0,4 s, como nos outros casos, para o curto na barra seguinte, ele iria operar para a corrente de Inrush dos trafos. Portanto, para garantir q isso não ocorra, esse dispositivo será configurado com um atraso de 0,1 s da corrente de Inrush.

Assim:

$$tp4 = t_{inrush} + 0,1 = 0,1 + 0,1 = 0,2$$

$$M = \frac{836,74}{4,18 \cdot 150/5} = 6,67$$

$$dt4 = \frac{0,2 \cdot (6,67 - 1)}{13,5} = 0,084$$

- Ajuste do relé 51-8

$$I_{ajuste} = 1,2 \cdot I_n = 1,2 \cdot 209,18 = 251,02 \text{ A}$$

$$Tape = \frac{I_{ajuste}}{RTC} = \frac{251,02}{300/5} = 4,18 \text{ A}$$

Este relé deve operar com um atraso de 0,3 s do relé 51-4 para o mesmo curto. Contudo, a corrente que irá passar por ele será o dobro.

Para um curto-circuito na barra 2, a corrente no relé 51-4 será de 262,61 A.

O tempo de atuação será de:

$$M = \frac{262,61}{4,18 \cdot 150/5} = 2,094$$

$$tp4 = \frac{13,5 \cdot 0,084}{(2,094 - 1)} = 1,036 \text{ s}$$

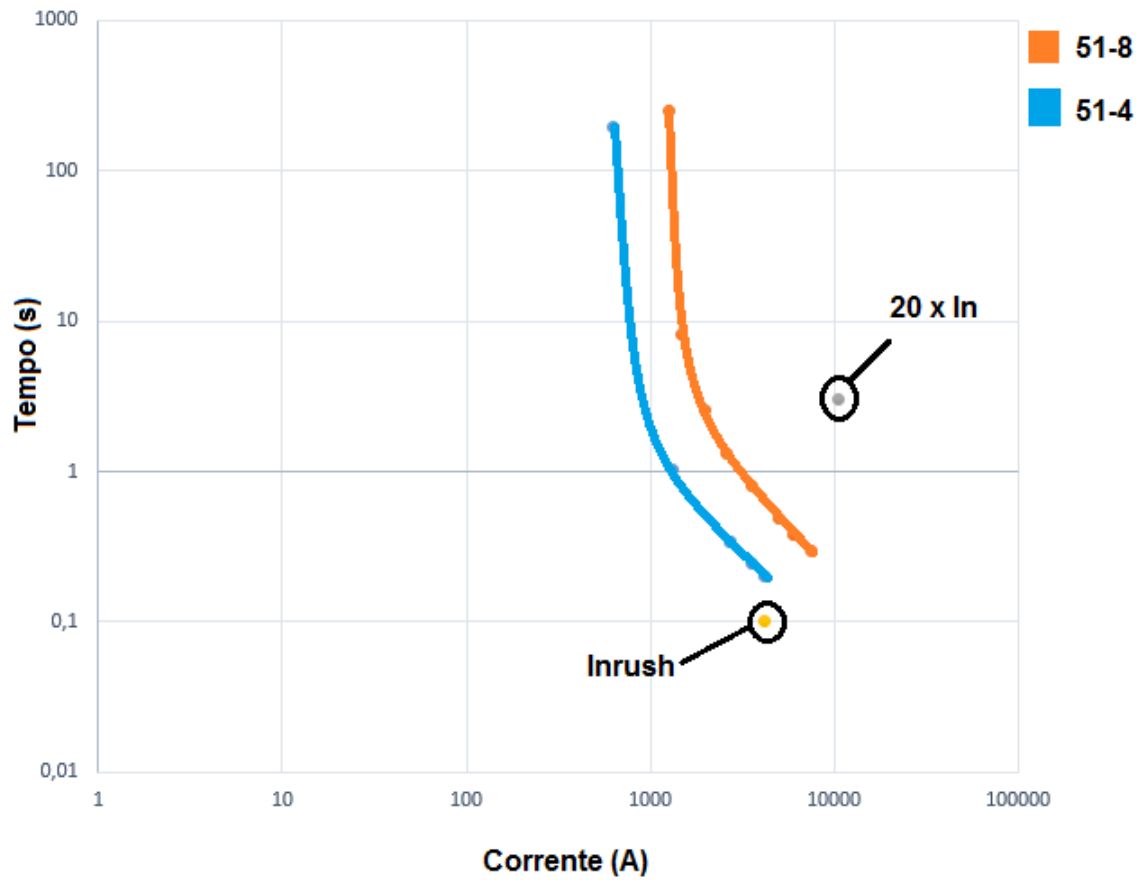
Logo:

$$tp8 = tp4 + 0,3 \text{ s} = 1,036 + 0,3 = 1,336 \text{ s}$$

$$M = \frac{525,22}{4,18 \cdot 300/5} = 2,094$$

$$dt8 = \frac{1,336 \cdot (2,094 - 1)}{13,5} = 0,108$$

Como os dois relés encontram-se na tensão de 69 kV, e o coordenograma é em 13,8 kV, as correntes foram referenciadas para a baixa tensão. Com isso, foram traçadas as curvas características.

Figura 14 - Coordenograma dos relés 51-4 e 51-8

Fonte - Autor

Tabela 11 - Dados da coordenação dos relés, 51-4 e 51-8

Relé	1,2 x In (A)	Tape (A)	dt
51-4	125,51	4,18	0,084
51-8	251,02	4,18	0,108

Fonte - Autor

7.4 Ajuste relé 51-2

$$I_{ajuste} = 1,2 \cdot I_n = 1,2 \cdot 1073,84 = 1288,61 \text{ A}$$

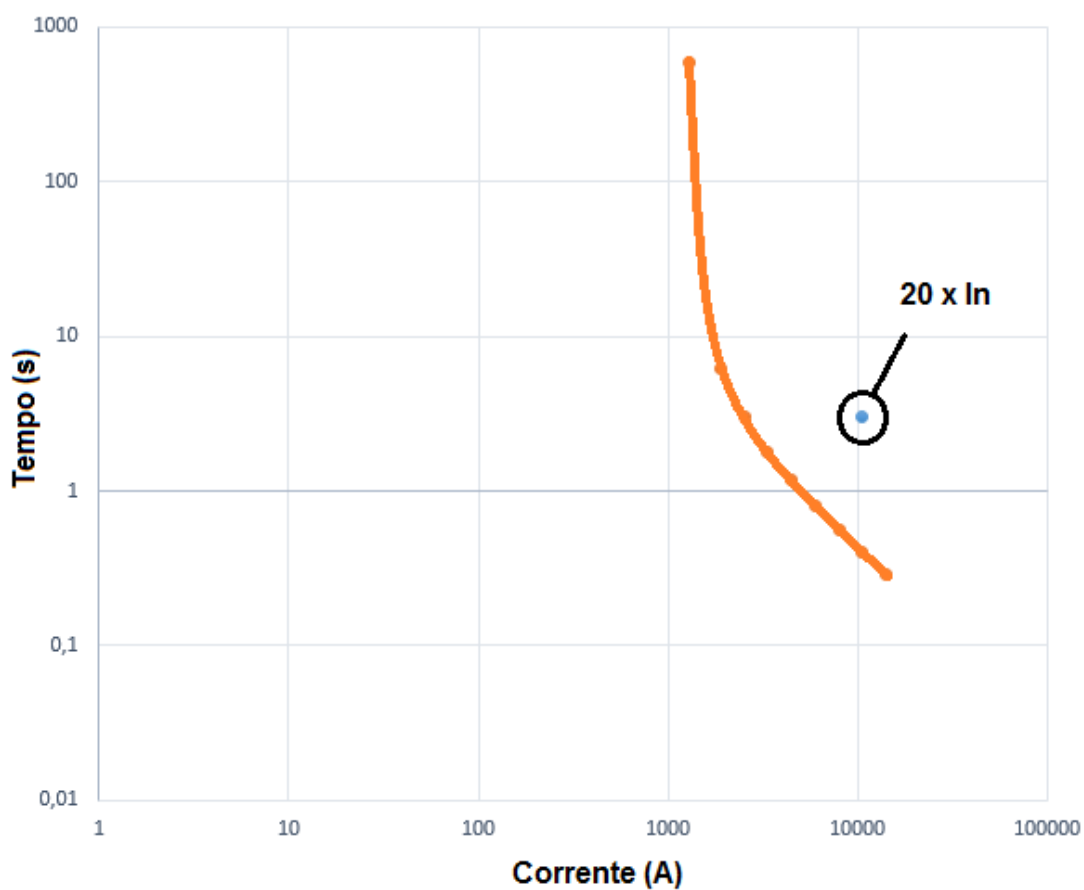
$$Tape = \frac{I_{ajuste}}{RTC} = \frac{1288,61}{1200/5} = 5,37 \text{ A}$$

Deverá atuar para curto-circuito na Barra 4, sendo uma corrente de 10 627,66 A, em 0,4 s.

$$M = \frac{10627,66}{5,37 \cdot 1200/5} = 8,246$$

$$dt2 = \frac{0,4 \cdot (8,246 - 1)}{13,5} = 0,215$$

Figura 15 - Curva característica do relé 51-2



Fonte – Autor

7.5 Ajuste do relé 51-12

$$I_{ajuste} = 1,2 \cdot I_n = 1,2 \cdot 209,18 = 251,02 \text{ A}$$

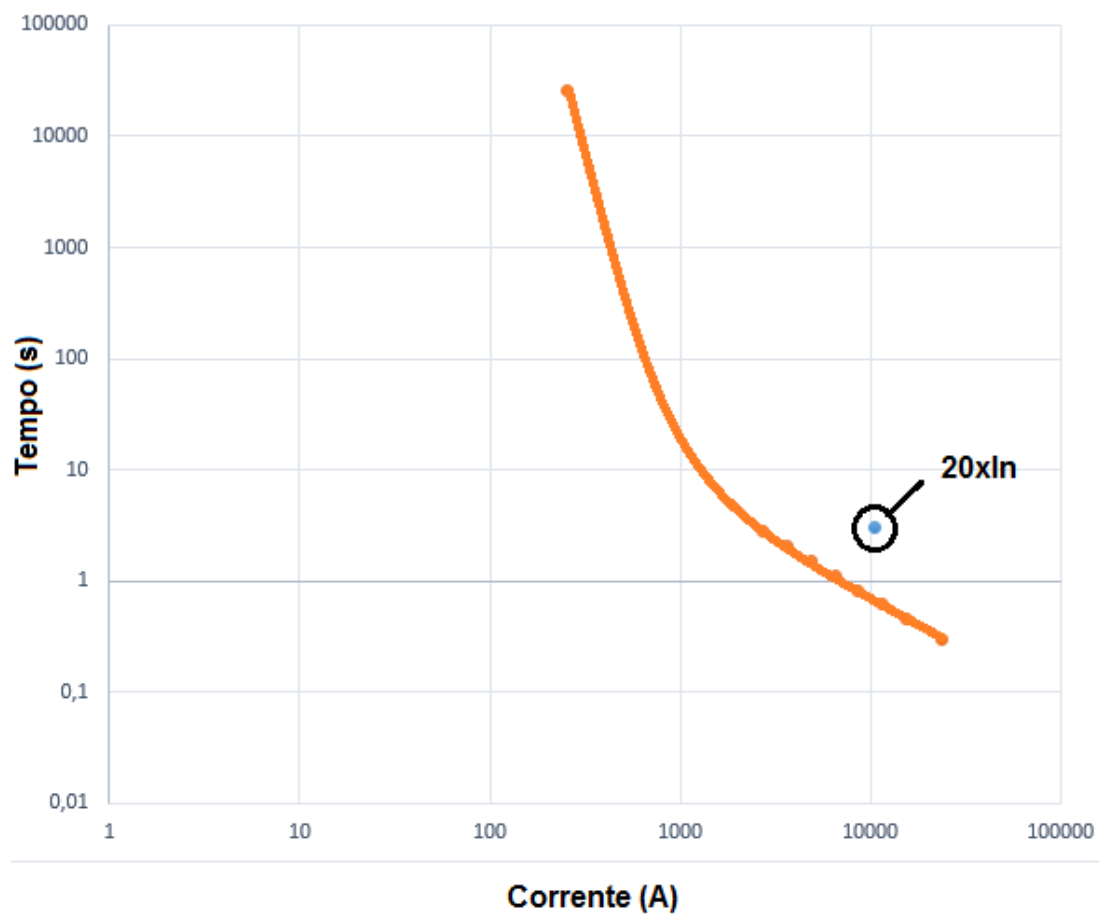
$$Tape = \frac{I_{ajuste}}{RTC} = \frac{251,02}{1200/5} = 1,05 \text{ A}$$

Deverá atuar para o maior curto-circuito no trecho, sendo que $I_{cc} = 23534,7 \text{ A}$, em 0,3 s.

$$M = \frac{23\,534,7}{1,05 \cdot 1200/5} = 93,39$$

$$dt_{12} = \frac{0,3 \cdot (93,39 - 1)}{13,5} = 2,05$$

Figura 16 - Curva característica do relé 51-12



Fonte – Autor

8 CONCLUSÕES

Um sistema de proteção elétrico é fundamental para garantir o bom funcionamento de uma indústria, a segurança de seus equipamentos e a integridade física dos trabalhadores. Contudo, para que isso ocorra, ele deve ser projetado para atuar de forma rápida, coordenada e seletiva.

Portanto, para auxiliar e garantir a exatidão nos cálculos realizados nesse projeto, foram utilizados os softwares PSP-UFU (Plataforma de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Uberlândia) e Excel.

Com isso, este trabalho possibilitou que o conhecimento adquirido durante as disciplinas de Análise de Sistemas Elétricos de Potência e Proteção de Sistemas Elétricos fosse utilizado na prática.

REFERÊNCIAS

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

MAXWELL. *Fluxo de Potência e Fluxo de Potência Continuado*. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/26243/26243_4.PDF>. Acesso em: set. 2018.

RODRIGUES, Jonatas Marques. *Estudo Tutorial da Proteção de Sistemas Elétricos Industriais*. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2013